Borrador del Plan de Mitigación, Adaptación y Resiliencia al Cambio Climático en Puerto Rico

Tomo 1









Borrador del Plan de Mitigación, Adaptación y Resiliencia al Cambio Climático en Puerto Rico

Comité de Expertos y Asesores sobre Cambio Climático (CEACC)
Gobierno de Puerto Rico
Versión revisada - abril de 2024

Cite este documento de la siguiente manera:

Comité de Expertos y Asesores sobre Cambio Climático (CEACC). 2024. *Borrador del Plan de Mitigación, Adaptación y Resiliencia al Cambio Climático en Puerto Rico. Gobierno de Puerto Rico.*





Tabla de contenido

El Plan de Mitigación, Adaptación y Resiliencia al Cambio Climático: herramienta novel, participativa y comprensiva para Puerto Rico 7

Una herramienta novel 7

Fruto de la participación 8

Visión comprensiva 8

Los cursos de acción (COA, por las siglas en inglés) 8

Estructura del Plan 9

Próximos pasos 11

Introducción 12

Propósito, misión, visión y objetivos del Plan 13

Propósito 13

Misión 13

Visión 14

Objetivos 14

Sectores que se incluyen en el Plan 15

CAPÍTULO 1.
Marco legal 16

1.1. La Ley 33 del 2019 y el Plan de Mitigación, Adaptación y Resiliencia al Cambio Climático de Puerto Rico 16

1.2. El Comité de Expertos y Asesores sobre Cambio Climático y el Plan de Mitigación, Adaptación y Resiliencia al Cambio Climático 21

1.3. La comisión conjunta de la legislatura sobre cambio climático 21

1.3.1. Aval de la legislatura 22

1.4. Leyes y reglamentos federales específicos sobre el cambio climático luego de la aprobación de la Ley 33 del 2019 22

CAPÍTULO 2.
Marco conceptual 25

2.1. Proceso de planificación del Plan 25

2.2. Marco conceptual de la mitigación, adaptación y resiliencia al cambio climático 27

2.2.1. Mitigación, adaptación y resiliencia: Criterios estratégicos para la elaboración del Plan 27

2.3. Proceso del desarrollo del Plan 29

2.3.1. Metodología del Plan 30
2.1. Plan multisectorial y multiconceptual (según especificado en la Ley 33-2019) 32
2.5. Percepción y divulgación sobre el cambio climático 35
2.5.1. El CEACC en la comunidad 37
2.6. Participación pública: la participación ciudadana y de los sectores interesados como parte esencial del desarrollo del Plan 38
2.7. Justicia climática 41

CAPÍTULO 3.

Emisiones de gases de efecto de invernadero y la situación actual de las manifestaciones del cambio climático en Puerto Rico 42
3.1. Escenarios globales: el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático de las Naciones Unidas (IPCC) 42
3.2. Escenarios climáticos en Puerto Rico 47
3.3. Situación actual de las emisiones de gases de efecto de invernadero en Puerto Rico 47
3.4. Manifestaciones del cambio climático en Puerto Rico 49
3.4.1. Temperatura atmosférica superficial 50
3.4.2. Tendencias y proyecciones de precipitación 54
3.4.3. Sistemas ciclónicos tropicales, extratropicales, ondas y frentes de frío 62
3.4.4. Aumento del nivel del mar 69
3.4.5. Aumento de acidez de los océanos 70
3.4.6. Aumento de temperatura del océano 71
3.4.7. Aumento de frecuencia e intensidad de episodios de polvo del Sahara 72

CAPÍTULO 4.

Impacto del cambio climático en Puerto Rico 74
4.1. Energía 74
4.2. Infraestructuras 81
4.3. Transportes y movilidad 93
4.3.1. Transportación marítima 94
4.3.2. Transportación aérea 96
4.3.3. Transportación colectiva 102

4.3.4. Vehículos eléctricos 106
4.3.5. Sistema de carreteras 107
4.3.6. Municipios con alta actividad económica que requieren mayor infraestructura de transportación 109
4.4. Residuos sólidos 110
4.4.1. Efecto de los residuos sólidos en el cambio climático en Puerto Rico 110
4.4.2. Estado presente del manejo de desperdicios/residuos sólidos en Puerto Rico 113
4.5. Salud y bienestar 120
4.5.1. Efectos del cambio climático sobre la salud humana 120
4.5.2. Determinantes sociales de la salud y cambio climático 129
4.5.3. Condiciones del sistema de salud ante el cambio climático 132
4.5.4. Salud mental y cambio climático 132
4.6. Agricultura y ganadería 133
4.6.1. Estado de la situación de la producción agrícola de Puerto Rico 134
4.6.2. El clima y el efecto del cambio climático sobre l a agricultura 140
4.6.3. Emisiones de GEI y el rol de la agricultura 146
4.6.4. La pesca como un sistema crucial de seguridad alimentaria 150
4.7. Agua 152
4.7.1. Sequías 153
4.7.2. Aguas subterráneas 160
4.7.3. Aguas superficiales y escorrentías 165
4.7.4. Manejo de los embalses y tomas de agua 167
4.7.5. Pérdida de agua 170
4.7.6. Alteración del ciclo hidrológico por el cambio climático 171
4.8. Sistemas marinos y zonas costeras 172
4.8.1. Deterioro de ecosistemas marinos y costeros: arrecifes de coral, hierbas marinas y humedales 174
4.8.2. Erosión costera 184
4.8.3. Inundaciones costeras 186
4.9. Ecosistemas terrestres 188
4.9.1. Impacto del cambio climático: Ecosistemas y biodiversidad 188

4.9.2. Especies amenazadas y en peligro de extinción en Puerto Rico 194
4.9.3. Hábitats críticos en Puerto Rico 199
4.10. Forestación 201
4.10.1. Inventario Forestal Nacional en Puerto Rico y el huracán María 204
4.10.2. El ciclo de carbono en los bosques de Puerto Rico 206
4.10.3. El cambio climático y los bosques de Puerto Rico 208
4.11. Turismo 211
4.11.1 El turismo y el cambio climático 211
4.11.2. Perfil y preferencias geográficas del visitante 213
4.11.3. Riesgos, amenazas y vulnerabilidades para el sistema turístico puertorriqueño ante el cambio climático 215
4.11.4. El sistema turístico puertorriqueño ante el cambio climático 223
4.12. Educación 229
4.12.1. ¿Qué impactos ha tenido la información divulgada en Puerto Rico sobre el cambio climático en todos los sectores? 232
4.12.2. Deficiencia en la divulgación sobre cambio climático en todos los sectores 239
4.13. Justicia climática 242
4.14. Escenarios sobre las proyecciones de aumento del nivel del mar sobre Puerto Rico (2030, 2050, 2100) y marejada ciclónica 246

CAPÍTULO 5.
Análisis de diagnósticos de los sectores: fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas (FODA) 249
Impactos 299
Tensiones 300

Resumen Ejecutivo

El Plan de Mitigación, Adaptación y Resiliencia al Cambio Climático: herramienta novel, participativa y comprensiva para Puerto Rico

- El Plan de Mitigación, Adaptación y Resiliencia al Cambio Climático (P-MARCC) surge de la encomienda presentada en el artículo 7 de la Ley 33 del 2019, donde indica que el Comité de Expertos y Asesores sobre Cambio Climático (CEACC) presentará un plan a la Comisión Conjunta sobre Mitigación, Adaptación y Resiliencia al Cambio Climático de la Asamblea Legislativa, según establecido en los artículos 8 y 9 de la Ley. El objetivo general del Plan es propiciar que Puerto Rico cree las condiciones óptimas para enfrentar y superar los efectos del cambio climático.
- El CEACC reconoce el peso histórico de esta encomienda y sus implicaciones en el desarrollo socioeconómico y el desarrollo humano del país.
- Con la ley como guía, el CEACC lideró un proceso de diseño y desarrollo de un documento vivo y dinámico que incluyera:
    - diagnósticos de la situación del país ante las manifestaciones del cambio climático con los mejores y más recientes datos disponibles (el CEACC utilizó datos divulgados hasta junio de 2023, para dar espacio al proceso de revisión final y aprobación del borrador a tiempo para someterlo a vistas públicas antes de presentarlo a la Asamblea Legislativa);
    - análisis de las fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas de esta situación por sector;
    - cursos de acción acompañados de estrategias para su implantación; y
    - recomendaciones que ayuden a los sectores en la toma de decisiones.

Una herramienta novel

- El P-MARCC cruza el umbral a un terreno nuevo en materia de política pública.
    - En cuanto a proceso, se nutre de la consulta y participación ciudadana, como lo dispone la Ley 33-2019.
    - En cuanto a su marco conceptual, este es el primer plan multiconceptual en su tipo en Puerto Rico que involucra los conceptos de mitigación, adaptación y resiliencia como ejes de su desarrollo e implantación. Asimismo, añade dos perspectivas transversales muy relevantes y pertinentes a Puerto Rico y a los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Organización de las Naciones Unidas: la descarbonización de la generación de energía eléctrica y la descarbonización del transporte terrestre.

Fruto de la participación

- El P-MARCC es producto del trabajo de un equipo multidisciplinario compuesto por una veintena de especialistas liderados por los expertos del CEACC.
    - La diversidad de peritajes, perfiles, trasfondos académicos y profesionales de este equipo abonó transparencia y pluralismo al trabajo.
    - Esto contribuyó también a la descentralización y neutralidad del proceso.

- Además, la participación pública como piedra angular para la confección del Plan rebasó lo que establece la Ley 33-2019. El primer documento sujeto a vistas públicas fue el borrador del bosquejo del plan, otra iniciativa novel. El proceso robusteció la estructura de este documento. Del mismo modo, el CEACC sometió el borrador del P-MARCC a vistas públicas antes de presentarlo a la consideración legislativa, aun cuando la Ley 33-2019 no lo requiere.

Visión comprensiva

- El equipo de trabajo y de apoyo técnico utilizó una diversidad de técnicas metodológicas para recopilar y analizar la información más reciente disponible sobre el cambio climático referente a los sectores identificados en la Ley 33-2019.
- El conjunto de casi una decena de metodologías incluyó, entre otras, análisis de documentos técnicos con diferentes herramientas de búsqueda de información como, por ejemplo, inteligencia artificial, entrevistas y visitas de campo.
- La riqueza metodológica permitió diagnosticar con más certeza y fundamentó los cursos de acción que se presentan en el P-MARCC para atender los efectos del cambio climático en Puerto Rico.

Los cursos de acción (COA, por las siglas en inglés)

- El P-MARCC presenta de forma sistemática y detallada los cursos de acción[1] que deben seguirse en cada sector identificado por la ley: energía, infraestructuras, transporte y movilidad, residuos sólidos, salud, agricultura y ganadería, agua, sistemas marinos y zonas costeras, forestación, turismo y educación. El CEACC acogió recomendaciones recibidas en las vistas públicas sobre el bosquejo del Plan para añadir los sectores de vivienda (bajo el sector de infraestructuras), ecosistemas terrestres y justicia climática. Además, el CEACC desarrolló cursos de acción para el control de emisiones de gases de efecto de invernadero.

1 Para el borrador del P-MARCC, un curso de acción es una recomendación basada en un proceso de planificación que considera qué tipos de acciones se deben tomar a través de unos objetivos y estrategias claves para lograr soluciones a un evento o situación con métricas cuantificables.

- Los COA están alineados a las guías definidas en la Ley 33-2019, así como a los mejores estándares de la planificación. Se enumeran en formato de tablas cuyos renglones se subdividen partiendo de las 71 guías establecidas en el artículo 9 de la Ley 33-2019 para los once sectores. En el transcurso de los trabajos se desarrollaron guías para fortalecer los objetivos del plan y el propósito de la ley, para un total de 76 guías.
- El formato en tabla responde a los requisitos de planificación para facilitar la comprensión y propiciar la implantación.
    - A cada guía le sigue una lista de prácticas exitosas que validan las estrategias propuestas.
    - Luego se presentan los COA con una serie de objetivos a alcanzar junto a las estrategias para lograrlos.
    - Cada COA identifica a la(s) entidad(es) responsable(s)[2].
    - Las tablas incluyen estimados de costos basado en un análisis económico de la información más reciente disponible, según el área correspondiente. No obstante, el P-MARCC establece que la entidad responsable de ejecutar las estrategias será la que determine con exactitud los costos de cada una, tomando en consideración las experiencias probadas en o fuera de Puerto Rico, previo a la fase de implantación. También se identifican fuentes potenciales de financiamiento.
    - Además, se indican los términos de tiempo para implantar las acciones, los resultados esperados y las métricas para analizar el progreso. Esta información es crucial para desarrollar los informes trienales de seguimiento y evaluación exigidos en la Ley 33-2019 (artículo 7). La información aporta también a la revisión del P-MARCC como marco general de referencia para las actividades de evaluación de impactos socioeconómicos, vulnerabilidad y adaptación al cambio climático, así como para otros deberes estipulados en la Ley 33-2019.

Estructura del Plan

El borrador del P-MARCC contiene nueve capítulos y seis anejos que complementan los diagnósticos o cursos de acción. Los primeros capítulos presentan un resumen de las disposiciones de la Ley 33-2019, los marcos y procesos utilizados para elaborar el Plan, y un análisis de los escenarios climáticos en Puerto Rico y globales. En el capítulo 4 se provee un diagnóstico para cada sector identificado en la ley, además de los tópicos de **vivienda** (bajo **infraestructuras**), **transporte aéreo** y **transporte marítimo** (bajo

2 Se resalta que, por ser este un plan estatal, las entidades responsables identificadas en este documento son parte del organigrama del Gobierno de Puerto Rico. En algunas estrategias se incluyen colaboradores potenciales como referencias sujetas a la evaluación de la entidad responsable sin limitarse a estos. A tono con la encomienda establecida en la Ley 33-2019, según aplique, la entidad responsable deberá identificar los actores claves (a escala municipal comunitaria, como entidades sin fines de lucro, entre otros) y promover la participación de sus colaboradores en la implantación de las estrategias.

transportes y movilidad) **pesca comercial** (bajo **agricultura y ganadería), ecosistemas terrestres** y **justicia climática**. El capítulo 5 presenta un análisis de las fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas en cada sector. En los capítulos 6 y 7 se detallan los COA para mitigar el cambio climático reduciendo emisiones de gases de efecto de invernadero y para adaptar y proveer a Puerto Rico resiliencia ante sus efectos. El capítulo 8 –Adopción del Plan– es pionero en su tipo debido a que la aprobación de este documento se establece por ley. Así, lo establecido en el P-MARCC prevalecerá sobre cualquier otra disposición de ley, reglamentaria o norma, que no estuviere en armonía. Por último, el capítulo 9 presenta las conclusiones y recomendaciones del CEACC que se nutren de un proceso amplio de consulta y participación ciudadana.

Tabla 1.

Descripción general de los capítulos

Capítulo	Descripción general	
C. 1 Marco legal **C. 2 Marco conceptual**	Estos capítulos presentan, respectivamente, el marco legal y los parámetros conceptuales y metodológicos dentro de los cuales se desarrolló el borrador del plan.	
C. 3 Emisiones de gases de invernadero y la situación actual de las manifestaciones del cambio climático en Puerto Rico	El capítulo presenta el diagnóstico de las emisiones de gases de efecto de invernadero y cómo se manifiesta el cambio climático en Puerto Rico. Se complementa con los posibles escenarios a nivel internacional sobre el cambio climático.	
C. 4 Impacto del cambio climático en Puerto Rico	El capítulo presenta el diagnóstico de los once sectores identificados en la Ley 33-2019 (artículo 9). En esta sección se presentan datos e información de la situación de los sectores, incluyendo vivienda, bajo el sector de infraestructuras. Se añade un diagnóstico sobre el estado de la atención a la justicia climática, un diagnóstico sobre ecosistemas terrestres y los escenarios sobre las proyecciones de aumento del nivel del mar para Puerto Rico.	Capítulos ejes del Plan
C. 5 Análisis de los diagnósticos de los sectores: fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas (FODA)	Este capítulo presenta los resultados de un análisis de las fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas de los diagnósticos incluidos en el capítulo previo, desde una perspectiva de planificación.	
C. 6 Cursos de acción (COA) para la mitigación de fuentes antropogénicas de emisiones de gases de efecto de invernadero **C. 7 Cursos de acción (COA) para la adaptación y resiliencia ante el cambio climático por sectores**	Los capítulos 6 y 7 presentan la espina dorsal del borrador del plan. Los capítulos trazan los COA que propiciarán robustecer la preparación y respuesta de Puerto Rico ante el cambio climático. El capítulo 6 presenta los COA alineados a la mitigación de las emisiones de gases de efecto de invernadero; el capítulo 7 delinea los COA para los once sectores identificados por la ley, añadiendo los temas de justicia climática, ecosistemas terrestres y vivienda, este último bajo el sector de infraestructura.	

12 sectores y mitigación de emisiones	76 guías	156 cursos de acción	808 estrategias

C. 8 Adopción del Plan **C. 9 Conclusiones y recomendaciones**	Estos capítulos exponen los procesos de adopción del Plan, según la Ley 33-2019, así como las conclusiones y recomendaciones para los responsables de elaborar la política pública y para otros sectores.
Anejos	El CEACC incluye en los anejos una serie de definiciones contenidas en la Ley y de otros términos utilizados en el borrador del plan. También se presenta un resumen de los procesos y actividades de participación pública y divulgación llevados a cabo. Además, se añaden documentos complementarios sobre educación, turismo y una guía para reforestar a Puerto Rico.

Próximos pasos

El proceso de planificación en torno al P-MARCC está pensado como una estrategia quinquenal de perfeccionamiento continuo: planificar, implantar lo planificado, comprobar los resultados y, por último, revisar la planificación para comenzar un nuevo ciclo. Este marco de revisión y actualización a cinco años va dirigido a ajustar el Plan a la situación del momento y a la nueva información científica disponible. El CEACC presentará a la Asamblea Legislativa un informe conjunto de seguimiento y evaluación del P-MARCC cada tres años, cónsono con los deberes que establece la Ley 33-2019 en su artículo 7.

Por esto, el CEACC subraya que el P-MARCC es un instrumento dinámico y vivo, el cual responde a las necesidades actuales, pero mirando hacia el futuro. Conforme surja información nueva que amerite incorporarla o que modifique lo planteado en el P-MARCC, este documento deberá ser revisado para ajustarlo a las exigencias del momento. El P-MARCC constituye un avance en la dirección correcta hacia la mitigación, adaptación y resiliencia de los diferentes sectores y comunidades en Puerto Rico frente al cambio climático. Confiamos en que este proceso brinde los resultados esperados de forma tangible en beneficio del pueblo de Puerto Rico.

La adopción del P-MARCC adelanta la gestión para promover el desarrollo socioeconómico, la protección de vidas y propiedad, al igual que manejar correctamente los componentes ambientales del país, reconociendo la necesidad de un balance entre las actividades relacionadas con los sectores, la vida humana y la protección del ambiente. Ayuda a satisfacer las necesidades de la sociedad, a la vez que reduce los peligros, daños o desastres a la presente generación. Asimismo, salvaguarda el derecho de las futuras generaciones a la seguridad y protección frente al cambio climático.

Este P-MARCC es más que un documento de política pública: es un llamado a la acción frente al cambio climático con iniciativas de innovación y transformación. Invita a liderar procesos que ayuden a aprender de las amenazas y debilidades para tener un Puerto Rico adaptado y resiliente frente al cambio climático.

Introducción

El Plan de Mitigación, Adaptación y Resiliencia al Cambio Climático (P-MARCC) es el instrumento de planificación del Gobierno de Puerto Rico que indica la dirección hacia donde todos los sectores deben moverse para reducir las emisiones de los gases de efecto de invernadero y la exposición de la población a las manifestaciones del cambio climático en nuestro archipiélago. Con este Plan, el Comité de Expertos y Asesores sobre Cambio Climático (CEACC) cumple la encomienda dispuesta en la Ley de Mitigación, Adaptación y Resiliencia al Cambio Climático –Ley 33 de 2019[3]. El P-MARCC tiene un enfoque multisectorial y multiconceptual. Su implantación diligente propiciará salvaguardar vidas, infraestructura, propiedad y servicios. La Ley estableció desde su nombre, indicado en el artículo 1, los ejes estratégicos de este plan: mitigación, adaptación y resiliencia, los cuales define en el artículo 2. La sección 2.4 los explica.

El P-MARCC identifica los desafíos principales que presentan para Puerto Rico eventos como el aumento de las temperaturas, la merma en el recurso agua, la erosión costera, el aumento del nivel del mar, las olas de calor y la acidificación de los océanos, entre otros. El Plan enmarca esos desafíos en once sectores detallados en los artículos 8 y 9 de la Ley, para los cuales se proveen guías. En el ejercicio de su discreción avalada en la Ley, el CEACC añadió guías para atender los desafíos relacionados con la emisión de gases de efecto de invernadero (GEI), vivienda (bajo infraestructuras), transporte aéreo y marítimo (bajo transporte y movilidad), pesca comercial (bajo agricultura), ecosistemas terrestres y justicia climática. Con este enfoque abarcador, el P-MARCC adelanta el cumplimiento de Puerto Rico con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Organización de las Naciones Unidas.

A través del desarrollo del borrador del P-MARCC se identificó una serie de necesidades críticas que requieren atención. El CEACC utilizó datos divulgados hasta junio del 2023, para dar espacio al proceso de revisión final y aprobación del documento a tiempo para someterlo a vistas públicas antes de enviarlo a la legislatura. El análisis permitió comprender mejor las causas e interrelaciones de estas necesidades para definir los cursos de acción y las estrategias dirigidas a mitigar, adaptar y crear resiliencia ante el cambio climático. Entre las áreas emergentes de atención clasificadas en impactos y tensiones están las siguientes: brotes de enfermedad y enfermedades crónicas, sequías y lluvias extremas, sistemas ciclónicos de categoría mayor, inundaciones por crecidas de ríos y quebradas, polvo del Sahara, sargazo en las playas y erosión costera. Otras áreas de atención son: la necesidad de generar espacios de cohesión educativa, la vulnerabilidad y los riesgos en las comunidades, el manejo sostenible de los residuos sólidos, infraestructura vulnerable; carreteras y puentes en peligro; y la localización de familias que residen en zonas inundables o susceptibles al aumento del nivel del mar.

El P-MARCC reconoce que la mayoría de las entidades responsables de implantar los cursos de acción tienen recursos limitados para destinar a las estrategias de mitigación, adaptación y resiliencia ante el cambio climático. Será importante proveerles mayores

[3] La Ley de Mitigación, Adaptación y Resiliencia al Cambio Climático (Ley 33 de 2019) aprobada el 22 de mayo de 2019 está vigente desde el 1 de julio del mismo año: https://bvirtualogp.pr.gov/ogp/Bvirtual/leyesreferencia/PDF/2019/0033-2019.pdf.

recursos. Esta realidad se tomó en cuenta al desarrollar los cursos de acción (COA, por sus siglas en inglés). El Plan establece cómo implantarlos, identifica ejemplos de experiencias exitosas, fuentes potenciales de financiamiento, los resultados esperados y las métricas para dar seguimiento a los progresos. Este nivel de detalle debe facilitar que las agencias implanten los COA.

Con este documento, procuramos responder responsablemente a la emergencia climática, descrita por la comunidad científica internacional como una de las mayores amenazas que enfrenta la humanidad.

Propósito, misión, visión y objetivos del Plan

Propósito

El artículo 8 de la Ley 33 de 2019 establece el marco estratégico para este documento. Dispone que el P-MARCC determinará los objetivos de emisiones de gases de efecto de invernadero y de los contaminantes del aire por períodos y propondrá las medidas necesarias para alcanzarlos de forma planificada. El Plan delineará los indicadores cuantitativos correspondientes, para lograr medir el impacto de las acciones. La Ley 33 de 2019 ordena que esto se logre mediante la participación y concertación de los entes locales y los demás actores implicados. La Ley da a este marco estratégico, detallado sectorialmente, carácter obligatorio.

El artículo 9 de la Ley 33 de 2019 establece, además, que el P-MARCC identificará la situación del territorio ante las manifestaciones del cambio climático y los cursos de acción a seguir para reducir la exposición y vulnerabilidad de los sectores mencionados ante tales manifestaciones para hacerlos resilientes.

La Ley 33 de 2019 dispone también que el P-MARCC sea consistente con el Plan Integrado de Recursos (PIR) de la Autoridad de Energía Eléctrica (AEE) aprobado por el Negociado de Energía de Puerto Rico[4], y con la Ley de Política Pública Energética de Puerto Rico (Ley 17 de 2019)[5].

Misión

Este plan tiene la misión de trazar las estrategias para lograr un nivel base de mitigación, adaptación y resiliencia ante el cambio climático en Puerto Rico que permita mejorar las condiciones en los sectores identificados en la ley, en un marco que propicie la protección de vida y propiedad.

4 El PIR de la AEE es un mandato de la Ley 57 de 2014: https://energia.pr.gov/ plan-integrado-de-recursos/

5 Vea el estatuto en: https://energia.pr.gov/wp-content/uploads/sites/7/2019/05/17-2019.pdf

Visión

Un Puerto Rico que garantice el bienestar físico, emocional, socioeconómico y ambiental de las personas y los recursos naturales, asegurando que la ciudadanía, las comunidades y el país en general estén preparados, adaptados y puedan recuperar rápidamente ante los impactos o tensiones asociadas al cambio climático.

Objetivos

Para cumplir con la misión del P-MARCC y, de acuerdo a los objetivos de reducción de emisiones, el marco estratégico y las medidas dispuestas en la Ley 33 de 2019, se presentan los siguientes objetivos:

Objetivo general

Propiciar que Puerto Rico cree las condiciones óptimas para enfrentar y superar las manifestaciones del cambio climático.

Objetivos específicos

1. Desarrollar el marco legal y conceptual del Plan conforme a los lineamientos claves para su estructura e implantación establecidos en la Ley 33 de 2019.

2. Desarrollar un conjunto de diagnósticos técnicos por sector de las emisiones de GEI y de la situación actual de las manifestaciones del cambio climático en Puerto Rico con la mejor información científica y técnica disponible. Esta información debe servir como base para generar una radiografía abarcadora de las fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas (análisis FODA). También debe servir para delinear los cursos de acción para todas las áreas identificadas en la Ley 33 de 2019, entre estas, reducir las emisiones de GEI, transformar el sistema eléctrico a energía renovable o energía alternativa, reducir la demanda de energía eléctrica, transformar la flota vehicular gubernamental a una de vehículos eléctricos y reforestar a Puerto Rico.

3. Realizar un análisis FODA para cada sector y para mitigar las emisiones de los GEI provenientes de fuentes antropogénicas, a partir del diagnóstico, con el propósito de establecer el marco referencial entre dónde estamos y hacia dónde vamos en términos de adaptación, mitigación y resiliencia ante el cambio climático en Puerto Rico.

4. Establecer unos cursos de acción para cada sector y para mitigar las emisiones de GEI de fuentes antropogénicas. Los COA deben ser viables para alcanzar los objetivos de reducción de estas emisiones establecidos en la Ley 33 de 2019 para los períodos considerados.

5. Proveer en cada COA una serie de objetivos y estrategias claves para lograr soluciones con métricas cuantificables que ayuden a la mitigación, adaptación

y resiliencia frente al cambio climático, identificando la(s) entidad(es) responsable(s) y un estimado de costos.

6. Establecer las medidas necesarias para alcanzar los objetivos de reducción de emisiones de forma planificada y estableciendo indicadores cuantitativos anuales de los resultados de las acciones.

7. Proveer las mejores prácticas utilizadas en y fuera de Puerto Rico para mitigar, adaptarse y generar resiliencia ante el cambio climático a base de la mejor ciencia disponible.

8. Proveer una serie de recomendaciones y conclusiones para dar continuidad a los procesos de planificación de los sectores y a la Ley 33 de 2019 ante los efectos del cambio climático.

Sectores que se incluyen en el Plan

La Ley 33 de 2019 establece que los sectores sobre los cuales el P-MARCC debe atender objetivos específicos son:



El CEACC decidió ampliar el alcance del P-MARCC a raíz del análisis de las propuestas presentadas en las vistas públicas sobre el borrador del bosquejo de este documento. También tomó en cuenta la importancia de integrar otros sectores para cumplir la Misión. Así se incluyeron los temas de vivienda (bajo infraestructuras), ecosistemas terrestres y justicia climática, además de los escenarios sobre las proyecciones de aumento del nivel del mar y de la marejada ciclónica sobre Puerto Rico para los años 2030, 2050, 2100.

CAPÍTULO 1.

Marco legal

1.1. La Ley 33 del 2019 y el Plan de Mitigación, Adaptación y Resiliencia al Cambio Climático de Puerto Rico

La exposición de motivos de la Ley de Mitigación, Adaptación y Resiliencia al Cambio Climático de Puerto Rico (en adelante, Ley 33-2019) afirma que Puerto Rico es física y socialmente vulnerable a factores de peligros o amenazas de orden natural y antropogénico[6]. Asimismo, reconoce las amenazas climáticas que enfrenta esta región del Caribe.

Las primeras Estimaciones de Resiliencia Comunitaria del Negociado del Censo para Puerto Rico –publicadas en junio del 2023[7] – indican que nuestra población tiene altos niveles de vulnerabilidad social, indicativo de que tendría problemas para recuperarse en caso de un desastre natural. Los 10 factores de riesgo a nivel individual y familiar en que se basan las estimaciones para medir las vulnerabilidades son: nivel de pobreza, número de cuidadores en el hogar, nivel de hacinamiento, nivel de escolaridad, empleo, discapacidades, cubierta médica, edad (65 años o más), acceso a vehículos y acceso a internet de banda ancha. El 46.1 % de la población tenía tres factores de riesgo o más. Los estimados apuntan a que apenas el 14.7 % de la población estaba fuera de los factores de riesgo. El 30 % tenía uno o dos.

Para el 2020, la población de Puerto Rico contaba con 3,311,274 habitantes. De esta población, el 25 % comprende personas de 62 años o más[8]. Otro dato poblacional relevante es que el 43 % de la población vivía bajo el nivel de pobreza[9]. El Informe de Enfermedades Crónicas más reciente disponible (2016-2017) concluye que “al menos el 32.3 % de la población adulta tiene una enfermedad crónica y que las primeras cinco causas de muerte son dichas enfermedades”[10] (Ilustración 1). Según la Organización Panamericana de la Salud: “El manejo y tratamiento de las enfermedades crónicas representa una de las mayores partidas en el presupuesto de salud pública que anualmente destina el

---

6 Ley 33-2019. Exposición de Motivos. Pág. 3.

7 Gurrentz, B., Scurry, J., Notter, I. R. June 07, 2023. How Socially Vulnerable Is Puerto Rico to Disasters? New Community Resilience Estimates Show Almost Half of Puerto Rico Population Had Three or More Risk Factors. Negociado del Censo de Estados Unidos. https://www.census.gov/library/stories/2023/06/how-socially-vulnerable-is-puerto-rico-to-disasters.html

8 Véase la Encuesta sobre la Comunidad (2017-2021) en: https://censo.estadisticas.pr/EncuestaComunidad

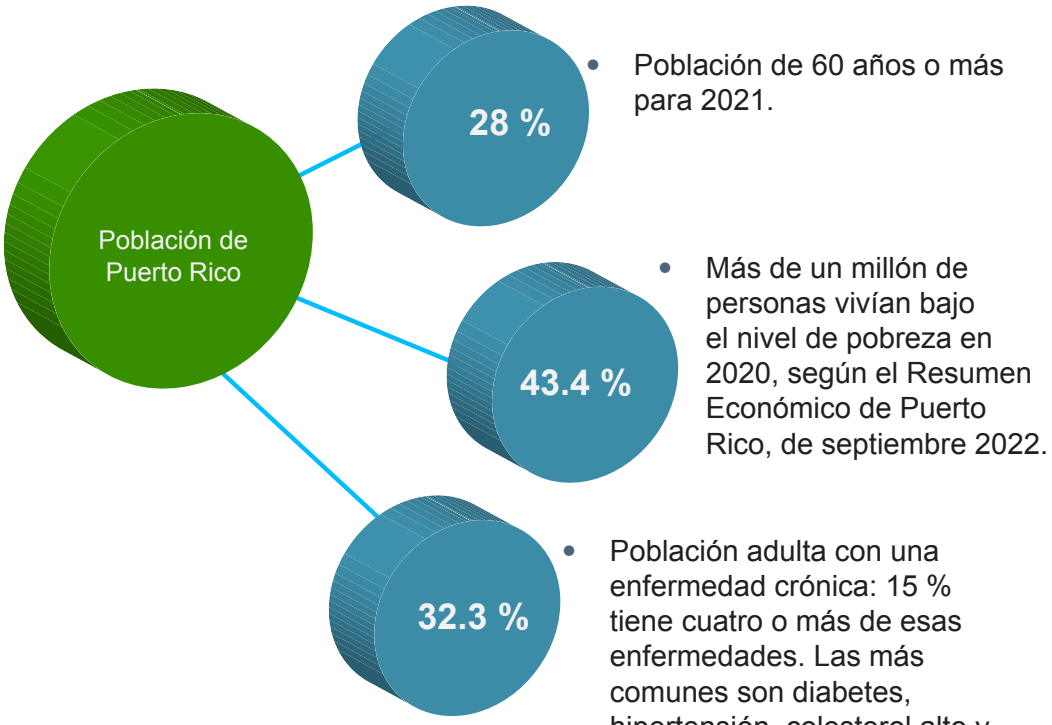
9 Resumen Económico de Puerto Rico, septiembre 2022, p.6. Junta de Planificación. Véase en: https://estadisticas.pr/files/inventario/resumen_economico/2022-12-07/JP-ResumenEcon-2022-09-02.pdf.

10 Ruiz-Serrano, K., Felici, M., Díaz-García, R., & Cases, A. (2019). *Informe de Enfermedades Crónicas, 2016-2017*. División de Prevención y Control de Enfermedades Crónicas, Secretaría de Promoción para la Salud del Departamento de Salud de Puerto Rico. Véase en: https://www.salud.pr.gov/CMS/DOWNLOAD/5533.

Gobierno de Puerto Rico, y se espera que en los próximos años continúe aumentando por efecto del envejecimiento poblacional"[11].

Ilustración 1.

Datos demográficos de Puerto Rico (2020-2021)



Fuentes: Resumen Económico de Puerto Rico, septiembre 2022, p.6. Junta de Planificación y el Informe de Enfermedades Crónicas (2016-2017), Departamento de Salud.

El Proyecto del Senado 773 (P. del S. 773) que dio origen a la Ley 33-2019 fue radicado en diciembre del 2017. En la exposición de motivos del documento se relacionan los huracanes de ese año con el cambio climático: "El paso de estos dos últimos ciclones levanta nuevamente la concienciación sobre la envergadura de incorporar medidas para reducir los efectos del cambio climático"[12]. Además, se citan informes de la Oficina de Contraloría General de Estados Unidos que concluyeron que los efectos del cambio climático tienen repercusiones serias en las finanzas del gobierno federal. El informe federal citado en el proyecto estableció que los esfuerzos de gestión del riesgo del cambio climático "deben centrarse en las áreas donde se necesita atención inmediata y favore-

[11] Véase el Perfil de Puerto Rico (2023) en el portal de la Organización Panamericana de la Salud: https://hia.paho.org/es/paises-2022/perfil-puerto-rico#situation

[12] Ley 33 de 2019. Exposición de motivos. Pág. 2, párrafo 1.

cer aquellas actividades o medidas que tienen mayor impacto y maximizan las gestiones en contra del cambio climático". Asimismo, en la exposición de motivos se argumenta sobre la necesidad de establecer una estrategia para identificar, priorizar y orientar los recursos económicos para mejorar la resiliencia frente a desastres futuros[13].

El Senado y la Cámara de Representantes aprobaron el proyecto sin oposición ni abstenciones en el 2019, luego de un extenso proceso de deliberación. Se presentaron 27 ponencias en ocho vistas públicas de la comisión de Salud Ambiental y Recursos Naturales del Senado y una de la comisión de Agricultura, Recursos Naturales y Asuntos Ambientales de la Cámara de Representantes[14]. La medida fue a Comisión de Conferencia, tras lo cual se avaló en ambos cuerpos legislativos.

La Ley 33-2019 expone que los efectos del cambio climático son notables en el país. Particularmente, se indica que las comunidades costeras, la infraestructura, la fauna y los ecosistemas son vulnerables a estos cambios[15]. De los datos del Censo del 202015[16] se desprende que el 61 % de la población de Puerto Rico vive en alguno de los 44 municipios costeros. Además, la mayoría de la infraestructura crítica, como los puertos aéreos, marítimos, edificios, viviendas y carreteras ubican en la costa[17]. El contenido de la Ley establece que el cambio climático repercute en la disponibilidad de los alimentos, la salud de la población y en la economía.

La Constitución de Puerto Rico declara: "Será política pública del Estado Libre Asociado la más eficaz conservación de sus recursos naturales, así como el mayor desarrollo y aprovechamiento de estos para el beneficio general de la comunidad"[18]. En el capítulo

---

13 Ley 33 de 2019. Exposición de motivos. Pág. 5, párrafo 2.

14 Véanse detalles del trámite legislativo en: https://sutra.oslpr.org/osl/esutra/medidareg.aspx?rid=124926

15 Ley 33 de 2019. Exposición de motivos. Pág. 4, párrafo 2.

16 Censo, Puerto Rico 2020. https://www.census.gov/library/stories/state-by-state/puerto-rico-population-change-between-census-decade.html

17 La Guía de Financiamiento para la Resiliencia Costera: Una herramienta para que los municipios de Puerto Rico se recuperen de los impactos de los huracanes Irma y María cita datos del Departamento de Recursos Naturales y Ambientales del 2017 que indican que el litoral del archipiélago tiene una longitud de aproximadamente 800 millas con más de 1,225 playas, incluyendo a las cuatro islas principales en torno a Puerto Rico: Vieques, Culebra, La Mona y Desecheo. "Todo Puerto Rico está clasificado como un área costera, lo que expone a toda la población, los recursos naturales y la infraestructura crítica de Puerto Rico a algún grado de riesgo de peligros costeros", indica el informe. Por otro lado, en el documento El estado de la costa en Puerto Rico (7 de abril de 2021), preparado por la Dra. Maritza Barreto Orta y el Instituto de Investigación y Planificación Costera de Puerto Rico, se citan datos del DRNA sobre la distribución de la infraestructura crítica en la costa: 7 plantas generadoras de energía eléctrica, 249 kilómetros de carreteras principales, 7 aeropuertos, 15 hospitales, 12 puertos y 121 hoteles. Ver también: Soderberg, C. (2 de febrero de 2020). Alza en el nivel del mar: Impacto sobre la infraestructura clave. *El Nuevo Día.*

18 Constitución de Puerto Rico, artículo VI, § 19. https://www.poderjudicial.pr/Documentos/Leyes-Reglamentos/Constitucion-Estado-Libre-Asocicado-PR.pdf

Sociedad y Economía[19] del informe *Estado del clima de Puerto Rico (2014-2021)*[20] se explica que el Tribunal Supremo de Puerto Rico ha interpretado que esta cláusula establece un "doble mandato" para lograr la conservación más efectiva de los recursos naturales de Puerto Rico, al tiempo que se esfuerza por utilizar y desarrollar dichos recursos en el mejor interés y bienestar de la comunidad[21].

Estos mandatos prevalecen sobre cualquier ley, reglamento u ordenanza, según se indica en el informe del Consejo de Cambio Climático de Puerto Rico (PRCCC) publicado en octubre del 2022. Se añade que, hasta la fecha, no existe una interpretación de esta cláusula constitucional en el contexto del cambio climático.

En el informe se destaca que, sin embargo, a lo largo de los años en Puerto Rico han surgido iniciativas dirigidas a mitigar el cambio climático, adaptarse a sus efectos, promover el desarrollo sostenible y conservar los recursos naturales. Entre otras iniciativas, se han emitido una serie de órdenes ejecutivas (OE) al respecto:

- OE-2013-16[22]: Ordenó desarrollar un estudio sobre la vulnerabilidad de la infraestructura pública relacionada con el cambio climático, y la adopción de planes de adaptación para responder a los hallazgos del estudio. En total, 17 agencias gubernamentales comenzaron a desarrollar estudios de vulnerabilidad al cambio climático. Solo tres agencias completaron sus planes de adaptación: la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados (AAA), en el 2015[23]; la Compañía de Turismo de Puerto Rico, en el 2016; y el Departamento de Recursos Naturales y Ambientales (DRNA), en el 2016.
- OE-2013-18[24]: Ordenó cuantificar las emisiones de GEI en Puerto Rico, y elaborar un plan para reducirlas y acercarse a la meta de neutralidad en carbono. El informe de GEI se hizo en el 2014[25]. Como parte del desarrollo del P-MARCC y con la colaboración del CEACC, el DRNA encomendó un nuevo estudio de emisiones, cuyos hallazgos están disponibles en el sitio digital del CEACC desde julio de 2023[26].

---

19 Aponte-González, F., Rodríguez-Rivera, L.E., Crespo Acevedo, W., Moyano Flores, R., Quiñones, H., Rodríguez, J.L., Leinberger, A., Santos-Corrada, M., Marrero, V., Rivera-Collazo, I., Ezcurra, P., Parés- Ramos, I.K., Avilés, K.R., Gould, W., Álvarez-Berrios, N., Torres, M., and Rodríguez-Morales,H.K. (2022). Working Group 3: Society and Economy. State of the Climate Report. Puerto Rico Climate Change Council. Aponte-González, F., Díaz, E., Rodríguez-Morales, H.K., Rodríguez, J.L., Marrero, V., Leinberger, A., Crespo Acevedo, W. I., and González, M. (Eds.)

20 Véase el informe en: https://www.pr-ccc.org/publicaciones/

21 El informe del PRCCC cita la decisión Misión Industrial v. Junta de Calidad Ambiental, 1998. https:// dts.poderjudicial.pr/opiniones/1998/98tspr85.pdf

22 Gobernador de Puerto Rico, 2013. https://docs.pr.gov/files/Estado/OrdenesEjecutivas/2013/OE-2013-016.pdf

23 Cambio Climático. *Autoridad de Acueductos y Alcantarillados.*

24 Gobernador de Puerto Rico, 2013. https://bibliotecalegalambiental.files.wordpress.com/2013/10/oe-2013-018.pdf

25 Center for Climate Strategies (CCS). (30 de septiembre de 2014). *Puerto Rico Greenhouse Gases Baseline Report.*

26 Véase el *Informe de Inventarios de Gases de Efecto Invernadero para Puerto Rico, 2019 y 2021*. DRNA. (julio, 2023): https://www.drna.pr.gov/noticias/inventario-gei-2019-2021/

- OE-2018-045[27]: Creó el Grupo de Trabajo Multisectorial para Mitigar el Cambio Climático, para establecer y recomendar iniciativas de política pública destinadas a reducir los efectos del cambio climático y proteger el medioambiente.
- OE-2023-009[28]: El 12 de abril de 2023, el gobernador Pedro Pierluisi emitió la Orden Ejecutiva 2023-009 que declaró un estado de emergencia por la crisis de erosión costera como resultado del cambio climático. La Orden Ejecutiva encomienda la implantación de múltiples acciones recomendadas por el CEACC[29]. Además, crea, entre otras medidas, el Comité de Acción para la Adaptación y Resiliencia ante la Erosión Costera, encargado de realizar un inventario de propiedades no habitadas y estructuras abandonadas o en ruinas ubicadas en la zona costera. Asimismo, le asigna determinar cuáles de las acciones contempladas en la orden ejecutiva se llevarán cabo en cada localidad.

La Tabla 2 identifica los estatutos de Puerto Rico relacionados con el cambio climático, además de la Ley 33-2019 en la que se ordena crear este plan.

Tabla 2.

Leyes y regulaciones sobre acción climática

• Ley de Política Pública de Diversificación Energética por Medio de la Energía Renovable Sostenible y Alterna en Puerto Rico (Ley 82-2010, según enmendada)
• Ley de Política Pública Energética de Puerto Rico (Ley 17-2019)
• Ley de Transformación y Alivio Energético (Ley 57-2014)
• Ley para la Reducción y el Reciclaje de Residuos Sólidos en Puerto Rico (Ley 70-1992, según enmendada)
• Ley del “Día de la Educación sobre Cambio Climático en Puerto Rico” (Ley 152-2019)
• Ley de Reforma Educativa de Puerto Rico (Ley 85-2018)
• Ley de Política Pública para el Desarrollo Sostenible de Turismo en Puerto Rico (Ley 254-2006, según enmendada)
• Ley de Regionalización Turística de Puerto Rico (Ley 125-2016)

En su análisis, el PRCCC reconoce que la Ley 33-2019 es la primera política pública que Puerto Rico establece para responder al cambio climático. El gobierno asume con ella su responsabilidad indelegable de adoptar medidas que mitiguen emisiones y redunden en las mejores prácticas de adaptación, creación de más resiliencia y reducción de vulnerabilidades al cambio climático.

[27] Departamento de Estado de Puerto Rico: https://docs.pr.gov/files/Estado/OrdenesEjecutivas/2018/OE-2018-045.pdf
[28] Boletín Administrativo Núm. OE-2023-009.
[29] Véase el documento en: https://drive.google.com/file/d/1MIZKJ8trBcjbGwTTJ4YzFhmUtCkK0hvk/view?fbclid=IwAR15iwIMAe1I7UwY9m2wDmcOCGOh4hKq1dQJ2UxHo0MxBA2S_Tv7d797MDU

1.2. El Comité de Expertos y Asesores sobre Cambio Climático y el Plan de Mitigación, Adaptación y Resiliencia al Cambio Climático

En el artículo 6 de la Ley 33-2019 se ordenó crear el Comité de Expertos y Asesores sobre Cambio Climático con la encomienda de asesorar y preparar el P-MARCC. El estatuto facultó al CEACC para atender los asuntos sustantivos con total autonomía e independencia y lo adscribió al DRNA.

La Ley otorgó al CEACC la prerrogativa de promover la concertación comunitaria, la participación de profesionales, de los mejores expertos e instituciones y del mayor número de agentes implicados e interesados en los sectores correspondientes para nutrir con propuestas la elaboración del Plan. Igualmente, la Ley concedió al Comité la potestad de monitorear y evaluar el seguimiento e implantación de las políticas climáticas, los planes estratégicos de las agencias y los planes de acción sectoriales relacionados con los aspectos relevantes para alcanzar las finalidades de la política pública.

En el artículo 6, inciso (a), de la Ley 33-2019 se instruye sobre la composición que deberá tener el CEACC: tendrá nueve miembros, de los cuales tres son miembros *ex officio* con derecho a voz y voto. El gobernador nombrará al resto de los miembros con el consejo y consentimiento del Senado y la Cámara de Representantes. Los miembros *ex officio* son el secretario o la secretaria del DRNA, quien presidirá el Comité; el presidente o la presidenta de la Universidad de Puerto Rico (UPR); y el secretario o la secretaria de Desarrollo Económico y Comercio. Mientras, los miembros nombrados por el gobernador deben tener trasfondo educativo, profesional o experiencia en el campo con conocimientos técnicos-científicos en ciencias atmosféricas (climatología y meteorología), ciencias naturales (ciencias ambientales, biología, ecología, física y química), planificación (ambiental, económica y urbana), oceanografía, salud pública (salud ambiental, epidemiología, demografía), ciencias terrestres (geografía, hidrología, geomorfología y geología), energía, sociología (repercusiones medioambientales y socioeconómicas), ingeniería ambiental y/o desarrollo sostenible. Al menos uno de ellos debe tener pericia en asuntos de energía renovable o alternativa y no podrán ser empleados públicos, excepto que sean profesores de la UPR.

Luego de completado el plan, el CEACC tiene la encomienda de someter el documento a la Comisión Conjunta sobre Mitigación, Adaptación y Resiliencia al Cambio Climático de la Asamblea Legislativa para su evaluación y acciones correspondientes.

1.3. La comisión conjunta de la legislatura sobre cambio climático

En el capítulo III (artículo 15) de la Ley 33-2019 se ordenó crear la Comisión Conjunta sobre Mitigación, Adaptación y Resiliencia al Cambio Climático de la Asamblea Legislativa de Puerto Rico. El organismo legislativo debe estar compuesto por siete miembros del Senado y siete de la Cámara de Representantes.

La Ley le confirió a la Comisión Conjunta jurisdicción para:

1. Estudiar, evaluar, informar, hacer recomendaciones, enmendar y aprobar el P-MARCC sometido por el CEACC, para presentarlo al pleno de ambos cuer-

pos legislativos. Para ello se dispone que, una vez recomendado el Plan, la Comisión Conjunta tendrá no más tarde de la culminación de la próxima sesión ordinaria para presentarlo simultáneamente a ambos cuerpos de la Asamblea Legislativa (art. 15, inciso a);

2. Examinar, investigar, evaluar y estudiar todo lo concerniente a la mitigación, adaptación y resiliencia al cambio climático (art. 15, inc. b);

3. Dar seguimiento periódico a los trabajos para la consecución del P-MARCC y cualquier propuesta relacionada con los propósitos de la Ley 33 de 2019 para reducir las emisiones de gases de efecto de invernadero, la transición a la energía renovable y estrategias de adaptación (art. 15, inc. c);

4. Evaluar e informar a la Asamblea Legislativa en torno al estudio de todas las medidas legislativas radicadas en ambos cuerpos legislativos concernientes al cambio climático (art. 15, inc. d);

5. Redactar, presentar y enmendar proyectos de ley, resoluciones y medidas sustitutivas relacionadas con el cambio climático y sus efectos en los distintos sectores (art. 15, inc. e);

6. Recomendar el uso de fondos del Fondo General, para el cumplimiento de la política pública enunciada en la Ley 33 del 2019 (art. 15, inc. f);

7. Realizar cualquier otra función asignada mediante Resolución Concurrente (art. 15, inc. g).

Además, cada tres años, la Comisión Conjunta sobre Mitigación, Adaptación y Resiliencia al Cambio Climático debe revisar la necesidad y conveniencia de la Ley 33-2019, y rendir un informe al gobernador y a los presidentes de los cuerpos legislativos sobre el particular, según dispone el artículo 15 del referido estatuto.

1.3.1. Aval de la legislatura

Una vez que la Comisión Conjunta apruebe el P-MARCC, lo someterá a la consideración del pleno de ambos cuerpos de la Asamblea Legislativa. Si se aprueba, pasará al gobernador de Puerto Rico para su firma o veto[30].

1.4. Leyes y reglamentos federales específicos sobre el cambio climático luego de la aprobación de la Ley 33 del 2019

A partir del 2021, el gobierno federal de Estados Unidos estableció medidas ejecutivas y legislativas asociadas a los retos ambientales y los cambios acelerados relacionados con el clima. El capítulo Sociedad y Economía del informe del PRCCC (2022) provee un resumen de estas leyes y de la jurisprudencia vigente relacionada con el cambio climático.

[30] Ley 33-2019, artículo 16.

Específicamente, la administración del presidente Joseph Biden emitió en el 2021 cuatro órdenes ejecutivas relacionadas con el cambio climático:

- Orden Ejecutiva 13990 del 20 de enero de 2021: Protección de la salud pública y el medioambiente y restauración de la ciencia para abordar la crisis climática[31].
- Orden Ejecutiva 14008 del 27 de enero de 2021: Abordar la crisis climática nacional e internacionalmente[32].
- Orden Ejecutiva 14013 del 4 de febrero de 2021: Reconstrucción y mejora de los programas para reasentar a los refugiados y planificación de los impactos del cambio climático en la migración[33].
- Orden Ejecutiva 14057 del 8 de diciembre de 2021: Catalizando industrias y empleos de energía limpia a través de la sostenibilidad federal[34].
- Orden Ejecutiva 14008 del 21 de abril de 2023: Abordar la crisis climática nacional e internacionalmente[35] que amplía el alcance de la orden del 27 de enero del 2021 para proteger mejor a las comunidades más afectadas por la contaminación y los daños ambientales. La Orden Ejecutiva dispone que las agencias consideren medidas para abordar y prevenir los impactos ambientales y de salud desproporcionados y adversos en las comunidades, incluidos los efectos acumulativos de la contaminación y otras cargas como el cambio climático.

El gobierno federal promulgó también la Ley de Innovación y Fabricación Estadounidense (27 de diciembre de 2020) que autoriza a la EPA a reducir gradualmente la producción y el consumo de los gases refrigerantes hidrofluorocarburos (HFC), administrar estos y sus sustitutos, y facilitar la transición a tecnologías de próxima generación[36]. Estos componentes son poderosos gases de efecto invernadero. El 3 de noviembre de 2022, la EPA propuso un reglamento para establecer la metodología para permitir las asignaciones de producción y consumo de HFC con miras a limitarlas a un 40 % por debajo del estándar, entre el 2024 y el 2028.

La atención al cambio climático es uno de los pilares de la Ley Bipartidista de Infraestructura firmada el 15 de noviembre de 2021. Otros ejes fundamentales de esta ley son

---

31 Federal Register, 2021a: https://www.federalregister.gov/documents/2021/01/25/2021-01765/protecting-public-health-and-the-environment-and-restoring-science-to-tackle-the-climate-crisis

32 Federal Register, 2021b: https://www.federalregister.gov/documents/2021/02/01/2021-02177/tackling-the-climate-crisis-at-home-and-abroad

33 Federal Register, 2021c: https://www.federalregister.gov/documents/2021/02/09/2021-02804/rebuilding-and-enhancing-programs-to-resettle-refugees-and-planning-for-the-impact-of-climate-change

34 Federal Register, 2021d: https://www.federalregister.gov/documents/2021/12/13/2021-27114/catalyzing-clean-energy-industries-and-jobs-through-federal-sustainability

35 Véase en: https://www.whitehouse.gov/briefing-room/presidential-actions/2021/01/27/executive-order-on-tackling-the-climate-crisis-at-home-and-abroad/.

36 Véase https://www.epa.gov/climate-hfcs-reduction.

promover la justicia ambiental y ampliar el acceso al agua potable limpia[37]. El estatuto asigna más de $2,265 millones a Puerto Rico para mejorar las vías de transporte público, ampliar la red de recarga de vehículos eléctricos, proveer cobertura de banda ancha en toda la isla y facilitar el beneficio de conectividad asequible para familias de bajos ingresos, proteger contra fuegos forestales, reducir los costos de energía eléctrica y desarrollar infraestructura de agua y aeropuertos.

Asimismo, la administración del gobierno federal creó en agosto del 2022 la Ley de Reducción de la Inflación[38], consistente con la política pública de avanzar en atender el cambio climático. La Ley crea, entre otras iniciativas, el Fondo de Reducción de Gases de Efecto Invernadero. El Fondo facilita el financiamiento de proyectos climáticos y energéticos impulsando el desarrollo de una economía basada en energía limpia. La Casa Blanca informó que esta ley ayudará a proteger a las comunidades de Puerto Rico más expuestas a los efectos del cambio climático, mediante fondos de asistencia técnica para apoyar la acción climática y aumentar la resiliencia ante condiciones climáticas extremas, el aumento del nivel del mar y otros riesgos. También destina fondos para apoyar a las comunidades costeras con resiliencia climática, conservación, restauración y protección costera. Además, crea un Programa de Subsidios de Equidad y Acceso a Comunidades que incluye apoyo para proyectos de transporte y planificación que ayuden a proteger a las comunidades de inundaciones y del calor extremo, entre otras amenazas. El programa promueve proyectos de siembra y reforestación.

37 Véase: https://www.govinfo.gov/content/pkg/PLAW-117publ58/pdf/PLAW-117publ58.pdf
38 Véase: https://www.whitehouse.gov/cleanenergy/inflation-reduction-act-guidebook/

CAPÍTULO 2.

Marco conceptual

2.1. Proceso de planificación del Plan

El P-MARCC se enmarca en la **planificación participativa**. Este enfoque base de unidad de análisis y planificación cuenta con la interacción de diferentes actores de la comunidad identificados en la Ley 33-2019, teniendo en cuenta que cada uno tiene diferentes niveles de participación. Los actores incluyen agencias estatales, agencias federales, corporaciones públicas, municipios, empresas privadas, la academia, organizaciones sin fines de lucro y la comunidad, entre otros grupos de interés. La Ley no exime que el gobierno, sus agencias, instrumentalidades, dependencias ni cualesquiera otras implanten la política pública que establece su letra. Sí dispone, en el artículo 9, unas guías por sectores que pueden involucrar directa e indirectamente a otras instituciones.

El P-MARCC presenta la situación local relacionada con el cambio climático, considerando las emisiones de GEI y las manifestaciones del cambio climático en Puerto Rico en los siguientes sectores principales: energía, infraestructura (incluye vivienda), transporte y movilidad, residuos sólidos, salud, agricultura y ganadería, agua, sistemas marinos y zonas costeras, ecosistemas terrestres, forestación, turismo, educación y justicia climática. Además, presenta los cursos de acción para propiciar los objetivos de reducción de emisiones establecidos en el artículo 5 y según las guías por sectores para reducir los efectos del cambio climático indicadas en el artículo 9 de la Ley.

El Plan utiliza también un enfoque de **planificación estratégica**. Su marco estratégico se basa en tres disposiciones del artículo 8 de la Ley:

1. Establecer los objetivos de emisiones de gases de efecto de invernadero y de los contaminantes del aire por períodos, así como una propuesta de las medidas necesarias para alcanzarlos de forma planificada y los indicadores cuantitativos anuales del impacto de las acciones. Para lograr estos objetivos y promover la concertación comunitaria deberá contar con la participación de los entes locales y los demás actores implicados.

2. Un marco estratégico, detallado sectorialmente.

3. Identificar los sistemas naturales, territorios y sectores socioeconómicos más vulnerables con una propuesta de medidas de adaptación necesarias para reducir la vulnerabilidad. Entre estas, se identificarán las zonas con alta erosión de costas, áreas de mayor alcance de inundación costera, producidas por marejadas asociadas a sistemas ciclónicos y frentes de frío, zonas de alta inundabilidad causada por descargas de ríos, zonas altamente susceptibles a inundabilidad por aumento del nivel del mar, áreas propensas a racionamiento de agua, áreas donde el desarrollo económico está comprometido o pudiera estar comprometido por falta de agua, acuíferos en estado crítico, embalses

cuya capacidad de almacenamiento está comprometida por sedimentación o menoscabo estructural de la represa, entre otras.

Este documento incluye medidas indicadas en el artículo 9 de la Ley con el propósito de lograr los objetivos de reducir emisiones y vulnerabilidad, el desperdicio alimentario y el consumo de recursos. El Plan establece el límite de las emisiones de los GEI permitido a los sectores que aplique. (La definición de emisiones está contenida en el inciso (n) del artículo 2 de la Ley).

El Plan prioriza en el manejo de las cuencas hidrográficas y costas, por encomienda del artículo 9. Reconoce a la cuenca hidrográfica como una unidad de planificación para el desarrollo de proyectos en los sectores que aplique. Por consiguiente, las estrategias del Plan se alinean a dicho análisis conceptual de integrar la cuenca hidrográfica como unidad de planificación, según corresponda. Este enfoque se consideró en el Plan Integral de Recursos de Aguas de Puerto Rico (PIRA) vigente, elaborado por el DRNA. El PIRA establece que: "La cuenca hidrográfica permite una interpretación más certera e integrada de las actividades naturales o inducidas por el ser humano que ocurren en ese contexto natural lo que, a su vez, permite conocer sus consecuencias en el sistema hídrico. Igualmente, como marco de análisis, la cuenca provee una mejor base para la planificación, conservación, uso y manejo sostenible del agua" (DRNA, 2016)[39].

Además, el P-MARCC es consistente con el PIR de la AEE aprobado por el Negociado de Energía de Puerto Rico, y con la Ley 17-2019, como ordena el artículo 8 de la Ley 33-2019. En vista de que el PIR es un documento de política pública relativamente nuevo, cuya implantación se encuentra en sus primeras fases, el desarrollo del P-MARCC se considera como un proceso continuo de alineación con el PIR actual.

El P-MARCC tiene como contexto otros esfuerzos de planificación gubernamental en áreas sobre las que el cambio climático incide. Se analizaron los datos y resultados de análisis técnicos en cada una de estas instancias. Entre estos esfuerzos se destacan los siguientes:

1. Plan de Uso de Terrenos, Junta de Planificación de Puerto Rico - 2015.
2. Planes estratégicos vigentes de las 18 agencias relacionadas con la Ley.
3. Plan de Desarrollo Económico del DDEC.
4. PIR de la AEE - 2019.
5. Plan Fiscal de la AEE - 2020.
6. *Puerto Rico Disaster Recovery Action Plan* - Departamento de la Vivienda federal.

[39] DRNA. 2016. Plan Integral de Recursos de Agua de Puerto Rico 2016, División de Monitoreo del Plan de Aguas, San Juan, Puerto Rico.

2.2. Marco conceptual de la mitigación, adaptación y resiliencia al cambio climático

2.2.1. Mitigación, adaptación y resiliencia: Criterios estratégicos para la elaboración del Plan

El artículo 9 de la Ley 33-2019 establece las medidas que el P-MARCC debe incluir para lograr sus objetivos. El capítulo 7 detalla las guías que regirán el desarrollo de los cursos de acción del Plan para cada sector. A continuación se resumen a grandes rasgos los marcos de acción sectorial:

Fuentes antropogénicas de emisiones de gases de efecto de invernadero

Reducir los niveles de las emisiones a través de acciones en las áreas de energía, construcción de viviendas e infraestructura, transporte, manejo de residuos y forestación para contribuir a los esfuerzos internacionales para mantener el calentamiento global en menos de 2.7 °F por encima de los niveles preindustriales.

Energía

Impulsar la transformación del modelo energético en uno de generación a base de fuentes renovables y alternas, de la eficiencia y el ahorro energético.

Infraestructuras

Impulsar nuevos modelos de planificación urbana, diseño y construcción de infraestructuras e instalaciones residenciales, turísticas y de otros servicios a base de estándares de conservación de recursos y eficiencia. Para esto deben tenerse en cuenta los análisis de vulnerabilidad a los efectos del cambio climático y los recursos de la infraestructura verde. Además, proteger *in situ* o reubicar de forma planificada la infraestructura que será impactada por el aumento del nivel del mar, las marejadas ciclónicas y otro tipo de marejadas.

Transporte y movilidad

Propiciar las condiciones físicas, tecnológicas y culturales para avanzar hacia un modelo de transporte colectivo, público e intermodal, que impulse a su vez la diversificación y eficiencia energética. Además, impulsar la transformación del parque vehicular de Puerto Rico de vehículos de combustión interna a vehículos híbridos y eléctricos.

Residuos sólidos

Promover y propiciar estrategias de manejo de residuos con las metas de reducir la cantidad de residuos depositados en los vertederos en un 60 %.

Salud

Entender y concienciar sobre los efectos del cambio climático en la salud de la población, y diseñar respuestas para protegerla, principalmente a los grupos desatendidos, desfavorecidos y desventajados.

Agricultura y ganadería

Identificar las vulnerabilidades y fortalezas de los cultivos y las especies agrícolas, y adoptar prácticas y tecnologías eficientes y responsables con los recursos aire, agua y suelo.

Agua

Adoptar acciones, prácticas y tecnologías que permitan un abasto confiable de agua al pueblo de Puerto Rico, a pesar de una posible merma de un 20 % en la lluvia.

Sistemas marinos y zonas costeras

Establecer políticas, sistemas y acciones que corrijan, mitiguen y prevengan de modo sostenible los efectos del cambio climático sobre los recursos marinos y costeros y las comunidades, entre ellos, la acidificación de los océanos, los aumentos en el nivel del mar y su temperatura.

Forestación

Impulsar una gestión de forestación urbana y forestación aguas arriba de los embalses que suplen agua a la AAA.

Turismo

Proteger o reubicar de forma planificada la infraestructura turística para asegurar este importante componente de nuestra economía. Además, proteger las playas de la erosión y contaminación del agua para mantener uno de los principales atractivos turísticos de la isla.

Educación

Aumentar el conocimiento de la población en torno al cambio climático, sus efectos sobre los ecosistemas naturales, la sociedad y la economía, y sobre las acciones para adaptarse y superar esas amenazas.

El Plan enmarca en estas guías los cursos de acción que se desglosan en los capítulos 6 y 7.

2.3. Proceso del desarrollo del Plan

Los miembros del CEACC elaboraron el Plan apoyados por un grupo de trabajo compuesto de 14 especialistas, una planificadora, un coordinador y una redactora. Estos fueron seleccionados por el CEACC a través de un proceso de evaluación estandarizado.

Esto propició, desde los fundamentos del desarrollo del Plan, tener un abanico de enfoques y experiencias distintas; promovió inclusión, diversidad y la participación de conocimientos. Los especialistas desarrollaron secciones del Plan, utilizando diferentes metodologías que se detallan en la sección 2.3.1. Tuvieron como referencia el marco legal y conceptual, la situación actual de las emisiones de GEI y de las manifestaciones del cambio climático, y los datos y análisis que dieron paso al diagnóstico por sectores, entre otra información. Las labores se hicieron bajo la supervisión de los miembros permanentes del CEACC con el apoyo de los miembros *ex officio* y su personal de confianza asignado. Con esa multiplicidad de peritaje y trasfondos profesionales se desarrolló una estructura que logró integrar el cúmulo de información recopilada y producida por los especialistas del CEACC, la planificadora, la redactora, los peritos consultados, las agencias de apoyo técnico y los miembros del CEACC (ver la sección Créditos en el Tomo 2).

Otra iniciativa novel que formó parte del proceso de desarrollo del P-MARCC fue cumplir con el espíritu de la exposición de motivos de la Ley 33-2019, la cual establece que: "[e]se plan de mitigación, adaptación y resiliencia se nutrirá de distintos sectores y de la coordinación y envolvimiento de estos, así como fomentará la participación, incentivación y educación ciudadana, social y económica". El CEACC ha mantenido comunicación constante con diversos grupos, que incluyen a personal de gobierno y al público en general, mediante grupos focales y la participación en actividades informativas durante todo el proceso de desarrollo de este documento, desde consultar a la ciudadanía sobre el borrador del bosquejo del plan hasta someter el borrador del Plan a vistas públicas antes de entregarlo a la legislatura. La sección 2.6 abunda al respecto.

Además, un esquema de ejecución de trabajo rigió los procesos a seguir y permitió evaluar la realización y la integración de las secciones y el montaje del Plan siguiendo el bosquejo aprobado. Este instrumento se usó para evaluar y medir mensualmente el avance del borrador para hacer las recomendaciones de mejoras pertinentes en cada sección del Plan asignada a los especialistas, la planificadora y la redactora. El ejercicio permitió saber: 1) el estatus de los capítulos; 2) qué partes faltaban; 3) las áreas que requerían prioridad para avanzar en su desarrollo; 4) si se necesitaban otros especialistas; y 5) el cumplimiento del plan de trabajo, entre otros aspectos.

2.3.1. Metodología del Plan

Un buen diseño metodológico es crucial para poder tener un diagnóstico e información que permitan identificar vacíos que pueden convertirse en oportunidades de cursos de acción y estrategias a corto, mediano y largo plazo. Así se facilita que las acciones propicien la adaptación y resiliencia de los sectores antes, durante y después de eventos causados por el cambio climático, con un enfoque de mitigación apropiado.

Esto se logró mediante dos acciones metodológicas: 1) recolección de datos y 2) análisis de la información. Estos métodos se desarrollaron a su vez con distintos procesos sistemáticos (ver la Tabla 3) teniendo en cuenta el mejor peritaje y de acuerdo con las necesidades de búsqueda de información más reciente y validada para el desarrollo de los capítulos. De manera general, se diseñó una matriz (Tabla 3) que recoge los tipos de técnicas utilizadas. El detalle de los esfuerzos de participación pública que aportaron a estas metodologías se describe en el anejo 2. La información derivada de estos métodos nutre los capítulos con las referencias citadas.

Tabla 3.

Metodología utilizada en los capítulos del P-MARCC

Métodos de recolección de datos

1. Identificación y revisión de documentos (arbitrados, informes técnicos y materiales audiovisuales, entre otros).
2. Consultas informadas.
3. Grupos focales.
4. Entrevistas.
5. Encuestas.
6. Visita ocular de campo.

Métodos para el análisis de la información

7. Análisis de mapas, datos y geodatos ya publicados.
8. Índice de especialización industrial (o como se conoce en inglés *Location Quotient*) en todos los 78 municipios de Puerto Rico.
9. Perfil de las fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas (FODA).

Capítulos	Técnicas metodológicas utilizadas								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Capítulo 1. Marco legal	x	x							
Capítulo 2. Marco conceptual	x	x							
Capítulo 3. Emisiones de gases de efecto de invernadero y la situación actual de las manifestaciones del cambio climático en Puerto Rico	x						x		
Capítulo 4. Impacto del cambio climático en Puerto Rico	x	x	x	x	x	x	x	x	x
4.1. Energía	x			x					
4.2. Infraestructuras	x	x				x	x		
4.3. Transportes y movilidad	x			x		x	x	x	x
4.4. Residuos sólidos	x						x		
4.5. Salud y bienestar	x		x	x					x
4.6. Agricultura y ganadería	x								
4.7. Agua	x						x		
4.8. Sistemas marinos y zonas costeras	x			x		x	x		
4.9. Ecosistemas terrestres	x			x					
4.10. Forestación	x	x	x	x		x			
4.11. Turismo	x	x	x	x			x		
4.12. Educación	x	x	x	x	x				
4.13. Justicia climática	x	x							x
4.14. Escenarios sobre las proyecciones del aumento del nivel del mar y marejada ciclónica sobre Puerto Rico (2030, 2050, 2100)	x	x							

Capítulo 5. Análisis de diagnósticos de los sectores: FODA	x	x							
Capítulo 6. Cursos de Acción (COA) para la mitigación de fuentes antropogénicas de emisiones de gases invernadero	x	x				x	x		
Capítulo 7. Cursos de Acción (COA) para la adaptación y resiliencia ante el cambio climático por sectores	x	x	x	x	x	x	x	x	x
7.1. Energía	x			x					
7.2. Infraestructuras	x	x				x	x		
7.3. Transportes y movilidad	x			x		x	x	x	x
7.4. Residuos sólidos	x						x		
7.5. Salud y bienestar	x		x	x					x
7.6. Agricultura y ganadería	x								
7.7. Agua	x						x		
7.8. Sistemas marinos y zonas costeras	x			x		x			
7.9. Forestación y ecosistemas terrestres	x	x	x	x		x			
7.10. Turismo	x	x	x	x			x		
7.11. Educación	x	x	x	x	x				
7.12. Justicia climática	x	x							x
Capítulo 8. Adopción del Plan	x	x							
Capítulo 9. Conclusiones y recomendaciones									
anejos	x	x							

2.4. Plan multisectorial y multiconceptual (según especificado en la Ley 33-2019)

La Ley 33-2019 establece las bases para que este sea un **plan multiconceptual** y **multisectorial**. El Plan es **multiconceptual** porque incluye como eje y/o marco teórico/conceptual principal tres conceptos: la mitigación, adaptación y resiliencia. El desarrollo de cada capítulo mantuvo foco sobre estos conceptos –según definidos en el artículo 2 del estatuto– de manera organizada y con un lenguaje que pueda ser entendido por la población general de Puerto Rico sin perder la veracidad y validación científica y técnica (ver la Ilustración 2).

Ilustración 2.

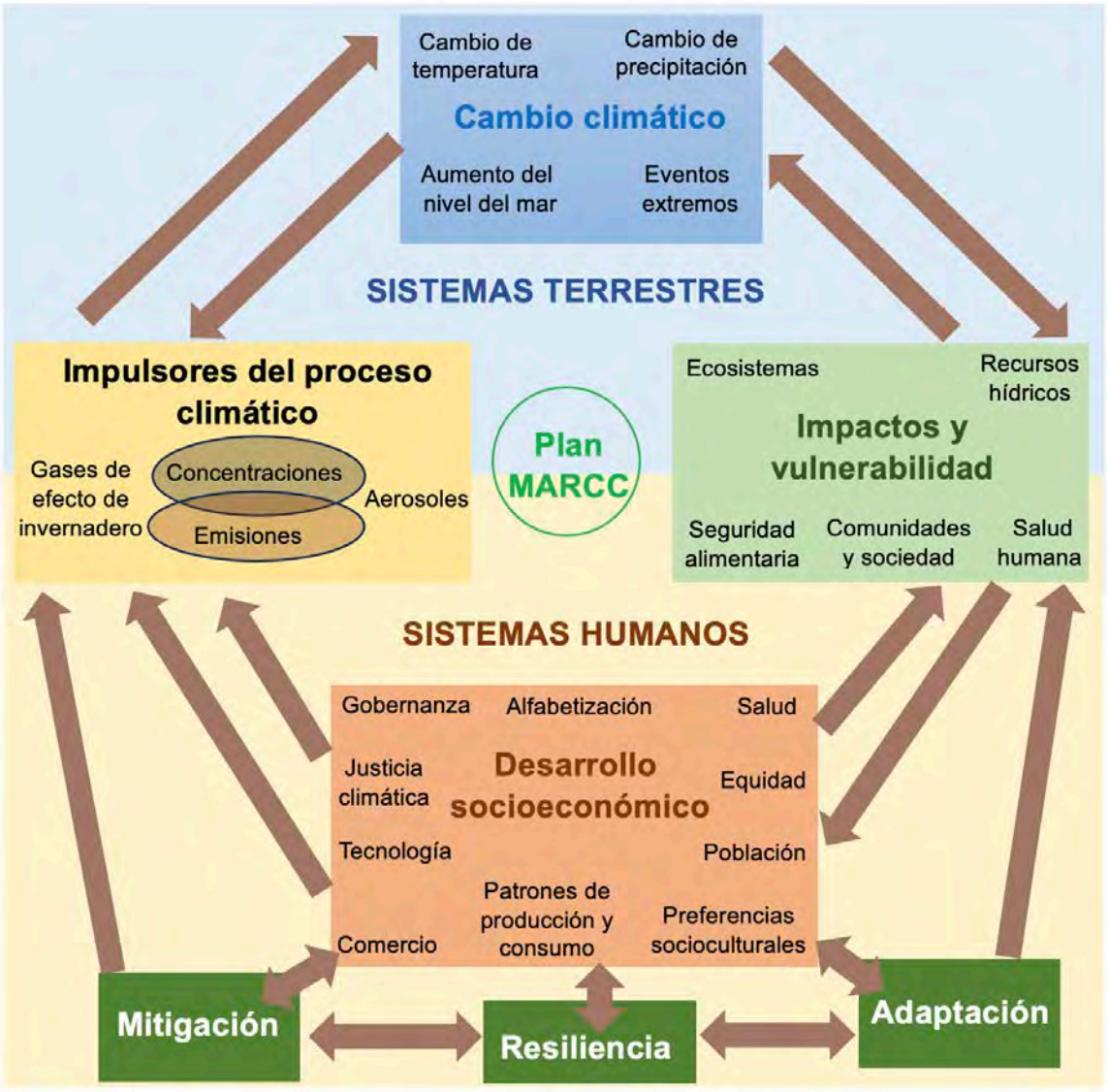
Los conceptos sobre mitigación, adaptación y resiliencia frente al cambio climático definidos por la ley 33-2019



Un enfoque integrado del cambio climático tiene en cuenta la dinámica del ciclo completo de las causas y los efectos interrelacionados en todos los sectores afectados. El P-MARCC reconoce esta visión holística y adopta, modificado para el P-MARCC, el siguiente esquema de marco de evaluación integrado para la consideración de los cambios climáticos antropogénicos según se indica en el Cuarto Informe de Evaluación del IPCC (AR4) (Ilustración 3). La modificación se adapta a Puerto Rico a la luz del P-MARCC, con la integración de la justicia climática en el desarrollo socioeconómico, la resiliencia como otro concepto sumado a la mitigación y adaptación; y reconociendo al P-MARRC como documento de política pública que tiene en cuenta este ciclo completo en todos los sectores que la Ley 33-2019 incluye para el desarrollo de los cursos de acción y su evaluación.

Ilustración 3.

Adaptación a Puerto Rico de marco esquemático de los impulsores antropogénicos, impactos y respuestas al cambio climático



Marco esquemático de los impulsores antropogénicos, impactos y respuestas al cambio climático, del Cuarto Informe de Evaluación del IPCC[40] adaptado y modificado para el P-MARCC. El P-MARCC (como eje central de la Ilustración 3) es el documento de política pública climática de Puerto Rico con diagnósticos y cursos de acción para la mitigación, adaptación y resiliencia ante el cambio climático para los siguientes sectores: energía, infraestructuras, transportes y movilidad, residuos sólidos, salud y bienestar, agricultura y ganadería, agua, sistemas marinos y zonas costeras, ecosistemas terrestres, forestación, turismo y educación.

[40] IPCC, 2007: Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, Pachauri, R.K and Reisinger, A. (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 104 pp. Véase en https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ar4_syr_full_report.pdf

El Plan es a su vez **multisectorial** debido a que la Ley 33-2019 ordena organizarlo por sectores, según se indica al comienzo de esta sección. La evaluación de estos se hizo con diversas perspectivas como son las de gobierno, la empresa privada, las organizaciones sin fines de lucro, comunidades y la academia, entre otras.

Al ser por mandato un plan multisectorial, este documento tomó como guía principal las encomiendas establecidas en la Ley 33-2019 por sector y consideró las políticas públicas vigentes para los diferentes sectores al trazar los cursos de acción con objetivos y estrategias a corto, mediano y largo plazo (véanse los capítulos 6 y 7). Con ello se orienta la ruta a tomar por el país ante las manifestaciones del cambio climático.

2.5. Percepción y divulgación sobre el cambio climático

Conocer cómo la ciudadanía percibe el cambio climático, sus experiencias, exposición al riesgo y el grado de entendimiento con que cuenta permite facilitar su participación sostenida en el diseño, la ejecución, evaluación y efectividad de las políticas climáticas.

Estudios realizados en la última década dan cuenta de que la percepción de la ciudadanía avanza gradualmente en reconocer algunos términos relacionados con el cambio climático (por ejemplo, calentamiento global y aumento del nivel del mar). Asimismo, los estudios revelan que, pese al progreso en ese reconocimiento, la ciudadanía no tiene aún una percepción clara sobre las amenazas concretas que el cambio climático representa para su cotidianidad y para Puerto Rico en general. Esta tendencia se mantuvo aún después de la devastación que los huracanes Irma y María dejaron sobre la isla en el 2017.

Por ejemplo, un estudio del 2018 comisionado por el Programa de Manejo de la Zona Costanera (PMZC) del DRNA encontró que el cambio climático ocupaba la novena posición entre los problemas principales identificados en una encuesta en la que participaron 1,000 personas. Otro estudio del 2021 demostró que, aunque la ciudadanía reconoce los efectos del cambio climático, no necesariamente se inclina a asumir las transformaciones individuales y de país que requieren protegerse y adaptarse a esas manifestaciones. La sección 4.12 provee detalles sobre los hallazgos de estos y otros estudios.

Los resultados de las investigaciones, así como la propia ciudadanía, señalan la necesidad de intensificar los esfuerzos de orientación sobre el cambio climático y sobre las medidas de adaptación y resiliencia que urge tomar. El cambio climático puede parecer a algunas personas una abstracción que no necesariamente relacionan con el calor que les agobia o con las inundaciones que alcanzan sus viviendas por un evento extremo de lluvia. En la medida en que la población entienda cómo los informes y proyecciones científicas sobre asuntos como el calentamiento global y el alza en el nivel del mar tienen consecuencias presentes o inminentes en el país, en su comunidad, su vida y rutinas, podrá reconocer que el cambio climático es una emergencia ante la cual debemos actuar como ciudadanos, sectores y sociedad.

Numerosos informes documentan los esfuerzos de la comunidad científica en Puerto Rico para investigar, documentar, educar y concienciar sobre el cambio climático.

Desde finales de la década de 2000, el PMZC del DRNA convocó a una serie de mesas redondas con expertos de la comunidad científica y académica para compartir datos sobre el estado climático e intercambiar conocimientos con otros sectores, como el privado, organizaciones no gubernamentales y representantes de los medios de comunicación. Agrupado bajo el PRCCC[41], el esfuerzo sumó investigadores, planificadores, arquitectos y profesionales de otras disciplinas con el objetivo de desarrollar recomendaciones dirigidas al gobierno a nivel central y municipal, a las comunidades y al sector privado. El PRCCC produjo al menos tres publicaciones a la fecha. La primera publicación fue *El estado del clima de Puerto Rico: evaluación de la vulnerabilidad socioecológica de Puerto Rico en un clima cambiante (2010-2013)*[42]. Luego publicó el documento *Ruta hacia la resiliencia: guía de estrategias para la adaptación al cambio climático de Puerto Rico* (2015)[43], elaborado en conjunto con el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático de las Naciones Unidas, la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA), el PMZC y la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, entre otros colaboradores. Este P-MARCC cita el informe más reciente, *Estado del clima de Puerto Rico*, publicado en el 2022. Dichas iniciativas y otros esfuerzos generados por la comunidad científica y académica evolucionaron hasta lograr la aprobación de la Ley 33-2019.

Otro ejemplo de los espacios creados por expertos de las agencias estatales y federales y de universidades para generar e intercambiar conocimiento con actores de otros sectores es el Centro Climático del Caribe o *Caribbean Climate Hub*. Este es uno de diez centros regionales de la red de centros climáticos establecida por el Departamento de Agricultura de Estados Unidos[44]. El Centro identifica como sus objetivos: proveer apoyo técnico a la comunidad agropecuaria y forestal en Puerto Rico e Islas Vírgenes para que puedan responder efectivamente a eventos de sequía, estrés por calor e inundaciones, y manejar adecuadamente cambios en el calendario de producción, plagas, enfermedades y demás retos asociados al cambio climático. Otro objetivo es educar y divulgar información científica a dicha comunidad sobre prácticas sostenibles de manejo agrícola para ayudar a incrementar la resiliencia climática en la región del Caribe.

Entre las aportaciones de la academia destacan las de la UPR: en Río Piedras, el Centro Legal de Desarrollo de Resiliencia de la Universidad de Puerto Rico[45] y el Instituto de Investigación y Planificación Costera de Puerto Rico, adscrito a la Escuela Graduada de Planificación; el Recinto de Mayagüez tiene el Programa *Sea Grant*[46], la Oficina de Climatología de Puerto Rico[47] y el Sistema Caribeño de Observación Costera Oceánica

41 Véase: http://www.pr-ccc.org.

42 *Puerto Rico Climate Change Council* (PRCCC). 2013. *Puerto Rico's State of the Climate 2010-2013: Assessing Puerto Rico's Social-Ecological Vulnerabilities in a Changing Climate. Puerto Rico Coastal Zone Management Program, Department of Natural and Environmental Resources, NOAA Office of Ocean and Coastal Resource Management. San Juan, PR.*

43 Véase: https://www.pr-ccc.org/publications/ruta-a-la-resiliencia-guia-de-herramientas-para-la-adaptacion-comunitaria-al-cambio-climatico/.

44 Véase: caribbeanclimatehub.org.

45 Véase: https://derecho.uprrp.edu/uplc-spanish/.

46 Véase: https://seagrantpr.org/.

47 Véase: https://www.uprm.edu/portada/2022/02/04/se-reactiva-oficina-de-climatologia-del-rum/.

(CARICOOS)[48]; en Humacao se desarrolla el proyecto de investigación ITIAS-GEO[49], vertiente del Instituto Transdisciplinario de Investigación-Acción; y las iniciativas del Departamento de Salud Ambiental del Recinto de Ciencias Médicas.

Por su parte, la Universidad Interamericana de Puerto Rico y la Universidad Ana G. Méndez cuentan con programas de bachillerato y maestría en Ciencias Ambientales –y doctorado, en el caso de la última– que amplían las oportunidades de desarrollo de investigaciones y de las nuevas capacidades que necesitaremos para enfrentar el cambio climático[50].

A la par, entidades sin fines de lucro realizan trabajo de educación y acciones, mientras que otras se centran en la abogacía. Algunas han surgido como iniciativas comunitarias. Entre otras, destacan: Para la Naturaleza[51], el Programa del Estuario de la Bahía de San Juan[52], EcoExploratorio: Museo de Ciencias de Puerto Rico y Amnistía Internacional[53].

Por otro lado, numerosas voces de la comunidad científica y de la academia se mantienen activas informando sobre los alcances del cambio climático y las acciones que se deben tomar. Algunos de ellos, hoy miembros del CEACC, han aportado durante años su conocimiento y explicaciones de los informes especializados internacionales, federales o locales a través de columnas periódicas en los medios de prensa de circulación general y otras plataformas[54].

2.5.1. El CEACC en la comunidad

Como parte de los esfuerzos educativos dirigidos al público en general, los miembros permanentes del CEACC ofrecieron, entre el 2020 y el 2023, al menos diez charlas virtuales o presenciales en Ponce, Humacao, Toa Baja, San Juan, Mayagüez y Arecibo. Las actividades cubrieron, entre otros temas, las implicaciones que el cambio climático tiene para Puerto Rico, la importancia de conservar y preservar los recursos del planeta como el agua, y la importancia de educar sobre el cambio climático.

Además, el CEACC participó en dos vistas ejecutivas con miembros de la Comisión Conjunta sobre Mitigación, Adaptación y Resiliencia de la legislatura en febrero y marzo del 2020. En la segunda vista participaron además representantes de agencias gubernamentales con deberes y responsabilidades en la Ley 33-2019. En el 2023, el CEACC envió a la Comisión Conjunta una lista de los recursos naturales ubicados en la Zona Marítimo-Terrestre que deben protegerse y una definición de Zona Marítimo-Terrestre, solicitada por el organismo legislativo.

---

48 Véase: https://www.caricoos.org/?locale=es.
49 Véase: https://www.upr.edu/humacao/itias/itias-geo/#1571402889715-2aeb9bc3-622c.
50 Tellado Domenech, R.N. (6 de diciembre de 2021). Demanda de nuevas profesiones debido al cambio climático. *Primera Hora.*
51 Véase: https://www.paralanaturaleza.org.
52 Véase: https://estuario.org.
53 Véase: https://www.amnistiapr.org/justicia-climatica/
54 Es el caso de los profesores Dr. Rafael Méndez Tejeda, Dra. Maritza Barreto Orta, el ingeniero Carl A. Soderberg y de la meteoróloga Dra. Ada Monzón, como jefa de Meteorología de un departamento de noticias de televisión y de la iniciativa EcoExploratorio.

Entre el 2022 y el 2023, el CEACC participó en otros procesos legislativos, entre ellos, un encuentro con la comisión de Infraestructura, Innovación, Urbanismo y Telecomunicaciones del Senado sobre educación y empoderamiento ante los efectos del cambio climático. También presentó comentarios sobre el borrador del Reglamento Conjunto 2022 ante la consideración de la Junta de Planificación.

Por otro lado, a solicitud del gobernador, el CEACC presentó al país 103 acciones recomendadas para corregir, mitigar y prevenir los efectos del cambio climático en la zona costanera de Puerto Rico. Parte de las recomendaciones publicadas en octubre del 2021 forman parte de la OE-2023-09 citada en la sección 1.1 del P-MARCC. En marzo del 2022, el CEACC recomendó otras 57 acciones en torno al recurso agua.

Otras iniciativas educativas del CEACC se canalizaron a través de medios de comunicación. Es el caso del reportaje especial de la Dra. Ada Monzón sobre las manifestaciones del cambio climático en Puerto Rico, difundido en abril del 2021. El trabajo incluyó múltiples entrevistas a expertos en el tema, quienes acentuaron la necesidad de enfrentar el cambio climático con soluciones que beneficien a las generaciones presentes y futuras. En noviembre de ese año, los miembros del CEACC participaron también en cuatro programas sobre el cambio climático transmitidos por la estación de televisión pública, WIPR.

Además, la tarea de concienciar sobre el cambio climático llevó a que el CEACC estuviera presente en al menos cuatro eventos que abordaron el tema en el 2022. Una de esas actividades la organizó el Instituto Doctrina Social de la Iglesia de la Facultad de Derecho de la Pontificia Universidad Católica de Puerto Rico en Ponce. Otras actividades fueron un panel de política pública durante el evento *2022 LULAC National Convention & Exposition Puerto Rico* y un foro sobre costas organizado por la comisión de Mitigación, Adaptación y Resiliencia al Cambio Climático en la Cámara de Representantes.

Ante estos esfuerzos, y otros sobre los que se abunda en la sección 4.12 del Plan, la sociedad puertorriqueña y los componentes del gobierno dan muestras más claras de saber que el cambio climático es una realidad. Queda lograr que ese reconocimiento se traduzca en acciones para proteger la salud, seguridad y bienestar integral de las generaciones presentes y futuras.

Es de esperar que la participación amplia de sectores y la ciudadanía en general en el desarrollo del P-MARCC, su divulgación y su implantación efectiva, particularmente en el contexto educativo, aumentarán el nivel de conocimiento, empoderamiento y respuesta de la sociedad puertorriqueña ante el cambio climático.

2.6. Participación pública: la participación ciudadana y de los sectores interesados como parte esencial del desarrollo del Plan

La participación pública es la espina dorsal del P-MARCC y del CEACC. Los actores económicos y sociales son elementos sustanciales en la elaboración del Plan, según establece la Ley 33-2019 desde su declaración de propósitos.

Los diferentes sectores de la población son fundamentales para diseñar políticas públicas que converjan con los saberes, creencias y percepción de los grupos sociales, en todas las escalas geográficas[55]. La participación amplia permite sostener los acuerdos y acelerar las acciones que muevan a Puerto Rico hacia reducir emisiones y adaptarse a los riesgos hasta tener un archipiélago resiliente al cambio climático, en condiciones de generar un desarrollo sostenible.

Es crucial tomar en cuenta lo que las comunidades y poblaciones desatendidas, desfavorecidas y desventajadas tienen que aportar en la creación de soluciones para que las respuestas propicien la justicia climática. Esas poblaciones históricamente ajenas a la toma de decisiones son las más vulnerables a los impactos del cambio climático debido a los niveles de pobreza y desigualdad, y en proporción a ellos[56].

Para viabilizar la participación ciudadana en la confección del P-MARCC, el CEACC emitió, el 28 de marzo de 2022, la primera convocatoria a una vista pública para evaluar el borrador del bosquejo del plan. El aviso público sobre el proceso de vistas expuso su propósito: que los sectores pudieran conocer el contenido del borrador del bosquejo del plan, desarrollado conforme a lo que establece la Ley 33-2019 y al peritaje de los miembros del CEACC. En ese proceso de vistas se interesaba recibir comentarios sobre el contenido del bosquejo y su estructura, en armonía con lo establecido en la Ley 33-2019 y con temas de planificación medulares para llevar a cabo con éxito el desarrollo y la implantación del Plan. El borrador del bosquejo para este documento acompañó la convocatoria. Asimismo, el CEACC divulgó el Protocolo de las vistas citadas para el 29 y 30 de abril de 2022, junto a un formulario electrónico para el registro de deponentes.

Las dos sesiones de vistas públicas se llevaron a cabo en formato virtual, debido a las restricciones impuestas por la pandemia de COVID-19. Durante los dos días de vistas, 18 personas depusieron, la mayoría representantes de organizaciones ambientales y comunitarias[57]. En total se recibieron 128 recomendaciones sobre el bosquejo. El oficial examinador a cargo del proceso presentó otras 25 recomendaciones. El CEACC publicó el informe oficial sobre este proceso el 30 de mayo de 2022[58].

Asimismo, hasta abril del 2023, el CEACC había llevado a cabo 13 talleres, grupos focales y reuniones con representantes de las agencias con responsabilidades y deberes en la Ley 33-2019, organizaciones ambientales, la academia, el sector de la salud y el sector privado. (Véase más en el anejo 2).

---

55 Corona-Jiménez, M. A. (2018). El conocimiento, la percepción y disponibilidad para afrontar el Cambio Climático en una población emergente, los migrantes de retorno. *Estudios Sociales*, 28(52), 1-28. https://doi.org/10.24836/es.v28i52.578

56 Bueno, R., Global Development and Environment Institute, Tufts University. (diciembre de 2017). Puerto Rico, los extremos climáticos y la economía de la resiliencia. *Climate Policy Brief*, No 6, pág. 3.

57 Alvarado León, G.E. (29 de abril de 2022). Entidades apoyan el borrador del bosquejo del plan de cambio climático, pero piden enmiendas. *El Nuevo Día*.

58 Véase el informe en la sección Publicaciones del sitio del CEACC en la página digital del DRNA: https://www.drna.pr.gov/wp-content/uploads/2022/06/Informe-del-Oficial-Examinador-—-Vistas-Publicas-CEACC-Borrador-Bosquejo-del-Plan-de-Mitigacion-Adaptacion-y-Resiliencia-al-Cambio-Climatico-6-13-22.pdf

El borrador del P-MARCC se presentó a la ciudadanía el 28 de septiembre del 2023 en una conferencia de prensa donde se anunció la convocatoria a un proceso de vistas públicas a partir del 10 de noviembre de 2023[59] [60] [61] [62] [63] [64]. La presentación se transmitió en directo a través del canal de la UPR-Carolina en la plataforma Facebook[65]. Desde ese día, copias digitales de los dos tomos del P-MARCC estuvieron disponibles al público en la página del DRNA[66]. Copias del documento impreso estuvieron disponibles también en las oficinas regionales de la agencia. El anuncio y la publicación del borrador se hicieron 12 días antes de la fecha establecida para comenzar a recibir comentarios sobre el documento; 43 días previo al comienzo de las vistas públicas. La fecha límite fijada para recibir comentarios fue el 10 de diciembre de 2023. No obstante, ante solicitudes de extender el período para emitir comentarios, la fecha límite se aplazó hasta el 22 de diciembre de 2023.

El CEACC llevó a cabo cinco vistas públicas –en Humacao[67], Ponce[68], Mayagüez[69], Carolina[70] y una en formato virtual[71]–, aun cuando la Ley 33-2009 no lo requiere. Todas las sesiones se transmitieron en vivo a través de la cuenta del DRNA en Facebook. En total, 45 personas se registraron para deponer en las vistas públicas. Además, se recibieron por escrito 26 ponencias de personas y entidades que no se expresaron en las vistas. Esto representó un total de 71 ponencias presentadas por personas y entidades en dicho período. El CEACC evaluó el informe del oficial examinador sobre el proceso de consulta pública en seis reuniones extraordinarias efectuadas desde el viernes 2 de febrero de

[59] Noticentro. (28 de septiembre de 2023). Presentan plan de mitigación y resiliencia ante el cambio climático en Puerto Rico. *WAPA TV.* https://wapa.tv/presentan-plan-de-mitigaci-n-y-resiliencia-ante-el-cambio-clim-tico-en-puerto-rico/video_12c451ff-aa86-5a70-a9a9-1683d42a49d7.html

[60] Notiseis 360. (28 de septiembre de 2023). Puerto Rico abre a la discusión pública estrategias para responder al cambio climático. WIPR TV. https://wipr.pr/puerto-rico-abre-a-la-discusion-publica-estrategias-para-responder-al-cambio-climatico/

[61] Guillama Capella, M. (28 de septiembre de 2023). Comité de Expertos y Asesores presenta su receta para enfrentar el cambio climático en Puerto Rico. *El Nuevo Día.* https://www.elnuevodia.com/ciencia-ambiente/cambio-climatico/notas/comite-de-expertos-y-asesores-presenta-su-receta-para-enfrentar-el-cambio-climatico-en-puerto-rico/

[62] Noticel. (28 de septiembre de 2023). Comité de Expertos sobre Cambio Climático abre a discusión pública borrador con recomendaciones. https://www.noticel.com/ahora/20230928/comite-de-expertos-sobre-cambio-climatico-abre-a-discusion-publica-borrador-con-recomendaciones/

[63] Gracia Mercado, C. (29 de septiembre de 2023). Presentarán plan para Puerto Rico ante cambio climático. *El Vocero.* https://www.elvocero.com/verde/presentar-n-plan-para-puerto-rico-ante-cambio-clim-tico/article_c8289090-5e40-11ee-823b-5f608568785c.html

[64] Santa Porrata, A.I. (29 de septiembre de 2023). Comité de Expertos y Asesores presenta borrador del plan para enfrentar el cambio climático. *Metro*. https://www.metro.pr/noticias/2023/09/29/comite-de-expertos-y-asesores-presenta-borrador-del-plan-para-enfrentar-el-cambio-climatico/

[65] Véase en: https://www.facebook.com/uprcarolinainforma/videos/337901208597481/

[66] Accese: https://www.drna.pr.gov/ceacc/eventos/vistas/#enc-borrador-p-marccpr

[67] Véase en: https://www.facebook.com/drnapr/videos/departamento-de-recursos-naturales-y-ambientales-en-vivo/344333094846998

[68] Véase en: https://www.facebook.com/watch/?v=683284787281963

[69] Véase en: https://www.facebook.com/watch/?v=746773440827231

[70] Véase en: https://www.facebook.com/watch/?v=205606482595972

[71] Véase en: https://www.facebook.com/watch/?v=205606482595972

2024 hasta el lunes 11 de marzo de 2024.

La forma y contenido del P-MARCC se nutre de las recomendaciones recibidas en todas estas actividades.

2.7. Justicia climática

La justicia climática es el concepto de que ningún grupo de personas debe recibir de manera desproporcionada la carga de los impactos climáticos o los costos de la mitigación y adaptación[72]. La justicia climática defiende un desarrollo que respete siempre los derechos humanos con un enfoque que sitúe a las personas en el centro[73].

Este concepto tiene componentes procesales y sustantivos, según lo explican Dolšak y Prakash (2022): El primero se refiere a los procesos a través de los cuales se formulan las políticas climáticas. Los "procesos justos incorporan el consentimiento informado a través de la participación pública inclusiva y brindan acceso a remedios para corregir los daños que las políticas pueden imponer a los ciudadanos". Los autores abordan el aspecto sustantivo como las "inequidades observables en la distribución de los beneficios y costos de la acción y la inacción climáticas"[74].

La justicia climática requiere una visión más amplia de lo que conllevan el cambio climático y sus posibles consecuencias. La justicia climática debe asegurar que las comunidades desatendidas, desfavorecidas y desventajadas reciban fondos suficientes para protegerlas de los efectos del cambio climático, por ejemplo, salvaguardar a las comunidades desatendidas, desfavorecidas y desventajadas cercanas a la costa expuestas al aumento del nivel del mar. Otro ejemplo es implantar medidas para que las comunidades desatendidas, desfavorecidas y desventajadas puedan afrontar las olas de calor mediante la climatización de viviendas, instalación de fuentes de energía renovables y la construcción de refugios de enfriamiento.

---

72 Cooley, H., E. Moore, M. Heberger, and L. Allen (Pacific Institute). 2012. Social Vulnerability to Climate Change in California. California Energy Commission. Publication Number: CEC-500-2012-013.

73 Ayuda en Acción. ¿Qué es la justicia climática?

74 Dolšak, N. y Prakash, A. (mayo, 2022). *Three Faces of Climate Justice. Annual Review of Political Science.* Vol. 25:283-301: https://doi.org/10.1146/annurev-polisci-051120-125514. Los autores utilizan como referencia aquí a Klinsky & Dowlatabadi 2009, Schlosberg & Collins (2014).

CAPÍTULO 3.

Emisiones de gases de efecto de invernadero y la situación actual de las manifestaciones del cambio climático en Puerto Rico

3.1. Escenarios globales: el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático de las Naciones Unidas (IPCC)

El IPCC –como se le conoce por sus siglas en inglés– es un organismo de la Organización de las Naciones Unidas creado para analizar los datos científicos relacionados con el cambio climático. El propósito es que dicho análisis informe la creación de política pública dirigida a adoptar estrategias de mitigación de riesgos y adaptación a los efectos del cambio climático. Sus recomendaciones más recientes están contenidas en las dos primeras entregas del *Sexto informe de evaluación* (AR6) tituladas *Cambio climático 2021: la base de la ciencia física*[75] y *Cambio climático 2022: impactos, adaptación y vulnerabilidad*[76], y en una tercera publicación presentada el 20 de marzo de 2023 titulada *Informe de síntesis*[77]. Sus hallazgos son pertinentes y relevantes para Puerto Rico.

Tabla 4.

Extractos del Informe del IPCC de 2022

Conclusiones destacables
• El IPCC tiene la certeza de que el cambio climático inducido por la actividad humana, incluidos los fenómenos extremos más frecuentes e intensos, causa efectos adversos generalizados, pérdidas y daños a la naturaleza y las personas más allá de la variabilidad natural del clima (*Nivel de confianza: alto*). • Los eventos meteorológicos y climáticos extremos provocan efectos irreversibles a medida que la presión sobre los sistemas naturales y humanos supera sus capacidades de adaptación. (*Nivel de confianza: alto*). • Las personas y los sistemas más vulnerables se perjudican de manera desproporcionada. (*Nivel de confianza: alto*).

[75] IPCC. (2021): https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/#FullReport
[76] IPCC. (2022): https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-ii/
[77] IPCC. (2023): https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-cycle/

Tabla 5.

Conclusiones generales gel Informe del IPCC de 2023

Estado actual y tendencias
El calentamiento observado y sus causas
• Es evidente que las actividades humanas, principalmente las que emiten GEI, han causado el calentamiento global. La temperatura superficial global alcanzó 2 °F DT (1.1 °C), entre 2011 y 2020, por encima del período entre 1850-1900. Las emisiones mundiales de GEI aumentan como consecuencia del uso insostenible de la energía y el cambio en el uso de la tierra, los estilos de vida y las tendencias de consumo y producción en todas las regiones, entre los países, dentro de ellos y entre las personas. (*Nivel de confianza: alto*).
Cambios e impactos observados
• Hay cambios generalizados y rápidos en la atmósfera, el océano, la criosfera y la biosfera. El cambio climático antropogénico incide ya en muchos fenómenos meteorológicos y climáticos extremos en todas las regiones del mundo. Esto provoca impactos adversos generalizados y pérdidas y daños relacionados con la naturaleza y las personas. Las comunidades vulnerables que históricamente han contribuido menos al cambio climático actual se ven afectadas de manera desproporcionada. (*Nivel de confianza: alto*).
Progreso actual en la adaptación, brechas y desafíos
• Hay progresos en la planificación y acción para la adaptación en todos los sectores y regiones, con beneficios documentados y eficacia variable. A pesar del progreso, hay brechas de adaptación y seguirán creciendo al ritmo actual de realización. Se alcanzan límites de adaptación rígidos y blandos en algunos ecosistemas y regiones. También hay mala adaptación en algunos sectores y regiones. El financiamiento global actual para la adaptación es insuficiente y limita las acciones de adaptación, especialmente en los países en desarrollo. (*Nivel de confianza: alto*).
Progreso actual en la mitigación, brechas y desafíos
• Hay un aumento consistente de políticas y leyes que abordan la mitigación desde el *Quinto Informe*. A la vez, las emisiones globales de GEI implícitas en las contribuciones determinadas a nivel nacional (NDC) para el 2030 –anunciadas en octubre del 2021– hacen probable que el calentamiento supere los 2.7 °F DT (1.5 °C) durante el siglo XXI y dificulte limitar el calentamiento por debajo de los 3.6 °F DT (2 °C). Hay brechas entre las emisiones proyectadas con las políticas implantadas y las NDC. El financiamiento no alcanza los niveles necesarios para cumplir con las metas climáticas en todos los sectores y regiones. (*Nivel de confianza: alto*).

Cambio climático futuro, riesgos y respuestas de largo plazo

Cambio climático futuro

- Las emisiones continuas de GEI conducirán a un aumento del calentamiento global, con estimados que alcanzan, en el mejor de los casos, 2.7 °F en el corto plazo en escenarios considerados y rutas modeladas. Cada incremento del calentamiento global intensificará los peligros múltiples y concurrentes. Las reducciones significativas, rápidas y sostenidas de las emisiones de GEI conducirían a una desaceleración perceptible del calentamiento global en aproximadamente dos décadas, y a cambios evidentes en la composición atmosférica en pocos años. (*Nivel de confianza: alto*).

Efectos del cambio climático y riesgos relacionados con el clima

- Para cualquier nivel de calentamiento futuro, muchos riesgos relacionados con el clima son más altos que los evaluados previamente, y los efectos proyectados a largo plazo son hasta varias veces más altos que los observados actualmente (n*ivel de confianza: alto*). Los riesgos y los efectos adversos proyectados y las pérdidas y daños relacionados con el cambio climático aumentan con cada incremento del calentamiento global (n*ivel de confianza: muy alto*). Además, los riesgos climáticos y no climáticos interactuarán cada vez más, creando riesgos compuestos y en cascada que son más complejos y difíciles de manejar (n*ivel de confianza: alto*).

Probabilidad y riesgos de cambios inevitables, irreversibles o abruptos

- Algunos cambios futuros son inevitables o irreversibles, pero se pueden limitar por una reducción significativa, rápida y sostenida de las emisiones mundiales de GEI. La probabilidad de cambios abruptos o irreversibles aumenta con mayores niveles de calentamiento global. De la misma forma, el riesgo de resultados poco probables asociados a los efectos adversos con alto potencial de severidad aumenta con niveles más altos de calentamiento global. (*Nivel de confianza: alto*).

Opciones de adaptación y sus límites en un mundo más cálido

- Las opciones de adaptación que son factibles y efectivas hoy se volverán limitadas y menos efectivas con el aumento del calentamiento global. Con más calentamiento, las pérdidas y los daños aumentarán y los sistemas humanos y naturales alcanzarán los límites de adaptación. La mala adaptación (que puede exacerbar las desigualdades existentes) puede evitarse mediante una planificación flexible, multisectorial, inclusiva y de largo plazo, y la implantación de acciones de adaptación, con beneficios colaterales para muchos sectores y sistemas. (*Nivel de confianza: alto*).

Presupuestos de carbono y cero emisiones netas

- Limitar el calentamiento global causado por las personas requiere neutralidad en carbono (*net zero CO_2 emissions*). Las emisiones de carbono acumuladas hasta el momento de alcanzarlo y el nivel de reducción de emisiones de GEI en esta década determinan en gran medida si el calentamiento puede limitarse a 2.7 °F o 3.6 °F. Las emisiones proyectadas de CO_2 provenientes de la infraestructura existente a base de combustibles fósiles sin más reducción excederían el presupuesto de carbono restante en 2.7 °F (50 %). (*Nivel de confianza: alto*).

Rutas de mitigación

- Todas las vías modeladas a nivel global que limitan el calentamiento a 2.7 °F (>50 %) con ningún rebasamiento o uno limitado implican reducciones rápidas y significativas, y en la mayoría de los casos inmediatas, de las emisiones de GEI en todos los sectores en esta década. Las emisiones netas globales de cero CO_2 se alcanzan a través de esas alternativas a principios de la década de 2050 y principios de la década de 2070, respectivamente. (*Nivel de confianza: alto*).

Rebasamiento: La superación del nivel de calentamiento y la vuelta atrás

- Si el calentamiento supera un nivel específico, como 2.7 °F, podría revertirse gradualmente logrando y manteniendo la neutralidad en emisiones de CO_2. Esto requeriría un esfuerzo adicional para eliminar carbono, en comparación con las rutas alternas en que no se excede el nivel de calentamiento, lo que generaría mayores preocupaciones de viabilidad y sostenibilidad. Rebasar conlleva efectos adversos, algunos irreversibles, y más riesgos para los sistemas humanos y naturales, todos crecientes con la magnitud y duración del rebasamiento. (*Nivel de confianza: alto*).

Respuestas en el corto plazo

Urgencia de una acción climática integrada a corto plazo

- El cambio climático es una amenaza para el bienestar humano y la salud planetaria (*nivel de confianza: muy alto*). Hay una ventana de oportunidad que se cierra rápidamente para asegurar un futuro habitable y sostenible para todos (*nivel de confianza: muy alto*). El desarrollo resiliente al clima integra la adaptación y la mitigación para adelantar el desarrollo sostenible para todos. Este desarrollo es posible mediante una mayor cooperación internacional, incluido un mejor acceso a recursos financieros adecuados, en particular para regiones, sectores y grupos vulnerables, y mediante una gobernanza inclusiva y políticas coordinadas (*nivel de confianza: alto*). Las elecciones y acciones adoptadas en esta década tendrán consecuencias ahora y durante miles de años (*nivel de confianza: alto*).

Los beneficios de la acción a corto plazo

- La mitigación significativa, rápida y sostenida y la puesta en marcha acelerada de acciones de adaptación en esta década reducirían las pérdidas y daños proyectados para los seres humanos y los ecosistemas (*nivel de confianza: muy alto*) y ofrecerían muchos beneficios colaterales, especialmente para la calidad del aire y la salud. Demorar las acciones de mitigación y la adaptación anclaría la infraestructura generadora de mayores emisiones, aumentaría los riesgos de estancar activos y elevar costos, reduciría la viabilidad y aumentaría las pérdidas y los daños. Las acciones a corto plazo implican altas inversiones iniciales y cambios potencialmente disruptivos que pueden reducirse con políticas favorables. (*Nivel de confianza: alto*).

Opciones de mitigación y adaptación a través de los sistemas

- Se necesitan transiciones rápidas y de gran alcance a través de todos los sectores y sistemas para lograr reducciones significativas y sostenidas de emisiones y garantizar un futuro habitable y sostenible para todos. Estas transiciones de sistemas implican una ampliación significativa de la cartera de opciones de mitigación y adaptación. Hay opciones factibles, efectivas y de bajo costo disponibles para mitigar y adaptar, con diferencias entre sistemas y regiones. (Nivel de confianza: alto).

SINERGIAS Y COMPENSACIONES CON EL DESARROLLO SOSTENIBLE

- La acción acelerada y justa para mitigar y adaptarse a los efectos del cambio climático es crítica para el desarrollo sostenible. Las acciones de mitigación y adaptación tienen más sinergias que inconvenientes con los Objetivos de Desarrollo Sostenible; dependen del contexto y el nivel de ejecución. (Nivel de confianza: alto).

EQUIDAD E INCLUSIÓN

- Priorizar la equidad, la justicia climática, la justicia social, la inclusión y los procesos de transición justa puede permitir la adaptación y las acciones ambiciosas de mitigación, así como el desarrollo resiliente al clima. Un mayor apoyo a las regiones y las personas con más vulnerabilidad a los peligros climáticos refuerza los resultados de la adaptación. Integrar la adaptación climática en los programas de protección social mejora la resiliencia. Hay muchas opciones disponibles para reducir el consumo intensivo en emisiones (esto es, el consumo de bienes y productos que generan más huella de carbono), incluso a través de cambios de comportamiento y estilos de vida, con beneficios colaterales para el bienestar de la sociedad. (*Nivel de confianza: alto*).

GOBERNANZA Y POLÍTICAS

- La acción climática efectiva es posible con el compromiso político, la gobernanza multinivel bien alineada, los marcos institucionales, las leyes, las políticas y las estrategias y un mayor acceso a la financiación y la tecnología. Los objetivos claros, la coordinación entre múltiples esferas políticas y los procesos de gobernanza inclusivos facilitan una acción climática efectiva. Los instrumentos regulatorios y económicos pueden facilitar reducciones significativas de emisiones y resiliencia climática si se aplican ampliamente. El desarrollo resiliente al clima se beneficia de aprovechar la diversidad de conocimientos. (*Nivel de confianza: alto*).

FINANZAS, TECNOLOGÍA Y COOPERACIÓN INTERNACIONAL

- Las finanzas, la tecnología y la cooperación internacional son facilitadores fundamentales para acelerar la acción climática. Tanto la financiación de la adaptación como la de mitigación tendrían que multiplicarse por mucho si se quieren alcanzar los objetivos climáticos. Hay capital global suficiente para cerrar las brechas de inversión global, pero existen barreras para redirigir el capital a la acción climática. Mejorar los sistemas de innovación tecnológica es clave para acelerar la adopción generalizada de tecnologías y prácticas. También, es posible mejorar la cooperación internacional a través de múltiples canales. (*Nivel de confianza: alto*).

3.2. Escenarios climáticos en Puerto Rico

El clima en el Caribe estadounidense está cambiando y se proyecta que sea cada vez más variable a medida que los niveles de GEI aumenten en la atmósfera, afirma la *Cuarta evaluación nacional del clima* del Programa de Estados Unidos para la Investigación sobre el Cambio Mundial, en su capítulo 20 sobre esta región[78]. El informe confirma que el alto porcentaje de área costera con respecto al área terrestre total de las islas caribeñas hace a gran parte de los habitantes, la infraestructura y la actividad económica en la región vulnerables al alza en el nivel del mar, el aumento en la frecuencia de lluvias intensas y las inundaciones costeras asociadas, así como a la intrusión de agua salada en los acuíferos. Específicamente sobre Puerto Rico, indica que la infraestructura crítica es vulnerable a los efectos del aumento en el nivel del mar, las marejadas ciclónicas y las inundaciones. Esto incluye tuberías y estaciones de bombeo de agua potable, tuberías y estaciones de bombeo de drenaje, plantas de tratamiento de aguas residuales y plantas generadoras de energía.

Los altos niveles de exposición y sensibilidad a riesgo en la región se complican por la baja capacidad de adaptación, atribuida en parte a los altos costos de mitigar y adaptar en relación con el producto interno bruto de la zona, cuando se compara con las áreas costeras continentales de Estados Unidos, añade el documento. “La limitada escala geográfica y económica de las islas del Caribe significa que las alteraciones causadas por eventos extremos relacionados con el clima, como las sequías y los huracanes, pueden devastar grandes porciones de las economías locales y causar daños extensos a cultivos, suministros de agua, infraestructura y otros recursos y servicios críticos”, sostiene.

El resumen de la *Cuarta evaluación nacional del clima* destaca que la mayoría de los países y territorios del Caribe “comparten la necesidad de evaluar riesgos, permitir acciones a través de escalas y evaluar los cambios en los ecosistemas para informar la toma de decisiones sobre la protección del hábitat en un clima cambiante. Las islas estadounidenses en el Caribe tienen el potencial para mejorar las acciones de adaptación y mitigación al fomentar colaboraciones más sólidas con iniciativas caribeñas sobre el cambio climático y la reducción de riesgos en desastres”.

3.3. Situación actual de las emisiones de gases de efecto de invernadero en Puerto Rico

Puerto Rico tiene una huella de carbono pequeña en relación con las regiones continentales y las naciones desarrolladas, de acuerdo con el informe más reciente del PRCCC sobre el estado del clima. No obstante, el documento indica que el territorio ocupa el puesto 19 entre los 38 países de América Latina y el Caribe con las mayores emisiones de CO_2. El informe acentúa que “mitigar el cambio climático es una responsabilidad compartida, y cuantificar las emisiones de GEI y el almacenamiento de carbono es im-

[78] USGCRP, 2018: *Impactos, Riesgos, y Adaptación en los Estados Unidos: Cuarta Evaluación Nacional del Clima, Volumen II: Informe Resumido* [Reidmiller, D.R., C.W. Avery, D.R. Easterling, K.E. Kunkel, K.L.M. Lewis, T.K. Maycock, B.C. Stewart, and A. Lustig (eds.)]. U.S. Global Change Research Program, Washington, DC, USA, 187 pp. doi: 10.630/NCA4.2018.RiBSpanish.

portante para alcanzar los objetivos y alinear las mejores prácticas de mitigación con las condiciones e incentivos locales, el financiamiento, las regulaciones y las prioridades identificadas a nivel nacional y multinacional".

Puerto Rico careció de un inventario de emisiones de GEI durante casi diez años. Como se indica en el capítulo 1, el informe que se tuvo disponible en los pasados años databa de septiembre del 2014. En cumplimiento con el artículo 10 de la Ley 33-2019, el DRNA, con el apoyo del CEACC, comisionó la realización de un nuevo inventario de GEI, cuyo informe final está accesible desde el 30 de junio del 2023 en la sección Publicaciones del sitio digital del CEACC[79].

El *Informe de referencia de gases de efecto de invernadero* (2014) evaluó las emisiones de GEI y los sumideros antropogénicos –o almacenamientos de carbono– desde el 1990 al 2035[80]. La evaluación estableció entonces que las principales emisiones provenían de la producción de energía, asociadas principalmente a la quema de combustibles para producir electricidad; del transporte, por vía de la combustión de gasolina de vehículos en las carreteras; y de industrias, en general, provenientes de la quema de carbón y gas. El más reciente *Informe del inventario de gases de efecto de invernadero de Puerto Rico 2019 y 2021* revela un aumento leve en las emisiones del sector energético y emisiones de transporte ligeramente más bajas que las del 2014. El análisis evaluó las emisiones de GEI y los sumideros antropogénicos –o almacenamientos de carbono– para los años 2019 y 2021. La evaluación estableció que las principales emisiones provenían del suministro eléctrico (52 % del total de emisiones al 2021), asociado principalmente a la quema de combustibles para producir electricidad; del transporte (26 % del total de emisiones al 2021), por vía de la combustión de gasolina de vehículos en las carreteras; y de la gestión de residuos (8 % del total de emisiones al 2021), en general, provenientes del tratamiento de residuos sólidos y aguas residuales producidos por residencias, comercios, instituciones e industrias.

El informe indica que los niveles de emisión alcanzados en el 2021 representan una reducción del 36 % respecto a los niveles del 2005. Las emisiones sumaron 33.4 millones de toneladas métricas (MTM) de equivalentes de dióxido de carbono (CO_2e) en el 2019 y 34.3 MTM de CO_2e en el 2021. El cálculo se basa en los potencia de calentamiento global (GWP) del *Sexto Informe de Evaluación* (AR6) del IPCC y descuenta el secuestro de emisiones de la silvicultura y otros usos de tierra. Quedan por encontrar otros 7.7 MTM de CO2e para eliminar, de forma que se alcance la meta de la Ley 33-2019 que requiere que, para el 2025, las emisiones de GEI en Puerto Rico no superen los 26.7 MTM.

El estudio proyectó también las tendencias futuras de las emisiones hasta el año 2041, a base de las previsiones claves como cambios demográficos y de crecimiento económico. En ese sentido, se prevé un descenso en las emisiones en los siguientes 20 años, suponiendo que el uso de combustibles y las emisiones disminuirán en proporción a la disminución de la población de Puerto Rico, así como el cierre de la central eléctrica de carbón de AES y su proyectada sustitución por generación eléctrica renovable.

79 Véase en: https://www.drna.pr.gov/noticias/inventario-gei-2019-2021/
80 DRNA, 2014.

El informe explora otras situaciones futuras en las que el descenso de emisiones de GEI se proyectan de manera más drástica. Un escenario de huracanes severos proyecta graves impactos económicos y ambientales, lo que generaría un menor uso de combustible y una pérdida importante de cobertura arbórea que provoca una menor captura de carbono. Asimismo, se proyecta un escenario de descarbonización, que consiste en proyectar la tendencia de emisiones cero al 2050, y al desarrollo intensivo de mecanismos forestales para la captura de carbono. Esta proyección indica que se lograría superar el objetivo inicial de reducción que se establece en el artículo 5 de la Ley 33-2019 en el 2028.

3.4. Manifestaciones del cambio climático en Puerto Rico

El cambio climático en Puerto Rico se manifiesta a través de diversos indicadores. Uno de los más notorios es el aumento de la temperatura. En las últimas décadas, hubo un aumento constante en la temperatura media anual, lo que ha llevado a una mayor frecuencia e intensidad de los eventos de temperatura extrema y a una reducción en las lluvias. Además, el alza de la temperatura a nivel global acelera el derretimiento de los glaciares y aumenta el nivel del mar, produciendo más riesgo local de inundaciones costeras.

Otro efecto de las manifestaciones del cambio climático en Puerto Rico es el aumento en la frecuencia e intensidad de los eventos climáticos extremos, como los huracanes, las tormentas tropicales y sequías. En los últimos años, el país ha sufrido varios huracanes devastadores, como el huracán María en el 2017, que causó grandes daños en la infraestructura y en la agricultura. También ha habido un aumento en la frecuencia de sequías, lo que afecta la disponibilidad de agua.

Asimismo, el cambio climático tiene efectos sobre la biodiversidad de Puerto Rico. Las especies nativas –como los coquíes y los hurones de cola larga– están amenazadas por el cambio climático. La degradación de los ecosistemas, la pérdida de hábitats naturales y la invasión de especies exóticas son otros de los efectos del cambio climático a nivel local. La sección 4.9 abunda al respecto.

Además, el cambio climático repercute en la economía de Puerto Rico. La agricultura, el turismo y la pesca son algunos de los sectores más perjudicados por los cambios acelerados del clima. El aumento de la temperatura y la reducción de las lluvias tienen efectos sobre la producción agrícola (ver la sección 4.6), mientras que los eventos climáticos extremos impactan la infraestructura turística y la pesca.

Los modelos climáticos son herramientas útiles para ayudarnos a comprender cómo puede cambiar el clima en el futuro, pero presentan también ciertos desafíos e incertidumbres. En el caso de Puerto Rico, la incertidumbre en los modelos de cambio climático puede asociarse con la resolución espacial, la disponibilidad de datos históricos, la complejidad del clima local y la variabilidad natural del clima. A pesar de estas incertidumbres, los modelos climáticos siguen siendo una herramienta valiosa para entender cómo podría cambiar el clima en Puerto Rico, ya que proveen unas proyecciones que nos pueden ayudar a planificar medidas de adaptación y mitigación. Sin embargo, es importante reconocer sus limitaciones y considerar múltiples escenarios para tomar de-

cisiones informadas. Se le exhorta a la comunidad científica en Puerto Rico a que siga realizando estudios sobre el uso de modelos climáticos que ayuden a entender mejor cómo el cambio climático se manifiesta en nuestra región.

3.4.1. Temperatura atmosférica superficial

Las temperaturas en Puerto Rico y las Islas Vírgenes aumentaron casi 2 °F desde el 1950, sostiene el primer mensaje clave del *Resumen del estado del clima 2022 para Puerto Rico y las Islas Vírgenes Estadounidenses*. En un escenario de más emisiones, se pronostica un calentamiento sin precedentes en este siglo, incluyendo un aumento en los eventos de calor extremo.

3.4.1.1. Tendencias y proyecciones de las temperaturas atmosféricas

La temperatura promedio anual (normal entre 1991 y 2020) era de 81 °F, de acuerdo con el *Resumen*. El número de días muy calurosos no presentó tendencias en ese período, pero las noches sumamente cálidas estuvieron en general por encima del promedio desde el 2000, añade el documento. La mayor cantidad se produjo a partir del 2015. El informe indica que el efecto isla de calor urbano provocó un aumento de la temperatura en la zona metropolitana de San Juan más rápido que en el resto de las islas.

Se proyecta que el calentamiento rebase los niveles históricos durante este siglo. Las proyecciones más frías para fines de siglo son unos 2 °F más cálidas que el promedio histórico, en un escenario con menos emisiones de GEI. Asimismo, en escenarios de emisiones más altas, las proyecciones más cálidas para fin de siglo son unos 7 °F más cálidas que el año más caluroso en el registro histórico, indica el informe[81].

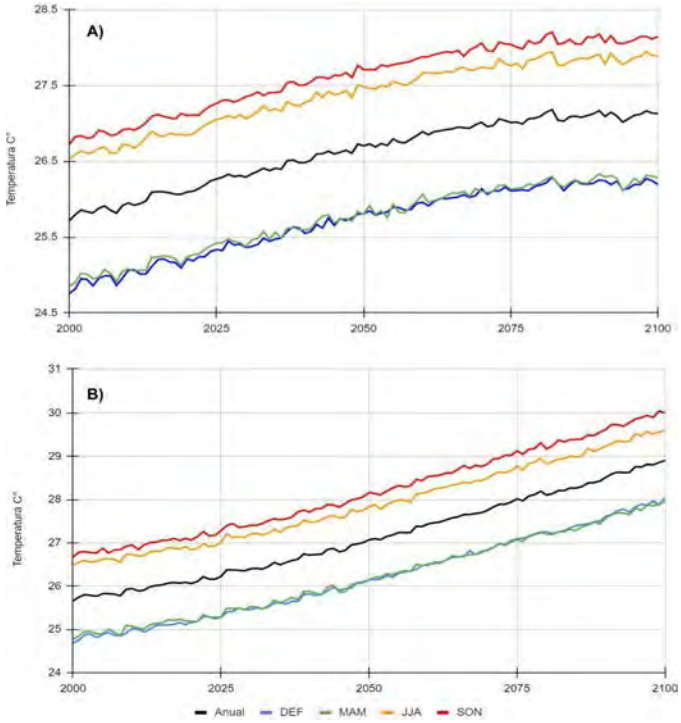
Cuando examinamos dos de los modelos más actualizados basados en las Trayectorias de Concentración Representativas (RCP, por sus siglas en inglés) de temperatura superficial para la región de Puerto Rico (Ilustración 4), podemos observar que en el escenario RCP 4.5 (escenario de estabilización de GEI) se proyecta un aumento de 3.1 °F en la temperatura anual promedio. En el RCP 8.5 (con un nivel muy alto de emisiones de GEI) podría aumentar hasta 5.8 °F. Las proyecciones de aumentos de temperatura promedio para los meses más calurosos (junio a noviembre) serían aún más significativas, con el RCP 8.5 anticipando un aumento de 6 °F. Estos modelos nos muestran que, tanto en escenarios de estabilización como en escenarios de niveles altos de emisiones, se espera que la temperatura promedio en Puerto Rico aumente significativamente cuando la comparamos con las temperaturas que se experimentaron a principios del siglo XXI.

Hay varias limitaciones en las proyecciones de temperatura por el cambio climático en Puerto Rico. En primer lugar, es difícil hacer proyecciones precisas a largo plazo debido a la complejidad del clima y la falta de datos históricos suficientes. Además, las proyecciones se basan en modelos climáticos globales, que pueden no capturar completamente las características regionales y locales del clima de Puerto Rico.

81 State Climate Summaries.

Ilustración 4.

Trayectorias de concentración representativas de temperatura superficial promedio para Puerto Rico



Trayectorias de concentración representativas de temperatura superficial promedio para Puerto Rico por temporada para el RCP 4.5 (A), escenario de estabilización de GEI y el RCP 8.5 (B), escenario de altos niveles de emisiones de GEI. Fuente: CEACC

Otra limitación es la variabilidad natural del clima, que puede enmascarar los efectos del cambio climático en el corto plazo. Por ejemplo, los eventos de El Niño y La Niña pueden producir períodos de clima más cálido o frío. También, las variaciones en la actividad solar pueden afectar el clima. Esto hace que sea difícil determinar qué parte de la variabilidad del clima se debe al cambio climático y qué parte es natural.

Además, existen incertidumbres en las emisiones futuras de GEI, ya que dependen de muchos factores, incluyendo el crecimiento económico, las políticas energéticas y tecnológicas y los cambios en el comportamiento humano. Las proyecciones de temperatura pueden afectarse también por factores como la urbanización y la deforestación, que pueden alterar la radiación solar y la evaporación en una región determinada.

3.4.1.2. Episodios de calor extremo

Los resultados de un estudio publicado en mayo de 2017 muestran que el número de días con temperaturas superiores a 89.6 °F aumentó, y el número de días con una tem-

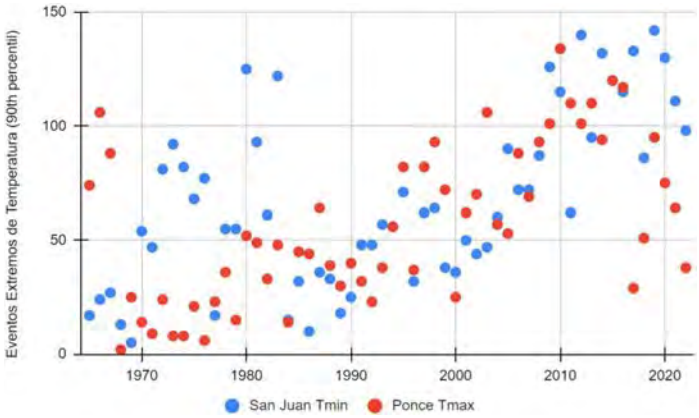
peratura mínima de 59 °F disminuyó[82]. El estudio encontró también que la temperatura media en Puerto Rico aumentó en 36.03 °F en el período analizado y que el aumento de la temperatura mínima es más del doble que el aumento de la temperatura máxima en el período analizado. Uno de los hallazgos más importantes del estudio es que el número de días con temperaturas superiores a 89.6 °F es tres veces más que el número de días con temperaturas inferiores a 59 °F.

En febrero de 2017, otro estudio documentó que "el aumento de la frecuencia y la duración de los episodios de calor intenso están provocando más problemas cardiovasculares y respuestas asmáticas entre la población de San Juan"[83]. El efecto de isla de calor urbano conduce a focos de temperaturas más altas en algunas áreas urbanas. El estudio advirtió que un efecto de isla de calor urbano puede aumentar la mortalidad relacionada con el calor.

Cuando utilizamos los datos más recientes de temperatura diaria para analizar la tendencia en días de calor extremo, podemos observar que tanto las temperaturas máximas como las mínimas muestran incrementos en el número de eventos (Ilustración 5). En San Juan observamos un incremento estadísticamente significativo en el número de eventos extremos de temperatura mínima (78 °F) desde el 1965 hasta el 2022.

Ilustración 5.

Eventos de temperatura mínima y máxima en o por encima del percentil 90 para estaciones ubicadas en San Juan y Ponce



Fuente de la gráfica: CEACC

82 Méndez-Tejeda, R. (2017). *Increase in the number of hot days for decades in Puerto Rico 1950–2014*. *Environment and Natural Resources Research*, 7(3), 16-26.

83 Méndez-Lázaro, P., Muller-Karger, F.E., Otis, D. *et al. A heat vulnerability index to improve urban public health management in San Juan, Puerto Rico*. Int J Biometeorol 62, 709–722 (2018). https://doi.org/10.1007/s00484-017-1319-z. Este estudio identificó que los tramos clasificados como más calientes y vulnerables correspondieron a áreas altamente construidas, incluido el Aeropuerto Internacional Luis Muñoz Marín, puertos marítimos, estacionamientos y áreas residenciales de alta densidad. Según el informe, un conjunto de variables contribuyó a aumentar la vulnerabilidad, incluidas tasas más altas de población que vive sola, personas con discapacidades, personas de edad avanzada y falta de cubierta de seguro médico. Las áreas más frescas correspondieron a paisajes con vegetación y cuerpos de agua urbanos.

Por ejemplo, en la década del 1971-1980, San Juan experimentó un promedio de 70 días con temperatura mínima en o por encima de 78 °F. En la década del 2011-2020 el número de eventos extremos promedió 115.5 días, un incremento de 45.5 días entre los dos períodos. En el caso de Ponce, se observa un incremento en el número de eventos extremos de temperatura máxima (92 °F), en especial durante el período de 1980-2015. La década del 2011-2020 promedió 68 días más de calor extremo que la década del 1971-1980, a pesar de que en los últimos años los eventos de temperatura máxima extrema disminuyeron.

3.4.1.3. Fuegos en bosques y pastizales

La temporada de incendios forestales en Puerto Rico se extiende desde el 2 de febrero hasta el 30 de agosto. La combinación de altas temperaturas, niveles bajos de humedad relativa y el viento son factores que propician su inicio y propagación.

En un análisis sobre el impacto de los incendios forestales en Puerto Rico para el período 2013-2014, se reportó que los factores climatológicos analizados incluyeron precipitación, temperatura, humedad relativa y viento. Los incendios forestales de origen natural suelen originarse por rayos y tormentas eléctricas, especialmente cuando no van acompañados de lluvia. Sin embargo, pueden ser también consecuencia de causas antropogénicas; es decir, incendios ocasionados por la actividad humana en las montañas y bosques, ya sea por no tomar las precauciones necesarias o por accidentes.

El análisis encontró que aproximadamente el 40 % de los incendios forestales se producen en el período nocturno (5:00 p. m. a 8:00 a. m.), cuando las condiciones climáticas no favorecen que ocurran estos fenómenos. En el 2013 hubo un aumento de incendios de 44 % con respecto al 2014, ocasionando una pérdida económica de $13.8 millones[84].

En el 2020 se reportaron 2,077 incendios en Puerto Rico. De estos, 97 ocurrieron en enero, según portavoces del Cuerpo de Bomberos[85]. En enero del 2021 hubo 240 incendios más que el año anterior, para un total de 337 incendios forestales en ese mes. El año terminó con 4,012 siniestros forestales[86]. El 2022 cerró con 2,522 fuegos forestales[87].

---

[84] Méndez-Tejeda, R.; Santos-Corrada, M.; Ortiz-Morales, S. and Claudio-Vargas, O. (2015) *Environmental and Economic Impact of Forest Fires in Puerto Rico 2013-2014*. *Open Journal of Forestry*, 5, 353-363. doi: 10.4236/ojf.2015.54030.

[85] El informe publicó bajo la firma de José M. Martínez Santana, identificado como coordinador de la Brigada Forestal Oeste del Cuerpo de Bomberos de Puerto Rico. (10 de febrero de 2021). https:// laislaoeste.com/responde-a-la-temporada-de-fuegos-forestales/.

[86] Estadística anual, 2021, Negociado del Cuerpo de Bomberos, Departamento de Seguridad Pública. Gobierno de Puerto Rico.

[87] Estadística anual, 2022 (actualizado hasta el 31 de diciembre de 2022). Negociado del Cuerpo de Bomberos, Departamento de Seguridad Pública. Gobierno de Puerto Rico.

3.4.2. Tendencias y proyecciones de precipitación

El segundo mensaje clave del *Resumen del Estado del Clima 2022* indica que los cambios futuros en las precipitaciones totales son inciertos, pero se prevé que los eventos extremos de lluvia aumentarán, causando inundaciones más intensas y frecuentes.

El número más alto de eventos extremos de precipitación de 3 pulgadas se registró a principios de la década del 2010, de acuerdo con el informe citado. Desde mediados de mayo hasta mediados de junio del 2011, Puerto Rico y las Islas Vírgenes tuvieron un período prolongado de lluvias torrenciales e inundaciones no relacionado con un ciclón tropical. Varios lugares recibieron el doble o hasta cuatro veces la lluvia normal durante ese período. Hubo inundaciones considerables en todo Puerto Rico, con la excepción de la región suroeste, según el análisis.

Como veremos más adelante en las secciones 3.4.3.1 y 3.4.3.4, en el 2022, al menos tres sistemas atmosféricos –dos frentes de frío en febrero y marzo, y el huracán Fiona en septiembre– dejaron pérdidas millonarias por inundaciones sin precedentes en Puerto Rico a causa de la cantidad de lluvia. No obstante, la isla estuvo bajo patrones de sequía desde mayo del 2020[88], indican los informes del Monitor de Sequía de Estados Unidos.

En el 2015, el archipiélago experimentó el evento de sequía más severo que afectó a la región del Caribe en 66 años, cuya intensidad se ha relacionado con el cambio climático debido al aumento de las temperaturas atmosféricas observadas, resume el documento[89].

Por otro lado, durante el período de 2018 a 2020, los eventos de sequía ocasionaron reducción en los niveles de los embalses de las zonas este y sur del país, disminución en los niveles de los acuíferos, muerte de ganado y pérdidas en la industria agrícola, de acuerdo con el *Informe sobre los eventos de sequía*[90], preparado por el DRNA. “Esto provocó la necesidad de llevar a cabo racionamiento del servicio de agua a la población, la activación de los comités de sequía y de acuíferos del sur, implantación de un plan de manejo para la cuenca del Río Grande de Loíza, solicitud de dragado del embalse Loíza, solicitud y desarrollo de proyectos que se suplan de agua superficial para la zona sur, actualización del Protocolo para el Manejo de la Sequía en Puerto Rico, distribución de fondos de emergencia entre los agricultores, entre otros”, según el documento oficial.

El primer mensaje clave de la *Cuarta evaluación nacional del clima* referente al Caribe estadounidense es que se proyecta que el incremento en las emisiones globales de carbono reduzca la precipitación pluvial media en esta región para fines de siglo. El capítulo 20 del informe explica que esto limitaría la disponibilidad de agua dulce. Al mismo tiempo, se prevé que aumente la intensidad de los eventos de lluvia extrema, que pueden acrecentar los efectos de las inundaciones de agua dulce. El alza en la variabilidad de los eventos de lluvia y los aumentos de temperatura alterarán la distribución de las zonas de

88 Tolentino Rosario, C. (4 de enero de 2022). Puerto Rico sigue bajo patrones de sequía desde mayo de 2020. *El Nuevo Día.* https://www.elnuevodia.com/noticias/el-tiempo/notas/puerto-rico-sigue-bajo-patrones-de-sequia-desde-mayo-de-2020/.

89 Herrera y Ault, 2017.

90 Véase: https://www.drna.pr.gov/wp-content/uploads/2021/02/Informe-Sequia-2018-2020_Final_Res.pdf.

vida ecológicas y exacerbarán los problemas actuales de gestión, planificación e infraestructura del agua, añade la evaluación.

La correlación entre el aumento en las emisiones de GEI y la reducción de las lluvias se establece también en el informe del PRCCC del 2022. Según sus proyecciones: las disminuciones en el promedio de precipitaciones anuales sobre el Caribe para mediados de siglo (2041-2060) oscilarían del 1 % al 6 % para los respectivos escenarios de menos y más emisiones. Cuando se reduce la escala de los modelos climáticos globales para comprender los posibles escenarios futuros de lluvia en Puerto Rico se confirma un cambio a condiciones más secas a medida que aumentan las concentraciones de GEI, indica el documento. Algunas proyecciones centradas en mediados del siglo indican reducciones superiores al 20 % para muchos lugares del archipiélago[91].

Un análisis realizado por miembros del CEACC nos muestra las tendencias en lluvia anual, por temporada y diaria en Puerto Rico. Este análisis se enfocó en identificar áreas donde la lluvia promedio anual y estacional está en aumento, disminuye o permanece normal. La precipitación total promedio anual y estacional se recuperó de 23 pluviómetros históricos con datos consistentes para el período 1956-2021. Se realizaron pruebas de tendencias de Mann-Kendall en las series de lluvias anuales y estacionales para determinar si alguno de los sitios está experimentando tendencias crecientes o decrecientes.

Luego, los datos de lluvia anual y estacional se separaron en dos climatologías diferentes (1956-1987 y 1988-2021) para examinar los cambios que ocurrieron de un período al siguiente. Después, las dos climatologías diferentes se compararon para identificar las áreas que experimentaron reducciones o aumentos anuales o estacionales de las lluvias.

Se calculó el número de días de lluvias extremas (percentil 90) para cada sitio y se empleó el análisis de tendencias de Mann-Kendall (MK) para determinar si hubo cambios.

Los datos de precipitaciones mensuales y diarias para el período 1956-2021 se obtuvieron del Centro Nacional de Información Ambiental. Se seleccionaron estaciones con al menos el 90 % de los datos; 23 estaciones históricas cumplieron con ese requisito. A partir de los datos mensuales se calculó la precipitación total anual y de los totales de lluvia mensual se calculó la lluvia estacional y se produjeron tres series estacionales: la estación seca (diciembre-marzo), la estación húmeda temprana (abril-julio) y la estación húmeda tardía (agosto-noviembre). Es bien sabido en la literatura que Puerto Rico tiene una estación húmeda y una estación seca muy definidas[92], por lo que en este estudio la estación húmeda se dividió en temprana y tardía para capturar los cambios que podrían haber ocurrido en la anterior o meses luego de la temporada[93].

Los resultados de la prueba de tendencias MK para la precipitación anual sobre Puerto Rico exhibieron estaciones con tendencias crecientes y decrecientes. La mayoría de los sitios (15) mostraron tendencias negativas en la precipitación anual, y cinco de esas

91 Colón, J. A. (2009). *Climatología de Puerto Rico*. University of Puerto Rico Press.
92 Colón, 2009.
93 Hernández y Heslar. 2018.

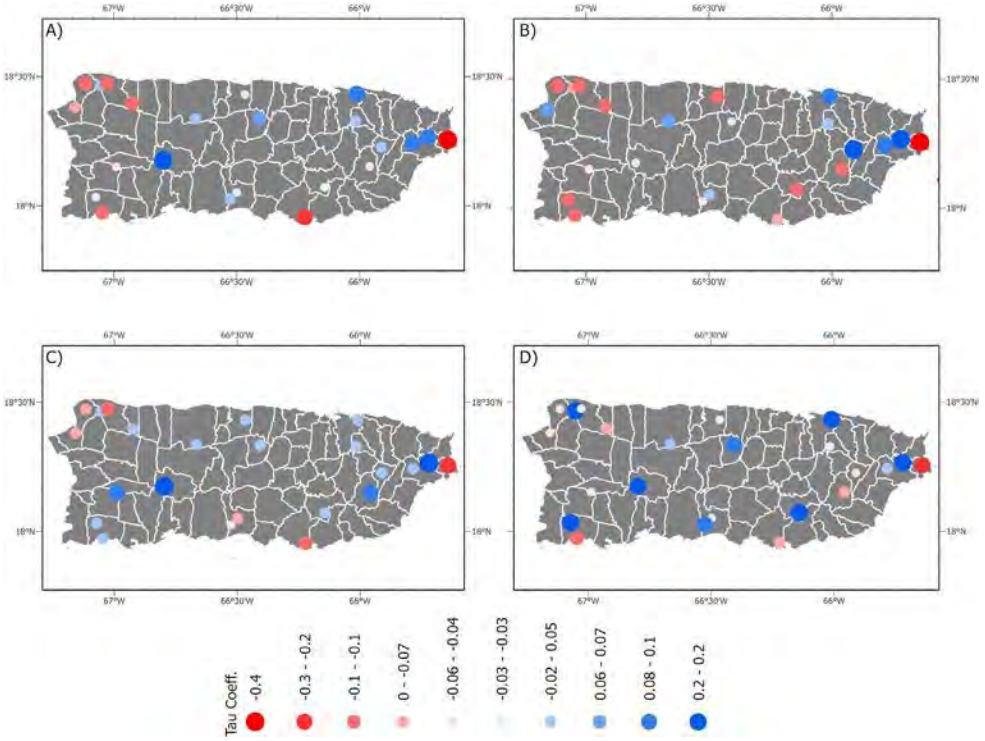
estaciones exhibieron tendencias estadísticamente significativas (Ilustración 6)[94]. De las nueve estaciones con tendencias positivas en precipitación anual, solo una (Adjuntas) tuvo una tendencia estadísticamente significativa.

La región noroeste mostró la mayor cantidad de estaciones con tendencias de reducción en la lluvia anual. Los dos sitios con las tendencias decrecientes más significativas en la lluvia anual se ubicaron en las regiones sureste y noreste. La región este tuvo la mayor cantidad de estaciones con tendencias a más lluvia anual, con tres de los sitios con tendencias estadísticamente significativas ubicados en el noreste y uno en la región interior occidental.

Se encontró que las tendencias de la lluvia de la estación seca eran muy similares a las de la precipitación anual, con 13 estaciones mostrando tendencias a menos lluvia y 10 exhibiendo tendencias a más (Ilustración 6b). Se encontró que tres estaciones tenían tendencias negativas estadísticamente significativas; un sitio tenía tendencias significativamente positivas. El noroeste, suroeste y sureste de Puerto Rico tuvieron varias estaciones con tendencias a menos lluvia en la estación seca. El noreste fue la región con la mayoría de los sitios que mostraron tendencias a más lluvia.

Ilustración 6.

Pruebas de tendencias de Mann-Kendall para lluvia anual (A), temporada seca (B), temporada húmeda temprana (C) y temporada húmeda tardía (D) sobre Puerto Rico



Fuente de la gráfica: CEACC

94 Hernández Ayala, J. J., & Heslar, M. (2019). "Examining the spatiotemporal characteristics of droughts in the Caribbean using the standardized precipitation index (SPI)." *Climate Research*, *78*(2), 103-116. DOI:10.3354/cr01562

La lluvia de la estación seca en Puerto Rico es principalmente el producto de procesos atmosféricos que incluyen frentes fríos y vaguadas de gran altitud que generan un patrón de lluvia de oeste a este[95]. Investigaciones previas sobre el tema encontraron que las lluvias de la estación seca sobre Puerto Rico están fuertemente correlacionadas negativamente con teleconexiones como la NAO y la Oscilación del Ártico (AO)[96], modos de variabilidad que influyen en la frecuencia y extensión de incursiones de frentes fríos en el Caribe[97].

Los resultados para la temporada de lluvia temprana (abril-julio) muestran más estaciones con tendencias positivas (13) en precipitación que aquellas con tendencias decrecientes (10). Cuatro de las estaciones con tendencias crecientes exhibieron aumentos estadísticamente significativos en las lluvias tempranas de la estación húmeda, con los sitios ubicados en las regiones interiores nororiental y occidental (Ilustración 6c). De las 10 estaciones que exhibieron tendencias negativas, solo tres tuvieron precipitaciones decrecientes estadísticamente significativas para la estación seca temprana, con un sitio ubicado en el noroeste, uno en el sureste y otro en la región este.

De manera similar a los patrones identificados en los mapas de tendencias de precipitaciones anuales y de la estación seca, la estación húmeda temprana muestra que las regiones del noroeste, sur y extremo este son las áreas que están experimentando una tendencia de menos lluvia. La temporada de lluvia tardía (agosto-noviembre) exhibió la mayoría de las estaciones (6) con tendencias crecientes estadísticamente significativas en las precipitaciones. En general, diez sitios mostraron tendencias positivas en la lluvia de finales de la estación húmeda; trece sitios mostraron tendencias negativas. De las estaciones con tendencias a menos precipitaciones de finales de la temporada de lluvias, solo dos mostraron tendencias estadísticamente significativas: en las regiones suroeste y extremo este (Ilustración 6d).

Estudios previos que examinaron la variabilidad de las precipitaciones sobre Puerto Rico han demostrado que las lluvias de la estación húmeda están fuertemente correlacionadas con la fase cálida de la Oscilación Multidecadal del Atlántico (AMO)[98]. Las aguas tropicales del Atlántico norte son más cálidas de lo normal durante la fase cálida de la AMO. Esto conduce a mayores tasas de evaporación y mayor contenido de humedad en la región. El mayor contenido de humedad durante las fases más cálidas del AMO se manifiesta luego en mayores acumulaciones de precipitación en Puerto Rico durante los últimos meses de la temporada de lluvias.

Los meses de fin de temporada se caracterizan también por el desarrollo y progresión de olas del este y ciclones tropicales que traen lluvia abundante[99]. Investigaciones recientes sugieren que el número total de ciclones tropicales y grandes huracanes ha aumentado desde mediados de la década de 1960, y que las últimas tres décadas tuvieron el mayor

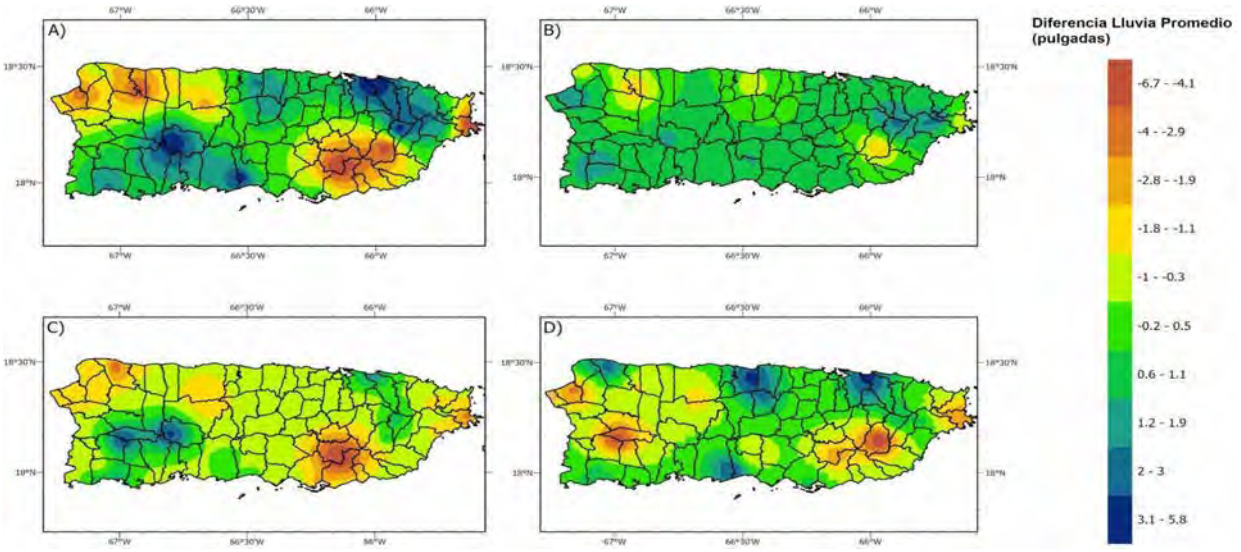
95 Colón, 2009.
96 Hernández, 2018.
97 Torres-Valcárcel, A.R. (2018). "Teleconnections between ENSO and rainfall and drought in Puerto Rico." *Int. J. Climatol.*, 38, e1190-e1204. https://doi.org/10.1002/joc.5444.
98 Hernández, 019.
99 Colón, 2009.

número de tormentas tropicales[100]. Una posible explicación del aumento de la precipitación en esas estaciones durante los últimos meses de la temporada de lluvias es la mayor cantidad de ciclones tropicales que han afectado a Puerto Rico en las últimas décadas.

Cuando se examinan las diferencias entre las climatologías de 1955-1987 y 1988-2021, encontramos que algunas regiones de Puerto Rico han experimentado una disminución o un aumento en la lluvia anual y estacional promedio (Ilustración 7). La precipitación promedio anual ha disminuido en el noroeste y regiones al sureste del extremo oriente (Ilustración 7a). Estos resultados coinciden con los de las pruebas de tendencia MK para lluvias anuales.

Ilustración 7.

Diferencias en las climatologías de lluvia entre el período 1955-1987 y el período 1988- 2021 para las precipitaciones anuales (a), temporada seca (b), temporada lluviosa temprana (c) y temporada lluviosa tardía (d)



Fuente de la gráfica: CEACC

Las regiones de Puerto Rico que experimentaron un aumento en la precipitación anual promedio de una climatología a otra fueron el suroeste y el noreste (Ilustración 7a). De las diferentes estaciones examinadas aquí, la estación seca fue la que reflejó un aumento general moderado en la lluvia para la mayor parte del país (Ilustración 7b), con sectores en el este (El Yunque) exhibiendo el mayor aumento.

Los resultados de la estación seca temprana muestran que la mayor parte de la isla está más seca en la última climatología (1988-2021) en comparación con la anterior (1955-1987), con las regiones noroeste y sureste mostrando las mayores reducciones en la lluvia promedio total (Ilustración 7c). Para la estación seca, solo dos áreas exhibieron

[100] Hernández y Méndez, 2022.

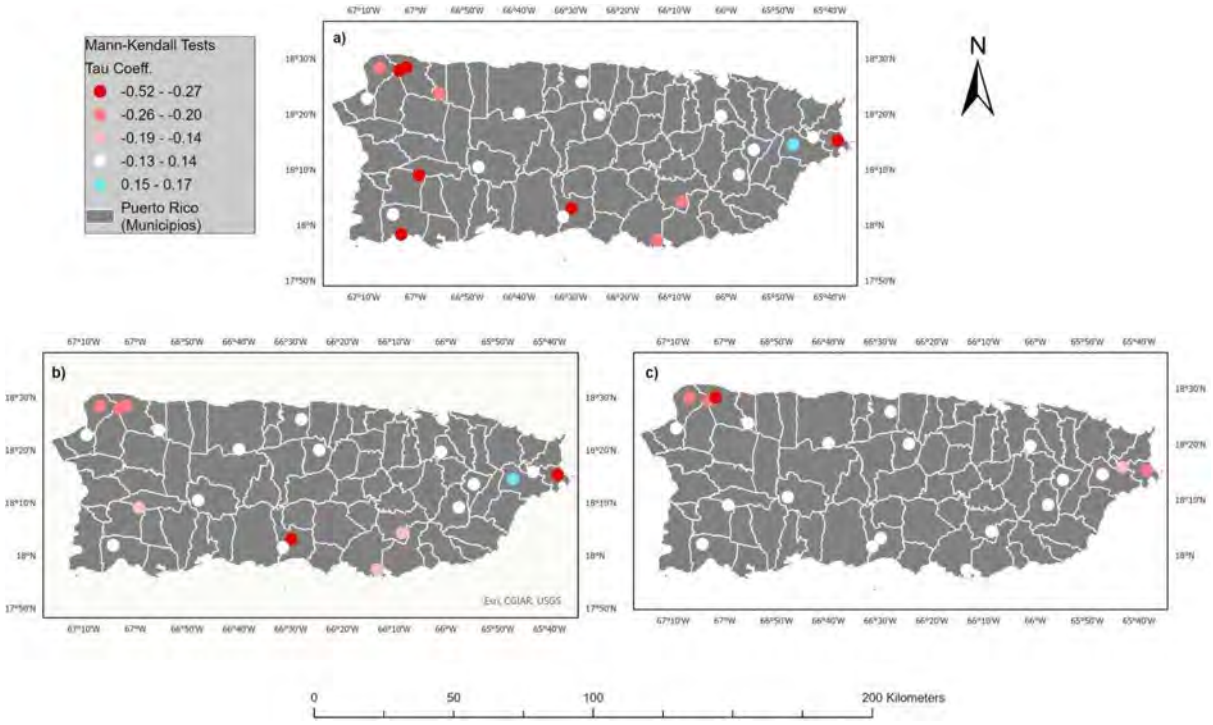
aumentos en la precipitación media, una zona en el interior occidental y un área en el noreste.

Los cambios en las climatologías de lluvia para la estación húmeda tardía muestran áreas con una disminución, un aumento y poco cambio en la precipitación promedio (Ilustración 7d). Una reducción en la precipitación media para la temporada de lluvia tardía de una climatología a la siguiente es evidente en gran parte del oeste y sureste. Tres zonas en la parte norte exhibieron aumentos en la precipitación promedio (Ilustración 7d). Estos resultados muestran los complejos patrones de lluvia que caracterizan a islas como Puerto Rico, donde algunas áreas han experimentado una disminución en la precipitación promedio anual y temporal, mientras que otras zonas han visto un aumento en la precipitación media.

Cuando examinamos tendencias en lluvia diaria, observamos que los eventos extremos de lluvia (percentiles 99, 95 y 90) han disminuido en diferentes sectores (Ilustración 8). Los resultados de tendencias de lluvia diaria en el 10 % (percentil 90) más alto de los eventos muestran una disminución significativa en sectores del oeste y sureste (Ilustración 8a). Gran parte de las estaciones ubicadas en el norte y centro no mostraron cambios en la tendencia. Solo una estación ubicada en el este (El Yunque) mostró un incremento en los eventos de lluvia diaria extrema en o por encima del 10 % más alto (Ilustración 8a).

Ilustración 8.

Resultados de las pruebas de tendencia Mann-Kendall sobre eventos de lluvia diaria en el percentil 99 (a), percentil 95 (b) y percentil 90 (c)



Fuente de la gráfica: CEACC

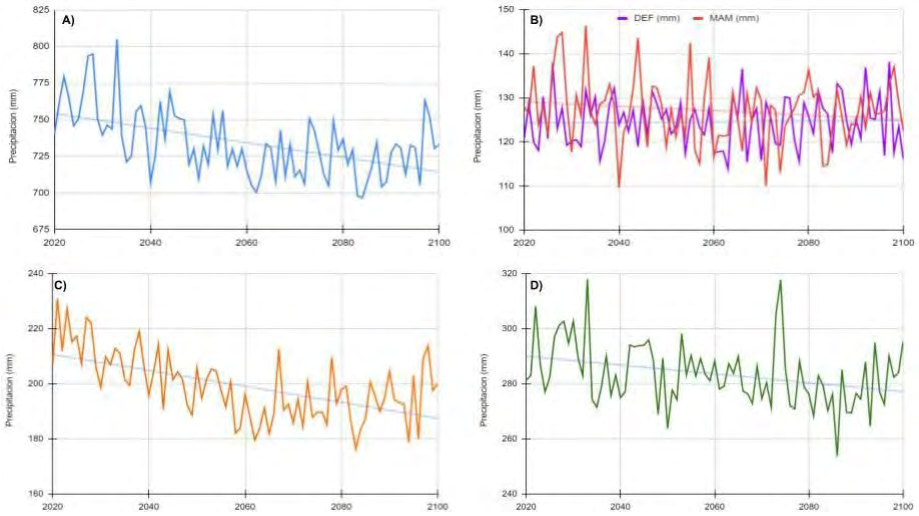
Los resultados de las pruebas de tendencias de lluvia diaria para los eventos dentro o por encima del 5 % (percentil 95) muestran que en la mayoría de las estaciones no hubo cambios significativos (Ilustración 8b). De las estaciones de lluvia diaria analizadas, solo seis mostraron un descenso en el número de eventos de lluvia diaria dentro o por encima del 5 % (Ilustración 8b). Estas estaciones que muestran una tendencia negativa (menos eventos de lluvia extrema) están ubicadas en sectores del oeste y sur de Puerto Rico. Los resultados se asemejan bastante a los presentados anteriormente, en donde vemos una tendencia de menos lluvia en general en el noroeste y el sureste.

A la hora de examinar los eventos de lluvia diaria extrema en o por encima del 1 % más alto (percentil 99), podemos observar nuevamente que la gran mayoría de las estaciones analizadas (18) no mostraron cambios significativos en sus tendencias (Ilustración 8c). Solo cinco de las 23 estaciones examinadas mostraron una disminución significativa en el número de eventos en o por encima del 1 % (Ilustración 8c). Las estaciones que mostraron disminuciones significativas en sus tendencias están ubicadas en el noroeste y extremo este. Los resultados de los análisis de tendencia de lluvia diaria en diferentes topes de extremo muestran que, en general, Puerto Rico no ha experimentado cambios significativos en lluvia extrema diaria, pero también muestran que unos sectores en el oeste, sur y este han visto un descenso en esos eventos de lluvia extrema.

Cuando observamos las proyecciones futuras de lluvia para la región de Puerto Rico (Ilustración 9), podemos apreciar que tanto en la proyección RCP 4.5 como en la RCP 8.5 se prevé una disminución de la lluvia en la región. En cuanto a la proyección de precipitación anual del RCP 4.5, se anticipa una reducción de 7.87 pulgadas (200 mm)

Ilustración 9.

Proyecciones futuras de precipitación total promedio según el escenario RCP 4.5 para lluvia anual (a), temporada seca (b), temporada lluviosa temprana (c) y temporada lluviosa tardía (d)



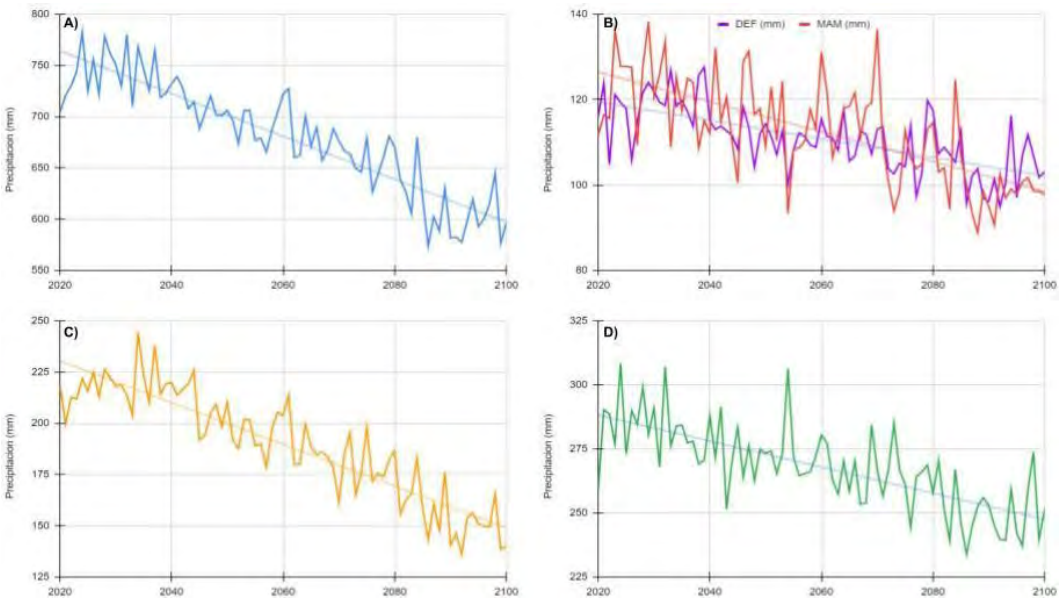
Fuente de la gráfica: CEACC

para la región a finales del siglo XXI. Al examinar las proyecciones de lluvia del RCP 4.5 por temporada, se observa que los meses más secos (diciembre a abril) no prevén una disminución de acumulaciones. Los meses más lluviosos (mayo-noviembre) sí proyectan un descenso significativo. Cabe recalcar que estas son proyecciones generales que no incorporan factores locales que podrían influir en las acumulaciones totales de lluvia.

Al examinar los escenarios de lluvia promedio total en el RCP 8.5 –el escenario más extremo en emisiones de GEI– se observa una disminución significativa en la lluvia acumulada desde el 2020 hasta finales del siglo (Ilustración 10). Se proyecta que la lluvia total promedio anual disminuiría de 29.41 pulgadas (747 mm) en esta década 2021-2030 a 23.62 (600 mm) en la última década (2091-2100) del siglo XXI. Cuando analizamos las proyecciones por temporada, observamos que la época que más sufrirá una disminución en la lluvia total acumulada es la temporada lluviosa temprana (junio-agosto), cuando podrían ocurrir disminuciones de hasta 5.91 pulgadas (150 mm) de precipitación total. Cabe resaltar que las proyecciones para la temporada seca y la temporada lluviosa tardía apuntan también a disminuciones significativas en la lluvia total promedio para la región de Puerto Rico.

Ilustración 10.

Proyecciones futuras de precipitación total promedio, según el escenario RCP 8.5 para lluvia anual (a), temporada seca (b), temporada lluviosa temprana (c) y temporada lluviosa tardía (d)



Fuente de la gráfica: CEACC

La mayoría de los modelos de cambio climático no pueden predecir cambios en la cantidad y distribución de la lluvia por temporada del año. Esto es particularmente relevante para Puerto Rico, donde la cantidad de lluvia varía significativamente de un período a otro. Otra limitación en cuanto a las proyecciones de lluvia extraídas de los modelos climáticos es que estos no capturan la relación compleja entre la lluvia y factores locales

como la topografía, la convección local y la cobertura de la superficie. Se exhorta a la comunidad científica local e internacional a realizar más estudios dirigidos a identificar cómo el cambio climático afectará los patrones de lluvia en Puerto Rico.

3.4.3. Sistemas ciclónicos tropicales, extratropicales, ondas y frentes de frío

3.4.3.1. Huracanes

Los huracanes son una gran amenaza tanto para Puerto Rico como para las Islas Vírgenes Estadounidenses, tal y como afirma el tercer mensaje clave del *Resumen del Clima 2022*. Se prevé que, en un clima más cálido, la cantidad de huracanes más intensos (categorías 3, 4 y 5) aumente y, con ello, las tasas de lluvia asociada a estos sistemas y las alturas de las marejadas ciclónicas al combinarse con el aumento del nivel del mar. Un estudio publicado recientemente concluyó que el número total de ciclones tropicales y huracanes más intensos (categorías 3, 4 y 5) ha aumentado en el océano Atlántico y que los aumentos de temperatura y humedad en la región asociados al cambio climático son uno de los factores más importantes en ese aumento[101]. Otro estudio encontró que el número de ciclones tropicales que se desarrollan en el Atlántico antes de temporada va en aumento, en especial para el mes de mayo[102].

El número de ciclones tropicales que impactaron a Puerto Rico aumentó en un período de 25 años, de 1996 a 2021, resume el informe del PRCCC. El documento establece que probablemente las temperaturas más cálidas de la superficie del mar y una atmósfera con más calor contribuyeron a los grandes totales de lluvia intensa asociada con el huracán María, que es la precipitación promedio más alta observada de un ciclón tropical en los últimos 60 años para el país (los registros dan cuenta de hasta 40 pulgadas de lluvia en Caguas). El 18 de septiembre de 2022, el huracán Fiona (categoría 1) dejó en Ponce récords de lluvia de más de 32 pulgadas en 48 horas (32.14) y 72 horas (32.45), informó el Servicio Nacional de Meteorología en Puerto Rico. El evento causó inundaciones catastróficas en múltiples sectores, desbordamientos de ríos y deslizamientos de tierra[103].

Desde el 1855 hasta el 2019, hubo en promedio 2.9 eventos de ciclones tropicales (depresiones, tormentas y huracanes) por períodos de cinco años dentro de las 200 millas náuticas (321.8 km) de Puerto Rico. Para cada uno de los últimos cinco quinquenios (25 años), la actividad ciclónica tropical fue superior al promedio, indica el informe del PRCCC. En un análisis realizado por especialistas del CEACC se extendió el radio a 270 millas náuticas (500 km) de la isla y se encontró que el promedio de ciclones tropicales era de 3.3 por año para las últimas tres décadas, el promedio más alto cuando se compara con décadas anteriores.

---

[101] Hernández Ayala, J. J., & Méndez-Tejeda, R. (2022). "The Extremely Active 2020 Hurricane Season in the North Atlantic and Its Relation to Climate Variability and Change." *Atmosphere*, *13*(12), 1945. DOI:10.3390/atmos13121945

[102] Hernández Ayala, José J., and Rafael Méndez-Tejeda. "Increasing frequency in off-season tropical cyclones and its relation to climate variability and change." *Weather and Climate Dynamics* 1.2 (2020): 745-757. doi.org/10.5194/wcd-1-745-2020

[103] Véase el informe del SNM sobre el huracán Fiona en: https://www.weather.gov/sju/fiona2022.

Entre 2017 y 2021, las temporadas de huracanes en el Atlántico produjeron 101 sistemas ciclónicos, según el Centro Nacional de Huracanes. De estos, 51 se formaron entre el 2020 (30) y el 2021 (21): 45 se convirtieron en huracán y 22 fueron huracanes mayores (categorías 3, 4 o 5)[104].

Los huracanes Irma y María cambiaron significativamente el paisaje terrestre y marino, incluidos los humedales costeros, los hábitats de coral y las hierbas marinas, como veremos en las secciones 4.8, 4.9 y 4.10. "Es probable que el aumento pronosticado en la frecuencia e intensidad de las tormentas a medida que continúa el cambio climático sea un factor crítico que afecte la forma y función de los sistemas naturales en Puerto Rico", plantea el informe del PRCCC[105].

También, en las secciones 4.8 y 4.14 veremos cómo los aumentos en la intensidad de los ciclones tropicales combinados con el aumento en el nivel del mar elevarán los niveles de la marejada ciclónica y las inundaciones costeras. El Centro Nacional de Huracanes (NHC, por sus siglas en inglés) distingue la marejada ciclónica de la marea de tormenta. Define la primera como un aumento anormal del agua generado por una tormenta por encima de la marea astronómica pronosticada. La segunda es un incremento en el nivel del agua durante una tormenta debido a la combinación de la marejada ciclónica y la marea astronómica[106].

Un informe de la NOAA del 2019 indica que durante el paso del huracán María por Puerto Rico el efecto combinado de la marejada ciclónica y la marea de tormenta produjo niveles máximos de inundación de 6 a 9 pies sobre el nivel del suelo a lo largo de las costas de Humacao, Naguabo y Ceiba[107].

3.4.3.2. Tormentas y depresiones tropicales

Según los registros del NHC, entre el 2017 y el 2021 hubo 49 tormentas tropicales, cinco depresiones tropicales y cuatro tormentas subtropicales. Aunque sus vientos no tienen la capacidad destructiva de los huracanes, las tormentas y depresiones tropicales tienen el potencial de causar estragos por inundaciones y derrumbes.

En septiembre del 1975, el paso de la tormenta tropical Eloise por aguas cercanas a Puerto Rico dejó una estela de destrucción sobre la isla con hasta 33.29 pulgadas de lluvia registradas en Utuado. Fue uno de los eventos de inundación de mayor impacto sobre Puerto Rico: 34 personas murieron, cientos resultaron heridas y más de 6,000 personas tuvieron que ser desalojadas[108].

---

[104] NHC. Temporada de Huracanes en el Atlántico.

[105] Carrubba, L., Burgos Caraballo, S., Engman, A.C., Galindo Estronza, A.M., Gutiérrez-Fonseca, P.E., Llerandi-Román, I., Pérez Reyes, O., Wagner Vega, K.M., Silander, S., Colón, R., Soler-Figueroa, B.M., Grafals, R., Torres-Pérez, J.L., García-Sais, J.R., Meléndez, M., Zayas-Santiago, C., Murry, B., Colón-Merced, R., Lilyestrom, C., Antoun, H. (2022). Working Group 2: Ecology and Biodiversity. State of the Climate Report. Puerto Rico Climate Change Council. Carrubba, L., Díaz, E., Marrero, V., González, M., Leinberger, A., Rodríguez, J.L. [Eds.].

[106] NHC. Introducción a la marejada ciclónica.

[107] NHC. https://www.nhc.noaa.gov/data/tcr/AL152017_Maria.pdf.

[108] EcoExploratorio. Inundaciones en Puerto Rico.

Cinco años antes, en octubre de 1970, una depresión tropical pasó a la historia como un sistema que produjo uno de los eventos más significativos de inundaciones desde que se tienen registros. Según un resumen del sistema publicado en el portal EcoExploratorio, el centro de la baja presión de la depresión tropical #15 no entró directamente sobre Puerto Rico sino que se mantuvo a unas 200 millas de la costa sur. No obstante, sus nubes estuvieron casi estacionarias sobre la isla mientras el fenómeno se movía del mar Caribe al océano Atlántico a través de la República Dominicana. Las lluvias excesivas alcanzaron 41.68 pulgadas en Jayuya entre el 5 y el 10 de octubre. Al menos 17 pulgadas de lluvia cayeron en 24 horas. "Sobre 20 ríos mayores se salieron de su cauce, y hubo destrucción de puentes y carreteras importantes del País. Sobre 600 casas fueron destruidas por las inundaciones o derrumbes. Unas 18 personas perdieron su vida y los daños económicos se estimaron en $68 millones. Gran parte de los daños fueron observados en la agricultura, como en la caña de azúcar y café"[109].

Un estudio muestra que las tormentas tropicales y depresiones que tienden a producir las lluvias más significativas (2 pulgadas (50 mm) promedio para toda la isla) suelen tener centros de sistema (ojo) muy cercanos a Puerto Rico (136.7 millas o menos), ambientes de humedad muy altos (1.77 pulgadas (45 mm) o más) y velocidades de traslación muy lentas (.004 millas (6.4 metros) por segundo o menos)[110]. Otro estudio concluyó que las zonas sureste y centro de Puerto Rico son las que más lluvia suelen acumular tras el paso de las tormentas y depresiones tropicales. Esta lluvia puede ocasionar inundaciones y deslizamientos, pero es también una fuente importante de agua para la isla (15-30 % de la lluvia en algunos sectores)[111]. Un estudio enfocado en las inundaciones asociadas al paso de tormentas tropicales encontró que las zonas del interior este y centro tienden a experimentar las inundaciones más extremas, mientras que las inundaciones en el oeste tienden a ser producto de otros fenómenos atmosféricos[112].

Varios estudios recientes apuntan a que el cambio climático está promoviendo ambientes de humedad óptimos para que la lluvia asociada al paso de ciclones tropicales sea aún más extrema. Un estudio sobre el huracán María concluyó que la precipitación extrema asociada al sistema se alteró por condiciones relacionadas con el cambio climático (altas temperaturas y humedad)[113]. Otro estudio sobre la temporada más activa en el Atlántico –la del 2020– encontró que las tendencias asociadas al cambio climático (aumento de temperatura superficial del océano Atlántico) han generado las condiciones ideales para que los eventos de lluvia extrema como los observados en esa tempo-

[109] Ídem.
[110] Hernández Ayala, J. J., Keellings, D., Waylen, P. R., & Matyas, C. J. (2017). "Extreme floods and their relationship with tropical cyclones in Puerto Rico." *Hydrological Sciences Journal*, *62*(13), 2103-2119.
[111] Hernández Ayala, J. J., & Matyas, C. J. (2018). "Spatial distribution of tropical cyclone rainfall and its contribution to the climatology of Puerto Rico." *Physical Geography*, *39*(1), 1-20.
[112] Hernández Ayala, et al., (2017).
[113] Keellings, D., & Hernández Ayala, J. J. (2019). "Extreme rainfall associated with Hurricane Maria over Puerto Rico and its connections to climate variability and change."*Geophysical Research Letters*, *46*(5), 2964-2973.

rada sean más frecuentes en el futuro[114]. Asimismo, un estudio sobre la lluvia extrema asociada al huracán Fiona apunta hacia el cambio climático como factor importante que generó las condiciones ideales para que en menos de 5 años se diera un evento de igual o mayor magnitud que el huracán María para ciertos sectores de Puerto Rico[115].

3.4.3.3. Marejadas asociadas a sistemas ciclónicos extratropicales

El NHC define los ciclones extratropicales como aquellos sistemas ciclónicos de cualquier intensidad cuya fuente primaria de energía resulta del contraste de temperaturas entre masas de aire cálido y frío[116]. Los ciclones extratropicales se forman en cualquier lugar dentro de las regiones extratropicales de la Tierra (por lo general, entre 30° y 60° de latitud). Ejemplos de ciclón extratropical son las tormentas invernales o frentes fríos que afectan la costa este de Estados Unidos. Su fuerza impulsa marejadas capaces de alcanzar las costas de Puerto Rico, como ocurrió en marzo de 2018[117]. Por generarse en áreas distantes a la isla, los oleajes se desarrollan en períodos largos por lo que arrastran más energía y crean condiciones muy peligrosas en las costas de Puerto Rico, particularmente en la franja norte. Con el debilitamiento de los sistemas de arrecifes de coral, la deforestación de manglares y humedales, y el aumento en el nivel del mar, el riesgo de que estos sistemas perjudiquen más a nuestros recursos y comunidades costeras aumenta.

Las marejadas son uno de los posibles causales de los cambios observados en las playas de Puerto Rico. En el ensayo *Manifiesto de Palmas del Mar ¿Qué hacer si el mar no se queda quieto y las costas siguen cambiando?*[118] se explica que también los sistemas de vientos que determinan el clima de Puerto Rico influyen en el sistema de oleaje, así como la profundidad del agua y la forma de la costa. El documento añade que “los tipos de oleajes que llegan a nuestras costas varían en la altura de las olas, su frecuencia de rompimiento y la energía que disipan en su trayectoria hacia la playa”. Asimismo, tienen distintos efectos sobre la costa.

La suma de la intervención humana a estos factores agrava sus efectos sobre la forma y estabilidad costera. Una investigación científica publicada en el 2020 analizó los impactos de los eventos climáticos extremos sobre las playas de Puerto Rico, particularmente en el sector turístico de Ocean Park, en San Juan. El estudio concluyó que una serie de

---

[114] Reed, K. A., Wehner, M. F., & Zarzycki, C. M. (2022). “Attribution of 2020 hurricane season extreme rainfall to human-induced climate change.” *Nature Communications*, *13*(1), 1905.

[115] Ramos Scharrón, C. E., Hernández Ayala, J. J., Arima, E. Y., & Russell, F. (2023). “Preliminary Analyses of the Hydro-Meteorological Characteristics of Hurricane Fiona in Puerto Rico.” *Hydrology*, *10*(2).

[116] Hernández Ayala, J. J., & Matyas, C. J. (2016). “Tropical cyclone rainfall over Puerto Rico and its relations to environmental and storm-specific factors.” *International Journal of Climatology*, *36*(5), 2223-2237.

[117] Fritz, A. (5 de marzo de 2018). The nor’easter was so big that its waves reached Puerto Rico — and the result was not good. The Washington Post.

[118] Ariel E. Lugo, Maritza Barreto Orta, Miguel Canals Silander, Ruperto Chaparro, María Santos Corrada, Ernesto Díaz, Juan G. González Lagoa, Edwin A. Hernández Delgado y José Molinelli. Acta Científica, *29*(1-3):92-108, 2019.

estos eventos ocurridos luego del huracán María combinados con el aumento en el nivel del mar y con décadas de mala planificación de la infraestructura costera empeoraron la erosión en la zona y afectaron severamente la infraestructura residencial, comercial y turística, así como las actividades recreativas que se realizan allí[119].

3.4.3.4. Frentes fríos y marejadas asociadas

Los frentes fríos son fenómenos meteorológicos comunes en Puerto Rico durante los meses secos (diciembre a abril). Estos sistemas frontales se caracterizan por un cambio brusco en la temperatura del aire y suelen estar asociados con vientos fuertes y lluvias moderadas o intensas, dependiendo de las condiciones. Los frentes fríos pueden generar condiciones peligrosas en la isla, como inundaciones repentinas y deslizamientos de tierra. Además, pueden afectar la navegación y la pesca en alta mar, ya que son capaces de generar eventos significativos de marejadas que impactan con mucha frecuencia las costas norte y oeste.

Los sistemas de frentes fríos han causado daños significativos en Puerto Rico por lluvias y marejadas. Entre el 4 y 6 de febrero de 2022 un frente de frío dejó hasta 16 pulgadas de lluvia, 12 de ellas en un período de 24 horas, informó el SNM. El 8 de marzo, el gobernador Pedro Pierluisi solicitó al presidente Joe Biden que emitiera una declaración de desastre mayor para al menos siete de los pueblos del norte más afectados, donde el costo de los daños se estimó en $2,338,408[120].

Los frentes fríos se consideran eventos extremos cuyas marejadas tienen impactos severos, como la erosión costera, y ponen en riesgo la infraestructura y la actividad económica. En marzo del 2018, Puerto Rico registró un récord de altura de marejada en la hora pico. Las olas rompientes sobrepasaron los 25 pies y posiblemente alcanzaron los 30 pies debido a un sistema frontal en dirección hacia el sur, que ocasionó el cambio de dirección del oeste al noroeste de vientos de 10 a 20 millas por hora, según datos del SNM citados en informes de prensa[121]. Los informes indican que la ola más alta registrada en un evento diez años atrás alcanzó los 16 pies en una boya ubicada a 160 millas al norte de San Juan.

La frecuencia e intensidad de estos frentes fríos podrían alterarse por el efecto que el cambio climático está teniendo en el vórtice polar. Debido al cambio climático, la temperatura en el Ártico se calienta a un ritmo más rápido que en otras partes del planeta. Esto significa que la diferencia de temperatura entre el aire frío en el polo y el aire cálido del sur disminuye, lo que debilita el vórtice polar. Como resultado, el vórtice polar se está volviendo más inestable y puede causar que ondas que separan el aire frío y el aire cálido

---

[119] Rafael Méndez-Tejeda, Kevián Augusto Pérez-Valentín, and Maritza Barreto-Orta, “Impact of Extreme Weather Events on the Beaches of Puerto Rico: The Case of Ocean Park, San Juan”. *American Journal of Marine Science*, vol. 8, no. 1 (2020): 1-5. doi: 10.12691/marine-8-1-1.

[120] B.J. Figueroa Rosa. (8 de marzo de 2022.) Pierluisi pide a Biden declaración de desastre mayor para siete pueblos afectados por lluvias. Primera Hora.

[121] Sostre Vicario, K.D. (5 de marzo de 2018). La “histórica marejada” batió récord de altura en la isla. *El Nuevo Día.*

penetren más al sur con el potencial de ocasionar sistemas frontales fuertes que podrían producir eventos de marejada y de lluvias significativos.

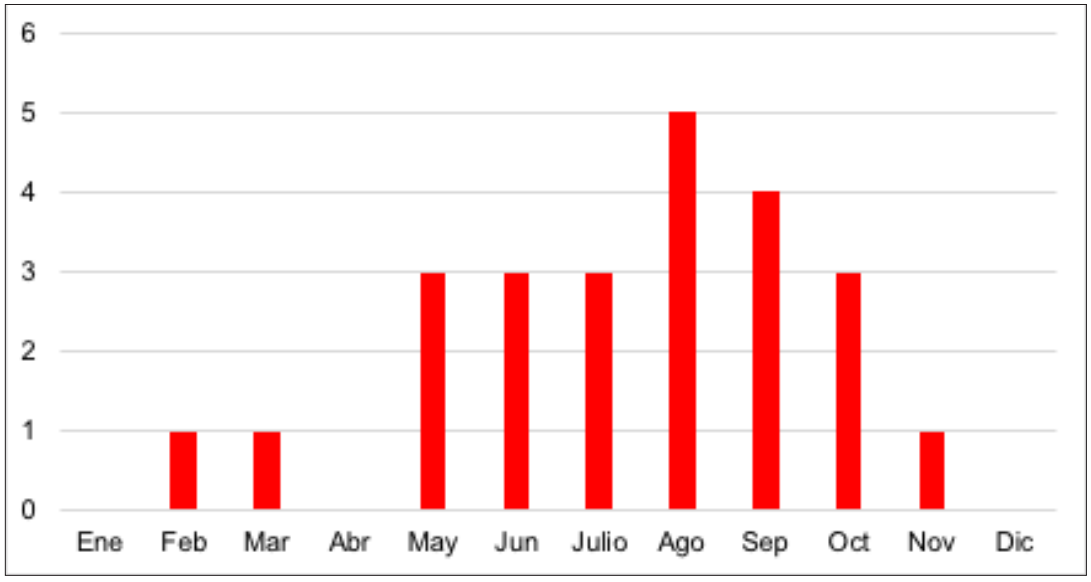
3.4.3.5. Tornados

A pesar de no ser comunes en la región, los tornados en Puerto Rico representan eventos meteorológicos que pueden causar impactos significativos en la isla. Estos torbellinos de viento presentan un riesgo impredecible para la infraestructura y las comunidades locales. Aunque generalmente de menor escala que los tornados observados en otras partes del mundo, su potencial destructivo no debe subestimarse.

Los tornados en Puerto Rico pueden formarse en cualquier momento del año, pero tienden a ser más comunes durante la temporada de huracanes, que va desde junio hasta noviembre. Durante este período, las condiciones atmosféricas pueden volverse propicias para la formación de tormentas eléctricas intensas, las cuales son un factor clave en la generación de tornados. Según datos de la NOAA, en Puerto Rico se han reportado y confirmado 24 tornados. La gran mayoría de estos se formaron en los meses de mayo a octubre, siendo agosto y septiembre los meses con la mayor cantidad de tornados reportados (Ilustración 11).

Ilustración 11.

Tornados en Puerto Rico por mes

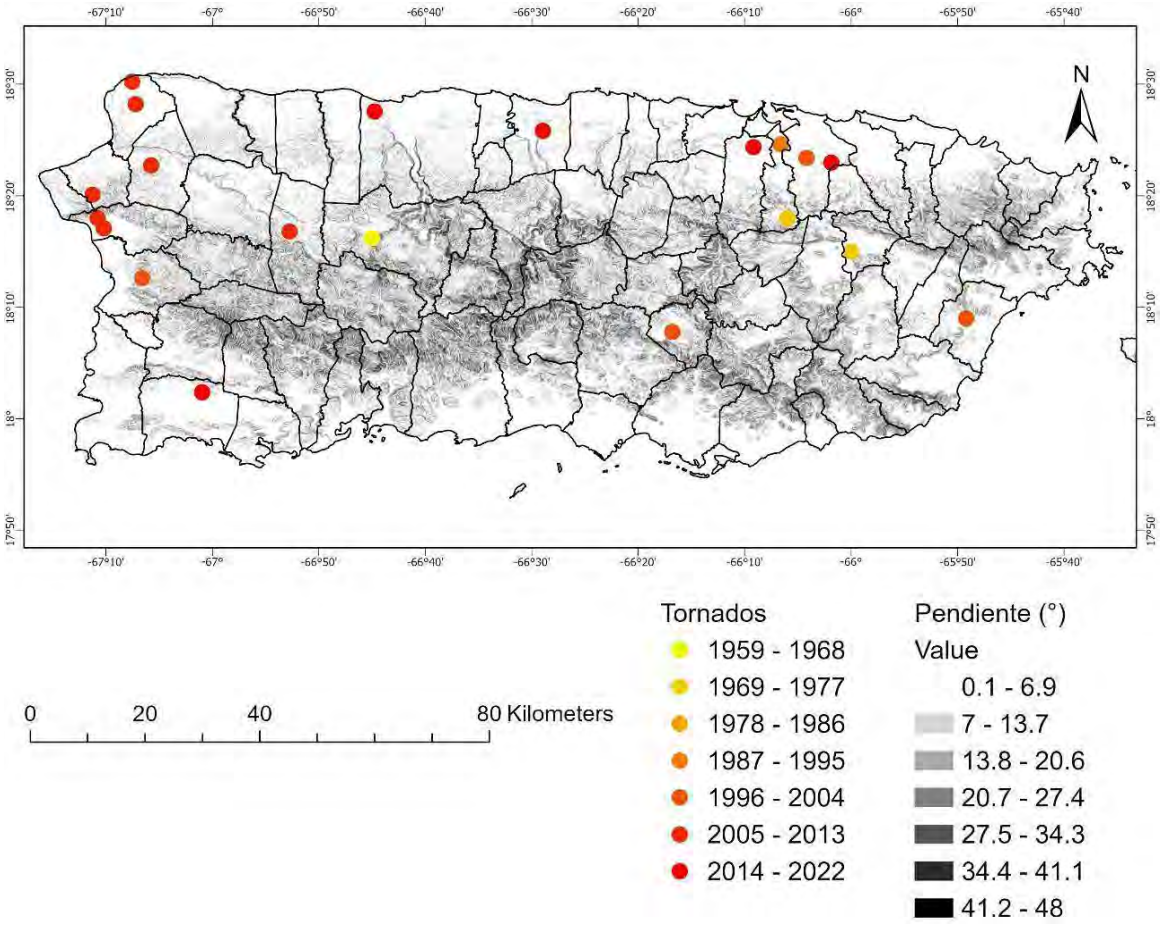


Cantidad total de tornados confirmados por mes del año. Fuente: NOAA / Servicio Nacional de Meteorología (https://www.spc.noaa.gov/gis/svrgis/)

Los tornados en Puerto Rico suelen formarse en asociación con sistemas atmosféricos como líneas de tormentas, células de tormenta individuales y bandas de lluvia asociadas a sistemas tropicales, como los huracanes o las tormentas tropicales. Las áreas y las llanuras costeras son más propensas a la formación de tornados debido a las condiciones topográficas y la interacción entre los vientos alisios y las condiciones atmosféricas cambiantes. Según los datos de la NOAA, desde el 1950 hasta el 2022 en la isla se han formado 24 tornados. La mayoría de estos tornados ocurrieron en la zona oeste, en especial en los municipios de Aguadilla, Aguada, Moca, Añasco y Mayagüez (Ilustración 12). Cabe recalcar que la región que más tornados ha experimentado en las décadas más recientes es el noroeste de la isla. En esta región es donde interactúan los vientos del este con la brisa marina del oeste, dos masas de aire con diferentes densidades que pueden generar las condiciones ideales para la formación de vórtices que pueden desarrollarse en tornados. Hasta agosto del 2023, se habían reportado tres tornados en esa región de la isla.

Ilustración 12.

Tornados documentados en Puerto Rico (1950-2022)



Cantidad de tornados documentados por la NOAA entre 1950 y 2022. La mayoría ocurrieron en la zona oeste. Fuente: NOAA / Servicio Nacional de Meteorología (https://www.spc.noaa.gov/gis/svrgis/)

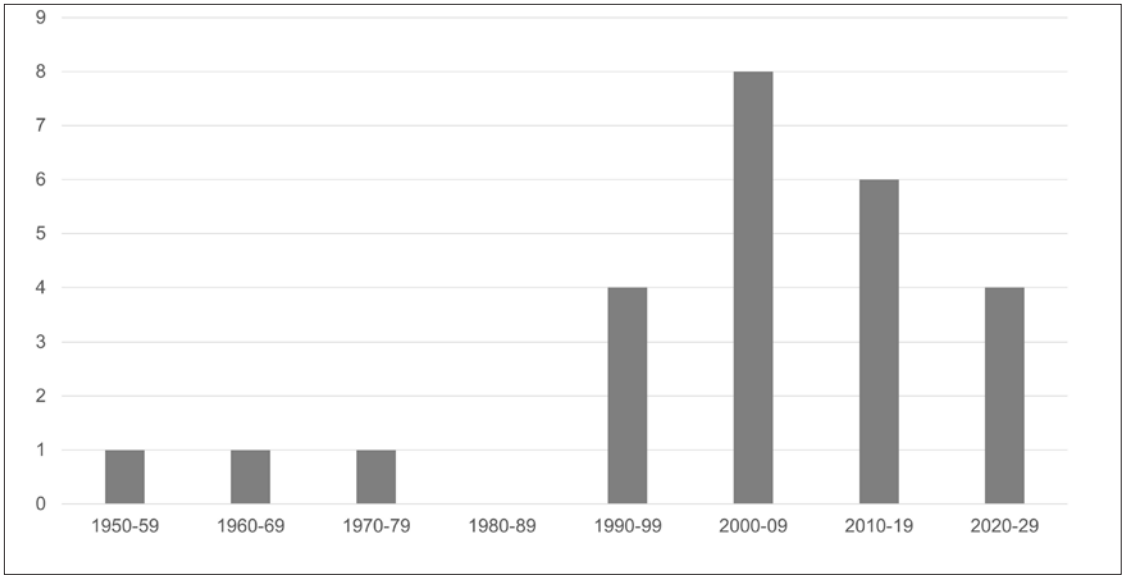
Es importante destacar que los tornados en Puerto Rico tienden a ser de menor intensidad en comparación con los tornados más devastadores que ocurren en otras regiones, como en las grandes planicies del medioeste y el sureste de los Estados Unidos. Sin embargo, pueden causar daños significativos en las áreas afectadas y las autoridades y la población en general deben tomarlos en serio.

En cuanto a tendencias en el número de tornados, según los datos de la NOAA, Puerto Rico ha experimentado un incremento en la cantidad total en las últimas dos décadas (Ilustración 13). En lo que va de la década 2020-2029, se han confirmado cuatro tornados (uno en Arecibo, uno en Aguada y dos en Aguadilla), por lo que podemos esperar que esta década será de las más activas en la historia de Puerto Rico.

Es importante recalcar que todavía no existe un consenso científico en cuanto a cómo el cambio climático afectará la frecuencia y magnitud de los tornados en Puerto Rico, pero los datos apuntan a un incremento en su frecuencia en las últimas décadas, por lo que debemos seguir estudiando su evolución para confirmar o descartar si existe una relación con el calentamiento global.

Ilustración 13.

Tornados por décadas en Puerto Rico



Cantidad total de tornados por década que fueron reportados y confirmados por el Servicio Nacional de Meteorología. Fuente: NOAA / Servicio Nacional de Meteorología (https://www.spc.noaa.gov/gis/svrgis/)

3.4.4. Aumento del nivel del mar

Desde el 1962, el nivel del mar aumentó 0.7 pulgadas por década en San Juan, Puerto Rico. La tasa es igual a la del aumento global del nivel del mar durante la segunda mitad del siglo xx, indica el cuarto mensaje clave del *Resumen del clima 2022*. Según el informe del PRCCC del 2022, se proyecta que el nivel global del mar podría aumentar en el

rango de 1 a 8 pies a partir de los escenarios de emisiones bajas, intermedias o altas y se anticipan aumentos similares para Puerto Rico y las Islas Vírgenes. La sección 4.14 abunda sobre las proyecciones.

El aumento del nivel del mar presenta amenazas generalizadas y continuas tanto a los ambientes naturales como a la infraestructura y servicios en las comunidades costeras. Además, el aumento del nivel del mar causa la intrusión de agua salada en los humedales costeros y acuíferos[122]. La *Cuarta evaluación nacional del clima* añade que "el aumento en el nivel del mar, combinado con la acción de olas más fuertes y oleadas de tormenta más altas, empeorarán las inundaciones costeras y aumentarán la erosión costera, lo que seguramente provocará una reducción en las áreas de playa, pérdida de barreras contra oleajes de tormenta, menos turismo y efectos negativos en el modo de vida y el bienestar". Este escenario puede empeorar si se suma la situación de hundimiento del terreno como, por ejemplo, aquellos asociados con eventos co-sísmicos como el ocurrido en varias áreas de la costa de Puerto Rico luego del terremoto de magnitud 6.4 con epicentro en el suroeste, ocurrido el 7 de enero del 2020[123].

Observaciones de mareógrafos en Isla Magueyes en La Parguera, Lajas, desde la década de 1950, y La Puntilla en la bahía de San Juan, desde la década de 1960, muestran una tendencia actual relativa de elevación del nivel del mar de .07 pulgadas (1.89 mm)$^{año-1}$ en la Isla Magueyes y .08 pulgadas (2.10 mm) $^{año-1}$ en San Juan, resume el Grupo de Trabajo 1 del PRCCC. Desde 2010, el nivel del mar en la Isla Magueyes y San Juan aumentó aproximadamente .17 pulgadas (4.4 mm) $^{año-1}$ y .07 pulgadas (1.8 mm) $^{año-1}$, respectivamente. Los conjuntos de datos a largo plazo de ambos mareógrafos muestran una aceleración creciente en el aumento del nivel del mar de aproximadamente ~ 11.81 pulgadas (0.3 m). La sección 4.14 ofrece detalles de los escenarios sobre las proyecciones de aumento del nivel del mar en Puerto Rico para las próximas décadas escogidos por el CEACC para la preparación del P-MARCC.

3.4.5. Aumento de acidez de los océanos

La superficie oceánica actual es 12 % más ácida que en 1988, indica el informe del PRCCC del 2022. Los niveles de pH[124] del agua de mar superficial de 1988 a 2020 disminuyeron a una tasa de -0.017 dentro de la Zona Económica Exclusiva de Puerto Rico. El análisis de datos de temperatura de la superficie del mar por teledetección de 1992 a 2020 en océano abierto frente al suroeste de Puerto Rico arrojó una tasa de calentamiento[125] que duplicó la tasa global y resultó en una temperatura oceánica superficial 2.3 % más alta que en 1992[126].

---

[122] Carrubba, L., et al., (2022)

[123] Kevián Pérez-Valentín, Maritza Barreto-Orta, Aurelio Castro, Alfredo Montañez-Acuña, and Nahir Cabrera-Valentín. (2020). "Revealing geomorphic changes after the occurrence of a seismic event on the South Coast of Puerto Rico". *Shore and Beach.* Vol. 89, No 1, Winter 2021. http://doi.org/10.34237/1008914

[124] pH es una medida del nivel de acidez o alcalinidad en el agua. A menor nivel de pH, mayor acidez. Para conocer más véase: https://www.usgs.gov/special-topics/water-science-school/science/ph-and- water.

[125] La tasa de calentamiento resultante fue 0.26 ± 0.006 ° C década-1.

[126] Meléndez, M. *Effects of Nearshore Processes on Carbonate Chemistry Dynamics and Ocean Acidification*. (2020). *Doctoral Dissertations*. 2532. https://scholars.unh.edu/dissertation/2532/.

Como recuerda el informe del IPCC, el calentamiento y la acidificación de los océanos perjudican la producción de alimentos procedentes de la acuicultura y la pesca de mariscos en algunas regiones oceánicas[127].

Estos factores generan cambios en la supervivencia y, en algunos casos, el movimiento activo de especies marinas para encontrar sus condiciones de temperatura preferidas, por lo que la mayoría se desplaza hacia el norte o hacia aguas más profundas en la medida en que se calientan los océanos, advierte la *Cuarta evaluación nacional del clima*. "Estos cambios están afectando la distribución y la disponibilidad de muchos peces e invertebrados de valor comercial y recreativo", dice el informe. Los autores del documento instan a tener en cuenta estos factores para que las pesquerías puedan afrontar el cambio climático. "Incluso sin tener directamente en cuenta los efectos climáticos, el manejo de las pesquerías de forma precautelar y mejores incentivos pueden aumentar los beneficios económicos y mejorar la resiliencia", señalan.

Estos datos concuerdan con cifras de la Fundación Nacional de Educación Ambiental que indican que la tasa actual de cambio en la acidez del océano "es casi 50 veces más rápida que tasas históricas de cambio conocidas"[128]. La entidad recuerda que la fuente primaria de proteína en la dieta de más de 1,000 millones de personas en el mundo proviene del mar.

3.4.6. Aumento de temperatura del océano

Los cambios a corto plazo en el clima o en la circulación oceánica pueden combinarse con las tendencias climáticas a largo plazo para producir períodos de condiciones oceánicas muy inusuales con el potencial de tener grandes repercusiones en las comunidades costeras, indica el informe resumido de la *Cuarta evaluación*. Dos de estos eventos documentados son la ola de calor marina de 2012 en el noroeste del océano Atlántico y la secuencia de eventos de calentamiento oceánico entre 2014 y 2016 en el noreste del océano Pacífico, incluyendo una gran zona de agua muy cálida y persistente denominada *Blob* (gota). Los ecosistemas de estas regiones experimentaron condiciones muy cálidas (más de 3.6 °F por encima del rango normal), las cuales se mantuvieron durante varios meses.

En su informe del 2022, el PRCCC abundó: "Las observaciones históricas disponibles y los *proxies* evidencian que el calentamiento del océano está ocurriendo a escala global a un ritmo que no es consistente con los ciclos naturales solos, como El Niño-Oscilación del Sur (ENSO) u Oscilación Decenal del Atlántico". Indica que las observaciones de la temperatura de la superficie del mar de la última década recogidas en la boya de CO2 frente a La Parguera y la boya CARICOOS PR-1 frente a Ponce evidencian la frecuente ocurrencia estacional de temperaturas muy por encima de 85.10 °F. Un promedio de 25 % de las observaciones de La Parguera y el 13 % de las de Ponce superaron dicho umbral. Las temperaturas por encima del umbral de blanqueo del coral son frecuentes tanto en las aguas exteriores como en las interiores. El calentamiento

[127] IPCC, SPM.B.1.3.
[128] NEEF, https://www.neefusa.org/explore/climate-change.

de los océanos complica más las amenazas que la acidificación puede tener en la biodiversidad marina y las actividades socioeconómicas en las próximas décadas[129].

3.4.7. Aumento de frecuencia e intensidad de episodios de polvo del Sahara

La presencia de polvo del desierto de Sahara sobre Puerto Rico es un fenómeno común que suele ocurrir en los meses de verano, entre junio y agosto. El polvo afecta los padecimientos respiratorios de la población. Sobre sus efectos en la salud pública, abundaremos en la sección 4.5.1.5.1.

A nivel climático, este fenómeno reduce la intensidad de los sistemas ciclónicos, como los huracanes. Asimismo, los aumentos en las concentraciones de polvo del Sahara en el Atlántico tropical se han asociado con la reducción de las lluvias en el Caribe y Puerto Rico.

En el verano del 2020, una concentración de polvo del Sahara sin precedentes en más de seis décadas cubrió a Puerto Rico durante al menos dos semanas. El evento provocó que el índice de calidad del aire alcanzara el nivel peligroso –305 en la estación del DRNA en Cataño[130]. El índice más alto reportado hasta entonces fue de 154 en el 2018. El sistema de polvo sahariano redujo la visibilidad en el Aeropuerto Internacional Luis Muñoz Marín hasta cinco millas y provocó el cierre de los balnearios. Los valores del particulado alcanzaron los 500 microgramos por metro cúbico, considerándose las partículas más grandes de lo normal, según la Estación Atmosférica Cabezas de San Juan[131].

El cambio climático puede tener un impacto significativo en la cantidad y la composición del polvo del Sahara que nos llega a Puerto Rico. El aumento de las temperaturas y la sequía en la región del Sahara pueden llevar a una mayor desertificación y erosión del suelo, lo que a su vez aumentaría la cantidad de polvo en suspensión en el aire. Además, el cambio climático puede afectar también los patrones de viento y las corrientes atmosféricas, lo que podría alterar la trayectoria del polvo del Sahara y llevarlo a áreas donde antes el fenómeno no se experimentaba con frecuencia.

Un análisis realizado por especialistas del CEACC encontró que desde el 1980 al 2022 hubo un alza en la frecuencia e intensidad de los episodios de polvo del Sahara para la región de Puerto Rico. Utilizando datos de satélite (Modelo MERRA-2) de densidad de polvo del Sahara en la región de Puerto Rico se identificó un incremento significativo en la cantidad de partículas suspendidas en los meses de junio a agosto (Ilustración 14). De continuar el incremento en la frecuencia e intensidad de eventos de polvo del Sahara, podemos esperar también una merma en la lluvia acumulada de esos meses

[129] Meléndez, M., Salisbury, J., Gledhill, D., Langdon, C., Morell, J. M., Manzello, D., Musielewicz, S., Rodríguez-Abudo, S., and Sutton, A. (2020) "Seasonal variations of carbonate chemistry at two western Atlantic coral reefs", *Journal of Geophysical Research*: Oceans, https://doi. org/10.1029/2020JC016108.

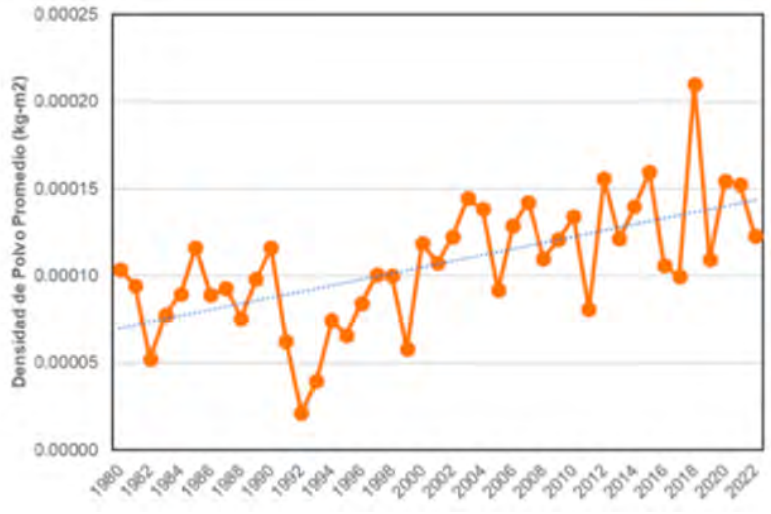
[130] *El Nuevo Día*. (martes 23 de junio de 2020). Índice de calidad del aire alcanza el nivel peligroso debido al polvo del Sahara.

[131] Delgado Rivera, J.O. (miércoles 24 de junio de 2020). *El Nuevo Día.* Polvo del Sahara: Así se mide en Puerto Rico el particulado que llega desde África.

de verano, lo cual podría exacerbar aún más las sequías que se proyectan para los años futuros.

Ilustración 14.

Densidad promedio de polvo del Sahara calculada utilizando datos del modelo MERRA-2 para la región de Puerto Rico para los meses de junio a agosto en el período de 1980 a 2022



Fuente de la gráfica: CEACC

CAPÍTULO 4.

Impacto del cambio climático en Puerto Rico

4.1. Energía

La Autoridad de Energía Eléctrica de Puerto Rico (AEE) se creó por disposición de la Ley 83 del 2 de mayo del 1941. Desde entonces, esta corporación había sido el único proveedor de electricidad en Puerto Rico, mediante plantas generatrices propias o plantas contratadas que utilizan fuentes alternas como el gas, el carbón, la energía solar y la eólica[132].

En el 2021, la administración del sistema de distribución y transmisión se delegó en la compañía *LUMA Energy* (en adelante, LUMA). En enero del 2023, se otorgó un contrato a la empresa Genera PR para operar, mantener y eventualmente decomisar las unidades generatrices propiedad de la AEE en cumplimiento con las metas energéticas. Como parte de la política pública energética establecida mediante la Ley 17-2019 se establecen metas específicas para una transición hacia las fuentes de energía renovable o alternativas.

Para el cumplimiento con las metas específicas existen procesos en curso para la contratación de generación de energía renovable en proyectos de gran escala que aporten el agregado de 3,750 MW, bajo los que al momento se han adjudicado contratos para aproximadamente 900 MW. A junio del 2023, la cantidad de clientes prosumidores (participantes del programa de medición neta) es de 85,662. La aportación de energía aproximada de estos clientes a la red eléctrica es de 336,000 MWh al año. Considerando la aportación de los clientes a la red y la producción de energía renovable de gran escala, representa una reducción aproximada de 456,744 toneladas de CO_2e al año.

Actualmente, en Puerto Rico se han desarrollado proyectos comunitarios de energía renovable, los cuales han sido ejemplos para otras comunidades. Entre estos, Casa Pueblo en Adjuntas provee energía solar a comunidades de bajos recursos, a personas con padecimientos de salud y a comercios en el casco urbano. Otro ejemplo es la microrred de Castañer, la cual suple energía renovable a cinco comercios y dos residencias, además de contar con dos cargadores para vehículos eléctricos.

Para que Puerto Rico pueda alcanzar la meta de 100 % de energía renovable al 2050, además de los proyectos de gran escala y la aportación de los prosumidores, se han recibido o se han asignado fondos federales para impactar varios sectores, tanto residenciales como comerciales. Ejemplo de estos son los $20 millones de la iniciativa Apoyo Energético del Programa de Política Pública Energética (PPPE) del Departamento de Desarrollo Económico y Comercio. Este programa ha beneficiado a 888 pequeños y medianos comerciantes. Otro programa es del USDA, al cual se le asignó $2,639,578 para

[132] Véase detalles de la generación en: https://genera-pr.com/data-generacion

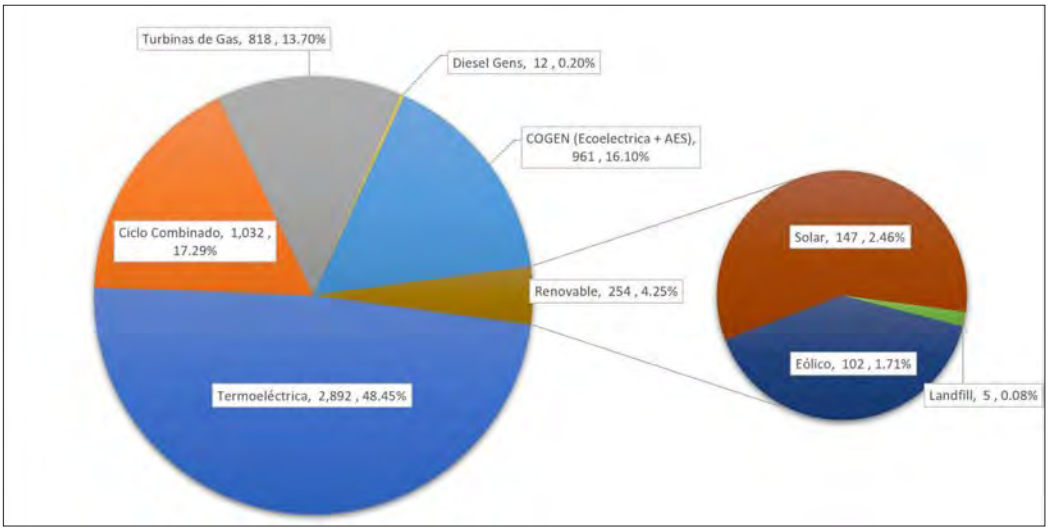
beneficiar a comunidades rurales. También el *Grid Deployment Office* del Departamento de Energía Federal (DOE) tiene asignados $1,000 millones para sistemas de energía renovable para clientes residenciales. Ya el gobierno federal asignó $9,600 millones a la isla para la reconstrucción de la red eléctrica devastada por el huracán María. Igualmente, a través de diferentes asignaciones del Departamento de Vivienda y Desarrollo Urbano de Estados Unidos, se han designado unos $800 millones para programas que promueven e incentivan el uso de sistemas solares y baterías para hogares.

Hasta abril del 2023, la AEE tenía 1,505,259 clientes de los cuales 1,369,786 (~91 %) eran clientes residenciales, 120,420 (8 %) clientes comerciales y 15,053 (menos del 1%) clientes industriales[133]. En cuanto a las ventas de energía para ese mismo período, la AEE generaba aproximadamente 16 TWh (16,000,000 MWh). De esta generación (datos aproximados), 43 % la consume el sector residencial, 45 % la consume el sector comercial y 11 % el sector industrial; un 1 % corresponde a la demanda de energía por iluminación y áreas comunes en los municipios.

La AEE cuenta con varias plantas generatrices y de apoyo (generadores de diésel), las cuales son de diferentes tipos de generación según muestran las ilustraciones 15 y 16.

Ilustración 15.

Capacidad de generación de energía de la AEE (MW)

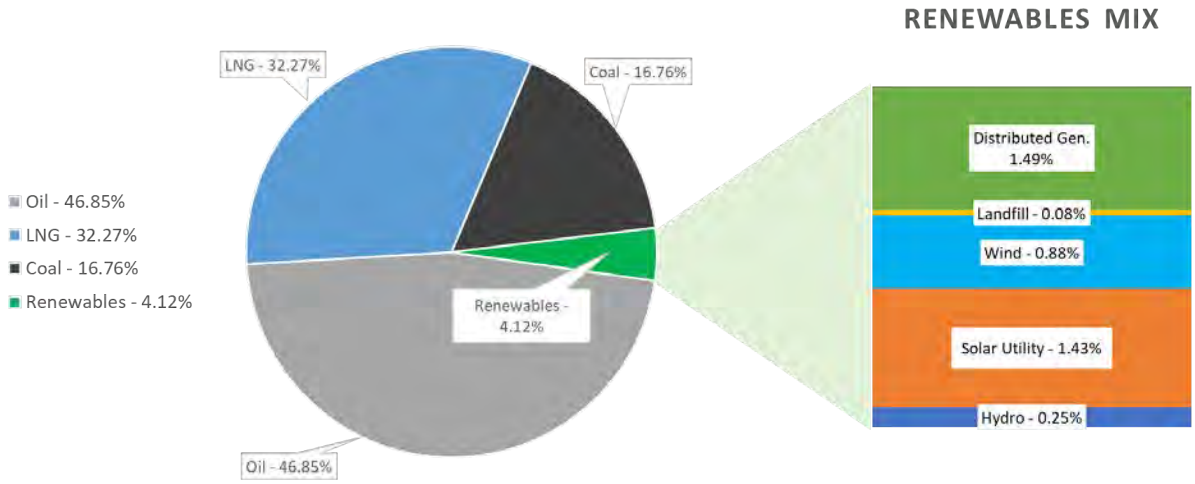


Fuente: Gráfica basada en datos de las capacidades de las plantas de generación obtenidas de la AEE (*2021-10-01 PREPA generating units availability*).

[133] Véanse los datos en indicadores.pr.

Ilustración 16.

Distribución de la generación a 2022



Fuente: https://energia.pr.gov/en/dockets/?docket=nepr-mi-2019-0016

Alrededor del 96 % de la generación de electricidad de la AEE utiliza combustibles fósiles. Solo el 4.12 % de la generación eléctrica proviene de fuentes renovables. Como parte de la generación de electricidad, no se están considerando los 98 MW de las plantas hidroeléctricas que están fuera de servicio y que son, también, fuentes de energía renovables.

Para el 2023, No todas las unidades están disponibles debido a que están fuera de servicio por mantenimiento o a que la AEE decidió tenerlas fuera de servicio debido al alto costo de reparación.

Ilustración 17.

Lista de unidades de generación operacionales

Generator Name	Start of Operations	Fuel	Nameplate Capacity (MW)	Available Capacity (MW)	Historic Forced Outage Rate (%)
AES 1	2002	Coal	227	227	3
AES 2	2002	Coal	227	227	3
Aguirre Combined Cycle 11	1977	Diesel	296	220	40
Aguirre Combined Cycle 21	1977	Diesel	296	100	30
Aguirre Steam 1	1971	Bunker	450	370	10
Aguirre Steam 2	1971	Bunker	450	350	10
Costa Sur 5	1972	Natural Gas	410	350	10
Costa Sur 6	1973	Natural Gas	410	350	15
EcoEléctrica	1999	Natural Gas	530	530	2
Palo Seco 3	1968	Bunker	216	190	15
Palo Seco 4	1968	Bunker	216	160	15
San Juan 7	1965	Bunker	100	70	30
San Juan 9	1968	Bunker	100	95	10
San Juan Combined Cycle 5	2008	Diesel / Natural Gas	220	200	7
San Juan Combined Cycle 6	2008	Diesel / Natural Gas	220	200	7
Cambalache 2	1998	Diesel	82.5	76	10
Cambalache 3	1998	Diesel	82.5	75	10
Mayagüez 1	2009	Diesel	55	50	30
Mayagüez 2	2009	Diesel	55	50	30
Mayagüez 3	2009	Diesel	55	50	30
Mayagüez 4	2009	Diesel	55	50	30
Palo Seco Mobile Pack 1-33	2021	Diesel	27 each (81 total)	81	9
7 Gas Turbines (Peakers)4	1972	Diesel	21 each (147 total)	147	40
Total			**4,981**	**4,218**	—

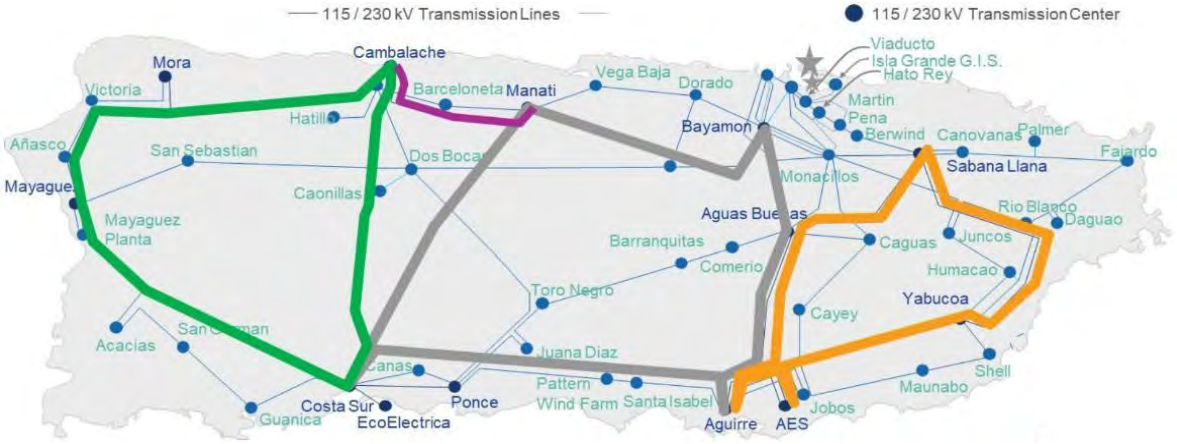
Fuente: Generation Resources Adequacy Analysis, páginas 28-29.

Según muestra la Ilustración 18, el sistema de transmisión contiene 178 centros de transmisión que operan a diferentes niveles de voltaje (230 KV, 115 KV y 38 KV). Estos centros interconectan sobre 1,100 millas de líneas de transmisión (230 KV y 115 KV) y sobre 1,500 millas de subtransmisión a 38 KV. Del sistema de distribución, el cual sirve a los 1.5 millones de clientes, se utilizan cerca de 1,200 circuitos con casi 32,000 líneas de distribución, incluyendo cerca de 17,000 millas de voltaje primario y aproximadamente 15,000 millas de líneas secundarias[134].

[134] Tomado del Plan Fiscal 2021 de la AEE, según aprobado por la JSF.

Ilustración 18.

Sistema de transmisión eléctrica de Puerto Rico



Fuente: Plan Fiscal de la AEE 2021, certificado por la Junta de Supervisión Fiscal, *Exhibit 5*, p.26.

Todo este sistema recorre la isla con sus retos geográficos, dado que las unidades principales de generación de mayor eficiencia (70 %) se encuentran en el sur y la mayor demanda de energía se encuentra al norte. Este tipo de estructura eléctrica provoca, en definitiva, un problema de mitigación y resiliencia, el cual ya Puerto Rico experimentó con los huracanes Irma y María (2017), los terremotos del 2020 y el huracán Fiona en el 2022.

En los capítulos 6 y 7, el P-MARCC provee las guías para minimizar cualquier impacto en la demanda del sistema eléctrico de Puerto Rico y eliminar las emisiones de gases de efecto de invernadero debido a la generación de electricidad por el uso de unidades con combustibles fósiles. El Plan considera la diversificación de la generación de energía a través de la isla para reducir significativamente la pérdida de energía.

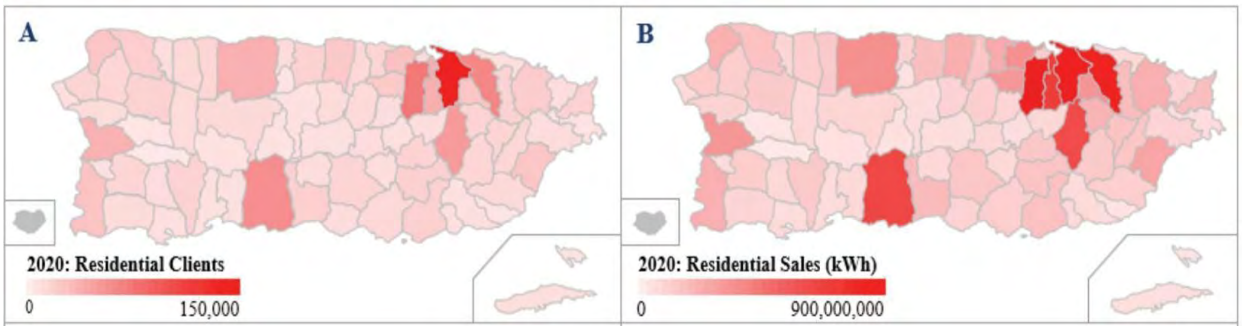
Población de Puerto Rico y clientes residenciales

De acuerdo con el Censo de Estados Unidos del 2020, Puerto Rico cuenta con 3.2 millones de habitantes. El Plan Fiscal 2021[135] aprobado por la Junta de Supervisión Fiscal (JSF) incluye una distribución de los clientes residenciales y la magnitud de consumo de energía (Ilustración 19).

[135] Vea el documento en: https://drive.google.com/file/d/1dXFJldZpOIsAObMZDBd7T2P3j2xMPaal/view

Ilustración 19.

Clientes residenciales y consumo energético en Puerto Rico



Fuente: Plan Fiscal de la AEE 2021, certificado por la Junta de Supervisión Fiscal, segmento del *Exhibit 7*, p.31.

Podemos observar que la mayor cantidad de la demanda de energía residencial se concentra en el área metropolitana y las grandes ciudades como Ponce, Mayagüez y Arecibo.

El Censo establece que aproximadamente el 44.5 % de los habitantes de Puerto Rico vive en nivel de pobreza; en 36 de los 78 municipios el 50 % o más de su población estaba en situación de pobreza. Una unidad familiar de tres personas con un ingreso familiar anual menor de $19,985 es clasificada como una familia en pobreza.

Estos datos son de extrema importancia a la hora de considerar la estrategia de proveer electricidad a los clientes de la AEE con sistemas de energía renovable o alternativas.

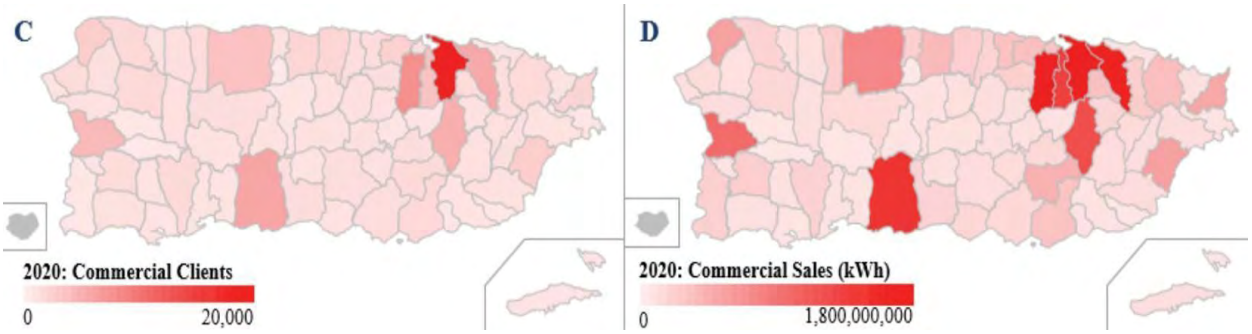
Clientes comerciales

Los clientes comerciales son el mayor grupo de clientes de la AEE en términos de demanda con cerca del 40 %.

De acuerdo con la distribución presentada en el Plan Fiscal de la AEE del 2021, la mayoría de los clientes comerciales se concentran en el área metropolitana. Sin embargo, en términos de demanda, además del área metropolitana, sobresalen los pueblos de Ponce, Mayagüez, Arecibo y Caguas (Ilustración 20).

Ilustración 20.

Clientes comerciales y consumo energético en Puerto Rico



Fuente: Plan Fiscal de la AEE 2021, certificado por la Junta de Supervisión Fiscal, segmento del *Exhibit 7*, p.31.

Por la naturaleza de las operaciones, en condiciones normales la demanda de este sector es bastante estable ya que utilizan siempre los mismos equipos y el tipo de operación no varía. Se puede observar una variación significativa en la demanda en eventos como la pandemia y desastres naturales. También, si comparamos diferentes tipos de clientes comerciales, se puede observar una diferencia en la demanda. Por ejemplo, un cliente comercial de sobre 5,000 pies cuadrados tendrá un consumo mayor, ya que puede que cuente con equipos de refrigeración de mayor consumo que un cliente comercial con solo 1,000 pies cuadrados. Aquí la importancia de determinar la intensidad en energía a base de la demanda y área del edificio. En términos tarifarios, las tarifas de electricidad para los clientes comerciales son las más altas cuando las comparamos con los clientes residenciales e industriales.

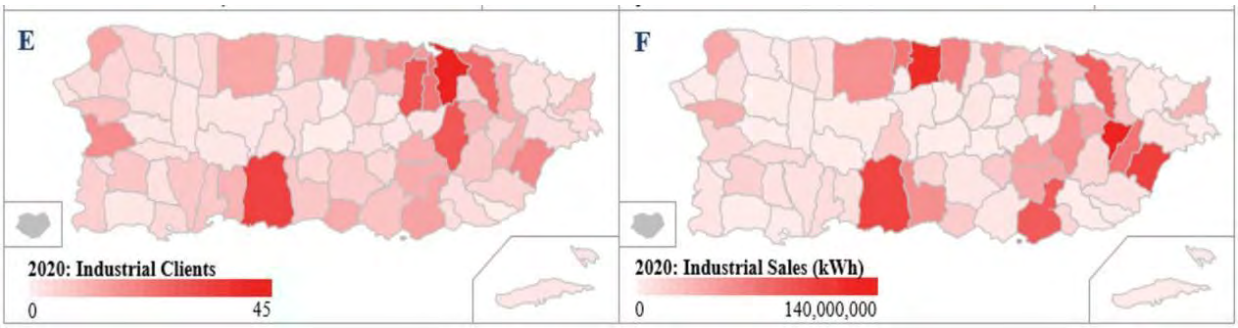
Clientes industriales

De los clientes de la AEE/LUMA, menos del 1 % son clientes industriales. Mientras, la demanda energética de estos clientes es cerca de un 10 %. La mayoría de estos clientes recibe energía de las líneas de transmisión de 115 KV o de 38 KV.

La mayor concentración de industrias en Puerto Rico se encuentra en las áreas norte, metropolitana y sur. Algunos clientes industriales tienen una tarifa tiempo de uso (TOU-T), la cual les permite tener una tarifa en horas pico (de mayor demanda) y otra tarifa en horas no pico.

Ilustración 21.

Clientes industriales y consumo energético en Puerto Rico



Fuente: Plan Fiscal de la AEE 2021, certificado por la Junta de Supervisión Fiscal, segmento del *Exhibit 7*, p.31.

Algunos clientes industriales se han movido hacia la generación interna de energía para reducir costos operacionales y mantener sus operaciones durante períodos en que la red eléctrica no esté disponible o esté inestable. Estos equipos de generación se conocen como CHP (*Combined Heat and Power*) y, además de generar electricidad, con el calor emitido por los generadores producen vapor, agua caliente y agua fría utilizando enfriadores (*chillers*) de absorción. La generación de estas utilidades permite reducir las emisiones de CO_2 ya sea por eficiencia de los equipos y por la reducción en la utilización de combustible para las calderas en la generación de vapor o agua caliente. Esos sistemas de CHP utilizan gas natural, propano, diésel o la opción de tener disponibles dos combustibles, como gas natural y diésel. La utilización del tipo de combustible dependerá del precio y la disponibilidad. Eventualmente estos sistemas podrán utilizar hidrógeno "verde" para eliminar por completo las emisiones de CO_2 y otros gases de invernadero. Algunos clientes industriales complementan los sistemas de CHP con sistemas de paneles fotovoltaicos con almacenamiento de energía.

4.2. Infraestructuras

El cambio climático afecta y seguirá afectando de forma progresiva y adversa a todo el país con el aumento en la frecuencia e intensidad de tormentas y huracanes. En especial, afectará a las comunidades costeras, las vías de acceso vehicular a esos lugares, la infraestructura eléctrica y sanitaria y el disfrute de las costas y sus playas como recurso ecoturístico según aumentan los niveles del mar.

Las centrales termoeléctricas que operan con la quema de combustible fósil ubican cerca de la costa para hacer intercambios de calor generado por sus procesos con las temperaturas más bajas del agua del mar. Los aumentos en la temperatura por estos intercambios afectan la vida marina. Los aumentos en el nivel del mar afectan adversamente estos procesos y los sistemas de cimientos de la estructura portante de las centrales. Escenarios similares ocurren con las plantas de tratamiento de la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados cercanas al mar u otros cuerpos de agua.

Los escenarios típicos que confrontamos pueden verse claramente utilizando el municipio de Cataño como ejemplo de los daños que ya se experimentan y que aumentarán en el futuro cercano. En la central de Palo Seco, por ejemplo, será difícil el acceso al lugar por la entrada del mar, según las proyecciones de la NOAA para el año 2050. El Aeropuerto Internacional Luis Muñoz Marín en Isla Verde, Carolina, ya comienza a tener eventos de inundación prematura en algunas de sus instalaciones motivando a expertos en cambio climático a proyectar la posible mudanza de la actividad aérea de este al Aeropuerto Internacional Rafael Hernández en Aguadilla, con las repercusiones económicas, viales, sociales y culturales, entre otras, que ello implica.

El huracán María

El paso del huracán María evidenció la fragilidad del sistema vial, en específico aquellas vías costeras y otras que se encuentran en zonas bajas o inundables. La compleja y extensa red de carreteras hace muy difícil su mantenimiento, limitando el acceso a diferentes comunidades que dependen de ella. Este escenario apunta a la necesidad de una visión holística de la planificación del suelo boricua y a cuán rigurosos debemos ser en hacer cumplir el Plan de Uso de Terrenos de forma inviolable por visiones desarrollistas de corto plazo.

La red de transmisión y distribución que fue derribada por el huracán puso de manifiesto cuán difícil y complejo es su mantenimiento. Si medimos el largo de los conductores de esta red, el total sería equivalente a 1.3 circunferencias alrededor del planeta Tierra. Si a esto añadimos que gran parte de esa red transcurre por topografías pronunciadas, nos percataremos de la futilidad y quizás imposibilidad de darle mantenimiento a una infraestructura eléctrica tan compleja y extensa. Por esa misma razón, el sistema de iluminación pública es poco confiable, ya que depende exclusivamente de su energización a través de redes que requieren conexión continua con el sistema de generación.

Las emisiones de CO_2 y la industria de la construcción

Las emisiones de dióxido de carbono están relacionadas íntimamente con los procesos de construcción, mantenimiento y operación de edificios y ambientes construidos. De acuerdo con el más reciente Informe del Inventario de Gases de Efecto de Invernadero 2019 y 2021 de Puerto Rico, “los sectores industriales responsables de las emisiones derivadas del uso de procesos y productos desempeñan un papel importante en la economía puertorriqueña. La vulnerabilidad climática de Puerto Rico ha creado una necesidad frecuente de construir y reconstruir edificios a raíz de fenómenos climáticos adversos como huracanes”[136].

El informe confirma que “la industria del cemento es esencial para construir y reconstruir infraestructuras”. Establece que en el 2006, “Puerto Rico utilizó 1.9 millones de toneladas de cemento al año, o 500 kg (0.5 toneladas) per cápita; en todo el mundo, el uso medio

[136] Larnerd, N.J., Ballard, S., and Kurtzer, J. December 7, 2022. *Humanitarian Response and Climate Resilience in Puerto Rico*. *Center for Strategic and International Studies.* Disponible en: https://www. csis.org/analysis/humanitarian-response-and-climate-resilience-puerto-rico.

anual de cemento per cápita es de 300 kg (0.3 toneladas) per cápita[137]". Según el informe, "la producción de cemento fue uno de los principales contribuyentes al sector industrial, pero ha ido disminuyendo en la última década debido a la desaceleración de demanda por parte de contratistas y promotores de la construcción[138]. Sin embargo, como lo demuestra el repunte en la producción de cemento en 2018 y 2022 después de los huracanes Irma, María y Fiona, se puede esperar que la escalada de eventos relacionados con el cambio climático provoque un aumento de la producción de cemento en Puerto Rico para reconstruir las estructuras destruidas por los desastres naturales".

Estructuras gubernamentales frente al reto energético

En el 1973, Puerto Rico se hizo consciente de su dependencia extrema de los combustibles derivados del petróleo (fósiles) motivado por el embargo petrolero de los países exportadores de petróleo. El incremento en el costo de energía eléctrica motivó aumentos significativos en el costo de la construcción y alarmó a todos los sectores de la economía. Una vez superada aquella crisis se regresó a una "normalidad velada" donde el espectro de futuros problemas petroleros tendría consecuencias similares.

Fue posterior a esa fecha que, bajo la presidencia de Jimmy Carter en Estados Unidos, se creó el Departamento de Energía federal y, en la isla, el Departamento de Energía de Puerto Rico. Las funciones del Departamento de Energía han pasado por varias agencias del gobierno incluyendo el Departamento de Recursos Naturales y Ambientales, el Departamento de Asuntos del Consumidor y el Departamento de Desarrollo Económico y Comercio. El nombre de la oficina ha cambiado según las administraciones bajo las que ha operado, a saber: el Departamento de Energía de Puerto Rico, la Administración de Asuntos de Energía de Puerto Rico y el Programa de Política Pública Energética. Todos estos programas han estado siempre subfinanciados. No fue hasta el paso del huracán María que se dramatizó la fragilidad del sistema eléctrico del país. Es ahora, durante el proceso de restauración, actualización y modernización del sistema de generación y su red de distribución, que se discuten los cambios necesarios considerando los asuntos ambientales relacionados con la contaminación ocasionada por las emisiones de dióxido de azufre, monóxido de carbono, óxido nitroso y, sobre todo, por las de dióxido de carbono, uno de los principales gases de efecto de invernadero que ocasionan el cambio climático.

En el 2004 se prepararon las Guías de Diseño para instalaciones Ecoturísticas y de Turismo Sostenible para la Compañía de Turismo de Puerto Rico, que se utilizan de forma voluntaria por diseñadores y empresarios que desean crear instalaciones sostenibles y resilientes que reduzcan los consumos de energía.

---

[137] 1) Martín, C. October 12, 2017. How Hurricane Maria exposed Puerto Rico's "colonial boom and bust. *Urban Institute*. Disponible en: https://www.urban.org/urban-wire/how-hurricane-maria-exposed- puerto-ricos-colonial-boom-and-bust; (2) Monteiro, P.J.M, Miller, S.A., Horvath, A. 2017. *Towards sustainable concrete*. *Nature Materials*, 16, 698-699. https://doi.org/10.1038/nmat4930.

[138] *Economist Intelligence.* May 13, 2016. "Planning Board estimates a deeper recession in 2016/17". *Economist Intelligence*. Disponible en: https://country.eiu.com/article. aspx?articleid=364212220&Country=Puerto%20Rico&topic=Economy&subto_9.

Los edificios sostenibles y resilientes

En el 1979 se publicó el libro *Fresco Gratis,* el cual abordaba el tema de la integración de los edificios con la naturaleza con atención especial a "sistemas pasivos" en Puerto Rico. En este se discuten los elementos sobresalientes del uso de la vegetación, el agua, la topografía, la orientación, la ventilación natural, los huecos de fenestración (puertas, ventanas y tragaluces) y el uso de materiales, entre otros, para que los edificios fuesen más frescos, saludables y que consumieran menos recursos y energía. Esta fue la primera publicación de carácter popular que abordó el tema de la arquitectura sostenible en Puerto Rico, antes de que se acuñara y popularizara el término "sostenibilidad". Su contenido sigue teniendo relevancia.

Modelaje digital

Los tiempos, la sociedad, la arquitectura, la ingeniería y la construcción han cambiado enormemente desde entonces en Puerto Rico. Ya no se diseña con estrategias de aproximación como resultado de la experiencia; ahora utilizamos programación (*software*) basada en conocimiento científico y empírico para modelar el comportamiento estructural y térmico de la envoltura de los edificios, incluyendo su fenestración. Se modela digitalmente el potencial de iluminación natural y la radiación solar, se pronostica el potencial de cosechas de aguas de lluvia, el comportamiento estructural de nuestros edificios, el costo del ciclo de vida y hasta las emisiones proyectadas de CO_2.

La ética de la construcción

Desde el 1973, cuando el mundo occidental contemporáneo se enfrentó por primera vez a la crisis de energía basada en la quema de combustibles fósiles, despertamos de repente en Puerto Rico de un mundo de excesos y abundancia a uno finito donde teníamos que medir la manera en que consumimos los recursos de la Tierra. Se redactaron textos encaminados a fomentar una ética de la construcción para atender esta situación: la ética del diseño y construcción de edificios sostenibles que reducen su impacto negativo en el ambiente y en los seres humanos que los habitamos y que inciden en los factores que ocasionan el cambio climático. En la búsqueda de soluciones al reto energético, los arquitectos e ingenieros como gremio propusieron edificios supersellados que junto a las emisiones de los materiales sintéticos que se fabrican y utilizan en los espacios interiores creó el síndrome de edificios enfermos. El reducir la temperatura del agua para conservar energía nos alertó sobre la bacteria *Legionella* que ocasionó la muerte de varios legionarios de América (de aquí su nombre) mientras celebraban su convención anual en el hotel Bellevue-Stratford en Filadelfia.

Organizaciones sin fines de lucro y el cambio climático en la industria de la construcción

En el 2004 se inscribió en el Departamento de Estado de Puerto Rico el Capítulo del Caribe del *US Green Building Council* con sede en San Juan[139]. Operó activamente como Capítulo del Caribe hasta el 2018. Desde entonces se ha mantenido como un capítulo pasivo, en función de los planes de regionalización que la organización implantó a nivel nacional.

El capítulo ha sido presidido por distinguidos profesionales de la industria del diseño y construcción de edificios verdes[140]. En la actualidad, el movimiento que propulsa el diseño, construcción, operación y mantenimiento de edificios verdes trasciende las disciplinas que tradicionalmente se relacionan con la industria de la construcción. El tema se ha popularizado, aunque aún queda un recorrido largo que completar de la "moda verde" a la "acción verde".

ACONER, la Asociación de Contratistas y Consultores de Energía Renovable de Puerto Rico ha dejado una huella importante en la historia de las fuentes renovables del país, impulsando el uso de estas fuentes en todos los niveles. La organización fundada en el 2007 cuenta con 102 miembros, la gran mayoría de ellos instaladores de pequeña y mediana escala de sistemas solares fotovoltaicos. Por otro lado, desde hace más de una década, Para la Naturaleza ha alertado a la población que el porcentaje de conservación de la tierra en Puerto Rico es mucho más bajo que los promedios de los Estados Unidos o el Caribe. El plan de Para la Naturaleza es aumentar la escala de conservación usando el Mapa 33 como una herramienta de planificación, centrándose en un enfoque de cuencas hidrográficas. Para la Naturaleza prioriza la selección de tipos de tierras y sitios para la conservación proactiva a través de adquisiciones, servidumbres y donaciones. La conservación actual de terrenos alcanza casi el 16 % de la tierra que debe conservarse para alcanzar su meta de 33 % para el 2033. Debido a que el mapa atiende con prioridad la vegetación y, en especial, las zonas boscosas, puede ser una herramienta de planificación a base de la cantidad de CO_2 que se secuestra, ahora y en el futuro, con estos planes de conservación.

El 27 de agosto de 2013 y por invitación del Centro de Estudios para el Desarrollo Sustentable de la Universidad Metropolitana (hoy Universidad Ana G. Méndez, Recinto de Cupey), el Senado de Puerto Rico recibió al destacado profesor y ecólogo Richard Heinberg, quien discutió el tema del drástico cambio internacional en términos energéticos y económicos, y exhortó a explorar opciones ante la falta de crecimiento económico, entre otros asuntos. Presidente fundador del *Post Carbon Institute*, Heinberg es una autoridad internacional en la discusión de conceptos de descarbonización del planeta. El 28 de agosto, Heinberg se presentó, además, en el Colegio de Ingenieros y Agrimensores de Puerto Rico. El resultado neto de sus exhortaciones fue inocuo.

---

[139] El capítulo se fundó por los arquitectos Fernando Abruña y Luis Huertas y la planificadora Peggy Van Kirk.

[140] Algunos de sus presidentes fueron los arquitectos Fernando Abruña, Jeannette Rullán, Cristina Algaze, Vincent Pieri, el ingeniero Jesús Garay y la educadora ambiental Jacqueline Torres.

En octubre de 2018, el Instituto de Competitividad y Sostenibilidad de Puerto Rico junto al *Rocky Mountain Institute* publicó el informe titulado: *Public Collaborative for Puerto Rico's Energy Transformation*. En el documento se hace un análisis del futuro deseado de la infraestructura energética del país. El informe fue preparado con la participación de organizaciones privadas y sin fines de lucro, oficiales del gobierno, líderes de la industria, representantes del sector comunitario, consultores y expertos en Puerto Rico. Este informe es uno de los más importantes en los últimos años y se utiliza como referencia al hablar del sistema eléctrico del país.

En el verano de 2020, Para la Naturaleza completó un estudio sobre la potencial viabilidad de un programa de *Carbon Credits* titulado: *Assessing Forest Carbon Offsetting Potential in Puerto Rico's Para la Naturaleza (PLN) Land Trust* en consorcio con *Winrock International* (un líder reconocido en desarrollo internacional que brinda soluciones a algunos de los desafíos sociales, agrícolas y ambientales más complejos del mundo. Actualmente, PLN está en proceso de viabilizar un banco local como parte de la institución para la transacción de *Carbon Credits (Carbon Offsets)* localmente.

Sistemas de certificación e iniciativas gubernamentales y de política pública en Puerto Rico

En el 2007 se emitió una orden ejecutiva (OE-2007-41) para fomentar la construcción de edificios verdes en Puerto Rico, requiriendo la aplicación del Sistema *LEED* (*Leadership in Energy and Environmental Design*) en proyectos de edificación con área no menor de 10,000 pies cuadrados y certificación *LEED Silver* en edificios de 30,000 pies cuadrados o más. Luego se aprobó la Ley 229 del 9 de agosto de 2009, conocida como la "Ley para promover la eficiencia en el uso de energía y recursos de agua en las edificaciones nuevas y existentes del Estado Libre Asociado de Puerto Rico". Desde entonces se han presentado numerosos proyectos enfocados en la sostenibilidad, el diseño y construcción de edificios verdes para reducir los consumos energéticos y las emisiones de CO_2, pero el resultado neto es que la mayoría no se ha aprobado y que la Ley 229-2009 parece ser letra muerta, pues no se le ha dado prioridad a su aplicación.

No hay duda, sin embargo, de que lo que en el pasado fue una discusión marginal es ahora una medular. Existe ya la masa crítica para que la industria del diseño y construcción de edificios y muchos de sus componentes estén involucrados en este importante movimiento. En Puerto Rico existe una robusta participación en el tema por parte de los gremios de diseñadores, planificadores, arquitectos, ingenieros y manufactureros. Los ferreteros, contratistas, tasadores y agentes de bienes raíces (*realtors*) están rezagados con una participación mínima o inocua. Es necesario que estos gremios se integren de forma más proactiva en promover soluciones y educación a sus miembros para mitigar el impacto del cambio climático en Puerto Rico.

Aunque se han diseñado varios proyectos sostenibles (que reducen las emisiones de CO2 al ambiente) antes de que existieran sistemas de certificación de edificios verdes (tales como "La Casa Ausente" y la Escuela Ecológica de Culebra), no es hasta que se comienzan a popularizar los sistemas de certificación que se conciencia al público general. El sistema más prestigioso y riguroso de certificación es el sistema *LEED* del

US Green Building Council (USGBC) administrado por el *Green Building Certification Institute*[141].

Al 13 de marzo de 2023 se habían certificado 136 proyectos *LEED*. Aunque es una cantidad considerable desde el inicio del Capítulo del Caribe del USGBC, la realidad es que el total de edificios con esta certificación no llega al 1 % del total en la isla. Hay que destacar que doce de estos son escuelas que se remodelaron o construyeron durante la vigencia del Programa ARRA. Estas escuelas sirven como instrumento pedagógico sobre el cambio climático y permitirán que las nuevas generaciones de estudiantes, profesores y administradores aprendan y vean los edificios sostenibles y descarbonizados como la norma y no como la excepción. Desde la fundación del capítulo del Caribe del USGBC se han acreditado 198 profesionales en el sistema *LEED* para cumplir con el proceso de certificación de edificios verdes que reduzcan su impacto al ambiente y sus emisiones de CO_2. La información que se recogió durante los años de operación del capítulo del Caribe del USGBC distribuía su membresía de la siguiente forma: 24 % de los miembros eran arquitectos, 15 % ingenieros, 7 % contratistas y 54 % de otras disciplinas, lo cual apunta a la diversidad de personas que se han interesado en el tema. Ya no es una discusión exclusiva de arquitectos o ingenieros; ahora el público general está exigiendo edificios verdes o sostenibles que mitiguen, eliminen o cancelen sus emisiones de carbono al ambiente para controlar la continua aceleración del cambio climático. Luego del paso del huracán María en el 2017, se añadieron a los requisitos de sostenibilidad los de resiliencia.

El sistema *LEED* no es una panacea para la certificación de edificios verdes que reduzcan su impacto en las emisiones de CO2 al ambiente. Existen otros programas de certificación que abonan asuntos que no se tratan propiamente por el sistema *LEED*. Entre ellos, se destacan el sistema BREEAM, *Passive Haus, Green Building Initiative* (*Green Globes*) y los programas *Energy Star*, *WaterSense* y *Air Plus* de la EPA. Hay muy pocos ejemplos de estos programas en la isla, excepto el de *Energy Star*. Este programa que los consumidores conocen a través de su logo (una estrella con un arco fugaz) estampado en enseres domésticos ha confeccionado también un programa de certificación para edificios energéticamente eficientes. Actualmente, 37 edificios en Puerto Rico tienen esta certificación con un equivalente de casi dos millones de pies cuadrados de construcción.

Existe también el *EPA GHG* (*Green House Gas*) *Reporting Program*, en el cual unos pocos propietarios de edificios en Puerto Rico informan sobre sus emisiones. Hasta el momento se identifican aproximadamente ocho informantes.

En el 2009 se inició el Programa de Permiso Verde como parte del Reglamento Conjunto de Puerto Rico. El permiso verde –de carácter ministerial– está definido como: “permisos para estructuras existentes o propuestas que cumplen con la precualificación de los parámetros necesarios para obtener una certificación que cumpla con las guías de diseño de permiso verde establecidas en las Guías para Proyectos Verdes del Reglamento Conjunto”. Su propósito es mejorar la salud pública, la seguridad y el bienestar general, mejorando el diseño y la construcción de diversos proyectos y edificios mediante el uso de los conceptos de construcción que tienen un impacto ambiental positivo y el fomento

[141] El primer edificio en certificarse *LEED* en Puerto Rico fue el de la compañía *Standard Refrigeration* bajo su presidente y dueño, el ingeniero mecánico Juan S. Quintana.

de las prácticas de la construcción sostenible. Los gerentes de permiso y el personal de la División de Evaluación de Cumplimiento Ambiental de la OGPe son los responsables de su evaluación. El Permiso Verde ofrece reducciones en los pagos de exacciones (impuestos) al momento de diseñar y desarrollar proyectos de construcción. Lamentablemente, la complejidad del proceso actual de este programa ha limitado sustancialmente su implantación y éxito.

Reconocimientos, líderes y precursores

Además de las certificaciones del USGBC y de *Energy Star*, la EPA ha conferido el *Environmental Quality Award* a varios proyectos verdes construidos en Puerto Rico, incluyendo la Escuela Ecológica Niños Uniendo al Mundo (programa Montessori) en el 1999 y la Escuela Ecológica de Culebra, del Departamento de Educación de Puerto Rico, en el 2006[142].

Varios proyectos verdes en Puerto Rico han sido destacados en revistas prestigiosas locales e internacionales. También ha habido esfuerzos informativos que focalizan entre otros temas el de los edificios sostenibles para mitigar el cambio climático y los efectos del ambiente construido en la presente crisis climática global[143].

Las tipologías edilicias que ya han incorporado estrategias verdes para combatir los efectos del cambio climático en su diseño incluyen, entre otras: edificios de oficinas, edificios industriales, de educación, de gobierno, corporaciones públicas, viviendas privadas y de interés social, oficinas federales, fábricas, farmacéuticas, centros de gobierno y edificios municipales. No obstante, el tener esta gran variedad edilicia no despinta que aún queda un gran camino que recorrer para lograr la meta de descarbonizar la isla para el 2050.

Uno de los retos importantes a los que nos enfrentamos es cómo crear edificios de alto rendimiento que cumplan con estos parámetros, que nos ofrezcan mayores beneficios ambientales y cuya equivalencia de beneficio económico y reducción de emisiones de CO_2 sea mayor que las inversiones que conlleva contrarrestar sus daños.

[142] A nivel nacional, este prestigioso premio ha reconocido también el trabajo del arquitecto Fernando Abruña (2006), del entonces alcalde William Miranda Marín del Municipio de Caguas (2006) y de la *Revista Ambiental Corriente Verde* (2013).

[143] Algunas de las publicaciones que han destacado estos proyectos puertorriqueños son *Environmental Building News*, *Green Builder Magazine*, *Architectural Record*, la revista *Entorno*, del Colegio de Arquitectos y Arquitectos Paisajistas de Puerto Rico (CAAPPR) y la revista *Dimensión*, del Colegio de Ingenieros y Agrimensores de Puerto Rico (CIAPR). También se han publicado a través de sitios en la internet como *Homes Across America*, *Building Green.com* y en el canal de televisión *Home and Gardens Television*. Además, localmente se publica por su editora, Alma Reyes, la *Revista Ambiental Corriente Verde*, que focaliza entre otros temas el de los edificios sostenibles para mitigar el cambio climático. La columna Dialogando Verde, del arquitecto Fernando Abruña que trató la discusión del ambiente construido y su impacto en el cambio climático se publicó desde el 2011, por casi ocho años consecutivos e ininterrumpidos en la (ahora extinta) *Revista Construcción* en la edición sabatina del periódico *El Nuevo Día.*

Los códigos de construcción y el cambio climático

El Código Internacional de Conservación de Energía (IECC) aumenta rápidamente en rigor. El IECC del 2021 es efectivamente un código de envoltura (*envelope*) de energía cero que supera los requisitos actuales del programa *Home Zero Energy Ready Home* del Departamento de Energía y sirve como referencia para los requisitos proyectados para el programa en el 2024.

Por otro lado, queda un enorme tramo por recorrer en el renglón de desperdicio de energía y emisiones de CO_2 ocasionados por la contaminación luminocturna. Uno de los proyectos más exitosos que atiende esta condición ha sido el de la Reserva Natural Cabezas de San Juan, en Fajardo, recipiente de un premio a nivel mundial. Además, hay que destacar el esfuerzo de carácter nacional que supone el proyecto del Bosque Modelo y Casa Pueblo en Adjuntas, pionero en sostenibilidad comunitaria y propulsor del uso de fuentes renovables a nivel comunitario.

Transportación y accesibilidad

El Tren Urbano es también una estrategia de sostenibilidad que puede mitigar las emisiones de CO_2. Este proyecto no madurará exitosamente hasta que se aumenten las modalidades y opciones de transporte desde cada estación, dándole prioridad a la designación de ciclovías y mejoras en la infraestructura peatonal junto al desarrollo de núcleos urbanos alrededor de cada estación del tren (véase más sobre esto en la sección 4.3).

Educación y cambio climático

Todas las escuelas de Arquitectura e Ingeniería y varios programas ambientales universitarios incluyen cursos de Sostenibilidad y Construcción Verde como parte de sus currículos. Varios institutos técnicos ofrecen cursos cortos y grados asociados en Fuentes Renovables de Energía. Además, existe el Centro de Estudios para el Desarrollo Sustentable de la Escuela de Asuntos Ambientales de la Universidad Ana G. Méndez que ha editado varias publicaciones sobre el tema de Desarrollo Sostenible, destacándose el libro *10 Principios y 100 estrategias para el Desarrollo Sostenible de Puerto Rico*. Esta institución ofrece un certificado de Diseño Verde a través de su programa de educación continua. Se han publicado, por otros autores, varios libros sobre el tema de Edificios Verdes.

El *Puerto Rico Energy Center* (PREC) se inició en el 2005 como un esfuerzo prioritario de la Iniciativa Tecnológica del Centro Oriental (conocido como INTECO por sus siglas en español) con la colaboración del Departamento de Energía de los Estados Unidos, como una contribución para crear un futuro energético estable para la región y Puerto Rico. El Centro es operado por la Universidad Ana G. Méndez (Campus Gurabo) con la participación de docentes e investigadores de diferentes disciplinas y universidades.

Innovación tecnológica local

Por otro lado, se destaca la fabricación de productos verdes incluyendo ventanas ecológicas como *BrightShade*[144], que actualmente se considera para la instalación en todas las escuelas públicas de Puerto Rico. También se desarrolló el "posterriqueño", diseñado por ingenieros y estudiantes del Recinto Universitario de Mayagüez (RUM) de la Universidad de Puerto Rico (UPR)[145], con el propósito de mejorar el sistema de iluminación pública de la isla. La luminaria está basada en la tecnología *Light Emitting Diode* (LED). Es capaz de reemplazar la luminaria actual que utiliza la tecnología *High Pressure Sodium* (HPS) de 100 vatios de consumo. Estos tipos de iniciativas impulsan la productividad nacional, la sostenibilidad y la reducción de emisiones de CO_2 al reducir los consumos de energía en los edificios mediante la innovación tecnológica.

En el 2007, *Standard Refrigeration* (*Mechanical Contractors*), en Guaynabo, recibió la primera y más alta certificación (Platino) del sistema *LEED*® v2.2 del USGBC en Puerto Rico. Este edificio de dos pisos incorpora tecnologías de uso eficiente de agua para el edificio y sus áreas verdes. El plan paisajista no requiere un sistema de riego permanente, reduciendo la necesidad de agua potable en el sitio. El proyecto incluye estrategias para mejorar la calidad del ambiente interior, incluyendo sistemas de monitoreo de CO_2 y el uso de materiales y pinturas de baja emisión. Además, se implantó un plan de calidad del ambiente interior durante las obras de construcción y antes de la ocupación para ayudar a mantener la comodidad y el bienestar de los ocupantes.

En noviembre del 2009, la Administración de Asuntos de Energía de Puerto Rico auspició la publicación del informe titulado *Achievable Renewable Energy Targets For Puerto Rico's Renewable Energy Portfolio Standard*[146]. Este informe aboga por el desarrollo de fuentes renovables a través de generación distribuida con especial atención a los techos de estructuras residenciales en el país.

En el 2011 se construyó Solaria, la primera Casa Ecológica prediseñada como prototipo para una firma privada en los terrenos de la Universidad Ana G. Méndez en Gurabo, como parte del *Puerto Rico Energy Center*[147].

Si deseamos transformar nuestros edificios a unos ecoamigables y que reduzcan las emisiones de CO_2 al ambiente, se hace necesario llevar los conceptos de eficiencia a otros renglones que tradicional y comúnmente no relacionamos con los consumos de energía y las emisiones de CO_2. Por ejemplo, la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados requiere la instalación de un contador de agua adicional entre la cisterna que cosecha aguas de lluvia y el inodoro, que pueda conectarse a la misma para operar con esas aguas. Ese contador adicional se utiliza para facturar las aguas de lluvia que terminan en el sistema sanitario de la AAA. Esto desalienta el uso de esta estrategia que, además de conservar agua, reduce los consumos del agua tratada potable que la AAA suministra

144 El producto fue patentado en el 2014 por el arquitecto Fernando Abruña y fabricado por la compañía local *Air Master*.

145 El proyecto fue propulsado por el Dr. Arturo Massol de Casa Pueblo.

146 Los autores son los doctores Agustín Irizarry, Efraín O'Neill y José A. Colucci del RUM-UPR.

147 Solaria fue prediseñada por el arquitecto Fernando Abruña como prototipo para la empresa Villas Mi Antojo.

a través de sistemas que consumen energía y que típicamente operan con generadores que consumen combustibles fósiles.

Todavía quedan más barreras que salvar. No existe una cultura de tasación de edificios que pueda aquilatar el verdadero valor de aquellas edificaciones que reduzcan las emisiones de GEI que propician el cambio climático. Algunas estrategias que no se consideran comúnmente en la valoración (tasación) de edificios incluyen sistemas degeneración de energía, cosechas de aguas de lluvia, reúso de aguas grises, el uso de materiales de aislación, innovaciones tecnológicas en baños, cocinas, puertas, ventanas y otras estrategias que pueden ser de fácil adopción. De la misma manera, aunque hay adelantos en la educación de los corredores de bienes raíces[148], todavía el encontrar un corredor entendido en la materia es la excepción y no la regla.

Hay que destacar esfuerzos embrionarios en la banca comercial y en las cooperativas de ahorro y crédito para desarrollar instrumentos de financiación que posibiliten incorporar estrategias verdes en las construcciones nuevas y existentes, incluyendo sistemas solares fotovoltaicos y los calentadores de agua solares.

Todas estas acciones, programas, esfuerzos, proyectos e ideas cuelgan de un elemento fundamental que debe integrarse a la política pública de nuestro país. El Plan de Uso de Terrenos debe ser una pieza clave para el desarrollo sostenible de Puerto Rico de cara al reto que nos presenta el cambio climático.

Vivienda sostenible y resiliente

En el 2001, estudiantes con sus respectivos profesores de las escuelas de Arquitectura y de Ingeniería de la Universidad de Puerto Rico obtuvieron el segundo lugar en la competencia más importante (*Architectural Livability*) del evento nacional *Solar Decathlon* celebrado en el *National Mall* en Washington D.C. y auspiciado por el Departamento de Energía de Estados Unidos y el *American Institute of Architects*. Esta importante victoria entre un total de 13 universidades finalistas es muestra de que el talento y conocimiento existe en Puerto Rico para desarrollar vivienda solar y sostenible capaz de mitigar el daño que las viviendas convencionales alimentadas con fuentes fósiles ocasionan.

En el 2013 se certificaron las primeras dos unidades de vivienda de interés social *Energy Star* por la compañía Verde Homes de Puerto Rico para el Departamento de la Vivienda del Municipio de San Juan y a través del Programa Home del Departamento de Vivienda y Desarrollo Urbano de Estados Unidos. Hasta el momento solo cuatro unidades de vivienda se han certificado en la isla bajo este programa. Se han hecho reformas recientes a los requisitos de este sistema de certificación para acomodarse mejor al contexto caribeño de nuestra isla. Se presume que este cambio ayudará a que diseñadores y constructores se interesen en certificar más unidades.

Desde el 2020 ha habido un crecimiento del 190 % en el total de viviendas certificadas de forma voluntaria para programas de energía cero y preparación para energía cero en los Estados Unidos y Canadá. Esto incluye un crecimiento del 440 % en viviendas unifa-

[148] Aquí destaca la labor de Aida Caraballo, la primera "*realtor* verde" del país.

miliares con más de 67,000 unidades certificadas en el 2022. En Puerto Rico no tenemos ninguna vivienda pública que cumpla con estos estándares.

Un reto primario que debe enfrentarse está ligado íntimamente al costo de las tecnologías y estrategias de sostenibilidad y resiliencia para las viviendas y la necesidad de que cumplan con los códigos vigentes y los que se proponen para el futuro. Los costos actuales de construcción sin incluir estas tecnologías son tan altos que imposibilitan que personas con escasos recursos puedan sufragarlos. Al añadir estas tecnologías de sostenibilidad y resiliencia, la vivienda se hace cada vez más difícil para muchos, en especial para el segmento de ingresos medianos y bajos. Pudiera argumentarse que los nuevos códigos son o pudieran ser inherentemente discriminatorios contra las clases socioeconómicas más vulnerables. Esto añade un reto adicional para buscar estrategias de financiación que puedan viabilizar el cumplimiento con los nuevos códigos de construcción verde y sistemas de certificación de estas viviendas que puedan valorar los ahorros en consumo y la resiliencia que ofrecen frente a eventos catastróficos ocasionados por el cambio climático.

A finales del 2020, se completó un proyecto demostrativo de vivienda sostenible, resiliente y asequible en las comunidades del Caño Martín Peña. El proyecto fue el resultado de un concurso de diseño patrocinado por el CIAPR, el CAAPPR, las comunidades del G8, el Fideicomiso de la Tierra del Caño Martín Peña y el Proyecto ENLACE. Se construyeron dos unidades a un costo aproximado de $95,000 cada una. Esto demuestra que la resiliencia y la sostenibilidad pueden ser viables económicamente bajo ciertos escenarios y circunstancias.

Durante los próximos diez años a partir del 2023, el crédito fiscal 45L proporcionará a los constructores $5,000 por cada vivienda unifamiliar y $1,000 por cada unidad multifamiliar certificada como *Zero Energy Ready Home*. Puerto Rico y los estados de California, Nueva Jersey, Nuevo México, Nueva York, Oregón y Washington están planificando o implantando actualmente códigos de energía cero o listos para energía cero.

Informes indican que Puerto Rico registró un aumento significativo en la instalación de sistemas fotovoltaicos. En una vista pública de la comisión de Energía de la Cámara de Representantes, portavoces de LUMA informaron que, desde el 2021 al presente, la cifra de clientes conectados al programa de medición neta aumentó de 25,000 a más de 56,000[149]. Esto representa aproximadamente un 5.6 % del total de viviendas en la isla.

Las temperaturas extremas registradas en Puerto Rico durante el 2023 y las temperaturas aún más altas que se pronostican para el futuro inmediato requieren la aclimatación de todas las residencias en Puerto Rico. Este es un asunto apremiante de salud pública.

Otro asunto importante es la dotación de placas solares y baterías a todas las viviendas unifamiliares, de manera que los residentes puedan mantener sus medicinas que necesitan refrigeración, como la insulina. Además, estas medidas permitirían la operación de ventiladores para personas que los necesitan para sobrevivir.

[149] Rivera Clemente, Y. 11 de mayo de 2023. Crece la conexión de clientes a sistemas de placas solares. *El Vocero.* https://www.elvocero.com/gobierno/legislatura/crece-la-conexi-n-de-clientes-a-sistemas-de-placas-solares/article_84e09a0e-ef45-11ed-a033-033a96f7638c.html.

En resumen, hemos progresado mucho en los pasados 30 años, pero aún falta mucho camino que entre todos haremos al caminar por la vía verde de la sostenibilidad. Los puertorriqueños tienen la esperanza de que la isla sea verde, no solo en sus campos y bosques, sino también en sus edificios y ciudades y en las conductas ambientales de todos para reducir las emisiones de CO_2 y lograr un Puerro Rico descarbonizado para el 2050. Esto aportará a la justicia climática de los más vulnerados.

4.3. Transportes y movilidad

El cambio climático que enfrenta el mundo desde las pasadas décadas representa un riesgo significativo y creciente para la seguridad, eficacia, equidad y sostenibilidad de la infraestructura de transporte y las comunidades a las que sirve. Las proyecciones de eventos naturales más frecuentes y severos –como fenómenos atmosféricos y tormentas tropicales– apuntan a la urgencia de atender esta amenaza crucial para el desarrollo económico y la cadena de suministros del país, sus municipios y comunidades.

Tal es la importancia de este asunto que la política pública del Departamento de Transporte de Estados Unidos (USDOT, por sus siglas en inglés) lidera actualmente los esfuerzos para prevenir o reducir el riesgo de que las manifestaciones del cambio climático afecten o paralicen las operaciones de los sistemas de transportación. Estamos ante una oportunidad única en una generación para hacerlo.

Datos del USDOT[150] especifican que el sector de la transportación genera un tercio de todas las emisiones de GEI en los Estados Unidos. Recordemos que, en el caso de Puerto Rico, el inventario de emisiones más reciente (2023) señala al sector de la transportación como el segundo emisor principal con el 26 % del total de emisiones al 2021, por vía de la combustión de gasolina de vehículos en las carreteras (ver la sección 3.3).

Los efectos del cambio climático inciden en la forma en que viajamos. Ejemplo de esto es el aumento de las turbulencias en los viajes aéreos[151]. Otro efecto es el daño directo e indirecto que los huracanes causan a la infraestructura. Aunque nos enfrentamos a grandes desafíos, a la misma vez podemos aprovechar las oportunidades de innovación y reingeniería para diseñar y construir una mejor infraestructura y un sistema de transportación resiliente y redundante que mitigue o elimine los efectos adversos del cambio climático.

La Ley 33-2019 –en el artículo 9, sección c– establece las guías que deben enmarcar las estrategias dirigidas al sector de la transportación y la movilidad en el P-MARCC. Esa sección hace énfasis solamente en el sector de transportación terrestre. Sin embargo, a partir del 2021, la política pública del gobierno de los Estados Unidos sobre el cambio climático se enmendó para atender y promover la transportación como un sistema nacional que abarca todas sus formas (modos): aérea, marítima y terrestre. La política pública federal dispone que las acciones para atender los efectos del cambio climático en el sector de la transportación y movilidad tengan un enfoque de intervención multimodal

150 U.S Department of Transportation. Climate Action.
151 The hidden danger of climate change on air travel: A more turbulent future (phys.org)

integrado[152]. Es crucial para Puerto Rico sincronizar su política pública y garantizar que cumpla con las políticas federales. Además, el gobierno puertorriqueño deberá analizar y recomendar acciones tomando en cuenta los otros modos de transportación que no están cobijados en la Ley 33-2019, como el aéreo y el marítimo.

Esa gestión cobra relevancia especialmente cuando varios de estos modos de transportación presentan exposición a diversas amenazas asociadas a las manifestaciones del cambio climático tales como inundaciones costeras y ocurrencia de huracanes, entre otras. Un análisis amplio promoverá que Puerto Rico tenga una infraestructura resiliente, acorde con las políticas públicas nacionales de Estados Unidos.

Otros factores necesarios en este enfoque multimodal son:

1. Considerar la transportación como una infraestructura importante para el desarrollo económico.
2. Reconocer que Puerto Rico es un conjunto de islas, por lo que su intercambio –tanto comercial como la movilidad de bienes y de personas con la región del Caribe y con el resto de los países del mundo– se da a través de sus puertos y aeropuertos. Ejemplo de esto es que el Aeropuerto Internacional Luis Muñoz Marín fue desde 1986 hasta el 2012 el centro de transbordo para el Caribe de la aerolínea American y su filial *American Eagle*.
3. Procurar que antes y después de un evento natural, la resiliencia y redundancia de estas instalaciones afecte mínimamente la cadena de suministros.

Esto es importante cuando las proyecciones del cambio climático anticipan la formación de fenómenos atmosféricos (como huracanes) con mayor intensidad y recurrencia.

Para atender las exigencias de la política pública federal y poder entender mejor las condiciones de los modos de transportación –marítima, aérea y terrestre–, Puerto Rico tendrá que enmendar la Ley 33-2019 y ampliar su política pública a tales fines.

4.3.1. Transportación marítima

A través de la historia hasta hoy, los puertos marítimos han tenido un papel esencial en el desarrollo económico. El modelo económico se impulsa por el intercambio comercial entre países y diferentes jurisdicciones de una misma nación. Según la Organización de las Naciones Unidas [ONU][153],

> "[…] Los puertos marítimos brindan acceso a los mercados globales y cadenas de suministros para todos los países, y son parte integral del transporte marítimo, así como de la pesca, el desarrollo de energía en alta mar y muchas actividades económicas en las zonas costeras. Con más del 80 % del volumen del comercio mundial transportado por mar, de puerto a puerto,

[152] *Climate Action Plan: Revitalizing Efforts to Bolster Adaptation & Increase Resilience* (2021).
[153] Asariotis, R. (2021). Climate change impacts on seaports: A growing threat to sustainable trade and development. Article No. 75 [UNCTAD Transport and Trade Facilitation Newsletter N°90 - Second Quarter 2021].

son nodos de infraestructura cruciales que sustentan las cadenas de suministros mundiales y son clave para las perspectivas futuras de comercio y desarrollo".

Puerto Rico cuenta con 15 puertos marítimos públicos que están bajo la administración de la Autoridad de los Puertos (APPR). Trece de ellos son del interés del Departamento de Seguridad Nacional de los Estados Unidos (DHS, por las siglas en inglés) por la cadena de suministros. Todos se distribuyen a lo largo de la franja costera en San Juan, Arecibo, Aguadilla, Mayagüez, Guánica, Guayanilla, Peñuelas, Ponce, Aguirre, Guayama, Yabucoa, Ceiba y Fajardo (Ilustración 22). Además, las islas de Vieques y Culebra cuentan con sus propios puertos por donde se mueve la carga y pasajeros. De estos, el principal puerto es el de San Juan, por donde se mueve más del 95 % de la carga y el 99 % de los pasajeros que llegan en barcos cruceros.

El informe *Seaborne Supply Chains* –realizado por *RAND Corporation* en 2018 por encomienda del DHS– hace recomendaciones que el gobierno de Puerto Rico y el gobierno federal deberían seguir para aumentar la resiliencia económica, la cadena de suministros y la capacidad de organización del grupo local, entre otras acciones. Todo esto deberá estar dirigido a preparar los trece puertos marítimos de importancia para el DHS en Puerto Rico ante la eventualidad de otro fenómeno atmosférico.

Ilustración 22.

Puertos marítimos públicos de Puerto Rico



Fuente del Mapa: *Rand's Seaborne Supply Chain Report* (2018)

4.3.1.1. Impactos en transporte marítimo por eventos naturales identificados

Por su ubicación en el litoral, los trece puertos de Puerto Rico son gravemente afectados con cierta frecuencia por el embate de tormentas tropicales o huracanes con sus marejadas ciclónicas, por oleajes fuertes, inundaciones costeras y, debido al cambio climático, por el aumento del nivel del mar. En pasados eventos naturales, las pérdidas económicas tanto de los daños directos a la infraestructura portuaria como de las interrupciones y retrasos en las operaciones –en especial en la cadena de suministros– han sido cuantiosas.

Además, estas instalaciones cuentan con una extensa red de carreteras para mover la carga entre los diferentes sectores económicos. Esto convierte la red vial en parte esencial de los análisis para mitigar los efectos del cambio climático en los puertos marítimos y para cumplir con el enfoque multimodal sugerido por el USDOT. Un ejemplo de ello fue el uso del Puerto de Ponce después del embate del huracán María, cuando dicho puerto jugó un papel protagónico en la distribución de suministros tanto para la región sur como para el resto de la isla principal. Cabe señalar que los puertos localizados en la costa este, sur y en Vieques y Culebra tienen una mayor probabilidad de recibir daños significativos por los impactos de los sistemas ciclónicos. La trayectoria de dichos fenómenos que vienen del este hacia el oeste o noroeste hace que esas regiones reciban el impacto directo con más frecuencia.

Hasta la fecha, no existe un enfoque único para la adaptación al cambio climático y la planificación de la resiliencia para la infraestructura de los puertos. No obstante, una de las alternativas para afrontar el alza del nivel del mar que analizan varias agencias federales (como la Guardia Costera, el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos (USACE) y la Administración Marítima) es la construcción de barreras marítimas duras tales como diques o rompeolas.

4.3.2. Transportación aérea

La aviación comercial ha sido uno de los modos de transportación predominantes durante los pasados 50 años, facilitando la conectividad entre ciudades y promoviendo la movilidad de bienes, productos y personas. Así se evidenció más durante el período de la pandemia de COVID-19, cuando el sector de la transportación aérea fue fundamental para distribuir las vacunas a todo el mundo.

No obstante, un informe del Instituto Brookings[154] en el 2023 indicó que si el nivel del mar continúa elevándose según las proyecciones, cerca del 20 % del total de pasajeros se afectará. Estas proyecciones pudieran tener lugar si no se toman las medidas de mitigación y adaptación necesarias para alargar la vida útil del aeropuerto, de acuerdo a las normas internacionales. Muchos de los principales aeropuertos de los Estados Unidos –incluyendo al principal aeropuerto de Puerto Rico– están localizados cerca del litoral, lo que hace a dicha infraestructura vulnerable al aumento del nivel del mar.

Los aeropuertos en el Caribe, en la costa este y el golfo de México de los Estados Unidos enfrentan el riesgo de interrupciones frecuentes en sus operaciones con el aumento pronosticado de la intensidad y frecuencia de eventos asociados al cambio climático. Incluso se exponen al cierre por días o semanas, similar a lo ocurrido en Puerto Rico y las Islas Vírgenes de Estados Unidos después del paso de los huracanes del 2017.

La Administración Federal de Aviación (FAA, por sus siglas en inglés) creó el documento *Plan de acción climática de la aviación 2021* (https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/2021-11/Aviation_Climate_Action_Plan.pdf), por directriz del secretario de Transportación y la política pública vigente para afrontar los retos de mitigar los posibles efectos

[154] Adie Tomer y Caroline George. (2023). *America's airports aren't ready for climate change. Brookings Institution*.

del cambio climático sobre la infraestructura aeroportuaria y sus potenciales repercusiones sobre la economía nacional. El propósito es alcanzar la meta de cero emisiones para el 2050. Este plan identifica acciones para disminuir las emisiones a través de:

- Desarrollo de nuevas tecnologías de aeronaves y motores más eficientes.
- Mejoras en las operaciones de las aeronaves en todo el Sistema Nacional del Espacio Aéreo.
- Producción y uso de combustibles de aviación sostenibles (SAF, por sus siglas en inglés).
- Electrificación y, potencialmente, uso de hidrógeno verde como soluciones para la aviación de corta distancia.
- Avances en las operaciones aeroportuarias en los Estados Unidos.
- Iniciativas internacionales como el estándar de CO2 de los aviones y el Plan de reducción y compensación de carbono para la aviación internacional.
- Apoyo a la investigación en la ciencia del clima.

El sistema de aeropuertos públicos de Puerto Rico (Ilustración 23) es uno de los ejes principales para la economía del país. En total son 10 aeropuertos públicos localizados en municipios costeros. Estos son los aeropuertos Luis Muñoz Marín (SJU); Comandante Fernando Luis Ribas Dominicci en Isla Grande, San Juan (SIG); Antonio (Nery) Juarbe Pol en Arecibo (ABO); Rafael Hernández en Aguadilla (BQN); Eugenio María de Hostos en Mayagüez (MAZ); Mercedita en Ponce (PSE); Dr. Hermenegildo Ortiz Quiñones en Humacao (X93); José Aponte de la Torre en Ceiba (RVR); Benjamín Rivera Noriega en Culebra (CPX); y Antonio Rivera Rodríguez en Vieques (VQS).

Ilustración 23.

Aeropuertos públicos de Puerto Rico



Mapa creado usando la aplicación *Great Circle Mapper*.

Solo cuatro de estas instalaciones (SJU, BQN, PSE y RVR) cuentan con pistas de aterrizaje de más de 6,000 pies de largo, que permiten manejar las operaciones de casi

cualquier modelo de avión. Esas condiciones son esenciales para las operaciones de respuesta a un desastre natural pues permiten la llegada de un mayor volumen de suministros. Los seis aeropuertos restantes tienen pistas de 5,000 pies o menos, utilizadas para vuelos recreacionales o comerciales de corto alcance.

Todos los aeropuertos públicos de Puerto Rico son parte del Plan Nacional de Sistemas Aeroportuarios Integrados de la FAA, el cual tiene como objetivo el desarrollo de la infraestructura e instalaciones aeroportuarias a través de sus diferentes programas para asignar los fondos y recursos necesarios.

El Aeropuerto Internacional Luis Muñoz Marín, en Carolina, tiene una función protagónica en la conectividad de Puerto Rico y el Caribe oriental con el mundo, pues mueve a través de sus instalaciones a millones de pasajeros y libras de carga aérea, desde su inauguración en 1955. Según la *Airports Council International* (ACI) en su informe 2019 de clasificación y rango por movimiento de pasajeros, carga y operaciones de los aeropuertos mundiales, el SJU es el aeropuerto de mayor rango en las tres categorías de la región del Caribe. Datos de la FAA[155] indican que, en el movimiento de abordaje de pasajeros y carga aérea para el 2021, el SJU ocupó a nivel nacional las posiciones 38 y 24, respectivamente. Otros puntos de importancia son los aeropuertos Rafael Hernández en Aguadilla y el Mercedita en Ponce.

4.3.2.1. Impactos en el transporte aéreo por eventos naturales identificados

Los eventos atmosféricos como los sistemas ciclónicos, lluvias y vientos fuertes afectan con frecuencia las operaciones aéreas en Puerto Rico. Por esto, es necesario propiciar la mitigación, resiliencia y redundancia de la infraestructura aeroportuaria para minimizar los impactos en la cadena de suministros y la movilidad de las personas. Para alcanzar dicho objetivo, se realizó un análisis de los posibles efectos en cada aeropuerto de Puerto Rico. El análisis identificó que dos de estas instalaciones están sujetas a un mayor impacto debido a las manifestaciones del cambio climático. Estas son:

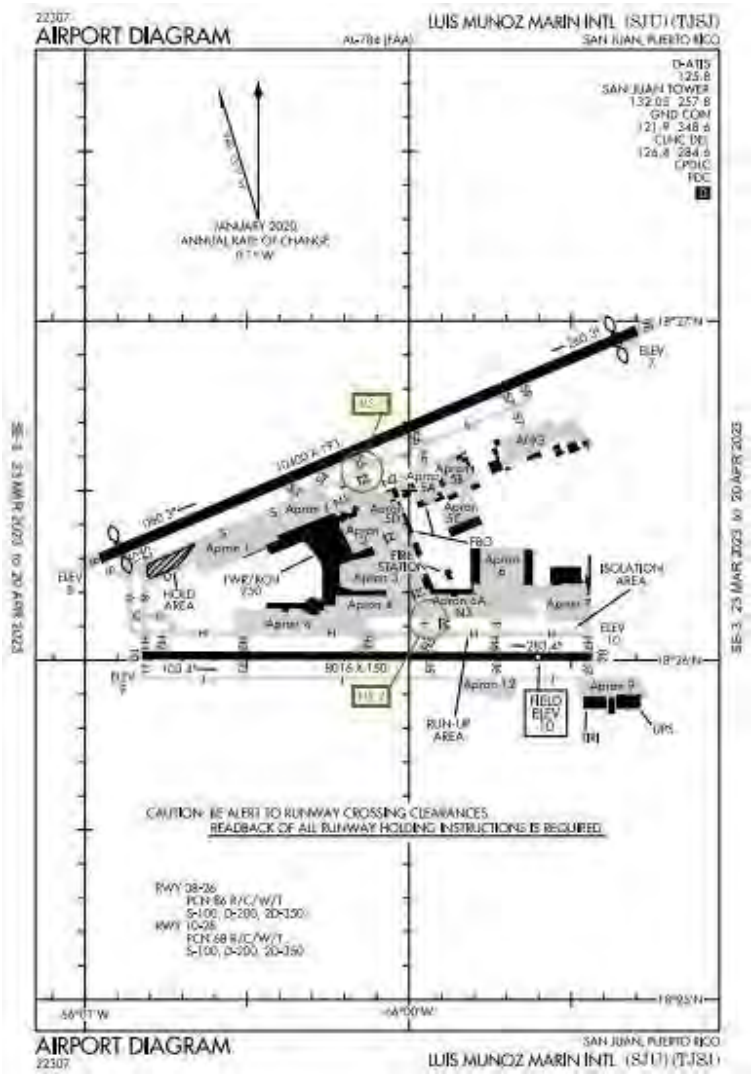
- Aeropuerto Internacional Luis Muñoz Marín

    1. El principal aeropuerto de Puerto Rico cuenta con dos pistas de aterrizaje. La altura oficial del SJU es de 9.6 pies sobre el nivel del mar, según el portal de datos e información de aeropuertos de la FAA[156]. Dicho punto se encuentra en la pista de aterrizaje 10-28, la cual está alineada y paralela al expreso Román Baldorioty de Castro. Sin embargo, la pista principal 08-26[157] en su tramo final hacia la laguna Torrecillas está a un nivel de 7 pies sobre el nivel del mar (Ilustración 24).

[155] Passenger Boarding (Enplanement) and All-Cargo Data for U.S. Airports. FAA.
[156] Accese el portal en: https://adip.faa.gov/agis/public/#/airportData/SJU
[157] En términos operacionales para la torre de control de la FAA, la pista 08-26 es la pista principal del aeropuerto. Operacionalmente, la pista 08-26 se designa como principal ya que es la más larga de ambas (aproximadamente 10,000 pies de largo) y puede acomodar cualquier modelo de avión sin restricciones. También se le designa como la pista principal porque fue la primera en construirse en la década de 1950. La pista 10-28 fue construida en la década de 1970.

Ilustración 24.

Diagrama del Aeropuerto Internacional Luis Muñoz Marín



Fuente: FAA

2. Ante las proyecciones sobre el alza en el nivel del mar, podría haber algún efecto sobre la infraestructura del SJU. Usando la herramienta *Sea Level Rise Viewer*[158] de la NOAA y en un escenario donde el nivel del mar subiera 5 pies para el 2050, la pista principal 08-26 y algunas antepistas de rodaje podrían quedar inoperantes en su extremo este (Ilustración 25). De darse este escenario, tendría grandes repercusiones en las operaciones del SJU, lo que podría significar una merma en las operaciones aéreas y en el movimiento de pasajeros y carga, con consecuencias en

158 Accese la herramienta en: https://coast.noaa.gov/digitalcoast/tools/slr.html.

la economía general de Puerto Rico, particularmente en la región de San Juan, tomando en cuenta la política pública de desarrollar los aeropuertos regionales. El nivel de impacto dependerá de cómo se afecte la pista 08-26. Entre las posibles consecuencias podrían estar el cierre total de la pista o solo el uso parcial en el tramo no afectado, lo que restringiría el uso solo para aviones de menor capacidad. De cerrarse la pista 08-26, esto implicaría que el SJU podría perder hasta un 50 % de su capacidad operacional de despegues y aterrizajes. Además, supondría restricciones a las operaciones de aviones de mayor capacidad como los 747, 777, MD11, A330, entre otros, que no podrían operar a toda capacidad, posiblemente a una capacidad de carga de 75 % o menos, ya que solo quedaría en operaciones la pista 10-28, pero esta tiene solo 8,000 pies de largo.

Ilustración 25.

Mapa de alza de 5 pies del nivel del mar y posibles efectos sobre el Aeropuerto Internacional Luis Muñoz Marín para el 2050



Mapa creado usando NOAA Sea Level Rise Viewer.

3. El SJU puede afectarse también por amenazas no relacionadas con el cambio climático como son los tsunamis, debido a su altura sobre el nivel del mar.

- Aeropuerto Internacional Mercedita (PSE) en Ponce

1. Este aeropuerto se encuentra a 28.4 pies sobre el nivel del mar y aproximadamente a 2.18 millas de la línea de costa, de acuerdo con los datos de la FAA. Por esta razón, este aeropuerto no se encuentra dentro de la zona propensa a inundación costera, alcance del aumento del nivel del mar o tsunami.

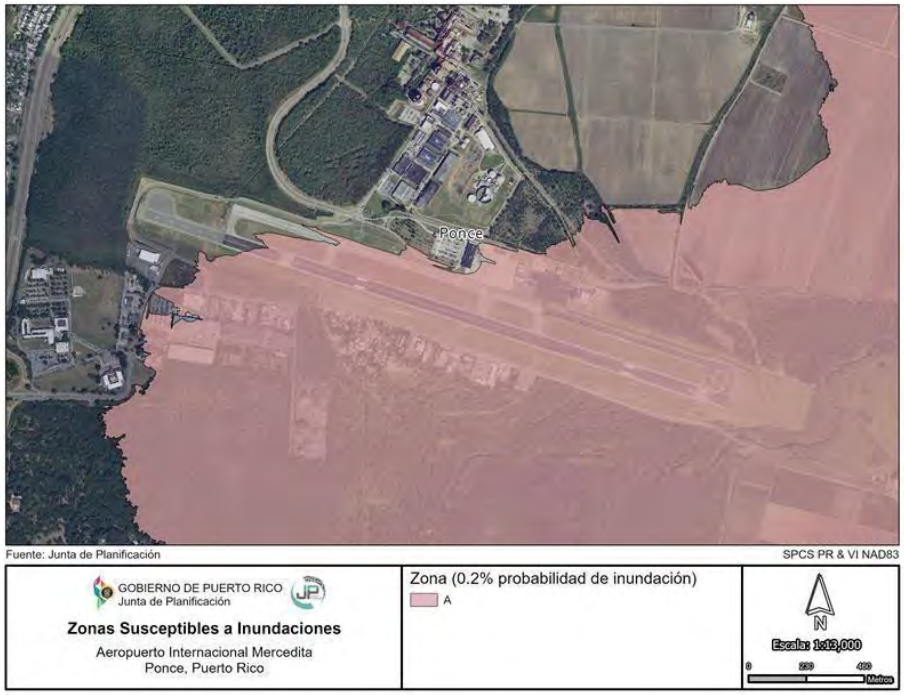
2. Sin embargo, este aeropuerto tiene un problema de inundaciones, en especial cuando ocurren lluvias torrenciales. Cuando estos eventos ocurren,

como sucedió durante el huracán María, el aeropuerto tiene que cancelar sus operaciones y cerrar. Esto se debe a que los últimos 2,000 pies hacia el este de la pista 12-30 quedan en la zona inundable de cauce mayor del río Inabón (Ilustración 26), según el *National Flood Hazard Layer Viewer* de la Agencia Federal para el Manejo de Emergencias (FEMA, por siglas en inglés). Si esto no se corrige, habría el riesgo de que esta instalación aérea quede inoperante por los eventos extremos de lluvia más frecuentes e intensos que se anticipan por el cambio climático.

3. A mayo del 2023, la APPR mantenía conversaciones con el USACE sobre esta situación y se encontraba identificando las posibles fuentes de financiamiento para que USACE realice un estudio de escorrentías y de inundación con el propósito de que eventualmente se lleven a cabo los proyectos necesarios para el control de inundaciones en el PSE.

Ilustración 26.

Zonas inundables en el Aeropuerto Internacional Mercedita en Ponce



Fuente: Mapa Puerto Rico interactivo. Junta de Planificación de Puerto Rico

El resto de los aeropuertos mencionados están fuera de zonas de tsunami, inundaciones costeras, o de inundaciones de cauce mayor. De todos estos aeropuertos, el BQN en Aguadilla es el más protegido, ya que no existen ríos en su cercanía y el mismo se encuentra a 237 pies sobre el nivel del mar. Esto lo pone fuera de la posibilidad de ser afectado por un tsunami.

4.3.3. Transportación colectiva

La transportación colectiva es parte esencial del sistema de transportación de una ciudad o región. Dicho sistema es clave para mover personas de un punto A hacia punto B. Uno de los objetivos de estos sistemas es satisfacer la demanda de viajes sobre todo del sector de la población más desventajado que no puede costear la compra u operación diaria de un automóvil. Esta visión ha ido cambiando por los pasados años cuando dicho sistema ha cobrado notoriedad como pieza clave para mitigar las emisiones que aceleran el cambio climático. El poder ofrecer y satisfacer las demandas de viaje de los usuarios convierte a la transportación colectiva en un sistema aventajado en comparación con el uso del automóvil. Entre las ventajas están:

1. Es más eficiente en la movilización de personas que el automóvil. Un autobús puede mover a 45 personas, mientras que un automóvil puede mover a cinco personas[159]. La capacidad de mover a más personas reduce el uso del automóvil y, con ello, bajan las emisiones de GEI.

2. Por lo anterior, los autobuses son más amigables al ambiente que los automóviles. Hoy en día, hay una transición hacia autobuses híbridos y/o eléctricos. Estas acciones disminuyen aún más las emisiones de la transportación colectiva.

3. Los costos operacionales de la transportación colectiva son una quinta parte del costo de operar un vehículo privado.

4. La transportación colectiva necesita menos espacio geográfico para operar que los automóviles. Un autobús necesita solo un carril para operar; un tren, rieles. Estas infraestructuras ocupan menos espacio que la requerida por los automóviles, los cuales necesitan una red de carreteras de dos o más carriles para mover la gran cantidad de vehículos.

La Ley 33-2019 reconoce la importancia de los sistemas de transportación colectiva como parte de las estrategias para lidiar con el cambio climático. Establece en su artículo 9, sección c (1 y 2), que las estrategias se enmarquen en fomentar el uso del transporte público, entre otras guías. La encomienda está alineada con la política pública de la administración Biden que espera que para el 2030 este sector reduzca en un 50-52 % los niveles de emisiones del 2005. La Administración Federal de Transporte (FTA, por las siglas en inglés) lanzó el programa Desafío de Transportación Colectiva Sostenible[160] para un Planeta Saludable, en junio de 2021, para cumplir con las metas federales. La iniciativa busca alentar a las agencias de tránsito a tomar medidas audaces para reducir aún más las emisiones del transporte público.

En Puerto Rico, solo los municipios de Yabucoa y Vega Baja, y la Autoridad de Transporte Integrado (ATI) son partícipes de dicho programa[161]. Además, la FTA creó otros progra-

159 UCLA's Institute of Transportation Studies. *Best Practices in Implementing Tactical Transit Lanes*.
160 Sustainable Transit for a Healthy Planet Challenge | FTA (dot.gov).
161 Véase: Challenge Participants | FTA (dot.gov)

mas, bajo la Ley Bipartita de Infraestructura de 2021[162], para fomentar el desarrollo de la transportación colectiva. Algunos de estos programas son:

1. Programa de accesibilidad de todas las estaciones.
2. Programa para autobuses y sus instalaciones.
3. Programa para inversiones de capital.
4. Programa piloto de ferri eléctrico o de baja emisión.

La Ley de Infraestructura 2021 autoriza hasta $108,000 millones para apoyar las iniciativas de los programas de transportación pública[163] para un período de 5 años. De esos fondos, hay $5.6 mil millones para la compra de autobuses de baja o ninguna emisión y para la construcción de instalaciones de combustible y mantenimiento. También se asignan $250 millones para la transición a ferris de baja o ninguna emisión.

Puerto Rico cuenta con cuatro componentes principales en su sistema de transportación colectiva para poder beneficiarse de estos programas federales. Estos son:

1. Autoridad Metropolitana de Autobuses (AMA)

   La AMA opera una red de rutas a través de la región metropolitana de San Juan. Esta incluye los municipios de San Juan, Trujillo Alto, Carolina, Loíza, Bayamón y Toa Baja (Ilustración 27). Cuenta con 24 rutas que operan de lunes a sábado. No operan los domingos. La AMA tiene una flota de 101 autobuses[164].

Ilustración 27.

Mapa de rutas de la AMA



[162] Véase: FTA Program Fact Sheets under the Bipartisan Infrastructure Law | FTA (dot.gov)
[163] Véase: Bipartisan Infrastructure Law | FTA (dot.gov)
[164] Véase: AMA (pr.gov)

Aunque la AMA cubre una gran extensión geográfica, cabe señalar unas deficiencias en sus operaciones actuales que tienen que corregirse para proveer un servicio eficiente y una alternativa a la necesidad de viajes de los ciudadanos. Estas son:

a) Reducción de rutas y servicios.

   En el 2014, la AMA anunció[165] la reducción de 37 a 14 rutas y la eliminación del servicio los domingos, debido a problemas financieros y la incapacidad de poner en operación una gran cantidad de sus autobuses.

b) Inconsistencia en la puntualidad de los autobuses.

   Históricamente, la AMA ha tenido problemas en cumplir con el itinerario de sus rutas. Esto hace al sistema ineficiente y fomenta la pérdida de usuarios.

Más allá de estas deficiencias, la AMA se ha movido en la dirección correcta en lo referente al cambio climático. En febrero del 2023, la AMA anunció a través de su página electrónica la compra de 12 autobuses de 40 pies de largo como parte del programa de reemplazo de flota, utilizando los fondos disponibles de la Ley de Infraestructura del 2021. Los nuevos autobuses son más eficientes y producen menos emisiones.

2. Tren Urbano

El Tren Urbano (TU) cubre una ruta que va desde Bayamón hasta la estación de Sagrado Corazón en Santurce (Ilustración 28). Cuenta con 16 estaciones a lo largo de su ruta.

Ilustración 28.

Mapa alineación del tren urbano



En sus años de operación, el TU ha tenido muchos problemas en atraer usuarios. Entre estos problemas están:

[165] Del Valle Hernández, S. (5 de agosto de 2014). La AMA reestructurará sus rutas de servicio. *Primera Hora.*

a) La falta de coordinación con otros modos de transporte como la AMA y los porteadores públicos ha hecho ineficiente la operación del TU.
b) La falta del desarrollo de sus alrededores a través del concepto de Desarrollo orientado al transporte (TOD).

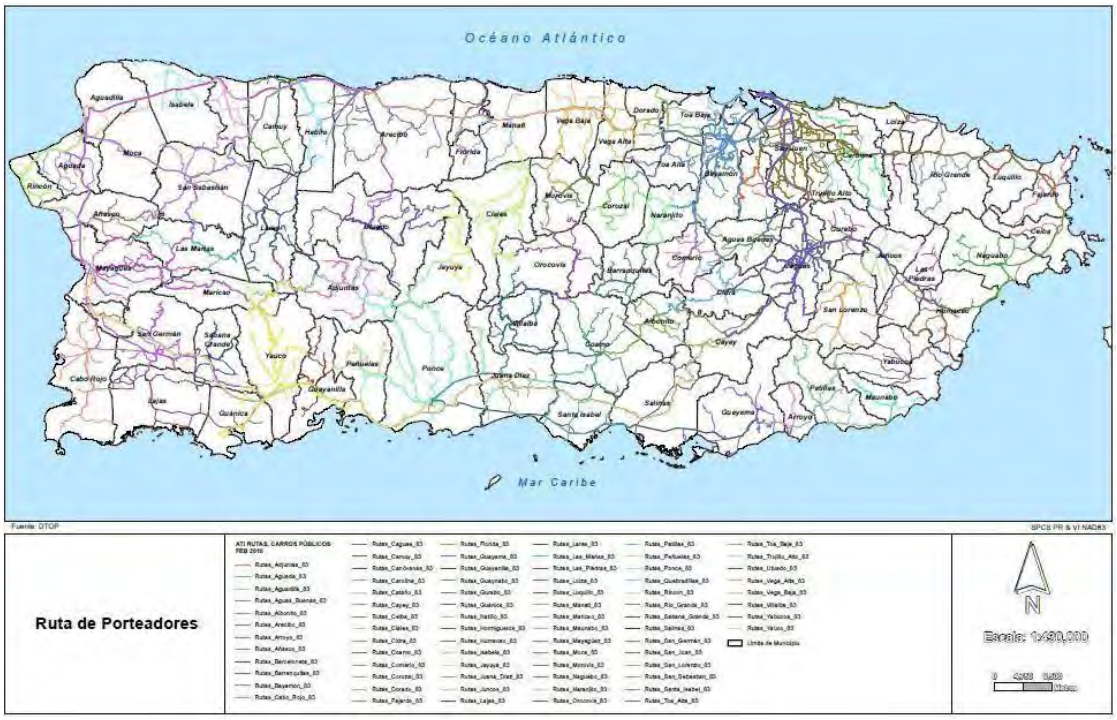
Otro problema que tiene el TU es que consume mucha energía. Una manera de disminuir ese consumo energético sería colocar placas solares en el techo de sus estaciones.

3. Porteadores públicos

Los porteadores públicos ofrecen sus servicios de mover personas en todo Puerto Rico. Son prácticamente el único servicio de transportación colectiva en la mayoría de los municipios fuera de la región metropolitana de San Juan. Según el Instituto de Estadísticas de Puerto Rico, hay registradas 386 rutas de porteadores públicos[166]. De estas, para el 2010, la Autoridad de Carreteras y Transportación (ACT) tenía registradas como activas solo 76 rutas (Ilustración 29). Esto equivale a un 19.7 % de todas las rutas registradas. Reactivar a los porteadores públicos a través de nuevas rutas que estén alineadas con las nuevas tendencias poblacionales y de viaje será importante como estrategia para ayudar a disminuir las emisiones de GEI.

Ilustración 29.

Mapa de rutas de porteadores públicos 2010



Fuente: DTOP

[166] Véase: Mapa de rutas de porteadores públicos - Conjuntos de datos - Datos.PR (estadisticas.pr)

4. Ferris

Los ferris son parte esencial de la transportación colectiva. Puerto Rico tiene tres rutas de ferris: Cataño-San Juan, Ceiba-Vieques y Ceiba-Culebra (Ilustración 30).

Ilustración 30.

Rutas de ferris en Puerto Rico



Fuente de Mapas: *Puerto Rico Ferries*[167]

El servicio del ferri es la forma económica de movilidad de Vieques y Culebra con la isla grande. Es de esperar que las nuevas tecnologías en embarcaciones más eficientes y con menos emisiones hará más rentables esos servicios.

4.3.4. Vehículos eléctricos

Una de las tendencias más marcadas como parte de la iniciativa para reducir o eliminar las emisiones ha sido promover el uso de los vehículos eléctricos. Todas las grandes manufactureras de automóviles del mundo están desarrollando sus propias líneas de ese tipo de vehículo. El gobierno federal a través del Servicio de Rentas Internas (IRS) y la sección de su código 30D[168] ofrece un crédito de hasta $7,500 para promover la compra de estos autos. En Puerto Rico, la Ley para el Fomento de los Vehículos Impulsados Mayormente por Electricidad (Ley 81-2014)[169] establece un crédito de hasta $2,000 en los arbitrios para estos vehículos. Informes anticipan que para el 2040, un 75 % o ¾ de los carros nuevos vendidos a nivel mundial serán eléctricos[170]. Los países desarrollados como China, EE. UU. y Europa serán los principales mercados para estos vehículos. Puerto Rico debe atemperarse a estas nuevas tendencias.

Además de los incentivos, Puerto Rico debe superar los problemas de infraestructura para hacer viables la compra y uso de estos vehículos. Estos son:

167 Véase: Routes and schedules - Puerto Rico Ferry anchored by Hornblower.
168 Véase: Credits for New Clean Vehicles Purchased in 2023 or After | Internal Revenue Service (irs.gov)
169 Véase la Ley 81-2014.
170 *The future lies with electric vehicles*. *The Economist*.

1. Falta de infraestructura para recargar los vehículos eléctricos.

   Actualmente existen muy pocas localidades para la recarga. Uno de los pocos lugares que cuenta con dichas instalaciones es San Patricio Plaza. Dichas áreas cuentan con solo cuatro estaciones de recarga.

   Aunque hay pocas estaciones de carga, otras empresas del sector privado han anunciado su intención de construir áreas de recarga para vehículos eléctricos para el 2030.

   Para que un plan de desarrollo de estaciones de recarga en todos los municipios sea viable, es necesario que los vehículos eléctricos sean rentables.

2. Costos energéticos.

   Este renglón será clave para que la población opte por comprar vehículos eléctricos. Los altos costos energéticos de Puerto Rico harían poco viable que sectores poblacionales con ingresos medianos o bajos los adquieran.

3. La falta de mano de obra diestra.

   Una de las preocupaciones es los pocos talleres de mantenimiento y mecánicos diestros en el manejo y reparación de dichos vehículos eléctricos. Se debería crear un programa de desarrollo de fuerza laboral enfocado en adiestrar a los mecánicos y técnicos necesarios para el mantenimiento de estos vehículos.

   Atender prontamente estas deficiencias en la infraestructura y áreas de mantenimiento y servicios para los vehículos eléctricos será importante para la viabilidad, rentabilidad y usos de estos autos.

4.3.5. Sistema de carreteras

Como mencionamos en la sección 4.2, Puerto Rico cuenta con un complejo sistema de carreteras que brinda conectividad a prácticamente todos los municipios. El sistema vial comprende aproximadamente 14,400 kilómetros de carreteras (Ilustración 28), según el documento *Guías para la selección e instalación de rótulos de orientación*,[171] publicado en el 2015 por la ACT. Este extenso sistema ha promovido que el automóvil sea el método de transportación más usado por los ciudadanos.

[171] Véase: https://act.dtop.pr.gov/fotos/transito/mutcd2009.pdf.

Ilustración 31.

Mapa de las carreteras principales de Puerto Rico



Fuente del Mapa: *Discover Puerto Rico*

La mediana de transportación hacia el trabajo en Puerto Rico fue de 27.1 minutos, según la Encuesta de la Comunidad 2021 producida por la Oficina del Censo. La cifra contrasta con la mediana de los Estados Unidos de 25.6 minutos para el mismo período, una diferencia de 1.5 minutos, lo que podría significar que en Puerto Rico se emite en promedio 1.5 minutos más de GEI.

Otro factor que se debe entender del sistema de carreteras de Puerto Rico es que, debido a su gran accesibilidad, muchas de estas carreteras están construidas en áreas clasificadas como de riesgos a través de las montañas, a lo largo de los valles inundables y la costa, lo que las hace vulnerables a eventos atmosféricos o geológicos. Ejemplo de una de estas carreteras es la PR-167 de Naranjito a Comerío. Esta carretera es susceptible a derrumbes cuando ocurren eventos de lluvias fuertes, lo que deja intransitable la principal vía de acceso que utilizan los ciudadanos de Comerío. Asimismo, durante el embate de los huracanes Irma y María, carreteras como la PR-187 en Piñones, Loíza, y la PR-3 entre los municipios de Maunabo y Patillas fueron severamente afectadas por la marejada ciclónica y las grandes acumulaciones de arena en sus carriles. La situación provocó el cierre de dichas vías, lo que dejó incomunicadas a las comunidades. Cabe señalar que el Instituto de Investigación y Planificación Costera de Puerto Rico (CoRePI-PR) ha identificado secciones de carreteras en la zona costanera que están expuestas y tienen alta probabilidad de ser afectadas por inundaciones costeras.

Los esfuerzos de mitigación y resiliencia del sistema de carreteras se hacen imperativos, sobre todo, en aquellas identificadas como de alto riesgo a los eventos asociados con el cambio climático.

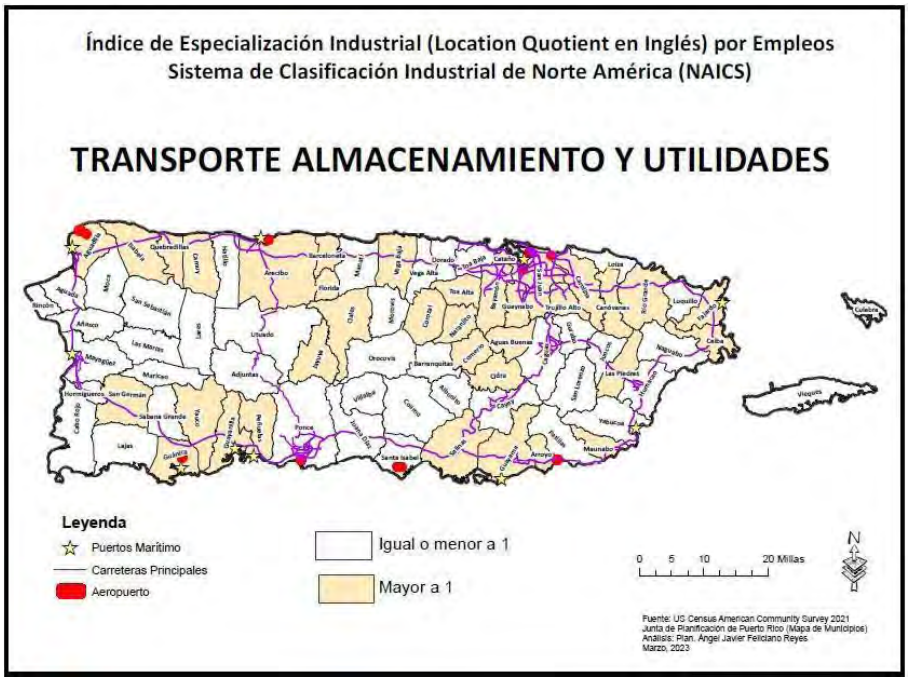
4.3.6. **Municipios con alta actividad económica que requieren mayor infraestructura de transportación**

Como toda actividad económica, los proveedores de los diferentes sectores del transporte suelen localizarse en lugares accesibles a la infraestructura principal de transportación, a centros comerciales e industriales y lugares de alta concentración poblacional. Conocer si existe una concentración espacial de este sector es vital para localizar y entender si dichos centros de aglomeración están en áreas de riesgos y para la priorización de los cursos de acción.

Para poder identificar si existe ese patrón espacial, se calculó el índice de especialización industrial, –o *location quotient* (LQ) como comúnmente se le conoce en inglés– para medir si existe concentración laboral en un sector en específico en Puerto Rico. El índice es muy utilizado por agencias federales como el Departamento del Trabajo y el Departamento de Comercio. Se utilizaron los datos basados en el Sistema de Clasificación Industrial de Norte América para el sector laboral de transportación, y almacenes y utilidades de la Encuesta de la Comunidad del Censo para el 2021. Aquellos municipios con un índice de especialización mayor de 1 son los que tienen concentración y dominan ese mercado laboral. Entre los municipios que presentan un índice de especialización mayor de 1 están: San Juan, Carolina, Río Grande, Fajardo, Ceiba, Maunabo, Arroyo, Guayama, Salinas, Guayanilla, Guánica, Aguadilla, Isabela, Quebradillas, Arecibo, Vega Baja, Cataño, Naranjito, Guaynabo, Aguas Buenas, Corozal, Cidra y Las Piedras, entre otros (Ilustración 32).

Ilustración 32.

Índice de especialización industrial por empleos, según el sistema de clasificación industrial de Norte América



Fuente de los datos: *US Census*

Basado en los resultados, se puede observar una concentración dentro de la región metropolitana de San Juan para este sector. Uno de los factores que pueden a contribuir a esta concentración espacial es la cercanía a las principales instalaciones de transportación que son el puerto de San Juan y el aeropuerto internacional por donde transita más del 90 % de la carga y pasajeros que entran y salen de Puerto Rico. Otros factores son los parques industriales a lo largo de las carreteras PR-22 y PR-3, un único sistema de transportación colectiva como la AMA, el TU y los porteadores públicos. Esto hace de esta región la más activa económicamente y la más accesible por los diferentes modos de transportación que operan en sus límites geográficos.

Otro de los centros de aglomeración que se puede apreciar es el de Fajardo-Ceiba, lo que se justifica con la operación en Ceiba del ferri que da servicios de pasajeros y carga hacia las islas municipios de Vieques y Culebra y hacia las Islas Vírgenes de Estados Unidos. En Fajardo se localizan los grandes hospitales, centros comerciales y oficinas profesionales de la región este.

Este análisis es importante para implantar los cursos de acción de este Plan, ya que ayudaría a priorizarlos. También ayudaría a fomentar y ampliar los otros centros de concentración fuera de San Juan, como parte de una estrategia de resiliencia y redundancia ante futuros eventos catastróficos que serán más frecuentes debido al cambio climático.

4.4. Residuos sólidos

4.4.1. Efecto de los residuos sólidos en el cambio climático en Puerto Rico

Los seres humanos usan productos, servicios y materiales en sus vidas diarias y estos generan desperdicios y residuos[172]. Cada producto, servicio o material se provee mediante una secuencia de eventos, pasos o ciclo de vida (también denominado *cradle to grave* o de la cuna a la tumba), según se muestra en la Ilustración 33:

a. extracción de materiales de la corteza terrestre

b. refinamiento/procesamiento de materia prima a materiales útiles

c. preparación/manufactura de productos y materiales

d. empaque/distribución/venta

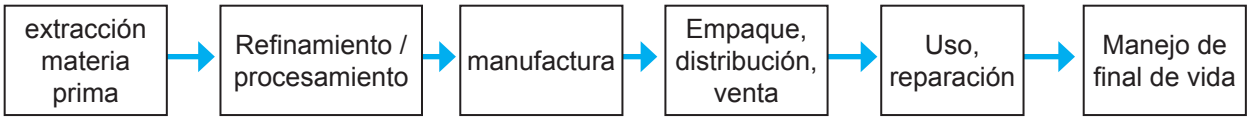
e. uso/reparación

f. manejo de fin de vida –reutilización, reciclaje, incineración o disposición/desecho

[172] El término residuo implica que el material tiene uso aún; desperdicio tiene la connotación de que ya el material no tiene utilidad.

Ilustración 33.

Ciclo de vida de un producto



Claramente, la última etapa o fin de vida del producto genera unas consecuencias adversas en términos de desperdicios y su impacto. Pero, además de la etapa de fin de vida, todas las demás etapas consumen materiales y energía (que puede generar GEI), generan desperdicios y emisiones. También hay que tomar en cuenta que entre las etapas hay procesos de transportación que consumen mucha energía (y pueden producir emisiones de GEI).

El punto importante aquí es que no solamente se deben considerar las consecuencias e impactos en el cambio climático causados por las actividades en la etapa de manejo de fin de vida (reciclar, incinerar, enterrar en rellenos sanitarios). Igualmente, se debe considerar el efecto en el cambio climático causado por todas las etapas del ciclo de vida de los productos (extracción de material, procesamiento, transporte de material, manufactura, distribución y uso) para así tomar acciones que tengan un efecto significativo en el cambio climático[173]. Por ejemplo, un producto que se exporta del puerto de Shanghái, China, a San Juan recorre una distancia de cerca de 22,200 millas en barco hasta Long Beach, California, 2,400 millas adicionales para llevarlo en camión al puerto de Jacksonville, Florida, y finalmente 1,400 millas en barco para llegar a San Juan –todo ese recorrido usando combustibles fósiles. Estos viajes generan una gran cantidad de GEI (se indica que la flota nacional de algunos países industrializados genera más contaminantes que todos los vehículos del país[174]). Si se envía en avión, las emisiones son mayores. Para tener una idea del impacto de materiales en el cambio climático, los plásticos tienen una huella de carbono significativa, contribuyendo con el 3.4 % de las emisiones globales de GEI a lo largo de su ciclo de vida. En el 2019, los plásticos generaron 1,800 millones de toneladas de emisiones, con el 90 % de esas emisiones de su producción y conversión de combustibles fósiles[175].

En el caso de Puerto Rico, nuestros productos se pueden fabricar locamente y distribuirse por transportación terrestre o fabricarse fuera de Puerto Rico e importarse por avión o barco. Luego de usarse, estos productos se descartan y entran al proceso de manejo de desperdicios/residuos sólidos (o fin de vida). En Puerto Rico, para este proceso de manejo de desperdicios/residuos sólidos se usan distintas estrategias u alternativas: reciclaje, composta (lo cual se usa para material orgánico –vegetativo y comida), manejo especial (gomas, aceite y baterías, entre otros) y el depositar en un relleno sanitario. Se han pre-

[173] Véase en el portal de EPA: https://www.epa.gov/ghgemissions/sources-greenhouse-gas-emissions#%3A~%3Atext%3DTransportation%20(28%25%20

[174] McCarthy, N. (19 de diciembre de 2019). How Maritime Emissions Compare to Cars in Europe. Statista.

[175] Global Plastic Outlook Calls for More Circularity, National Roadmaps. *SDG Knowledge Hub*.

sentado propuestas y diseños para incluir la conversión de residuos a energía (llamado en inglés *waste to energy facilities*). Ninguna de estas propuestas ha prosperado.

Una ventaja de la composta, el reúso y el reciclaje es que se generan materiales utilizables para la producción local y esto reduce significativamente las distancias de transportación de materiales (lo cual reduce la generación de GEI). Las instalaciones para convertir residuos a energía producen electricidad, aunque hay preocupaciones por los efectos sobre la salud de comunidades cercanas por los gases producidos durante el proceso de combustión de materiales.

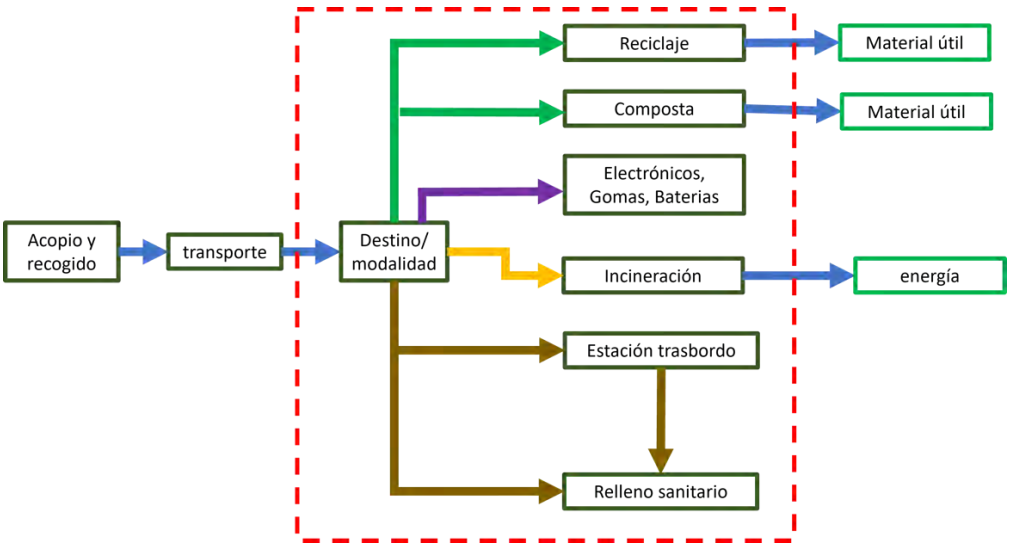
Ilustración 34.

Distribución, uso y fin de vida de un producto en Puerto Rico



Ilustración 35.

Manejo de fin de vida de un producto en Puerto Rico



4.4.2. Estado presente del manejo de desperdicios/residuos sólidos en Puerto Rico

En esta sección evaluaremos la estrategia de manejo de desperdicios/residuos sólidos en Puerto Rico usando la información disponible. Es importante que antes de diseñar un Plan de Manejo de Residuos se tengan datos certeros de asuntos tales como cuánto material descartado se genera, qué tipo de materiales se descartan, dónde se descartan estos materiales, cuánto material descartado se puede reciclar y cuánto material se está reciclando realmente.

4.4.2.1. Estudio de caracterización de los desperdicios sólidos en Puerto Rico 2003

En el 2003, la Autoridad de Desperdicios Sólidos contrató a la compañía de Wehran Puerto Rico para realizar un estudio de caracterización de los residuos generados en Puerto Rico[176]. Para el mismo se utilizaron datos de 32 rellenos sanitarios y dos estaciones de transbordo. A finales del 2003 también se generó un Plan Estratégico de Manejo de Residuos Sólidos. Los datos del estudio de Wehran 2003 se pueden resumir en las tablas 6, 7 y 8 y las ilustraciones 36 y 37. De estos datos se pueden hacer las siguientes observaciones:

1. Se determinó que cada persona en Puerto Rico generaba 5.18 libras de desecho diarios (en contraste con las 3.19 libras por persona del promedio de Estados Unidos para el 2003[177]). Ahora hay que evaluar si este promedio por persona incluye los desperdicios industriales y comerciales que terminan en los rellenos sanitarios. Esta distinción se debe hacer en un próximo estudio.

2. El estudio se enfoca en los materiales descartados. No se incluyen datos de materiales recuperados ni de material que se haya compostado ni de qué compañías y organizaciones estaban reciclando qué materiales al momento del estudio.

3. No hay datos de equipos electrónicos. En el 2003 no existían muchos de los dispositivos electrónicos que conocemos al presente como los teléfonos inteligentes, tabletas o los relojes inteligentes que son productos que no duran mucho y generan muchos desperdicios. Otro tipo de equipo eléctrico que no abundaba eran las placas solares y las baterías que se usan para almacenar la energía.

[176] Wehran Puerto Rico Inc. (24 de octubre de 2003). *Final Report Waste Characterization Study*. https://estadisticas.pr/files/BibliotecaVirtual/estadisticas/biblioteca/ADS_Waste_Characterization_Study_2003.pdf.

[177] EPA. (2003). Municipal Solid Waste Generation, Recycling, and Disposal in the United States: Facts and Figures for 2003.

Tabla 6.

Datos de desperdicios 2003

Categoría	Toneladas semanales	porcentaje
Desperdicios sólidos municipales	49,463	71.50 %
Construcción y demolición	12,943	18.70 %
Jardinería/vegetativos	2,733	3.90 %
Desperdicios especiales	3,636	5.30 %
Automóviles	436	0.60 %
Total	69,211	100 %

Ilustración 36.

Desperdicios en Puerto Rico 2003

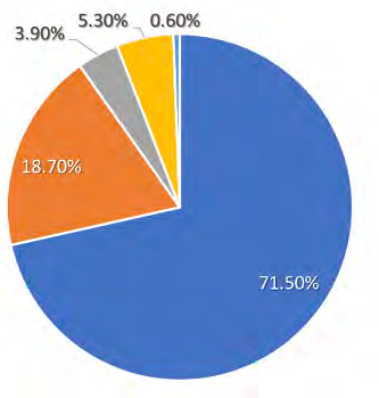


Tabla 7.

Generación diaria de desperdicios en Puerto Rico 2003

Total de toneladas 2003	3,598,972
Promedio diario en toneladas	9,860.20
Promedio diario en libras	19,720,394.52
Población de Puerto Rico 2003	3,808,610
Libras de desperdicio per cápita	5.18

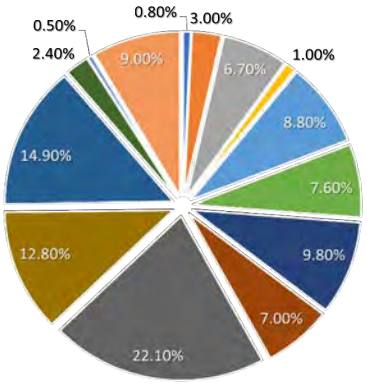
Tabla 8.

Tipos de materiales descartados

Materiales descartados	
Plástico 1 – PET	0.80 %
Plástico 2 - HDPE	3.00 %
Plásticos 3 – 7 (PVC, LDPE, PP,PS)	6.70 %
Papel alta calidad	1.00 %
Papel baja calidad	8.80 %
Cartón	7.60 %
Metales ferrosos	9.80 %
Metales no ferrosos	7.00 %
Desperdicios jardinería	22.10 %
Desperdicios orgánicos	12.80 %
Construcción y demolición	14.90 %
Vidrio	2.40 %
Desperdicios peligrosos	0.50 %
Otros	9.00 %

Ilustración 37.

Materiales descartados en Puerto Rico 2003



Inventario de materiales 2003

4.4.2.2. Situación del sistema de desperdicios sólidos en Puerto Rico 2022

La situación de los rellenos sanitarios en Puerto Rico en el 2022 se resume en la Tabla 9 según datos provistos por el DRNA.

Tabla 9.

Capacidad y vida útil para disposición de desperdicios/residuos sólidos en Puerto Rico

Instalación	Toneladas/día	Años de vida útil
Añasco	16	10
Arecibo	1,100	5
Arroyo	32	5
Barranquitas	66	5
Carolina	180	14
Cayey	28	0
Culebra	10	8
Fajardo	600	20
Florida	24	0
Guayama	11	4
Hormigueros	11	5
Humacao	2900	50
Jayuya	11	3
Juana Díaz	435	Con 4 celdas nuevas
Juncos	150	0
Lajas	28	0
Mayagüez	400	5
Moca	146	2
Peñuelas[178]	200	24
Peñuelas	54.82	38
Ponce	800	25
Salinas	500	32
Toa Baja	1000	4
Vega Baja	405	15
Vieques	10	5
Yauco	191	10 con celdas nuevas

De estos datos (y el resto de la información provista) se pueden hacer las siguientes determinaciones del estado de los rellenos sanitarios en Puerto Rico:

[178] Hay dos instalaciones en Peñuelas.

1. Al presente, la disposición diaria total de los rellenos sanitarios es de 9,078 toneladas diarias.

2. De un total de 26 instalaciones, 14 no cuentan con geomembranas para evitar la fuga de lixiviados[179].

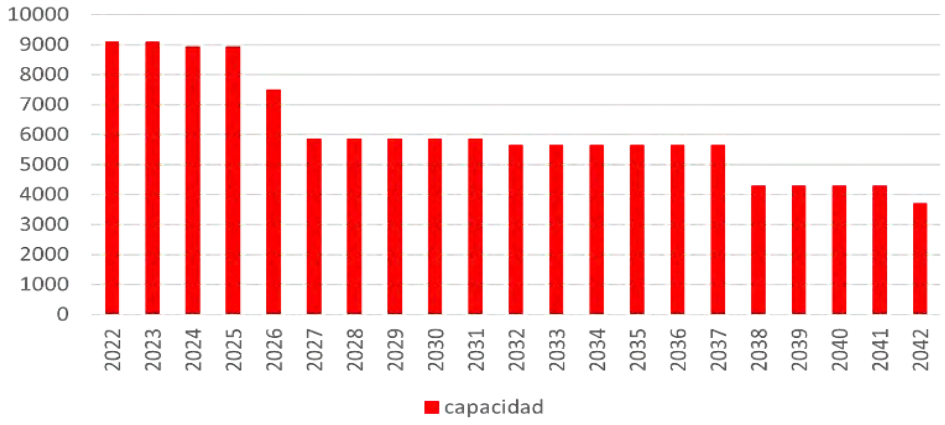
3. De un total de 26 instalaciones, 14 tienen una vida útil de 5 años o menos. La Tabla 10 muestra la reducción en capacidad por los próximos 20 años. Hay que tomar en cuenta que, cuando una instalación se cierra (como fue el caso de San Juan), hay que llevar estos desperdicios a otras instalaciones y este aumento de material les reduce la vida útil.

4. La Ilustración 38 muestra cómo se reduce la cantidad de desperdicios que se depositarán diariamente en los rellenos sanitarios existentes en los próximos 20 años. Para el 2027 se reduce el 35 % de lo que se deposita diariamente respecto al 2022.

5. La Ilustración 39 muestra cuánto es la reducción de los residuos (reducción de materiales, reciclaje y composta, etc.) que tenemos que alcanzar para atender el problema sin tener que recurrir a construir nuevas instalaciones, ampliar las existentes o construir digestores. Aunque factores como desastres naturales y cambios demográficos alteran este análisis, es claro que debemos desarrollar una mejor estrategia basada en reducir materiales y reciclarlos.

Ilustración 38.

Depósito diario de residuos sólidos en instalaciones existentes en Puerto Rico 2022-2042



[179] Los lixiviados son los líquidos que circulan entre los residuos que se encuentran en los vertederos y que pueden contaminar las aguas subterráneas. Las geomembranas evitan la fuga de lixiviados hacia el terreno.

Ilustración 39.

Reducción de depósito diario de residuos sólidos en instalaciones existentes en Puerto Rico 2022-2042

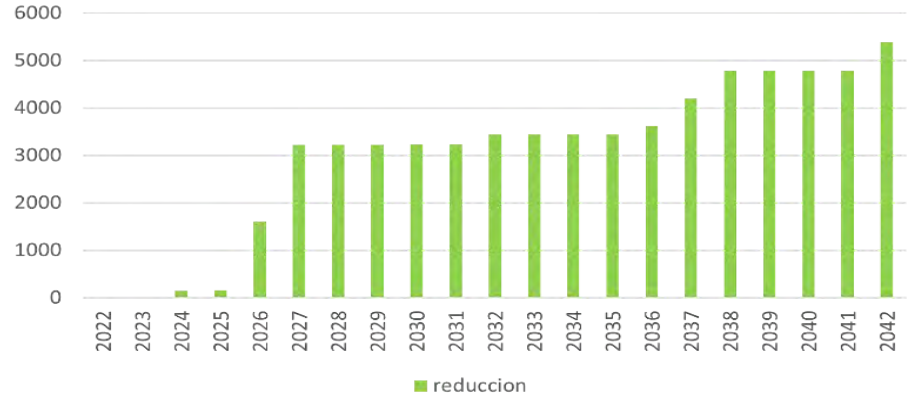


Tabla 10.

Depósito diario de residuos sólidos en instalaciones existentes en Puerto Rico 2022-2042

Año	Capacidad	Reducción
2022	9,079	0 %
2023	9,079	0 %
2024	8,933	2 %
2025	8,922	2 %
2026	7,476	18 %
2027	5,857	35 %
2028	5,857	35 %
2029	5,857	35 %
2030	5,847	36 %
2031	5,847	36 %
2032	5,640	38 %
2033	5,640	38 %
2034	5,640	38 %
2035	5,640	38 %
2036	5,640	40 %
2037	5,640	46 %
2038	4,290	53 %
2039	4,290	53 %
2040	4,290	53 %
2041	4,290	53 %
2042	3,690	59 %

Los datos de las tasas de desvío de materiales reciclables entre 2015 y 2018 se resumen en la Tabla 11.

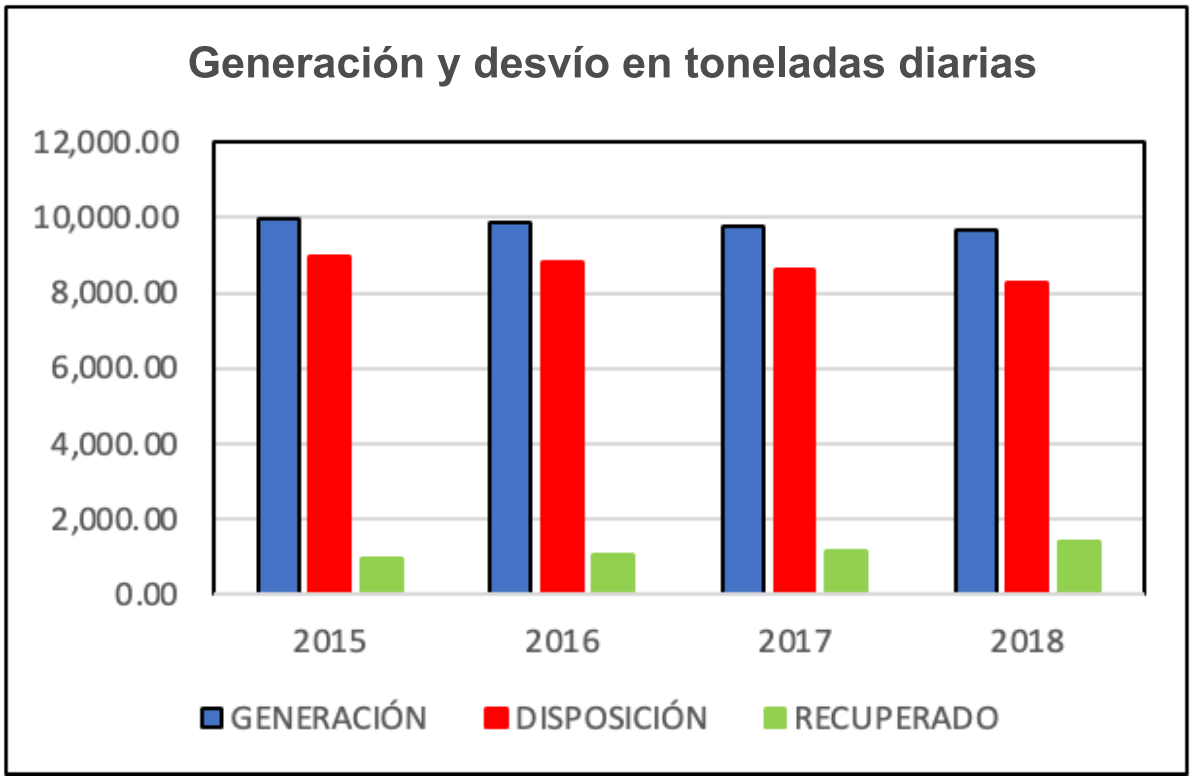
Tabla 11.

Generación, disposición y recuperación de material en toneladas por año

Año	Generación	Disposición	Recuperado	Desvío
2015	3,643,402.86	3,283,357.48	360,045.38	9.88 %
2016	3,607,725.27	3,220,330.05	387,395.22	10.74 %
2017	3,563,876.40	3,143,289.70	420,586.70	11.8 %
2018	3,536,142.00	3,020,537.89	515,604.15	14.58 %

Ilustración 40.

Toneladas diarias de generación, disposición y recuperación de residuos sólidos en Puerto Rico 2015-2018



De los datos sobre el estado de los rellenos sanitarios y de la tasa de desvío destaca lo siguiente:

a. La tasa de desvío/reciclaje de 14.58 % en el 2018 está muy por debajo de las metas establecidas en la Ley para la Reducción y el Reciclaje de Residuos Sólidos en Puerto Rico (Ley 70-1992), según enmendada, que establecía una meta de reciclaje del 35 % de los residuos sólidos para el 2006.

b. Los eventos de desastres naturales con la generación adicional de residuos afectan la vida útil de nuestros rellenos sanitarios.

c. La rápida reducción de la capacidad de los rellenos sanitarios no se puede atender con los presentes niveles de desvío de materiales.

Observaciones y recomendaciones

De la información disponible, se observa y recomienda:

1. A base de los datos de capacidad y años de vida, en los próximos 5 años se perderá el 35 % de la capacidad de los rellenos sanitarios y en 15 años se perderá el 46 % de la capacidad. Esto es sujeto a que no ocurran eventos naturales significativos que generen cantidades atípicas de residuos sólidos y que estos reduzcan la expectativa de vida de las instalaciones.

2. A base de los datos de desvío de materiales reciclables, ya para el 2026 la capacidad perdida de los vertederos no podrá compensarse por los presentes niveles de reciclaje (a los niveles del 2018).

3. Hace falta un sistema de recolección de datos que genere continuamente la información sobre los tipos de desperdicios que se producen, las cantidades y las áreas en que se desechan, qué productos generan, qué materiales, dónde se depositan los residuos sólidos en Puerto Rico y el estado presente de las instalaciones de relleno sanitario.

4. El inventario de residuos sólidos actualizado (2023) es clave para diseñar una estrategia de desviación de materiales (reciclaje y composta). Con esta información se podrá establecer qué materiales se pueden reciclar, determinar qué instalaciones se necesitarán para reciclarlos y qué cantidades de materiales se generan para usarse en otros productos; en fin, una estrategia integrada de reciclaje que genere dinero y sea rentable.

5. Se debe hacer una evaluación de los rellenos sanitarios existentes para entender su vida útil considerando posibles eventos atmosféricos y el efecto del aumento de disposición de residuos sólidos en las instalaciones remanentes provocado por el cierre de algunas instalaciones.

6. Se debe evaluar la posible vulnerabilidad de los rellenos sanitarios a los efectos de eventos atmosféricos severos tales como lluvias, inundaciones, erosión costera y hasta el aumento del nivel del mar.

7. Se debe hacer la contabilidad de carbono del manejo y disposición de los residuos sólidos en Puerto Rico para entender su efecto en el cambio climático y para generar estrategias para reducir su huella de carbono.

8. Se deben generar estrategias de política pública para incentivar la reutilización o reparación de productos, la reducción de desechos y el reciclaje de materiales útiles. Ya existen grupos trabajando con la recuperación y búsqueda de

alternativas para residuos como son, por ejemplo, los materiales vegetativos. Entre estas entidades están Vivo Recycling, TAIS y Puerto Rico Hardwoods. Hay oportunidad de mayor organización y coordinación.

Respecto al impacto de plásticos en los ríos y mares, en la investigación de este diagnóstico no se encontraron datos de Puerto Rico, aunque hay estudios del World Bank del Caribe donde se incluyen distintos países y se entiende que en algunos países no hay programas completos de manejo de residuos sólidos ya que habla de materiales sin tratar o manejar.

4.5. Salud y bienestar

4.5.1. Efectos del cambio climático sobre la salud humana

El cambio climático es una amenaza importante y emergente para la salud pública. Presenta desafíos cambiantes para la salud humana, la distribución y diversidad de los recursos naturales vivos[180]. El cambio climático está afectando la salud física, mental y espiritual a través del aumento en la frecuencia e intensidad de los eventos extremos; se relaciona con el aumento en los casos de enfermedades infecciosas, exposición a alérgenos en el aire y enfermedades transmitidas por vectores, tales como el dengue y el chikunguña, afectando particularmente en las comunidades costeras tropicales[181].

A nivel de los Estados Unidos, a través del Programa de Investigación del Cambio Global (*U.S. Global Change Research Program*) se ha publicado una serie de informes que evalúan los asuntos relacionados con el cambio climático. La *Cuarta Evaluación Nacional del Clima* (conocida por sus siglas en inglés como NCA4) se publicó en 2018 y la quinta (NCA5) está en desarrollo. Como resultado de las investigaciones realizadas hasta ese momento, la NCA4 identificó cuatro mensajes clave: (1) El cambio climático afecta la salud de todas las personas; (2) La exposición y la resiliencia varían a través de las poblaciones y las comunidades; (3) La adaptación reduce el riesgo y mejora la salud; y (4) La reducción de las emisiones de gases de efecto de invernadero trae como consecuencias beneficios económicos y de salud.

Para abordar el análisis del impacto del cambio climático en la salud, el modelo conceptual utilizado mayormente es el que ilustra los mecanismos bajo los cuales los impulsores del clima producen unos resultados de salud a través de rutas de exposición. Algunos de estos impulsores son el aumento en las temperaturas, la precipitación extrema, eventos atmosféricos extremos y el aumento en el nivel del mar. Algunas de las rutas de exposición son el calor extremo, la pobre calidad del aire, la inseguridad alimentaria, la pobre calidad del agua, los cambios en los agentes infecciosos y el desplazamiento poblacional. Por su parte, entre los resultados en salud se encuentran las enfermedades relacionadas con el calor, las enfermedades cardiovasculares, las enfermedades transmitidas por el agua, los alimentos o los vectores, así como repercusiones en la salud mental y el

[180] IPCC, 2007; GCCIUS, 2009; Barnet et al., 2012.
[181] Githeko et al., 2000; Ndiaye et al., 2006; Gage et al., 2008; Brunkard et al., 2008; Portier et al., 2010; Méndez-Lázaro et al., 2014. NCA5.

estrés. Bajo este modelo conceptual, las rutas de exposición y los resultados en salud se afectan tanto de forma positiva como negativa por el contexto ambiental e institucional y por el contexto social y conductual[182].

Las investigaciones sobre el impacto del cambio climático en la salud han ido más allá de identificar enfermedades o afecciones[183]. Más recientemente se ha fijado el enfoque en las desigualdades en salud que se manifiestan en distintas poblaciones y grupos sociales[184]. La Comisión sobre Determinantes Sociales de la Salud (CDSS), creada por la Organización Mundial de la Salud, reconoce que el proceso salud-enfermedad se da de manera desigual entre países, ciudades e incluso grupos poblacionales. Es por esta razón que el enfoque principal de la CDSS es presentar mecanismos para reducir las desigualdades en salud, consideradas como innecesarias, injustas y evitables.

En un ámbito más práctico para atender los asuntos de desigualdades en salud, los Centros para el Control y la Prevención de Enfermedades (CDC, por sus siglas en inglés) elaboraron un modelo conceptual conocido por sus siglas en inglés como BRACE (*Building Resiliency Against Climate Effects* o Construyendo resiliencia contra los efectos climáticos)[185]. Este modelo consiste en cinco pasos que pueden seguir los departamentos de salud de los estados y territorios para identificar cómo el cambio climático ha afectado y afectará la salud humana en cada una de sus jurisdicciones. También sirve de guía para desarrollar e implantar planes de adaptación con un enfoque en la justicia, equidad, diversidad e inclusión, conocido por sus siglas como JEDI. Los cinco pasos que establece el modelo BRACE son los siguientes:

1. Anticipar el impacto climático y evaluar las vulnerabilidades.
2. Proyectar la carga de enfermedad.
3. Evaluar intervenciones de salud pública.
4. Desarrollar e implantar un plan de salud y adaptación climática.
5. Evaluar el impacto y mejorar la calidad de las actividades.

4.5.1.1. *Efectos directos*

Los eventos extremos afectan no tan solo los determinantes sociales de la salud, sino también los servicios esenciales, incluyendo la salud ambiental, el sistema de atención médica y el acceso de la población al sistema de salud. También tienen un impacto en las poblaciones vulnerables y los resultados en salud, que incluyen la salud física, mental y la calidad de vida.

Los eventos extremos como los huracanes y ciclones tropicales que amenazan la vida son las formas más desastrosas en que las personas experimentan los efectos climáticos en todo el Caribe. Como ya hemos mencionado, en el 2017, Puerto Rico y muchas otras islas del Caribe experimentaron una de las temporadas de huracanes más catastróficas

182 USGCRP, 2018, pág. 543.
183 OMS, 2008.
184 *World Health Organization*. (2010). A conceptual framework for action on the social determinants of health. *World Health Organization*.
185 En la sección 4.5.1 se incluye un resumen de cada uno de los pasos del modelo BRACE.

en la historia reciente. La evidencia demuestra que la temporada de huracanes para ese año fue una anómala, que estuvo realzada por el aumento en el registro de temperatura de la superficie del mar[186] [187], lo cual es atribuible, en parte, a las tendencias de calentamiento global[188]. El huracán María representó el ciclón tropical con mayor intensidad de lluvia en 24 horas al menos desde 1898[189].

Muchos de estos territorios afectados (por ejemplo, Puerto Rico) experimentaron importantes interrupciones en los servicios esenciales (por ejemplo, agua potable y energía eléctrica, telecomunicaciones, transporte, carreteras y puentes) y problemas de salud ambiental (por ejemplo, saneamiento del agua, exposición a contaminantes, enfermedades transmitidas por vectores, higiene de los alimentos, intoxicación por monóxido de carbono y exposición a hongos). En el caso de Puerto Rico, hubo un exceso de mortalidad tras el paso del huracán María.

Es muy probable que los huracanes más frecuentes e intensos interactúen con infraestructura frágil y obsoleta, y un perfil demográfico cada vez más vulnerable con elevados determinantes sociales de la salud. Como resultado se esperan interrupciones en la atención médica, una preocupación particular para los grupos sensibles, las comunidades vulnerables y las comunidades desatendidas, desfavorecidas y desventajadas. Estas comunidades son sistemáticamente excluidas del bienestar, la educación y otros servicios y beneficios sociales que ayudan a mantener buenas condiciones de salud. Esto ha presentado desafíos importantes para estas comunidades y para los funcionarios de salud pública que buscan ayudar a los residentes en sus propios términos significativos.

Las siguientes características sociodemográficas aumentan la vulnerabilidad de los individuos ante los peligros relacionados con el clima[190]:

- Personas con enfermedades preexistentes, especialmente trastornos mentales y asma.
- Personas con movilidad limitada.
- Personas con discapacidades.
- Personas con bajos ingresos o en pobreza.
- Adultos mayores, especialmente los que viven solos.
- Embarazadas.

---

[186] Halam, S., & et.al. (2019). Ocean precursors to the extreme Atlantic 2017 hurricane season. *Nat. Commun, 10*, 896.

[187] Ramos-Scharrón, C., & Arima, E. (2019). “Hurricane María’s Precipitation Signature in Puerto Rico: A Conceivable Presage of Rains to Come.” Recuperado en febrero de 2022, de www.nature.com:https://doi.org/10.1038/s41598-019-52198-2.

[188] Ídem.

[189] Ídem.

[190] EPA. 2021. *Climate Change and Social Vulnerability in the United States: A Focus on Six Impacts*. *U.S. Environmental Protection Agency*, EPA 430-R-21-003; *American Public Health Association*, *Climate Changes Health: Vulnerable Populations*, accesado el 5 de abril de 2023.

- Niños e infantes.
- Personas social o lingüísticamente aisladas.
- Personas de piel oscura o negra.

4.5.1.2. Servicios ecosistémicos y salud pública

Los bienes y servicios ecosistémicos producen muchos de los beneficios que recibimos para sustentar la vida, tales como el aire limpio, el suelo fértil, la producción de cosechas, polinización y el control de inundaciones[191]. La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) considera el concepto de servicios ecosistémicos como una estrategia para ordenar en forma integrada la tierra, el agua y los recursos vivos que fomenta el uso sostenible y la conservación de forma equitativa[192].

Estudios demuestran cómo los servicios ecosistémicos se pueden afectar por el aumento en las temperaturas dentro de las ciudades como resultado de episodios de calor extremo. Igualmente, cómo se pueden afectar como consecuencia de la pobre planificación urbana y el impacto en la salud. En Puerto Rico, se destaca un estudio que relacionó los servicios ecosistémicos con la salud pública. El estudio exploró el rol de estos servicios en la prevención de enfermedades gastrointestinales en el contexto de eventos extremos[193]. Este estudio encontró que, en Puerto Rico, las enfermedades gastrointestinales aumentan luego de eventos de lluvia, y que la infiltración natural que provee el suelo del karso puede ayudar a prevenir inundaciones y la ocurrencia de este tipo de enfermedades[194].

4.5.1.3. Efectos a través de los sistemas socioeconómicos

Otros factores importantes que juegan también un papel en los patrones de contagio incluyen la inmunidad y movilidad, y el aumento de la densidad de la población[195], factores socioeconómicos (desigualdad y pobreza), políticas públicas, implementación de sistemas de vigilancia, programas de control del dengue y condiciones deficientes de tanques sépticos, entre otros.

La pobreza y la falta de acceso a los recursos exacerban las vulnerabilidades. Por ejemplo, más de 1.8 millones de latinos viven dentro de un radio de media milla de complejos petroleros y de gas en los Estados Unidos[196]. Además, las poblaciones expuestas a temperaturas más altas y a la contaminación del aire se han relacionado con resultados negativos en el parto: embarazos prematuros, de bajo peso al nacer y de mortinatos.

---

[191] Adie Tomer y Caroline George. (2023). America's airports aren't ready for climate change. *Brookings Institution*.
[192] (FAO s.f.). (Andrade 2007).
[193] De Jesús Crespo R, Wu J, Myer M, Yee S, Fulford R. "Flood protection ecosystem services in the coast of Puerto Rico: Association between extreme weather, flood hazard mitigation and gastrointestinal illness." *Sci Total Environ*. 2019 Aug 1;676:343-355. Doi: https://doi.org/10.1016/j. scitotenv.2019.04.287. EPUB 2019 Apr 24. PMID: 31048165.
[194] De Jesús, id.
[195] Bennet et. al., 2010.
[196] CDC, 2019, p.47.

Las madres afroamericanas tienen 2.4 veces más probabilidades de tener hijos con bajo peso al nacer que las mujeres caucásicas[197].

Puerto Rico ha sido catalogado como el tercer país con mayor desigualdad económica[198] y con altos niveles de desigualdad social[199]. El coeficiente de Gini (medida de desigualdad económica entre familias) ha sido relativamente alto en Puerto Rico durante la crisis económica. La relación entre la alta prevalencia de enfermedades crónicas en las comunidades pobres y la intensificación de la carga de los impactos del cambio climático se considera un tema clave a identificar e investigar en Puerto Rico.

4.5.1.4. Enfermedades transmitidas por el agua

Los eventos extremos como el huracán María, que destruyó la red eléctrica, afectan las plantas de tratamiento de agua. La Agencia de Protección Ambiental (EPA, por sus siglas en inglés) encontró contaminación de los ríos y otras fuentes de agua con enterococos, la bacteria responsable de la diverticulitis, de infecciones del tracto urinario y de la meningitis. Los casos de leptospirosis, que ya se documentaban en la isla, empeoraron con el paso del huracán María. En apenas semanas, para octubre del 2017, se habían reportado 121 casos de leptospirosis y 4 muertes confirmadas, lo que significó el doble de casos anuales[200].

4.5.1.4.1. Sargassum sp.

Esta es una fuente natural de degradación de la calidad del aire en las comunidades costeras. Históricamente, las algas de sargazo han estado presentes en el mar Caribe. Desde el 2011, cantidades masivas de sargazo pelágico han llegado a la costa a lo largo de las islas caribeñas[201] de enero a agosto. En Puerto Rico, las costas este y sur son más vulnerables que la costa norte; experimentan volúmenes mucho más altos de sargazo varado durante todo el año[202]. El sargazo que flota libremente suele tener varios pies de profundidad y cubre miles de millas cuadradas del océano. A medida que estas esteras llegan a la costa, se descomponen y liberan sulfuro de hidrógeno y gas amoniaco. Esto afecta a los turistas y comunidades en las zonas costeras en las islas del Caribe[203] (véase más al respecto en la sección 4.8). La exposición a este problema ambiental podría estar asociada a palpitaciones cardíacas, dificultad para respirar, mareos, vértigo, dolores de cabeza y erupciones cutáneas[204].

---

197 CDC, 2019, p.48.
198 Centro de Información Censal. (2018). Notas del Centro de Información Censal (CIC) #29: Desigualdad social en Puerto Rico vs. el mundo.
199 Instituto de Estadísticas de Puerto Rico. (2018). Informe sobre desarrollo humano: Puerto Rico 2016 [Archivo PDF].
200 Guerra Velázquez, G.R. (2022). Hurricane María and Public Health in Puerto Rico: Lessons Learned to Increase Resiliency and Prepare for Future Disasters. *National Library of Medicine*.
201 Wang y Hu, 2017; Johns et al., 2020.
202 Trinanes et al., 2021.
203 Resiere et al., 2021.
204 p. Ej., ANSES, 2017; Fidai et al., 2020; Resiere et al., 2021, 2019, 2018.

En el 2018, en Guadalupe y Martinica hubo más de 11,000 casos de presunta exposición a altas concentraciones de sulfuro de hidrógeno[205]. Los pacientes se quejaron de palpitaciones cardíacas, dificultad para respirar, mareos, vértigo, dolor de cabeza y erupciones cutáneas. La Agencia Francesa de Seguridad y Salud Alimentaria, Ambiental y Ocupacional (ANSES) llevó a cabo una evaluación de expertos sobre los humos gaseosos emitidos por el sargazo en descomposición[206] y reveló que el sargazo puede acumular también metales pesados como el arsénico y el cadmio que pueden representar un riesgo para la salud humana y para el medioambiente.

4.5.1.5. Contaminación del aire y salud pública

4.5.1.5.1. Calidad de aire (hongos, esporas, polen, polvo del Sahara)

A nivel mundial, las mayores fuentes de polvo se encuentran en el hemisferio norte, con importantes contribuciones en las regiones del desierto del Sahara y Sahel en el norte de África. Estas regiones por sí solas aportan más de 20 millones de toneladas de polvo en suspensión por año[207]. Los vientos alisios transportan el polvo africano sobre el océano Atlántico, llegando a América del Norte y del Sur, las naciones insulares del Caribe y los territorios de los EE. UU.[208].

Las partículas de aerosol de polvo afectan el clima, proveen nutrientes y fertilizantes naturales a ecosistemas terrestres y marinos incluidos los arrecifes de coral y los bosques[209]. En Puerto Rico, el polvo del Sahara se asocia con afecciones cardiovasculares y respiratorias[210]. Los brotes de polvo del Sahara se asocian también con un riesgo mayor o excesivo de visitas a la sala de emergencias y hospitalizaciones relacionadas con el asma en niños en Trinidad y Tobago[211], Guadalupe[212] y Granada[213]. Muchos de estos problemas en la región del Caribe son estacionales[214]. La preparación del sector de la salud pública para mitigar las enfermedades relacionadas con estos eventos es baja aún.

La relación entre el polvo, el particulado en aerosol y los alérgenos sobre el clima y las condiciones del tiempo, los ecosistemas y las poblaciones humanas son áreas por evaluar. El asma afecta desproporcionadamente a menores de bajos ingresos y diversidad étnica y racial, siendo los latinos lo más afectados[215]. Hay datos que demuestran la alta

---

205 Resiere et al., 2018ª.
206 ANSES, 2017.
207 Yu et al., 2015.
208 Prospero, 1999; Swap et al., 1996; Prospero y Mayol-Bracero, 2013.
209 Prospero, 1999; Twohy et al., 2009; Evan et al., 2011; Okin et al., 2011; Prospero & Mayol-Bracero, 2013; Prospero et al., 2014; West et al., 2016; Zhang et al., 2016.
210 Lillianne et al., 2019.
211 Gyan et al., 2005.
212 Cadelis et al., 2015.
213 Akpinar- Elci et al., 2015.
214 Monteil et al., 2005; Depradine & Lovell 2007; Matthew et al., 2013.
215 Szema, A., Li, J., Pagnotta, A., Singh, M., White, J.A. (2021). “Asthma, Hay Fever, Pollen, and Climate Change.” In: Pinkerton, K.E., Rom, W.N. (eds) *Climate Change and Global Public Health*. Respiratory

prevalencia de asma entre niños, por ejemplo en la zona metropolitana de San Juan, donde también se han registrado altas olas de calor[216].

4.5.1.6. Enfermedades transmitidas por vectores

Las enfermedades transmitidas por vectores (VBD, por sus siglas en inglés) en el Caribe provienen principalmente de los mosquitos *Aedes aegypti, Aedes albopictus y Culex*. Muchos investigadores sugieren que tanto *Aedes aegypti* como *Aedes albopictus* tienen excelentes habilidades de adaptación con respecto al aumento de las temperaturas y las condiciones extremas. En la actualidad, no existe una vacuna o terapia eficaz para contrarrestar los síntomas del dengue, el chikunguña y el zika. El dengue es una de las enfermedades más comunes de los seres humanos, con más de un tercio de la población mundial en riesgo[217]. En Puerto Rico, las grandes epidemias se han repetido cada 3-5 años (las epidemias se definen como tres o más sospechas de dengue notificadas por cada 1,000 personas durante dos semanas consecutivas).

Las relaciones entre las enfermedades infecciosas transmitidas por vectores y las condiciones ambientales de una región en particular están bien documentadas. Las variables ambientales más asociadas con las transmisiones de VBD son la temperatura, la precipitación, la humedad relativa y la temperatura de la superficie del mar. El aumento de las temperaturas promedio puede llevar a la expansión del rango geográfico de muchos vectores, a la disminución de los períodos de incubación extrínseca de muchos patógenos y a una mayor tasa de contacto de mosquitos (como *Aedes aegypti* y *Aedes albopictus*) picando a sus presas, incluidos los humanos.

Estudios recientes presentan evidencia de que la abundancia y el potencial de transmisión del *Aedes aegypti* en Puerto Rico están influenciados por la temperatura y la precipitación[218]. Existe una interrelación entre los determinantes climáticos, ecológicos, sociales y culturales que afectan el surgimiento y la transmisión del dengue en Puerto Rico y sus implicaciones en la respuesta contra el zika[219]. Igualmente, se ha demostrado una asociación positiva entre el *Aedes aegypti* y la alta densidad de viviendas, regiones urbanas y elevadas temperaturas del agua en macetas de bambú, mientras que el *Aedes mediovittarus* se asociaba positivamente con áreas boscosas, regiones rurales y se correlacionaba negativamente con la temperatura del agua[220]. El mosquito no se dispersa fuera de su lugar de desarrollo y se mantiene en el nivel de los hogares[221]. Otros factores importantes que juegan también un papel en los patrones de contagio incluyen la inmu-

Medicine. Humana, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-54746-2_10; (EPA, https://www.epa.gov/children/childrens-environmental-health-facts).

216 Pablo Méndez-Lázaro, Cynthia M. Pérez, Ernesto Rodríguez, Odalys Martínez, December 2016. "Climate change, heat, and mortality in the tropical urban area of San Juan, Puerto Rico." *International Journal of Bioetereology 62*(5) doi: 10.1007/s00484-016-1291-z.

217 Buckzac et al., 2012.

218 Johansson et al., (2009), Moore et al., y Méndez-Lázaro et al., (2014).

219 Matysiak y Roess (2017).

220 Cox et al., 2007.

221 Harrington et al, 2005.

nidad y movilidad, aumento de la densidad de la población[222], factores socioeconómicos (desigualdad y pobreza), políticas públicas, implementación de sistemas de vigilancia, programas de control del dengue y condiciones deficientes de tanques sépticos, entre otros.

4.5.1.7. Episodios de calor extremo y salud pública

Las olas de calor están aumentando en frecuencia, intensidad y duración, lo que representa una amenaza de una mayor incidencia de enfermedades y muertes relacionadas con el calor. La vulnerabilidad al calor se conceptualiza en función de la exposición al calor y la sensibilidad de las personas. Son múltiples los factores asociados a los determinantes sociales de la salud que contribuyen a la vulnerabilidad al calor. Algunos ejemplos son: tasa de población que vive sola, personas con discapacidades, personas que viven por debajo del umbral de pobreza, comunidades desatendidas, desfavorecidas y desventajadas, niños menores de 5 años, población de edad avanzada, población con enfermedades preexistentes y falta de acceso a seguro médico. Al mismo tiempo, la sensibilidad de las personas al calor depende de una serie de factores individuales, que bien pueden influir en la capacidad de adaptación y la capacidad para hacer frente a temperaturas extremas. Como explicamos en la sección 3.4.1.2, en Puerto Rico hay evidencia de episodios de calor extremo. Se observó una serie de eventos de temperatura extrema durante los veranos de 2012, 2013 y 2014, las temporadas con más días excediendo los 90 °F, el mes más caluroso jamás registrado y las rachas más largas de 90 °F en la historia de Puerto Rico.

Las temperaturas dentro de las ciudades pueden también alcanzar niveles estresantes durante los episodios de calor extremo. La urbanización, la transformación del paisaje y el crecimiento demográfico han modificado los climas urbanos, y los efectos de las islas de calor urbanas son más evidentes en Puerto Rico. Eventos más intensos en áreas urbanas tendrían un efecto negativo en la salud humana y en actividades sociales y económicas, además de afectar la integridad de los ecosistemas y los beneficios que obtenemos de ellos. San Juan, capital de Puerto Rico, es una de las ciudades tropicales más grandes del Caribe insular. Las temperaturas dentro de la ciudad de San Juan pueden alcanzar niveles estresantes durante los episodios de calor extremo. Existe evidencia sustancial que sugiere efectos de islas de calor urbano en San Juan. Debido a la rápida urbanización y la transformación del paisaje, los efectos de las islas de calor urbano se han vuelto más peligrosos.

Las áreas más calientes y vulnerables al calor corresponden a áreas altamente construidas (por ejemplo, zonas residenciales, comerciales e industriales), incluido el aeropuerto internacional, puertos marítimos, estacionamientos y áreas residenciales de alta densidad. Las áreas más frescas en San Juan corresponden a paisajes con infraestructura verde, vegetación y cuerpos de agua (por ejemplo, ríos, lagunas, jardines botánicos, humedales y parques recreativos). Estos ejemplos proporcionan evidencia de cómo las infraestructuras verde y azul en un ambiente cálido y húmedo proporcionan servicios ecosistémicos esenciales para la adaptación climática y ayudan a regular las temperatu-

[222] Bennet et. al., 2010.

ras extremas. Estudios científicos evidencian que, en la zona metropolitana de San Juan, los episodios de calor extremo están asociados con un aumento significativo en el riesgo relativo de mortalidad. Los accidentes cerebrovasculares y las enfermedades cardiovasculares son de las principales causas de muerte más asociadas con las temperaturas extremas en Puerto Rico.

En climas cálidos como Puerto Rico y la región del Caribe, se necesita energía eléctrica para enfriar los entornos y los ambientes interiores, así como todos los inmuebles y edificios. Por tal motivo, el cambio climático podría afectar la necesidad de enfriamiento. La demanda de energía eléctrica en Puerto Rico se correlaciona bien con el comportamiento estacional de la temperatura[223]. Históricamente ocurre mayor demanda y consumo de energía eléctrica durante los meses de verano. Sin embargo, el consumo de energía eléctrica disminuyó en el país durante las últimas décadas debido a múltiples factores socioeconómicos: migración, reducción poblacional, menos industrias y comercios y el uso de equipos más eficientes.

Bajo los escenarios de reconstrucción del sistema eléctrico destruido en el 2017, a medida que las temperaturas aumentan rápidamente en Puerto Rico y los episodios de calor son cada vez más frecuentes, se produce el consiguiente aumento en la demanda de electricidad para refrigeración y enfriamiento del entorno. Desafortunadamente, hoy en día el sistema eléctrico actual es tan frágil y obsoleto que no tiene la capacidad de satisfacer las demandas de energía durante las temporadas cálidas. Desde el huracán María, los apagones y las deficiencias de generación de energía son comunes y frecuentes en Puerto Rico durante la temporada cálida dejando a miles de personas desprovistas de servicios esenciales[224].

4.5.1.8. Enfermedades emergentes, pandemias y epidemias

Los primeros casos de COVID-19 notificados en la región del Caribe se registraron el 2 de marzo de 2020. El 11 de marzo de 2020, la Organización Mundial de la Salud declaró al COVID-19 una pandemia mundial[225]. Los primeros casos confirmados en Puerto Rico se diagnosticaron el 13 de marzo de 2020. Existe una amplia especulación sobre si el brote de COVID-19 es estacional[226]. Investigaciones anteriores han encontrado que la transmisión del SARS, el MERS y la influenza se asocian a menudo con la variabilidad estacional y las tendencias climáticas, pero no todos los virus respiratorios estacionales experimentan los mismos patrones[227]. La pregunta es si el COVID-19 es susceptible a factores similares[228]. Los factores ambientales primarios que podrían influir en la trans-

[223] Méndez-Lázaro, P., Martínez-Sánchez, O., Méndez-Tejeda, R., Rodríguez, E., Morales, E., & Scmitt-Cortijo, N. (2015). *Extreme Heat Events in San Juan Puerto Rico: Trends and Variability of Unusual Hot Weather and its Possible Effects on Ecology and Society. Climatology & Weather Forecasting*.
[224] Turoff, M., Bañuls, V. A., & Ramírez de la Huerga, M. (2018). *Hurricanes Send Signals for the Future of Emergency Preparedness*. En K. B. Tomaszewski (Ed.), *Proceedings of the 15th ISCRAM Conference.* Rochester, NY: WiPe/CoRe Paper - *T10 Case Studies and Reflections*.
[225] OMS, 2020.
[226] De Ángel Solá et al., 2020; NAS, 2020.
[227] Monamele et al., 2017; Moriyama et al., 2020.
[228] Sajadi et al., 2020; Wang et al., 2020.

misión viral respiratoria incluyen la temperatura de la superficie del aire, la humedad relativa y los patrones de lluvia[229].

Las rutas de transmisión directa e indirecta de este virus ocurren al tocar superficies infectadas (piel a piel, tocar objetos inanimados infectados) y luego mediar la infección del virus a través de la boca, la nariz o los ojos[230]. La transmisión a través de la inhalación de pequeñas gotas de aire respiratorio exhalado (por ejemplo, contacto cercano a 1 metro) y aerosoles[231] parece ser especialmente eficaz[232]. El COVID-19 aumenta el riesgo de mortalidad debido a una enfermedad respiratoria grave y una lesión cardíaca[233].

Una pregunta es si los efectos en la salud de una interacción entre los brotes estacionales de polvo sahariano que ocurren cada año en el Caribe entre mayo y agosto pueden tener impactos significativos en la salud y la mortalidad debido a la pandemia de COVID-19. Los microorganismos en las partículas en suspensión o el polvo en el aire pueden tener relación con enfermedades infecciosas[234]. Es importante comprender si tales interacciones conducen a vulnerabilidades en los pacientes que exacerban los efectos del COVID-19.

4.5.2. Determinantes sociales de la salud y cambio climático

La CDSS establece que “hay una íntima relación entre el deterioro y el agotamiento de los sistemas naturales, incluido el sistema climático, y la tarea de reducir las desigualdades sanitarias en todo el mundo. El daño ecológico afecta a todos los integrantes de la sociedad, pero es más perjudicial para los grupos más vulnerables”[235]. En este sentido, el enfoque de justicia climática debe estar en el centro del análisis. En particular, la justicia climática busca exponer las verdaderas causas del cambio climático para atender y desmantelar los sistemas de poder que hacen que unos grupos en la sociedad se vean más afectados que otros, generando así injusticias. La justicia climática busca cambiar esas estructuras de poder y realza las obligaciones y relaciones éticas entre las personas y los ecosistemas[236].

Según el informe rendido por la CDSS en el 2018, el cambio climático, la urbanización, el desarrollo rural, la agricultura y la seguridad alimentaria son determinantes entrelazados de la salud de la población y la equidad en la atención médica y de salud. Por lo cual, resulta fundamental garantizar que las políticas sociales y económicas propuestas para detener el cambio climático y otras formas de degradación del medioambiente tengan en cuenta la equidad en salud. Además, la CDSS enfatiza en lo necesario que es analizar

---

229 Lowen et al., 2008; Tamerius et al., 2013; NAS, 2020.
230 Guangbo et al., 2020; Moriyama et al., 2020; Chang et al., 2020; Peng et al., 2020.
231 Por ejemplo, presencia de microbios y partículas de <5 µm –menos de 5 micrómetros o millonésimas partes de un metro– de diámetro que permanecen en el aire durante largos períodos de tiempo, transmitidas a otros a distancias superiores a 1m.
232 Guangbo et al., 2020; *Service*, 2020.
233 Shi et al., 2020; Madjid et al., 2020.
234 Yu et al., 2004; Guangbo et al., 2020; WHO, 2020b.
235 OMS, 2008, p.71.
236 Farhana Sultana, “Critical climate justice,” *Geography Journal*, Oct. 13, 2021, DOI: https://doi.org/10.1111/geoj.12417.

con más profundidad la relación que existe entre los determinantes sociales, el cambio ecológico y las desigualdades en salud "que inspire la elaboración tan necesaria de políticas y su ejecución"[237].

El tema de los determinantes sociales de la salud conlleva el análisis de las condiciones de vida tales como la seguridad en los entornos, la estabilidad económica, el acceso a sistemas de salud que sean de calidad, la continuidad de las tradiciones y de la cultura, el acceso y la calidad de la educación, el acceso a alimentos nutritivos para contrarrestar la inseguridad alimentaria, las oportunidades de actividad física, la salud mental, las condiciones de los vecindarios, el sistema de salud y el ambiente[238]. Además, incluye el análisis de los determinantes políticos.

De la revisión de literatura sobre este tipo de análisis se identificó un estudio del 2018 en el que se analiza el aumento en el riesgo de las personas con discapacidades ante los desastres y se proponen tres modelos para entender los riesgos de esta población: el modelo de vulnerabilidad física, modelos sociopolíticos y modelos de justicia social[239], como parte del enfoque de justicia climática que mencionamos al comienzo de esta sección. Los autores integran en su análisis lo que denominan *colonialismo ambiental*

–el desarrollo y la privatización de las costas, la contaminación por la Marina de Guerra de los Estados Unidos (principalmente en Vieques) y la extracción y explotación de los recursos naturales. También analizan el estado de bienestar en Puerto Rico y lo describen como abandonado, dadas las políticas públicas dispares en comparación con los estados de Estados Unidos debido a su condición territorial.

Rivera (2020) abunda en el tema del colonialismo ambiental en Puerto Rico, analizando y comentando lo que denomina *colonialismo del desastre*[240]. Utiliza el término para describir el rol de los desastres en la perpetuación de la colonización en el Caribe y señala como uno de sus ejemplos el caso de Puerto Rico y el huracán María. Por otra parte, se considera esencial poder identificar los mecanismos históricos a través de los cuales el clima influye en la seguridad alimentaria y en la disponibilidad del recurso agua en Puerto Rico. Por ejemplo, estudiar el impacto de las sequías o huracanes en los sistemas de alimentación desde la producción hasta el consumo, así como el control de insectos.

Además de lo anterior, se ha estudiado el impacto que han tenido eventos extremos, como el huracán María en la cadena de distribución farmacéutica de Estados Unidos. El 10 % de los fármacos que se utilizan en Estados Unidos proviene de farmacéuticas

237 OMS, 2008, p.196.

238 Hernández-Delgado, E. (2015). The emerging threats of climate change on tropical coastal ecosystem services, public health, local economies and livelihood sustainability of small islands:Cumulative impacts and synergies. *Marine Pollution Bulletin*, 5-28.

239 Hayward, A., Morris, Z., & Otero Ramos, Y. (2019). The Political Determinants of Disaster Risk: Assessing the Unfolding Aftermath of Hurricane Maria for People with Disabilities in Puerto Rico. *Environmental Justice, 11*(2), 89-94.

240 Rivera, D. Z. (2020). Disaster Colonialism: A Commentary on Disasters Beyond Singular Events to Structural Violence. *International Journal of Urban and Regional Research*, 126-135.

ubicadas en Puerto Rico, por lo que resulta fundamental identificar las vulnerabilidades de los suplidores ante los riesgos severos del clima[241].

En cuanto a la estabilidad económica, se han utilizado cuatro categorías: empleo, inseguridad alimentaria, inestabilidad de vivienda y pobreza[242]. El 85 % de los alimentos en Puerto Rico es importado[243]. Sin embargo, ante la posibilidad de que en el futuro se pueda desarrollar una agricultura sustentable que permita que la mayoría del consumo sea local, es importante evaluar las respuestas de los agricultores y pescadores ante eventos extremos como resultado del cambio climático. A estos fines resaltan los trabajos de Perfecto, et. al (2019), Rodríguez, Moore & Niles (2021) y Rodríguez y Niles (2021), en los que se estudian las vulnerabilidades de los agricultores (principalmente de monocultivos), instancias de resistencia y resiliencia y las motivaciones para la adaptación, luego del huracán María. Igualmente, se ha estudiado la percepción de los pescadores sobre su vulnerabilidad ante eventos extremos[244].

Por otro lado, la educación de calidad aumenta las oportunidades de empleos con salarios más altos y a su vez está vinculada con comportamientos saludables[245]. Por ello se requiere evaluar el sistema de educación en Puerto Rico en cuanto a la preparación ante los efectos del cambio climático, no solo en términos de los peligros ambientales y de infraestructura, sino también en los programas de educación a sus estudiantes y a la comunidad sobre estrategias de resiliencia y adaptación[246] (véase la sección 4.12).

Dentro del tema de los determinantes sociales se pueden incluir los sistemas de infraestructura que son críticos para el funcionamiento de las comunidades. El sistema eléctrico es el más crítico, toda vez que muchos otros sistemas dependen de él. Ante la precariedad del sistema eléctrico, se han planteado alternativas de generación casera[247] que se discutirán en el capítulo 7 de este Plan. Los conceptos de justicia –incluyendo la justicia climática, equidad, diversidad e inclusión– son fundamentales para dirigir los recursos a comunidades con alta susceptibilidad a los impactos climáticos debido a las inequidades históricas y las desigualdades en el acceso a una amplia gama de recursos tanto públicos como privados.

---

[241] Lawrence, J.-M., Ibne Hossain, N. U., Jaradat, R., & Hamilton, M. (2020). Leveraging a Bayesian network approach to model and analyze supplier vulnerability to severe weather risk: A case study of the U.S. pharmaceutical supply chain following Hurricane Maria. *International Journal of Disaster Risk Reduction, 49*, 101607.

[242] DePriest & McCauley, 2019.

[243] Comas-Pagán, 2014; Irizarry-Ruiz, 2016; Álvarez-Berríos et al., 2018; Rodríguez et. al, 2021.

[244] Seara, T., Pollnac, R., & Jakubowsky, K. (2020). Impacts Natural Disasters on Subjective Vulnerability to Climate Change: A Study of Puerto Rican's Fisher's Perceptions after Hurricanes Irma & Maria. *Coastal Management, 48*(5), 418-435.

[245] DePriest & McCauley, 2019.

[246] Sheffield, Uijttewaal, Stewart, & Galvez, 2017.

[247] Mango, M., Casey, J. A., & Hernández, D. (2021). Resilient Power: A home-based electricity generation and storage solution for the medically vulnerable during climate-induced power outages. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/ pii/S0016328721000161. *Futures,* 128, 102707.

4.5.3. Condiciones del sistema de salud ante el cambio climático

Los eventos extremos impactan no tan solo los determinantes sociales de la salud, sino también los servicios esenciales, incluyendo los problemas de salud ambiental, el sistema de atención médica y el acceso de la población al sistema de salud. También tienen un impacto en las poblaciones vulnerables y los resultados en salud, que incluyen la salud física, mental y la calidad de vida. La planificación de la adaptación con los principios JEDI brinda a los profesionales de la salud pública y a los responsables de la formulación de políticas una herramienta poderosa para identificar los impulsores estructurales de la exposición desproporcionada a la contaminación y los impactos climáticos como el calor, las inundaciones, los incendios forestales y la sequía.

Por otro lado, la clase médica debe identificar los enlaces entre el impacto del cambio climático y la mortalidad. Igualmente, es importante identificar los efectos de las variaciones del clima y los desastres.

4.5.4. Salud mental y cambio climático

En Puerto Rico, luego del paso del huracán María, el trabajo de organizaciones de base comunitaria –que recibieron ninguna o poca ayuda gubernamental– llenó los vacíos en los esfuerzos de recuperación[248]. A través del estudio del trabajo con un enfoque ecosocial se identificó que estos esfuerzos comunitarios son cruciales para la protección efectiva de los grupos más vulnerables. Entre los efectos relacionados mayormente con la salud mental están el trauma, la ansiedad y la depresión[249]. Si bien hubo comunidades que se pudieron organizar, la migración tuvo un rol muy importante en Puerto Rico luego del huracán María[250]. Se estima que aproximadamente 160,000 personas emigraron de Puerto Rico, una magnitud nunca vista[251]. Los retos ante la reubicación dirigida por las comunidades debido a eventos climáticos en Puerto Rico han comenzado a ser objeto de estudio[252]. Se ha demostrado un rol importante en el establecimiento de coaliciones colaborativas para enfrentar la relocalización, así como la recopilación de las historias y las voces de las comunidades.

Un estudio más reciente que analizó el estrés percibido a un año del huracán María halló que los niveles de estrés de las personas empeoraron[253]. Las investigadoras resaltaron la importancia de que los gobiernos tanto locales como federales establezcan planes para

[248] Hayward, A., Morris, Z., & Otero Ramos, Y. (2019). The Political Determinants of Disaster Risk: Assessing the Unfolding Aftermath of Hurricane Maria for People with Disabilities in Puerto Rico. *Environmental Justice, 11*(2), 89-94.

[249] Erlick, J. C. (2021). "Trauma and Collective Memory." En J. C. Erlick, *Natural Disasters in Latin America and the Caribbean: Coping with Calamity.*

[250] Griffith, D. (2020). Environmental Change and Human Migration Stylized Facts from Puerto Rico and Honduras. *Coastal Management*.

[251] Erlick, 2021, p. 85.

[252] Maldonado, J., Flores Castillo Wang, I., Eningowuk, F., Laukea, L., Lascurain, A., Lazrus, H., ... Thomas, B. (2021). Addressing the challenges of climate-driven community-led resettlement and site expansion: knowledge sharing, storytelling, healing, and collaborative coalition building. *Springer*.

[253] Meléndez, K., & Saltzman, B. (2021). Puerto Ricans One Year After Hurricane Maria: Secondary Analysis of Factors Affecting Stress Due to Hurricane Effects. *Environmental Justice, 14*(1).

aminorar la carga de salud mental y asegurar y facilitar el acceso a los servicios de salud mental luego de desastres naturales. En Puerto Rico puede haber ocurrido un aumento en ciertos impactos adversos a la salud como es el síndrome de estrés postraumático, defectos congénitos, autismo o cáncer que tengan una etiología (o conjunto de causas) ambiental[254]. Los trabajos de facilitadores y psicólogos sociales comprometidos con la justicia climática pueden tener un rol clave en fortalecer los esfuerzos de transformación comunitarios posdesastres[255].

4.6. Agricultura y ganadería

La agricultura global ha logrado producir suficientes calorías, proteínas y nutrientes para cumplir la demanda de sobre 8,000 millones de personas. No obstante, todavía hay una proporción considerable de la población que sufre inseguridad alimentaria y malnutrición. En los próximos años, el sector agrícola será responsable de cumplir con la triple carga de proveer seguridad alimentaria y nutricional a una población en crecimiento continuo, lograr estilos de vida razonable para los millones que dependen de la agricultura y mejorar la sostenibilidad ambiental.

Los sistemas agrícolas a nivel global y local han contribuido al cambio climático mediante la emisión de GEI por la conversión de sistemas naturales (cambio en el uso de las tierras), niveles y tipos de insumos usados y alteraciones al suelo. A la vez, el sector agrícola es uno de los que más se afectará por el incremento en las temperaturas, los eventos extremos de sequía y precipitación, cambios en patrones de precipitación y otros factores asociados al cambio climático.

Las tendencias en los indicadores agrícolas en Puerto Rico sugieren que el sector agrícola es muy vulnerable a las perturbaciones y tensiones provocadas por el clima y las políticas institucionales locales; el cambio climático es un agravante. Aunque el sector agrícola en Puerto Rico no aporta cantidades significativas –2.7 % o 0.95 millones de toneladas de equivalentes de dióxido de carbono (Mt CO_2e)– de la totalidad de emisiones antropogénicas de GEI del país, este puede contribuir a mitigar el cambio climático mediante la reducción en las emisiones de GEI por animales y el manejo del estiércol, prácticas agrícolas que reduzcan la erosión y devuelvan carbono (C) al suelo, y que se minimice la pérdida de nutrientes, especialmente nitrógeno.

La extrapolación de trabajos científicos hechos principalmente en las zonas templadas a Puerto Rico demuestra que, de no tomar acción para mejorar la adaptación y la resiliencia, los rendimientos de los cultivos y animales se van a reducir. Se afectarán las economías de las empresas agrícolas y la competitividad del sector agrícola a nivel local, y se pondrá en más riesgo aún la seguridad y soberanía alimentaria del país. Las prácticas que aumenten la productividad agrícola de forma sostenible, mejoren la resiliencia, reduzcan y remuevan GEI y que aumenten la seguridad alimentaria local

254 Cange & McGaw-Cesaire, 2019.

255 Unanue, I., Patel, S., Trott, C. D., Piazza Rodríguez, A. A., Méndez Serrano, K., Brown, L. M., & Thomas Tormala, T. (2020). “Seeing More Clearly: Communities Transforming Towards Justice in Post-Hurricane Puerto Rico.” *Community Psychology in Global Perspectives, 6*(2/2), 22-47.

serán las mejores estrategias para que el sector agrícola se adapte y supere más rápido los efectos del cambio climático.

4.6.1. Estado de la situación de la producción agrícola de Puerto Rico

La conversión de sistemas naturales a agrícolas ha ocurrido a través de la historia y ha sido "necesaria" para sostener una población mundial en crecimiento continuo[256] [257] [258]. La tasa de aumento en la producción de comida ha excedido la de la población, inicialmente por aumentos en la huella agrícola y luego por aumentos en los rendimientos asociados a la tecnología y las prácticas agrícolas modernas[259]. Pero, haber asegurado abastos suficientes de comida ha degradado los ecosistemas y sus funciones, afectando los servicios de los que la humanidad depende[260] [261] [262]. Si bien será necesario aumentar la producción de comida entre un 30 % a 60 % para mantenerse a la par con los cambios demográficos, el cambio climático tiene el potencial de reducir los rendimientos entre un 10 % a 25 % (dependiendo del cultivo y la localización geográfica). Esto hace evidente la necesidad de lograr una seguridad alimentaria tanto en sistemas de comida globales y regionales o locales y de que se haga de forma sostenible[263].

En Puerto Rico, la producción agrícola es importante para mejorar la actividad económica, aumentar los empleos, salvaguardar los abastos de comida durante desastres naturales, amortiguar las fluctuaciones en los abastos de alimentos y precios a nivel global, y para mejorar la salud de los puertorriqueños. Según se resalta en el Informe Económico al Gobernador[264], la importancia de la seguridad alimentaria local no puede desligarse del contexto global. A continuación, se presentan algunos indicadores que ayudan a describir el estado de la situación agrícola en Puerto Rico.

Población. Contrario a las tendencias mundiales, la población de Puerto Rico alcanzó su máximo en el 2004 y para el 2022 estaba en descenso con cerca 3.2 millones[265].

---

256 Evans, L.T., 1998. *Feeding the ten billion. Plants and population growth*. Cambridge University Press.

257 Foley, J.A. et al., 2005. "Global consequences of land use." *Science*. 309. 570. DOI: https://doi.org/10.1126/science.1111772.

258 FAO. 2017. *The future of food and agriculture –Trends and challenges.* Rome. ISBN 978-92-5-109551- 5.

259 Cassman, K.G., Grassini, P. 2020. "A global perspective on sustainable intensification research." *Nature Sustainability.* 3, 262–268. https://doi.org/10.1038/s41893-020-0507-8.

260 Foley, J.A. et al., 2005. "Global consequences of land use." *Science*. 309. 570. DOI: https://doi.org/10.1126/science.1111772.

261 Godfray, H.C.J. et al., 2010. "Food security: The challenge of feeding 9 billion people." *Science*. 327: 812-818.

262 Benton, C. Bieg, H. Harwatt. 2021. *Food system impacts on biodiversity loss: Three levers for food system transformation in support of nature. Energy, Environment, and Resources Programme*. Chatham House. 75 p.

263 FAO, 2022. *FAO Strategy on Climate Change* 2022–2031. Rome.

264 Junta de Planificación, 2021. Ver el detalle en la sección "Trasfondo Histórico de la Seguridad Alimentaria a Nivel Mundial y Puerto Rico", p. 139-167.

265 IEPR (Instituto de Estadísticas de Puerto Rico). 2023. https://censo.estadisticas.pr/EstimadosPoblacionales.

Estructura poblacional. En términos generales, la población mundial es más vieja[266] y está más desconectada de la ruralía (donde se produce la comida) con flujos migratorios hacia las zonas urbanas[267]. La misma tendencia se observa en Puerto Rico, donde para el 2021 la mayoría de la población residía en zonas urbanas, la expectativa de vida era de 78 años[268] y la mediana de edad era de 44.2 años[269]. Las tendencias sugieren que la fuerza trabajadora disponible para los trabajos agrícolas disminuirá y la que quede será de mayor edad. En el período del 2015 al 2021 hubo 16,000 personas menos trabajando en la agricultura, con una reducción anual de 1.3 %[270].

Densidad poblacional. Puerto Rico tiene una densidad poblacional cercana a las 340 personas por kilómetro cuadrado. Aunque esta cifra es más de 10 veces el promedio mundial, no es muy distinto a algunos países. La carencia histórica de tierras disponibles para la producción agrícola ha sido ampliamente reconocida y continúa hoy en día. No obstante, los países que comparten densidades poblacionales similares a Puerto Rico pueden ser competitivos mediante productos agrícolas que tengan ventaja económica comparativa para el consumo doméstico y la exportación y mediante la intensificación de la producción agrícola usando alta tecnología[271] [272].

Área agrícola y número de fincas. Del 1964 al 2018, el área agrícola en Puerto Rico se redujo consistentemente cada quinquenio, y en el 2018 el inventario era un 70.3 % de las 1,641,042 cuerdas que había en el 1968[273]. En el quinquenio del 2012 al 2018, el área agrícola se redujo 17 % para una pérdida promedio anual de 19,443 cuerdas agrícolas. Para el 2018, Puerto Rico tenía un área agrícola de 487,775 cuerdas[274], distribuidas entre 168,442 cuerdas en cultivos, 81,674 cuerdas cosechadas y 261,206 cuerdas en pasturas[275].

El número de fincas ha decrecido[276] también con 19,951 en el 1998 y 8,230 en el 2018[277]. En el quinquenio del 2012 al 2018 el número de fincas se redujo en 37 %. De continuar las tendencias de pérdida en el número de fincas habrá menos de 4,000 para el 2030[278]. El 73 % de las fincas tienen 49 cuerdas o menos, con 27 % entre 1 y 9 cuerdas y 22.5 % entre 10 a 19 cuerdas. Del 2012 al 2018, el área promedio en fincas

---

266 FAO, 2017.
267 Ídem.
268 Banco Mundial: https://datos.bancomundial.org/indicator/SP.DYN.LE00.IN?locations=PR.
269 Estimados anuales poblacionales de los municipios desde 1950. Instituto de Estadísticas de Puerto Rico. Disponible en https://censo.estadisticas.pr/.
270 Junta de Planificación, 2021.
271 Vicente-Chandler, J. 1993. Una agricultura para los 90. Monografía preparada para el Secretario de Agricultura de Puerto Rico. 185 p.
272 Cassman y Grassini, 2010.
273 USDA-NASS (*United States Department of Agriculture-National Agricultural Statistics Service).* 2018. *Census of Agriculture*, Puerto Rico (2018) *Island and Regional Data*. AC-17-A-52.
274 1 ha es 2.47 acres y 2.54 cuerdas.
275 USDA-NASS, 2018.
276 Junta de Planificación, 2021.
277 USDA-NASS, 2018.
278 Junta de Planificación, 2021.

aumentó 33.3 % (estimado en 59.3 cuerdas). Entre los aproximadamente 8,000 operadores de fincas, el 89 % eran hombres y la edad promedio fue de 60 años[279].

La pérdida de área agrícola por factores exógenos (externos) sociales, políticos y económicos es un elemento importante que amenaza la sostenibilidad del sector agrícola de Puerto Rico ante el cambio climático, ya que es la base del recurso natural del cual la industria depende. Entre países homólogos del Caribe, Puerto Rico está sexto en área total. Pero, la proporción de área agrícola es de 22 %, muy por debajo del promedio mundial de países –44 %– y de otros países homólogos y competidores de la zona (por ejemplo, Cuba, Costa Rica, República Dominicana y Jamaica). Sin un inventario adecuado de terrenos agrícolas con precios de arrendamiento y compra accesibles y razonables es muy difícil mantener y revitalizar las empresas agrícolas e iniciar otras.

Producción agrícola y rendimientos. Hay información muy escasa para evaluar la productividad agrícola en términos de producción y rendimiento de cosechas y animales en Puerto Rico. Un estudio[280] que describe las tendencias en la producción y en los rendimientos de los cultivos de importancia económica demostró que había una brecha de rendimiento significativa en los cultivos de importancia. Esto sugiere que la producción agrícola en Puerto Rico puede aumentar todavía mediante la intensificación agrícola sostenible[281] [282]. En términos de la producción relativa de comida a nivel local, estimados para los años 2015 al 2017 sugieren que la producción local fue: 10 % para carne de res, 11 % para raíces y tubérculos, entre 5 % y 100 % para algunas hortalizas y sobre 80 % en algunas frutas[283] [284]. Los mejores estimados sugieren que la producción local satisface cerca del 15 % del consumo de comida[285] [286] y el 18 % del consumo calórico[287].

Valor de la producción. El sector agrícola en Puerto Rico se puede describir como frágil; contribuye aproximadamente un 0.6 % al producto interno bruto (GDP, por las siglas en inglés). El sector agrícola aporta una porción relativamente pequeña al ingreso familiar con pocas familias dependientes estrictamente del sector y solo el 17 % de los agricultores reciben 75 % o más de su ingreso de la agricultura[288]. En el 2018 en Puerto Rico, aproximadamente 1,000 fincas reportaron $60,000 o más en ventas[289].

---

279 USDA-NASS, 2018.

280 Sotomayor-Ramírez, D., Barragán-Arce, M. J., Lozada-Ramírez, G., & Jaramillo, R. 2013). "Trends in fertilizer consumption in Puerto Rico." *The Journal of Agriculture of the University of Puerto Rico*, *97*(1 2), 15–32. https://doi.org/10.46429/jaupr.v97i1-2.3037.

281 Vicente-Chandler, 1993.

282 Cassman y Grassini, 2020.

283 Sotomayor-Ramírez, sin publicar.

284 Ortiz-Colón, G., S.J. Fain, I.K. Parés, J. Curbelo-Rodríguez, E. Jiménez-Colón, M. Pagán-Morales, W. Gould. "Assessing climate vulnerabilities", 2018. *Climatic Change* 146 (6): 47-58.

285 Comas-Pagán, M., 2009. Vulnerabilidad de las cadenas de suministros, el cambio climático y el desarrollo de estrategias de adaptación: El caso de las cadenas de suministros de alimento de Puerto Rico. Disertación presentada para el grado de Doctor en Filosofía en Administración de Empresas, Programa de Comercio Internacional.

286 Junta de Planificación, 2021.

287 Hernández et al., 2017.

288 USDA-NASS, 2018.

289 Kenner, B., D. Russell, C. Valdes, A. Sowell, X. Pham, A. Terán, J. Kaufman. 2023. "Puerto Rico's Agri-

Del 2000 al 2009-2010, el ingreso bruto agrícola (IBA)[290] fluctuó entre $716.1 millones y $789.8 millones[291] y, del 2010 al 2016-2017, fluctuó entre $830.6 millones a $894.5 millones[292]. Los huracanes Irma y María (2017) causaron grandes daños en la agricultura[293], lo que se reflejó en el Censo del 2018[294] con un IBA de $585,000 millones distribuidos igualmente entre cultivos y animales y un ingreso neto de $21 millones. De un IBA de $243 millones atribuido a animales, el 71 % se debe a leche, 15.5 % a carne de res y novillas y 8.3 % a pollos y sus productos. En el renglón de cultivos con un IBA de $242 millones, el 31 % se debió a granos (semillas), 17 % correspondió a plátanos, 14 % a plantas ornamentales, 14 % a hortalizas y vegetales, y 4.7 % se debió a la producción de forrajes. Del 2012 al 2018, todos los grupos de cultivos –excepto los granos producidos en la industria de semillas– sufrieron pérdidas en el IBA de hasta $54 millones en el sector de plátanos; $30 millones en el de café; vegetales y melones, de $23 millones; y frutales y cocos, de $19 millones[295]. Para el 2018, las dos regiones geográficas que más aportaron al IBA fueron Arecibo y Ponce, la primera dedicada principalmente a la producción de leche y sus derivados y la segunda a las hortalizas donde están los mejores suelos, llanos y mecanizables y con infraestructura de riego.

No cabe duda de que los huracanes del 2017 causaron grandes pérdidas en la economía del sector agrícola[296] [297]. Los fenómenos naturales afectaron severamente el inventario de cultivos y animales y la infraestructura agrícola. También, exacerbaron la escasez en la mano de obra necesaria para las actividades agrícolas. Pero, las tendencias históricas en los indicadores económicos agrícolas demuestran que los problemas son de carácter estructural y van más allá de estos fenómenos y del quinquenio 2012 al 2018. La reducción en el área agrícola y su pérdida de competitividad se debe a un complejo entramado de fenómenos naturales extremos y a otros factores de carácter económico, político y social[298].

Consumo de agua para la agricultura. El riego suplementario es de vital importancia

---

cultural Economy in the Aftermath of Hurricanes Irma and María: A Brief Overview." *Economic Research Service. Administrative Publication Number 114.* April 2023. 35 p.

290 El valor de producción a nivel de la finca se evalúa basado en el ingreso bruto agrícola (IBA) y no toma en consideración el valor añadido fuera de la finca que puede variar entre 2x y 4x el IBA, ni otros ingresos asociados a la participación en programas de ayuda (que pueden fluctuar entre un 10 a 20% del IBA).

291 Datos tomados del Ingreso Bruto Agrícola reportado por el Departamento de Agricultura de Puerto Rico y presentado por el Instituto de Estadísticas PR en su portal Ingreso Bruto Agrícola. Disponible en: https://estadisticas.pr/en/inventario-de-estadisticas/ingreso-bruto-agricola.

292 Datos tomados del Ingreso Bruto Agrícola reportado por el Departamento de Agricultura de Puerto Rico y presentado por el Instituto de Estadísticas de Puerto Rico en su portal Ingreso Bruto Agrícola, disponible en hoja de cálculo para los años 2010 al 2017. Disponible en: https://estadisticas.pr/en/inventario-de-estadisticas/ingreso-bruto-agricola.

293 Kenner et al., 2023.

294 No se pudo obtener datos más recientes.

295 Kenner et al., 2023.

296 Weiner, S.S. N. Álvarez-Berríos, A.B. Lindsey. 2020. "Opportunities and Challenges for Hurricane Resilience on Agricultural and Forest Land in the U.S. Southeast and Caribbean." *Sustainability 2020*,*12*(4), 1364; https://doi.org/10.3390/su12041364. https://www.mdpi.com/2071- 1050/12/4/1364.

297 Kenner et al., 2023.

298 Hernández et al., 2017.

para lograr las metas de producción y la seguridad alimentaria de muchos países[299]. Se prevé que el cambio climático en el Caribe y Puerto Rico provocará variaciones en el ciclo hidrológico, lo que pudiera reducir la disponibilidad del agua en el suelo, aumentar su demanda y agudizar su escasez[300] (véase más en la sección 4.7). Por tal razón, es importante preservar las áreas que han sido dotadas con sistemas de riego.

Los patrones de variaciones temporales y espaciales en la precipitación en Puerto Rico hacen necesario el riego suplementario agrícola para algunas zonas, especialmente la zona sur, donde se encuentran la mayoría de los suelos fértiles, llanos y mecanizables. Para el 2010, se reportó que el sector agrícola utiliza cerca de 38.2 millones de galones diarios (MGD) de agua para cultivos y crianza de animales en cerca de 42,000 acres, lo que representa solo el 5 % del uso consuntivo total del agua[301]. El 41 % del agua proviene de cuerpos superficiales y el 58 % son aguas subterráneas. El área bajo riego está potencialmente entre el 5 % y 9 % del área agrícola total[302] [303]. El 81 % del agua se aplica mediante el sistema de microrriego, lo cual aumenta la eficiencia de uso. Las principales zonas donde se consume el 95 % del agua de riego están en el sur, desde Cabo Rojo a Guayama, incluyendo a 18 municipios. Para el 2010, la gran mayoría del consumo de agua de riego fue para la producción de frutas, vegetales, plátanos y guineos.

A base de la información y datos disponibles, los estimados de demanda de agua agrícola para el futuro en Puerto Rico no están claros. Será necesario identificar las áreas que se desean regar y la infraestructura disponible. También será necesario definir el criterio de riego para llegar a los requisitos de agua considerando cultivos, época del año, características de los suelos y la calidad del agua.

Consumo de nutrientes en fertilizantes. El uso de fertilizantes en la agricultura combinado con fitomejoramiento[304], la biotecnología, el riego y la mecanización han sido los responsables por el incremento histórico mundial en la producción agrícola[305]. Para el 2020, el consumo anual mundial de fertilizantes fue de 201 millones de toneladas (M t) de nutrientes distribuidos entre 113, 48 y 30 M t, para nitrógeno (N), óxido de fósforo (P_2O_5) y óxido de potasio (K_2O)[306]. El nivel de aplicación de fertilizantes promedio fue de 129 kilogramo por hectárea (kg/ha) de nutrientes (N + P_2O_5 + K_2O) distribuidos entre 73, 31, y

[299] FAO. 2020. El estado mundial de la agricultura y la alimentación 2020. Superar los desafíos relacionados con el agua en la agricultura. Roma. https://doi.org/10.4060/cb1447es.

[300] NOAA. 2022. Puerto Rico and the U.S. Virgin Islands. NOAA National Centers for Environmental Information. State Climate Summaries 2022. https://statesummaries.ncics.org/chapter/pr/.

[301] Molina-Rivera, W.L. 2014. Estimated water use in Puerto Rico, 2010: *U.S. Geological Survey Open-File Report 2014* –1117, 35 p., http://dx.doi.org/10.3133/ofr20141117.

[302] El rango corresponde a las proporciones estimadas para el 2012 y el 2018 o entre 26,993 y 53,361 cuerdas. Molina (2010) reporta un área bajo riego de 40,200 acres para el 2010.

[303] USDA-NASS, 2018.

[304] El fitomejoramiento es el arte y la ciencia de mejorar genéticamente las plantas en beneficio de la humanidad. Los mejoradores obtienen nuevas variedades no solo para los alimentos, los piensos y las fibras, sino también para los combustibles. Fuente: https://www.fao.org/3/at910s/at910s.pdf

[305] Erisman et al., 2008.

[306] FAOSTAT, 2023. *Food and Agriculture and Organization*, *Statistical Division*. Disponible en: https://www.fao.org/faostat/en/#home.

25 kg/ha, para N, P_2O_5, y K_2O[307]. De todas las entradas (deposición atmosférica, estiércol, fijación biológica y fertilizante) de N a los sistemas agrícolas, el 54 % no se contabiliza en el rendimiento de cultivos por lo que se queda en el suelo o se pierde en el ambiente (lixiviación, escorrentía, desnitrificación, volatilización), con potencial de impactar la calidad del agua, el aire y los ecosistemas naturales[308]. El balance mundial entre las entradas por fertilizante, estiércol y otros y la remoción por cosechas demuestra que hay un superávit anual de N de 95 M t y de P_2O_5 de 13.5 M t[309] [310].

Para Puerto Rico se ha reportado[311] un nivel de consumo de nutrientes en forma de fertilizantes de 88 kg/ha. El estimado para el 2020 fue de 40 kg/ha o una disminución de 57%. Los estimados de Puerto Rico están muy por debajo del promedio mundial, pero un poco más altos que el resto del Caribe. Los estimados de consumo de nutrientes parecen ser razonables considerando el área agrícola y la brecha de rendimiento observada.

Pérdida y desperdicio de alimentos. La pérdida y el desperdicio de alimentos están asociados a una disminución en la calidad y cantidad de alimentos. Se estima que un 30 % de la comida producida se pierde o se desperdicia[312], lo que puede ocurrir en los puntos de producción, consumo o en la cadena alimentaria. Esto tiene un impacto en el consumo de energía y en la emisión de GEI. Por ejemplo, se estima que el 8 % de las emisiones totales de GEI se deben a la pérdida y al desperdicio de comida[313] [314]. No se pudo conseguir estimados de pérdida y desperdicio de alimentos en Puerto Rico, pero existe conciencia sobre la importancia de reducirlos[315].

Demanda en la producción de alimentos (calorías y proteínas) e inseguridad alimentaria. El consumo diario per cápita de calorías y proteínas ha aumentado consistentemente desde el 1961 al presente con 2,950 kilocalorías y 80 gramos en el período 2018-2020[316]. En el futuro, se prevé mayor cambio en las dietas de países con mayor poder adquisitivo y se espera mayor consumo de carnes y mayor demanda de granos para la producción de carne. Esto pondrá más presión en los recursos de tierra disponibles.

A nivel mundial, la obesidad entre adultos aumentó entre 2000 y 2016, con un promedio de 13.1 % de la población, pero en algunas regiones (Norte América y Europa) la obe-

---

307 Ídem.

308 Follet, J.R., R.F. Follet, W.C. Herz. 2010. "Environmental and human impacts of reactive nitrogen." P. 1-37. En J.A. Delgado y R. Follet (editores). *Soil and Water Conservation Society*. Ankeny, IA.

309 Zhang, X., Davidson, E. A., Zou, T., Lassaletta, L., Quan, Z., Li, T., & Zhang, W. (2020). "Quantifying nutrient budgets for sustainable nutrient management." *Global Biogeochemical Cycles*, 34, e2018GB006060. https://doi.org/10.1029/2018GB006060.

310 FAOSTAT, 2023.

311 Sotomayor-Ramírez et al., 2013.

312 FAO, 2017.

313 CCA. 2017. Estudios de caso sobre pérdida y desperdicio de alimentos en América del Norte, Comisión para la Cooperación Ambiental, Montreal, Canadá, 66 pp.

314 FAO, 2022.

315 LPRA 13 del 12 enero 2023. Para declarar el día nacional para la conciencia de la pérdida y el desperdicio de alimentos. Disponible en: https://bvirtualogp.pr.gov/ogp/Bvirtual/leyesreferencia/PDF/13-2023.pdf

316 FAO, 2021. *World Food and Agriculture - Statistical Yearbook 2021*. Rome. https://www.fao.org/3/cb4477en/cb4477en.pdf.

sidad puede llegar a 28 %, seguido por Latinoamérica y el Caribe. En Puerto Rico, el 68.4% de la población adulta es obesa o sobrepeso. Cerca de un 10 % de los jóvenes de 18 a 24 años y 2 % de los adultos mayores de 65 años se encuentran bajo peso, principalmente por una alimentación inadecuada, lo cual es más alta que en Estados Unidos[317]. La producción de frutas y de hortalizas y legumbres aportaron menos de 1 % de la demanda calórica (ajustado por edad). En Puerto Rico se consume menos de la ración recomendada de frutas y vegetales y se estima que un 34 % de las calorías consumidas son de alimentos y bebidas con alto contenido de grasa o azúcar[318].

Hambruna y desnutrición. A pesar de los avances en abastos de comida y en la capacidad de suplir calorías y proteínas, todavía hay grandes brechas en términos de cantidad (incremento poblacional y poder adquisitivo), calidad de comida y productos agrícolas[319]. En ese contexto, para el 2020, entre 720 y 811 millones de personas estaban severamente malnutridas y sufriendo hambruna, 2,370 millones de personas tienen inseguridad alimentaria moderada o severa y 928 millones de personas sufrían inseguridad alimentaria severa[320]. En Puerto Rico, el 33.2 % de la población de 18 años o más presentó algún nivel de inseguridad alimentaria y el 21.7 % de las personas indicaron que en los últimos 12 meses hubo ocasiones en las que tuvieron que servirse menos cantidad de alimentos o dejar de comer una de sus comidas diarias[321].

4.6.2. El clima y el efecto del cambio climático sobre la agricultura

La Agencia de Protección Ambiental (EPA) ha desarrollado más de 50 indicadores de cambio climático que se agrupan en seis categorías[322]. El Departamento de Agricultura federal (USDA) ha desarrollado 20 indicadores de cambio climático que proveen información relevante a los sistemas de producción agrícola en Estados Unidos[323].

El IPCC[324] ha identificado 35 indicadores denominados impulsores de cambio climático (*climate impact drivers*, CID por sus siglas en inglés). Algunos, si no muchos de los

317 Hernández et al., 2017.
318 Ídem.
319 FAO-IFAD-UNICEF-WFP-WHO, 2021.
320 FAO, 2021.
321 Santiago-Torres, M., Román-Meléndez, E.M., Rodríguez-Ayuso, I. R., Ríos-Vázquez, Z. 2019. Seguridad alimentaria en Puerto Rico. Instituto de Estadísticas de Puerto Rico. https://estadisticas.pr/files/Comunicados/Seguridad%20Alimentaria%20en%20Puerto%20Rico%20-%20Final%20%28300519%29.pdf.
322 https://www.epa.gov/climate-indicators/view-indicators. Los indicadores se agrupan según las categorías: (i) gases efecto invernadero; (ii) el tiempo y el clima; (iii) océanos; (iv) nieve y hielo; (v) salud y sociedad; (vi) ecosistemas.
323 Walsh, M. K., P. Backlund, L. Buja, A. DeGaetano, R. Melnick, L. Prokopy, E. Takle, D. Todey, L. Ziska. 2020. Climate Indicators for Agriculture. USDA Technical Bulletin 1953. Washington, DC. 70 p.
324 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, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 3−32, doi: 10.1017/9781009157896.001.

indicadores, puede que no sean relevantes o no sean aplicables a las condiciones de Puerto Rico, debido a que no son medidos o no se han documentado y reportado[325]. Por lo general, los indicadores de cambio climático reportados más comúnmente para Puerto Rico se agrupan en cinco categorías: (i) temperatura; (ii) precipitación; (iii) fenómenos climáticos naturales; (iv) incremento en CO_2 atmosférico; y (v) incremento en el nivel del mar. En el capítulo 3 se resumen las tendencias históricas y predicciones de indicadores climáticos en Puerto Rico, entre los más importantes: temperaturas, lluvia, alza en el nivel del mar y concentraciones de GEI.

El desarrollo, crecimiento y rendimiento de los cultivos responderán de forma diversa a los aumentos en las temperaturas, los cambios en los patrones de lluvia, el aumento en las concentraciones de CO_2, mayor frecuencia de eventos extremos, presiones de plagas y patógenos[326] [327]. Los efectos del cambio climático sobre los suelos, cosechas y animales se han estudiado mediante una combinación de ensayos empíricos y modelos de crecimiento de cosechas y modelos de clima. Los resultados varían según las zonas geográficas, escenarios que se evalúan y las interacciones entre los factores. Las variables climáticas afectarán en grados y formas distintas la gran variedad de cultivos y tipos de animales. La Tabla 12 resume en términos generales cómo los indicadores de algún factor climático afectan las cosechas y animales.

Tabla 12.

Indicadores de algún factor climático y su efecto sobre la agricultura

Factor climático	Posibles implicaciones para la agricultura
Temperaturas más cálidas	1. Alteración de las estaciones del año. 2. Estrés de calor para los cultivos y animales. 3. Reducción de la calidad y el rendimiento de los cultivos y animales. 4. Estrés por calor para los trabajadores agrícolas (impacto en la salud). 5. Aumento en la evapotranspiración de los sistemas suelo-cultivo. 6. Cambios en las poblaciones y el rango de distribución de insectos y otras plagas. 7. Alteración en los patrones de fruto e inflorescencia. 8. Cambios en la biodiversidad de especies de pasturas naturales. 9. Reducción en la salud del suelo (asociado a población y diversidad de microorganismos del suelo). 10. Aumento de costos del enfriamiento de estructuras. 11. Desplazamiento de zonas ecológicas. 12. Mayor riesgo de enfermedades para animales.

[325] Los 35 indicadores CID están agrupados en siete tipos (o categorías): (i) calor y frío; (ii) mojado y seco; (iii) viento; (iv) nieve y hielo; (v) costa; (vi) océano y (vii) otros.

[326] Soares, D.; Paço, T.A.; Rolim, J. "Assessing Climate Change Impacts on Irrigation Water Requirements under Mediterranean Conditions - A Review of the Methodological Approaches Focusing on Maize Crop." *Agronomy* 2023, 13, 117. https://doi.org/10.3390/agronomy13010117.

[327] Tubiello, F.N, J.F. Soussana, S.M. Howden. 2007. "Crop and pasture response to climate change." *PNAS*, *104*(50), 19686-19690. https://doi.org/10.1073/pnas.0701728104.

Factor climático	Posibles implicaciones para la agricultura
Menor precipitación y mayor evaporación (dependiente de la región)	1. Menor humedad del suelo, causando estrés hídrico en cultivos que se producen en secano (la tierra agrícola que no tiene riego, sino solo recibe agua de lluvia). 2. Mayor dependencia de riego y mayor estrés sobre los recursos hídricos. 3. Disminución en la disponibilidad de agua de riego. 4. Degradación de suelos (desertificación y salinización). 5. Pérdida de cosechas (especialmente pasturas) por fuegos. 6. Amenaza a la infraestructura por riesgo de incendios en pasturas y bosques. 7. Menor recarga de ríos y embalses que pueden servir para abastos de agua de riego. 8. Menor recarga de acuíferos e intrusión salina. 9. Cambios en la diversidad y dominancia de especies.
Mayor frecuencia e intensidad de tormentas extremas	1. Inundación de terrenos agrícolas. 2. Riesgos o daños a la infraestructura de almacenes, oficinas, umbráculos (sitios cubiertos para resguardar del sol a las plantas). 3. Mayor escorrentía. 4. Mayores tasas de erosión. 5. Mayor riesgo de enfermedades en animales. 6. Interrupción de la actividad agrícola. 7. Reducción de los abastos de agua. 8. Pérdida en la producción agrícola asociada a daños por inundación de cosechas. 9. Mayor costo de seguros o pérdida de cubiertas.
Aumento en la frecuencia de lluvias fuertes	1. Alteración de la estacionalidad. 2. Aumento de la erosión. 3. Aumento de la escorrentía. 4. Reducción de la fertilidad del suelo. 5. Mayores costos para establecer prácticas de conservación.
Aumento en el nivel del mar	1. Intrusión salina en los acuíferos que sirven de abastos de agua. 2. Pérdida de áreas agrícolas cerca de las costas.
Incremento del CO_2 atmosférico	1. Aumento o reducción del rendimiento de algunos cultivos.
Fuegos más frecuentes en bosques y pasturas	1. Pérdida de cosechas, especialmente forrajes. 2. Mayor riesgo de erosión. 3. Pérdida de C en suelos. 4. Emisiones de GEI (CO_2).
Degradación de suelos	1. Cambios en los requerimientos de riego. 2. Cambios en la humedad de los suelos. 3. Erosión. 4. Salinidad. 5. Reducción en la fertilidad del suelo por mayor pérdida de nutrientes (vía lixiviación, desnitrificación, volatilización y escorrentía). 6. Cambios en la salud del suelo (respiración, diversidad y actividad microbiana).

El clima afecta la producción de cosechas. Los cambios de temperatura se pueden manifestar mediante el incremento en la temperatura promedio anual, temperaturas diarias y nocturnas y número de días con temperaturas por encima de un valor umbral. Los efectos de las temperaturas pueden variar por regiones. Algunos cultivos en zonas templadas pueden responder de forma positiva al aumento en temperatura[328], con un impacto más negativo en latitudes más bajas. En términos generales, bajo un escenario de incremento de temperaturas se espera una reducción en el rendimiento de las cosechas de entre 10 % a 25 % para el 2050[329]. Puerto Rico cuenta con una gran variedad de cultivos hortícolas y agronómicos que se producen bajo varios regímenes de clima y una gran variedad de suelos.

El aumento en la temperatura del aire tiene un efecto sobre el desarrollo fisiológico de los cultivos, incluyendo la fenología, productividad, los requisitos nutricionales y de agua. Los efectos fisiológicos de la temperatura no se deben confundir con la alteración de la temporada de crecimiento, lo cual se espera que sea más larga en latitudes más altas. Los cultivos con ruta fotosintética C3 son más sensitivos que cultivos C4[330] a los aumentos en temperatura promedio del aire, ya que en los primeros aumenta la fotorrespiración reduciendo la tasa fotosintética y reduciendo biomasa vegetal y rendimiento. Se prevé que el aumento en la temperatura del aire acelerará las tasas de desarrollo fenológico y las tasas de transpiración y acortará las etapas de crecimiento de las cosechas. El incremento en las tasas de transpiración tiene un efecto sobre el contenido de humedad del suelo y su demanda por el cultivo. En otros casos el incremento de la temperatura puede tener un efecto negativo en el número de horas frías para lograr la germinación o florecida prolongando el ciclo de crecimiento. El número de días que un cultivo se expone a temperaturas umbrales (nocturnas y diurnas) en etapas críticas de crecimiento como, por ejemplo, florecida, fructificación y llenado de grano, reducen los rendimientos de los cultivos y su calidad. Otros efectos indirectos del aumento en las temperaturas se asocian a mayor incidencia de plagas, yerbajos, y patógenos[331]. Los cultivos anuales pueden afectarse más que los perennes[332]. Se prevé que la mayoría, si no todos, los cultivos y sistemas de producción en Puerto Rico son vulnerables a los aumentos esperados en la temperatura.

---

328 Farooq, A., N. Farooq, H. Akbar, Z.U. Hassan, S.H. Gheewala. 2023. "A Critical Review of Climate Change Impact at a Global Scale on Cereal Crop Production." *Agronomy* 2023, *13*(1), 162. https://doi.org/10.3390/agronomy13010162.

329 Zhao, C., B. Liu, S. Asseng. 2017. "Temperature increase reduces global yields of major crops in four independent estimates." *PNAS*. *114*(35), 9326-9331. https://doi.org/10.1073/pnas.1701762114.

330 Ejemplos de cultivos C3 son algodón, arroz, trigo, cebada, soja, papa, leguminosa y se caracterizan porque se produce una molécula de tres carbonos como primer paso en la ruta fotosintética. Ejemplos de cultivos C4 son maíz, sorgo, caña de azúcar y el producto fotosintético es una molécula de cuatro carbonos.

331 *Science Daily*, 2008. *University of Illinois at Urbana-Champaign.* "Insects Take a Bigger Bite Out Of Plants In A Higher Carbon Dioxide World.*"* March 25, 2008. Disponible en: https://www.sciencedaily.com/releases/2008/03/080324173612.htm; *Science Daily*, 2011. *Purdue University.* "Climate change allows invasive weed to outcompete local species." 1 June 2011. Disponible en: https://www.sciencedaily. com/releases/2011/05/110531155351.htm; y *Science Daily*, 2018. *USDA/Agricultural Research Service.* "Elevated Carbon Dioxide Boosts Invasive Nutsedge Plants." *1 July 2008*. Disponible en: https://www.sciencedaily.com/releases/2008/06/080629074053.htm.

332 Soares et al., 2022.

Por otro lado, los cambios en la precipitación se pueden manifestar mediante el promedio diario a anual, la intensidad, el número de días con o sin lluvia, el número de eventos de precipitación y la combinación de estos. Los cambios (incremento) en la duración e intensidad de las lluvias aumentan la humedad del suelo con el potencial de afectar la magnitud y grado de la erosión y aumentar la magnitud de las inundaciones de terrenos y los días de encharcamiento de agua[333]. Un aumento en el número de días sin lluvia reduce la disponibilidad de agua para cultivos que no tienen riego afectando sus rendimientos. El balance entre la precipitación y evapotranspiración afectará el almacenaje de agua en suelo[334] [335]. En áreas con estrés hídrico habrá mayor presión sobre los recursos de riego, principalmente en la zona sur de Puerto Rico. La mayoría de la producción agrícola en Puerto Rico se da en secano (áreas sin riego). Las condiciones de sequía pueden provocar rápidamente reducción en la humedad del suelo, estrés hídrico en la planta y reducción en la magnitud y calidad del rendimiento. Los cultivos permanentes de la montaña como frutales y café podrían ser especialmente vulnerables al estrés hídrico. La tendencia hacia menor precipitación en la región del Caribe y Puerto Rico puede afectar todos los cultivos y sistemas de producción. Bajo condiciones de sequía, los cultivos pueden ser más susceptibles a la incidencia de presión de plagas, provocando mayor dependencia en el uso de plaguicidas sintéticos.

Los efectos principales de las concentraciones elevadas de CO_2 en los cultivos son una reducción en la transpiración y conductancia (o corriente continua) estomática[336] y, por ende, una mejoría en la eficiencia de uso del agua. Esto resulta en una mayor tasa fotosintética que promueve mayor biomasa y rendimiento de cultivos[337]. La fertilización con CO_2 beneficia más a los cultivos C3 que a los C4, debido a que los cultivos del segundo grupo se saturan con CO_2 a menor concentración[338]. El beneficio del CO_2 sobre los cultivos es mayor cuando hay suficiente N disponible[339]. Los efectos positivos de concentraciones elevadas de CO_2 sobre la productividad primaria podrán ser contrarrestados por otros factores tales como competencia por plagas, limitación de nutrientes y el aumento en la temperatura[340].

Los efectos de la interacción de aumentos en la temperatura y el CO_2 atmosférico con los cambios en la humedad del suelo son difíciles de predecir y las publicaciones científicas

---

333 Lal, R. 2021. “Climate change and agriculture.” Chapter 31. In *Climate Change*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2021; pp. 661–686.

334 Kirkham, M.B. 2011. “Water Dynamics in Soils.” P. 53-65. En J.L. Hatfield y T.J. Sauer (Editores). *Soil Management: Building a Stable Base for Agriculture.* American Society of Agronomy, Soil Science Society of America.

335 Hatfield, J.L. 2011. “Soil Management for Increasing Water Use Efficiency in Field Crops under Changing Climates.” P. 161-174. En J.L. Hatfield y T.J. Sauer (Editores). *Soil Management: Building a Stable Base for Agriculture.* American Society of Agronomy, Soil Science Society of America.

336 Relativa al estoma, definido por el *Diccionario de la lengua española* de la RAE como una abertura microscópica en la epidermis de las partes verdes de los vegetales superiores que permite el intercambio de gases y líquidos con el exterior.

337 Tubiello et al., 2007.

338 Hatfield et al., 2011.

339 Izaurralde, R.C., A.M. Thomson, J.A. Morgan, P.A. Fay, H.W. Polley, J.L. Hatfield. 2011. “Climate impacts on agriculture: Implications for forage and rangeland production.” *Agron. J.* 103:371–381.

340 Hatfield et al., 2011.

en el tema siguen aumentando. La mejor variable para describir ese efecto combinado es en la eficiencia del uso del agua (EUA). Por ejemplo, la EUA mejora con el aumento de CO_2 hasta que la temperatura del aire excede el valor umbral del cultivo y luego la EUA disminuye; el efecto es más marcado en plantas C3 que en las C4. El aumento en evapotranspiración anual por temperatura resultaría en déficit hídrico en cultivos y pérdidas económicas, a menos que este fenómeno se cancele por incrementos en precipitación o disponibilidad de riego y aumento en las concentraciones de CO[341].

El clima afecta los suelos. Cambios en la humedad y temperatura del suelo modifican las propiedades del suelo, especialmente aquellas asociadas a la biología. El aumento en la temperatura del suelo aumenta la actividad microbiana acelerando las tasas de oxidación de la materia y residuos orgánicos. Niveles altos de materia orgánica en suelo con buena actividad y diversidad microbiana resulta en suelos más saludables y resilientes, especialmente con relación a patógenos y plagas. Cambios en la actividad y diversidad microbiana también alteran los patrones regulares de reciclaje de C y de nutrientes (especialmente N). Aumentos en la precipitación media anual, eventos de lluvia extrema, o en la duración de la precipitación pueden aumentar la erosión del suelo con pérdidas asociadas de carbono y nutrientes[342]. El incremento en la humedad del suelo aumenta la proporción de poros ocupados por agua, modificando las emisiones de GEI, principalmente a través del aumento de emisiones de óxido nitroso (N_2O) y metano (CH_4) o reduciendo las tasas de oxidación de CH_4. La combinación del aumento de temperaturas y la reducción de la lluvia acelera la descomposición de la materia orgánica del suelo reduciendo el almacenaje de C en suelo y reduciendo la capacidad de los suelos para secuestrar C. Suelos con menos materia orgánica retienen menos humedad. Esto influye negativamente en la resiliencia del suelo a los efectos de las lluvias extremas y sequías.

El aumento de períodos prolongados de sequía en zonas sin riego suplementario puede reducir la disponibilidad de agua para cultivos y sus rendimientos. Bajo un escenario de menos lluvia media anual y más eventos de sequía se pueden esperar cambios en los recursos hídricos incluyendo la magnitud de los flujos en los ríos y la reducción en el almacenaje de agua en embalses, menos recarga de acuíferos y mayor salinización de los suelos. Modificaciones en temperatura y humedad pueden afectar la incidencia de plagas (enfermedades asociadas a hongos, bacterias y virus) de forma muy incierta e imperceptible. Los períodos de sequía pueden afectar la incidencia de fuegos en pasturas y en bosques. Los cambios de temperatura pueden provocar nuevas condiciones ecológicas asociadas al desplazamiento de las zonas climáticas. La forma en que los suelos del trópico responden a los distintos escenarios del cambio climático es posiblemente distinta a las respuestas de los suelos en zonas templadas y puede ser muy incierta.

El clima afecta a los animales. Hay consenso en que los indicadores de cambio climático tales como estrés de calor y sequía han afectado las actividades pecuarias de producción de carne y leche en Puerto Rico[343]. Los animales se pueden afectar en forma directa o indirecta por los efectos del cambio climático. En Puerto Rico, los animales usados para producir carne y leche han sido introducidos generalmente de zonas templadas y

[341] Hatfield et al., 2011
[342] Lal, 2021.
[343] Álvarez-Berríos et al., 2018 y Ortiz-Colón et al., 2018.

tienen una adaptación limitada para sostener su productividad potencial en los climas del trópico. Por tal razón, los animales son vulnerables a episodios transitorios y prolongados de estrés crónico de calor con una reducción en la producción de carne[344] o leche[345]. El efecto del estrés se puede manifestar mediante un incremento en la temperatura corporal, el potencial de reproducción, el aumento en la edad al parto, edad al preñarse y en el peso vivo al parto[346]. El estrés de calor se puede manifestar también en indicadores de bienestar animal tales como higiene, cojera, estrés social, mastitis y su nutrición[347]. El calentamiento excesivo reduce la capacidad de las vacas de producir leche y disminuye las tasas de preñez. El alza en la temperatura puede aumentar los costos de enfriamiento de los establos y aumentar los costos de producción por la necesidad de aplicar prácticas de conservación (como, por ejemplo, techos en campos y árboles para sombra).

En términos indirectos, las temperaturas altas aumentan la proliferación y sobrevivencia de los parásitos y patógenos[348] [349]. Los efectos de sequías frecuentes y prolongadas afectan la productividad de las pasturas y otros cultivos producidos como alimento, reduciendo la disponibilidad de alimentos y aumentando la dependencia de granos importados. Las sequías hacen a las pasturas susceptibles a fuegos con pérdidas económicas grandes e inmediatas. En las áreas de pastoreo, el exceso en el pastoreo provoca disminución en la calidad y hace a los suelos más susceptibles a la erosión.

4.6.3. Emisiones de GEI y el rol de la agricultura

Aportación de la agricultura a las emisiones totales de GEI: Contexto global. La interpretación de los estimados de las emisiones de GEI y la proporción emitida por la agricultura y sus sectores pueden ser confusas debido a que varían según las actividades (cultivos y animales) consideradas, las diferencias en las metodologías y los sectores incluidos en los estimados por la FAO o el IPCC (*landuse change* por la FAO *y Agriculture + Landuse change and forestry, LULUCF*[350] por NGHGI)[351]. También, puede haber

[344] Brown-Brandl, T.M. 2018. "Understanding heat stress in beef cattle. Biometeorology and Animal Welfare." *R. Bras. Zooc.* 47. https://doi.org/10.1590/rbz4720160414.
[345] Rood, sin fecha.
[346] Ortiz-Colón et al., 2018.
[347] Nalon, E., B. Contiero, F. Gottardo, G. Cozzi. 2021. "The Welfare of Beef Cattle in the Scientific Literature From 1990 to 2019: A Text Mining Approach." *Front. Vet. Sci*., *11 January 2021 Sec. Animal Behavior and Welfare*. *Volume 7 - 2020* | https://doi.org/10.3389/fvets.2020.588749.
[348] Brown-Brandl, T.M., E.D. Berry, J.E. Wells, T.M. Arthur, J.A. Nienaber. 2008. "The impact of stress level on fecal bacteria and pathogen shedding in feedlot cattle." 2008 ASABE *Annual International Conference*, Providence RI. https://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=25044&t=1&redir=&redirType=
[349] Vitali, A., A. Felici, A.M. Lees, G. Giacinti, C. Maresca, U. Bernabucci, J.B. Gaughan, A. Nardone, N. Lacetera. 2020. "Heat load increases the risk of clinical mastitis in dairy cattle." *J. Dairy Sci*. 103.8378-8387. Disponible en: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022030220304586.
[350] El sector LULUCF se refiere al uso de la tierra, cambio en el uso de la tierra y de los bosques.
[351] Ver por ejemplo, Tubiello, F.N, M. Salvatore, R.D. Cóndor Golec, A. Ferrara, S. Rossi, R. Biancalani, S. Federici, H. Jacobs, A. Flammini. 2014. "Agriculture, Forestry and Other Land Use Emissions by Sources and Removals by Sinks: 1990-2011 Analysis." *FAO Statistical Division Working Paper Series*. ESS/14-02; FAO. 2021A. "The share of agri-food systems in total greenhouse gas emissions: Global, regional, and country trends 1990-2019*." FAOSTAT Analytical Brief 31*. Disponible en: https://www.fao.org/3/cb7514en/cb7514en.pdf. -*emissions data*; Tubiello, F.N., Rosenzweig, C., Conchedda, G., Karl,

diferencias debido a los modelos usados, formas en las cuales los diferentes países reportan los resultados y diferencias en los factores de emisión. Las emisiones de GEI por la agricultura han sido reportados por varios autores[352] [353].

Los estimados agrícolas más recientes y confiables son los reportados por la FAO para el 2019[354]. Las emisiones de GEI de fuentes agrícolas y cambio de uso de tierra (LUC) fueron de 10,717 Mt CO_2e de las cuales 7,214 Mt CO_2e eran a nivel de finca (de cultivos y animales) y 3,503 Mt CO_2e fueron de la conversión de bosques y fuegos en bosques tropicales y suelos orgánicos (Tabla 13).

Tabla 13.
Aportación del sector agrícola a las emisiones de GEI para el 2019 (FAO, 2021).

	M t (=10^6 t)	% del total de emisiones antropogénicas
Agrícola (finca)	7,214	13.7
Conversión de bosques y fuegos (cambio de uso de tierras (LUC))	3,503	6.2
Agrícola + LUC	10,717	20.0
Pre y posproducción de alimentos	5,800	11.1
Total	16,517	31.1

K., Gütschow, J., Pan, X., Obli-Laryea, G. *et al*., 2021. "Greenhouse Gas Emissions from Food Systems: Building the Evidence Base." *Environmental Research Letters* 16, no. 6. doi.org/10.1088/1748-9326/ac018e - *Policy*; Jia, G., E. Shevliakova, P. Artaxo, N. De Noblet-Ducoudré, R. Houghton, J. House, K. Kitajima, C. Lennard, A. Popp, A. Sirin, R. Sukumar, L.Verchot, 2019: "Land–climate interactions. In: Climate Change and Land: an IPCC Special Report on Climate Change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems." [P.R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M, Belkacemi, J. Malley, (eds.)]. *In press. - emissions data*.

[352] Tubiello et al., 2014; Jia et al., 2019; Tubiello et al., 2021; FAO 2021.

[353] Nabuurs, G-J., R. Mrabet, A. Abu Hatab, M. Bustamante, H. Clark, P. Havlík, J. House, C. Mbow, K.N. Ninan, A. Popp, S. Roe, B. Sohngen, S. Towprayoon, 2022: "Agriculture, Forestry and Other Land Uses (AFOLU)". In *IPCC*, 2022: "Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change." Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [P.R. Shukla, 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, J. Malley, (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. doi: https://doi. org/10.1017/9781009157926.009.

[354] FAO, 2021.

Dióxido de carbono. El CO_2 es el GEI más abundante en la atmósfera y el que mayor aportación relativa tiene a las emisiones totales antropogénicas. En la mayoría de los sistemas de producción de cosechas la contribución neta de CO_2 de los suelos es negativo, debido a la productividad primaria vegetal. Las emisiones de CO_2 están asociadas principalmente a la conversión de bosques, fuegos forestales, fuegos de suelos orgánicos, drenaje de suelos orgánicos y consumo de energía en la finca.

Los sumideros de CO_2 atmosférico están asociados a la fotosíntesis, al almacenaje transitorio en la biomasa vegetal y animal y al almacenaje en la materia orgánica del suelo. Los cultivos fijan C vía fotosíntesis y respiran CO_2 a la atmósfera. Cuando el cultivo se cosecha o se quema, se devuelve al suelo parte del C en el residuo. Allí, durante el proceso de oxidación, parte se libera como CO_2 y otra se incorpora a la biomasa microbiana y eventualmente a la materia orgánica del suelo. La biomasa microbiana puede catalizar la transformación de C que proviene de las plantas a uno de mayor estabilidad en el suelo como la materia orgánica del suelo a través del secuestro de C. Las tasas anuales de secuestro de C pueden variar entre 100 a 1,000 kg C/ha según la biomasa antecedente, el clima, suelo, y manejo. Las prácticas que aumentan la cantidad de residuo vegetal devuelta al suelo y reducen la oxidación de C son claves para aumentar el C en los suelos. El incremento en el secuestro de C mejora las propiedades del suelo y mitiga las emisiones de CO_2 de otras fuentes como la industria y el sector de la energía. Un aumento de C en los suelos sirve para mejorar la capacidad de estos para filtrar el agua, mejorando la eficiencia del uso de nutrientes y mejorando la capacidad adaptiva de los suelos y cultivos para responder al cambio climático.

Metano. El CH_4 es un gas de corta duración en la atmósfera producido por procesos de oxidación anaeróbica de compuestos orgánicos en los suelos y rumiantes por medio de la acción microbiana. El metano se puede oxidar en los suelos por las bacterias metanotróficas.

Las emisiones globales antropogénicas de metano (CH_4) fueron en 2019 el 38.2 % de todas las emisiones agrícolas[355]. Las emisiones de fuentes naturales pueden ser entre 39 % a 42 % de las emisiones totales globales[356]. Cerca de un 20 % del calentamiento global se atribuye al CH_4.

Las principales fuentes agrícolas de CH_4 incluyen la fermentación entérica por rumiantes domesticados (bovinos, cabros, ovejos), arrozales inundados, descomposición del estiércol animal, la quema de biomasa y el drenaje de humedales. Algunas de estas fuentes emiten también N2O o CO_2, y las emisiones de GEI se expresan en equivalentes de CO_2, por lo que es difícil atribuir con precisión cuáles son las principales fuentes (únicas) que aportan a las emisiones. Pero, no cabe duda de que la actividad pecuaria de fermentación entérica y el estiércol son las principales fuentes de CH_4 a la atmósfera. Las emisiones pueden ser directas por el animal en forma de CH_4 o indirectas debido al estiércol depositado mientras los animales pastorean (CH_4 y N_2O), almacenaje y aplicación de estiércol a suelos (CH_4 y N_2O).

[355] *World Food and Agriculture - Statistical Yearbook 2021*. Rome. https://doi.org/10.4060/cb4477en.
[356] Lal, R. 2021.

Óxido nitroso. El N_2O se produce en sistemas anaeróbicos tales como suelos agrícolas, humedales, y plantas de tratamiento de aguas usadas. Las emisiones de N_2O están asociadas principalmente a la presencia de N oxidado (principalmente nitratos), buena disponibilidad de donantes de electrones (carbono orgánico) y anaerobiosos en el suelo. Aunque el N_2O se puede producir por anammox[357], el principal mecanismo para su producción es mediante la desnitrificación. Las emisiones de N_2O están íntimamente relacionadas con el exceso de N aplicado (no utilizado por cultivos y animales) que se mantienen en el suelo en forma oxidada. Las principales fuentes de nitrato al suelo pueden ser estiércol excretado en pasturas, estiércol aplicado a suelos y estiércol manejado, fertilizantes sintéticos y fijación biológica de N.

Las emisiones de N_2O provenientes de actividades agrícolas estuvieron por debajo de las de CO_2 y CH_4. Pero, la agricultura es el sector que más N_2O aporta al balance global de GEI. El N_2O es un gas de alta persistencia en la atmósfera y mayor capacidad para absorber energía infrarroja.

La aportación relativa de fertilizantes nitrogenados a las emisiones agrícolas a nivel de finca es de 8.3 % y a las emisiones agrícolas totales es de 5.6 %. Las emisiones de N_2O restantes se atribuyen al cultivo de suelos orgánicos y a la excreta animal. Es difícil precisar la aportación animal de N_2O, ya que se obtienen estimados distintos según la metodología[358], pero debe estar entre 9 % y 11 % de las emisiones agrícolas a nivel de finca y entre 6 % y 7 % de las emisiones agrícolas totales. De las emisiones de N_2O estimadas, cerca de un 36 % provienen de actividades pecuarias y 27 % provienen de fertilizantes nitrogenados sintéticos.

Los factores agrícolas más relevantes que pueden impactar la aportación de N_2O a la atmósfera son el fertilizante nitrogenado, la labranza, el uso de cobertoras y manejo de fuentes orgánicas como el estiércol. El N disponible para pérdida en el sistema agrícola es el resultado neto de entradas por fertilizante, estiércol, fijación biológica de N y la remoción del N en las cosechas. Conforme aumenta el exceso de N en el suelo se reduce la eficiencia de utilización y el potencial de emisiones de N_2O aumenta[359]. La eficiencia de utilización de N histórica ha mejorado en países industrializados, pero no en países en desarrollo[360]. Dado que la tasa anual de consumo de fertilizante continúa en cerca de 1.12 % y que las emisiones de N_2O aumentan con la fertilización nitrogenada, es importante mejorar la eficiencia de utilización de fertilizante nitrogenado.

La inclusión de leguminosas en rotación o como cobertoras pueden afectar las emisiones de N_2O en formas distintas. Las leguminosas pueden aportar a sistemas de producción ambientalmente amigables y sostenibles. Por un lado, las leguminosas tienen la capa-

[357] Tecnología de oxidación anaeróbica de amonio para la eliminación de nitrógeno de aguas residuales. Véase más en: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780323911801000090.

[358] El N_2O proveniente de actividad pecuaria se puede estimar basado en: N_2O agrícola (2,130.5 CO_2e) – [fertilizante-N (600.5 CO_2e) + suelo orgánico (832.9 CO2e)] = 697 CO_2e; La aportación de estiércol en pastura es de 763.5 CO_2e.

[359] Lassaleta et al., 2014. *Environ. Res. Letters*. https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/9/10/105011

[360] Lassaletta et al., 2014.

cidad de utilizar el N del suelo, reduciendo el exceso que no utiliza el cultivo comercial. También pueden aportar N al sistema mediante fijación biológica reduciendo la necesidad de fertilización. Mientras se reduce la necesidad de fertilización con N, la descomposición de residuos, la liberación de exudados y nitrificación-desnitrificación del N fijado pueden aumentar las tasas de emisión de N_2O[361] .

La agricultura orgánica continúa avanzando en muchas partes del mundo, pero tiene también implicaciones en las emisiones de N_2O. Por un lado, el agroecosistema orgánico puede servir de repositorio de múltiples desechos orgánicos que pueden aportar N y otros nutrientes y carbono para el cultivo comercial. Si las fuentes orgánicas se utilizan adecuadamente, usualmente la producción agrícola está limitada por el N y los rendimientos están por debajo de lo óptimo. La aplicación de residuos orgánicos para satisfacer el requisito nutricional de N puede conllevar una sobre aplicación de N resultado en exceso de N en suelo y mayores pérdidas de N_2O a la atmósfera. El consumo de energía en los sistemas de producción de cosechas orgánicos puede ser mayor que en convencionales[362]. El almacenaje, disposición y manejo de fuentes orgánicas, especialmente estiércol animal, puede resultar en mayores pérdidas de N_2O que fertilizantes nitrogenados.

Aportación de la agricultura a las emisiones totales de GEI: Contexto de Puerto Rico. El inventario más reciente de emisiones de GEI para Puerto Rico corresponde al 2021 con emisiones totales de 34.3 M t CO_2e[363]. El principal contribuyente fue CO_2 con un 87 % de las emisiones, seguido por CH_4 con 11 % y N2O con 1 %. Para el 2021, la silvicultura aportó 6 % y el sector agrícola 2.7 % de las emisiones. El sector agrícola presentó emisiones de 0.9 M t de las cuales el 67 % se atribuye al ganado por fermentación entérica, un 30 % por el manejo de estiércol y una proporción mínima del manejo de suelos. De los 0.9 M t el 5.8 % se debió al CO_2, 70 % al CH4 y 24.3 % al N_2O. El sector de la silvicultura fue analizado separado de la agricultura con emisiones de 2.1 % y sumideros de 1.9 % tuvo emisiones netas de 0.1 Mt. Véase más sobre el inventario en la sección 3.3 de este plan.

4.6.4. La pesca como un sistema crucial de seguridad alimentaria

La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) establece que la pesca contribuye significativamente a la seguridad alimentaria, a la lucha contra la pobreza, y el desarrollo y la estabilidad de las comunidades rurales y costeras[364]. Esto es evidente ya que la actividad pesquera, incluyendo la recolección de mariscos, provee la nutrición básica de 3,000 millones de personas y aporta al menos el 50 % de las proteínas animales y de minerales a 400 millones de personas en los países más pobres. En ciertas zonas de los trópicos, con el cambio climático se pronostica un descenso de hasta el 40 % en las capturas previstas para el 2050.

[361] Lal, R. 2021. pp. 661–686.
[362] Lal et al., 2021.
[363] DRNA (Departamento de Recursos Naturales y Ambientales. Informe de inventarios 2019 y 2021 de gases efecto invernadero para Puerto Rico. Preparado por *Applied Economics Clinic*. julio 2023. p.156.
[364] Organización de las Naciones Unidas (1995) Código de conducta para la pesca responsable. Disponible en: https://www.fao.org/3/v9878s/v9878s.pdf

La mayor parte de la pesca del Caribe estadounidense se desarrolla en la costa oeste de Puerto Rico. La costa cuenta con una amplia plataforma donde se encuentran grandes bancos de peces que ayudan a que sea la región más activa para la pesca comercial. Por el contrario, la costa norte es la más complicada para la pesca porque posee una plataforma muy estrecha, se caracteriza por mucho viento y fuerte oleaje[365].

Las pesquerías comerciales en Puerto Rico son esencialmente artesanales o de pequeña escala, ya que la mayoría se realiza en el hábitat costero o sobre la plataforma insular. Se estima que hay entre 1,500 y 2,000 pescadores comerciales activos y de 120,000 a 170,000 pescadores recreativos[366]. La edad promedio de estos pescadores comerciales activos en la costa este es de 48 años[367].

Actualmente, en Puerto Rico se pesca solo el 10 % del pescado que se consume. Esto significa que las principales fuentes de aminoácidos y proteínas del mar son importadas en Puerto Rico (~90 %). El Departamento de Agricultura (DA) busca duplicar esta cantidad. De acuerdo con datos del DA, las villas pesqueras mueven alrededor de 2,500,000 libras de pescado y mariscos, lo que representa entre $12 millones y $15 millones al ingreso bruto agrícola[368].

Según un estudio realizado en Puerto Rico con 49 pescadores, trabajadores gubernamentales y personal de organizaciones ambientales, los pescadores estuvieron de acuerdo con que la contaminación terrestre, el cambio climático y la sobrepesca han provocado el descenso de la cantidad de peces que pueden ver y capturar. Los entrevistados atribuyeron también esta merma al creciente número de pescadores que operan sin licencia y los que no cumplen las reglas, como las vedas por temporada. Los pescadores expresaron que ven menos peces y creen que estos están migrando a aguas más profundas como consecuencia de la contaminación y los cambios climáticos que dañan el ecosistema más cercano a la costa[369].

Otro estudio realizado sobre las percepciones y los efectos socioeconómicos del cambio climático en las pesquerías comerciales reveló que después del huracán María se encontró un nuevo enfoque sobre las amenazas y efectos del cambio climático en las pesquerías. Como parte de los resultados se descubrió que los pescadores han estado modificando sus prácticas de pesca desde hace varios años. Esto incluye: a) pescar especies diferentes, b) utilizar múltiples artes de pesca y c) pescar más lejos de la costa. Entre las principales inquietudes que presentan los pescadores se encuentran a nivel socioeconómico: a) la recesión económica, b) las vedas, c) el aumento del precio del

---

365 Binns, H. (2018). *Los pescadores del oeste de Puerto Rico solicitan una mayor participación en el manejo y mejorar esfuerzos de cumplimiento*. Conservación de los océanos del Caribe & U.S. Ocean Conservation. Disponible: https://www.pewtrusts.org/es/research-and-analysis/articles/2018/03/08/west-puerto-rico-fishers-call-for-more-participation-in-management-and-enhanced-enforcement

366 Ídem.

367 Cruz Mejías, C. (1 de marzo de 2020). El aumento de la temperatura del mar hace que los pescadores artesanales de Puerto Rico tengan que luchar por su futuro. *Global Press Journal.* https://globalpressjournal.com/americas/puerto-rico/puerto-ricos-fishers-fight-preserve-trade/es/.

368 WIPR (2022). *Secretario de Agricultura busca aumentar la pesca en Puerto Rico*. Disponible en: https://wipr.pr/secretario-de-agricultura-busca-aumentar-la-pesca-en-puerto-rico/

369 Binns, H. (2018).

combustible, y d) hay menos pescadores comerciales lo cual reduce la presión pesquera sobre los recursos. A nivel ambiental, consideran: a) los vientos cambiantes, b) el aumento de la temperatura del agua, c) especies invasoras, y d) la contaminación, incluida la basura, los aceites, el petróleo y los sedimentos fluviales arrastrados a alta mar por las corrientes[370].

El informe del IPCC demuestra que actualmente urge más que nunca seguir avanzando hasta conseguir que la gestión de la pesca sea sostenible. Las pesquerías sostenibles que están bien gestionadas y que cuentan con sistemas de seguimiento, regulación y gestión son más resilientes y capaces de adaptarse al cambio climático[371].

4.7. Agua

El agua es un recurso vital. Es un recurso móvil, limitado (espacial y temporalmente) y de usos múltiples (agricultura, turismo, industria, recreación, necesidades básicas e higiene de las personas, entre otros). Se considera un recurso renovable en calidad y cantidad. Sin embargo, la mala gestión y el cambio climático pueden reducir la cantidad de agua disponible en ciertas regiones.

Puerto Rico ocupa el escalafón número 135 de 182 jurisdicciones estudiadas a nivel mundial con respecto a la disponibilidad de agua dulce por persona, de acuerdo con la

Oficina de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. También es la segunda jurisdicción en América Latina con menos disponibilidad de agua dulce por persona, según el Banco Mundial.

Es de conocimiento público que la capacidad de almacenamiento de la mayoría de los embalses está comprometida seriamente por la sedimentación. La destrucción de 144 millones de árboles por el huracán María empeoró la situación. Entre los problemas que enfrenta el recurso agua están: intrusión de agua salada en los acuíferos, sequía, contaminación de los cuerpos de agua dulce, pérdida por salideros y otras deficiencias de infraestructura. A medida que el nivel del mar siga subiendo, la intrusión de agua de mar a los acuíferos aumentará, reduciendo la disponibilidad del agua subterránea.

La justicia climática y el acceso al agua se relacionan estrechamente, ya que el cambio climático afecta de manera desproporcionada a las comunidades más pobres y vulnerables del mundo, que a menudo tienen acceso limitado a fuentes seguras de agua. La falta de agua potable y de saneamiento adecuado puede agravar también los efectos del cambio climático en estas comunidades más vulnerables. Esto hace que sea aún más importante garantizar el acceso equitativo al agua mediante acciones climáticas justas y efectivas. La gestión sostenible del agua es esencial para abordar los desafíos del cambio climático y construir resiliencia en las comunidades afectadas.

---

370 Seara, T., Pollnac, R. & Jakubowski, K. (2020). *Impacts of natural disasters on subjective vulnerability to climate change: A study of Puerto Rican fishers' perceptions after hurricanes Irma & Maria*. Coastal Management, 48(5), 418-435. https://doi.org/10.1080/08920753.2020.1795969

371 IPCC (2019). *Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*. https://www.ipcc.ch/srocc/

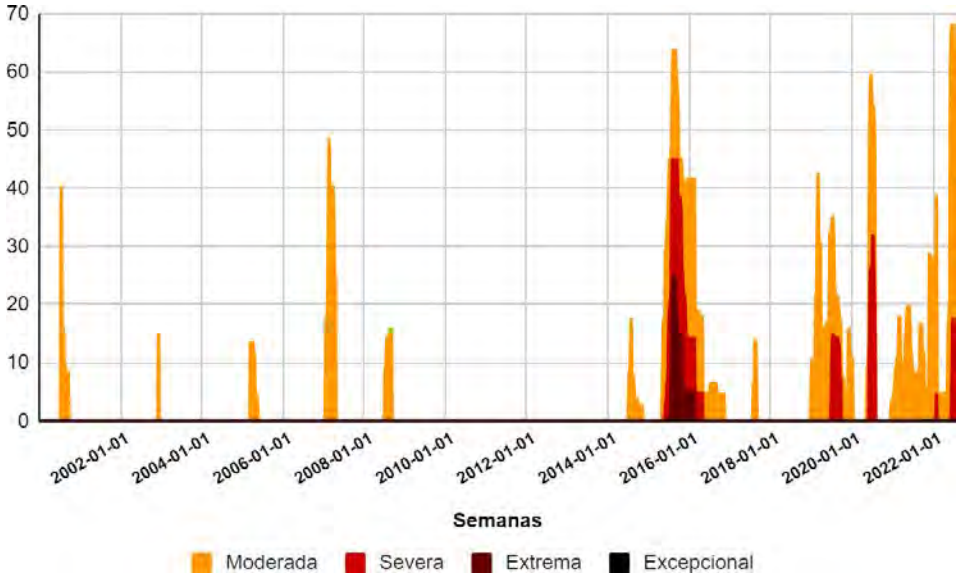
4.7.1. Sequías

Puerto Rico tiene un clima tropical lluvioso caracterizado por una temporada lluviosa que va desde mayo hasta noviembre y una temporada seca que va desde diciembre hasta abril. El interior este y el interior oeste son las zonas que reciben mayor precipitación anualmente. El área norte recibe mucha más lluvia que el área sur. La lluvia que se recibe en la temporada lluviosa es mayormente producto de la convección local, el efecto orográfico, ondas y ciclones tropicales. Mientras, la lluvia que se recibe en los meses secos proviene mayormente de frentes fríos y vaguadas[372].

Las teleconexiones como El Niño/Oscilación del Sur (ENOS), la Oscilación Multidecadal del Atlántico (AMO), la Oscilación del Atlántico Norte (NAO) y la Oscilación del Ártico (AO)[373] influyen también en la lluvia anual y temporal en Puerto Rico. En la última década (2013-2022), el país experimentó varios episodios de sequía significativos (Ilustración 41) que disminuyeron la cantidad de agua potable y en algunos casos provocaron el racionamiento del recurso hídrico[374]. El período de sequía más extremo fue el del 2015-2016, pero también los últimos tres años se caracterizaron por ser más secos de lo normal, según el registro de todos los eventos de sequía desde el 2000 hasta el 2022[375].

Ilustración 41.

Áreas bajo sequía moderada, severa, extrema o excepcional en Puerto Rico



Puerto Rico es una de las zonas del planeta donde los períodos más secos (1994 y 2015) y húmedos (1995 y 2017) de las últimas décadas provocaron, por un lado, racionamiento

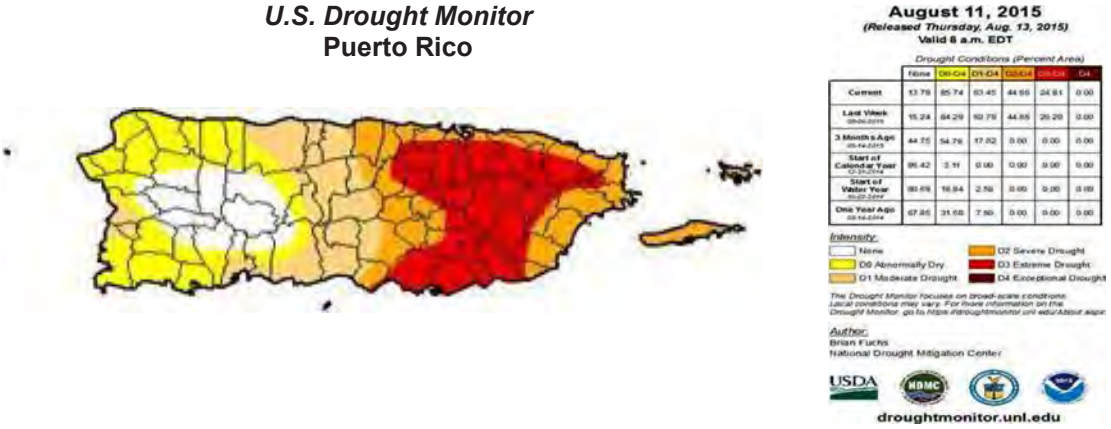
372 Colón-Torres, J. A. (2009). *Climatología de Puerto Rico*. Editorial Universidad de Puerto Rico.
373 Hernández Ayala, J. J., & Heslar, M. (2019). "Examining the spatiotemporal characteristics of droughts in the Caribbean using the standardized precipitation index (SPI)." *Climate Research*, *78*(2), 103-116.
374 Ídem.
375 Monitor de Sequía de los Estados Unidos.

de agua y grandes pérdidas agrícolas[376], mientras que, por otro lado, ocurrieron inundaciones extremas y deslizamientos de tierra[377] [378].

En la última década, Puerto Rico experimentó un período de sequía (Ilustración 42) importante (2013-2016) que generó serios desafíos hídricos[379] [380]. En el 2017 y el 2022, ocurrieron acumulaciones de lluvia sin precedentes asociadas con el paso del huracán María y el huracán Fiona, respectivamente, que causaron inundaciones repentinas catastróficas y deslizamientos de tierra[381] [382] [383] [384] [385]. Las proyecciones para el Caribe y Puerto Rico relacionadas con el cambio climático anticipan que esos episodios de sequía y de precipitación extrema serán aún más frecuentes en el futuro.

Ilustración 42.

Semana de más sequía



Condiciones de sequía para Puerto Rico para la semana del 4 al 11 de agosto de 2015. Esta se considera la semana en que la mayor parte del territorio estuvo en condiciones de sequía para el período del 2000 al 2022.

376 Larsen, M. C. (2000). "Analysis of 20th-century rainfall and streamflow to characterize drought and water resources in Puerto Rico." *Physical Geography*, *21*(6), 494-521.

377 Hernández Ayala, J. J., & Heslar, M. (2019).

378 Hernández Ayala, J. J., Keellings, D., Waylen, P. R., & Matyas, C. J. (2017). "Extreme floods and their relationship with tropical cyclones in Puerto Rico." *Hydrological Sciences Journal*, *62*(13), 2103-2119.

379 Hernández Ayala, J. J., & Heslar, M. (2019).

380 Herrera, D. A., Ault, T. R., Fasullo, J. T., Coats, S. J., Carrillo, C. M., Cook, B. I., & Williams, A. P. (2018). "Exacerbation of the 2013–2016 pan-Caribbean drought by anthropogenic warming." *Geophysical Research Letters*, *45*(19), 10-619.

381 Ídem.

382 Keellings, D., & Hernández Ayala, J. J. (2019). "Extreme rainfall associated with Hurricane Maria over Puerto Rico and its connections to climate variability and change." *Geophysical Research Letters*, *46*(5), 2964-2973.

383 Ramos-Scharrón, C. E., & Arima, E. (2019). "Hurricane María's precipitation signature in Puerto Rico: A conceivable presage of rains to come." *Scientific reports*, *9*(1), 1-7.

384 Hernández Ayala, J. J., & Méndez-Tejeda, R. (2021). "How much rainfall did Hurricane María really drop in Puerto Rico?" *Weather*, *76*(9), 313-316.

385 Ramos Scharrón, C. E., Hernández Ayala, J. J., Arima, E. Y., & Russell, F. (2023). "Preliminary Analyses of the Hydro-Meteorological Characteristics of Hurricane Fiona in Puerto Rico." *Hydrology*, *10*(2), 40.

Los eventos extremos de lluvia y sequía han causado pérdidas de miles de millones de dólares solo en la última década, por lo que es extremadamente importante determinar si Puerto Rico está experimentando cambios en su climatología de lluvias y si experimentará más de estos eventos extremos en un futuro cercano.

Cuando se trata de cambios en las tendencias de las precipitaciones en Puerto Rico, algunos estudios han detectado una tendencia a la sequía[386] durante la temporada lluviosa (mayo-noviembre). Otros estudios han encontrado tendencias crecientes en la cantidad de días lluviosos y un patrón decreciente en la cantidad de días secos para el área metropolitana de San Juan[387]. Trabajos recientes sobre sequías en el Caribe y Puerto Rico sugieren que más áreas están experimentando sequías severas[388] y que el cambio climático representó ~15-17 % de la severidad de la sequía y ~7 % de su distribución espacial medida[389].

Uno de los estudios más completos sobre las sequías en Puerto Rico encontró que el peor período de sequía fue en 1994, con el 35.08 % de la superficie en sequía extrema y el 60.97 % en condiciones moderada o severamente secas[390]. Aquella sequía disminuyó los niveles de los embalses y llevó a un racionamiento de agua que causó pérdidas agrícolas de $165 millones[391]. También durante el evento de 2015, toda la isla experimentó una sequía moderada o severa, lo que llevó a pérdidas de millones de dólares y a medidas de racionamiento de agua que duraron meses[392]. El estudio concluyó que Puerto Rico experimentó más períodos secos que lluviosos en la época del 1981-2018, siendo la región este la zona que experimentó más episodios de sequía (Ilustración 43).

386 Neelin, J. D., Münnich, M., Su, H., Meyerson, J. E., & Holloway, C. E. (2006). Tropical drying trends in global warming models and observations. Proceedings of the National Academy of Sciences, *103*(16), 6110-6115.

387 Méndez-Lázaro, P. A., Nieves-Santiago, A., & Miranda-Bermúdez, J. (2014). “Trends in total rainfall, heavy rain events, and number of dry days in San Juan, Puerto Rico, 1955-2009.” *Ecology and Society*, *19*(2).

388 Hernández Ayala, J. J., & Heslar, M. (2019).

389 Herrera, et al (2018).

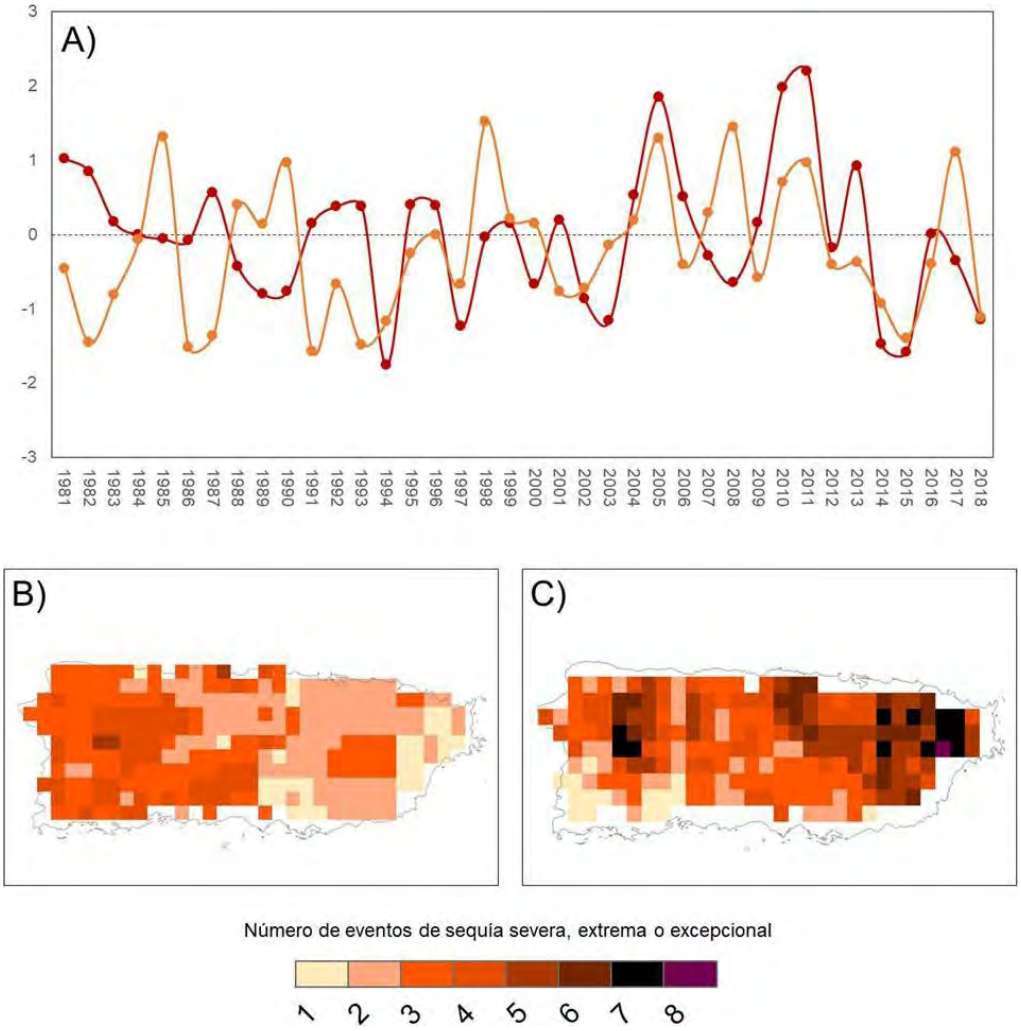
390 Hernández Ayala, J. J., & Heslar, M. (2019).

391 Larsen, M. C. (2000).

392 DRNA, 2016.

Ilustración 43.

Episodios de sequía analizados



Episodios de sequía examinados utilizando el Índice estándar de precipitación (SPI, por sus siglas en inglés) como método de clasificación de sequía para detectar períodos secos y húmedos (A) en los meses de mayo a julio (línea roja) y los meses de agosto a octubre (línea naranja). Número de eventos de sequía severa, extrema o excepcional para los meses de mayo a julio (B) y los meses de agosto a octubre (C).

De acuerdo con la investigación que se ha realizado sobre la variabilidad de la precipitación en Puerto Rico, está claro que no hay consenso sobre si la precipitación anual, estacional o diaria en general aumenta o disminuye. Algunos estudios sugieren que las precipitaciones sobre Puerto Rico aumentan durante los meses más secos[393]. Otros estudios sugieren que el área de Puerto Rico está experimentando una tendencia a la sequía que se exacerba por el cambio climático inducido por el hombre[394].

[393] Méndez-Lázaro, P. A., Nieves-Santiango, A., & Miranda-Bermúdez, J. (2014).

[394] Bhardwaj, A., Misra, V., Mishra, A., Wootten, A., Boyles, R., Bowden, J. H., & Terando, A. J. (2018). "Downscaling future climate change projections over Puerto Rico using a non-hydrostatic atmospheric model." *Climatic Change*, *147*, 133-147.

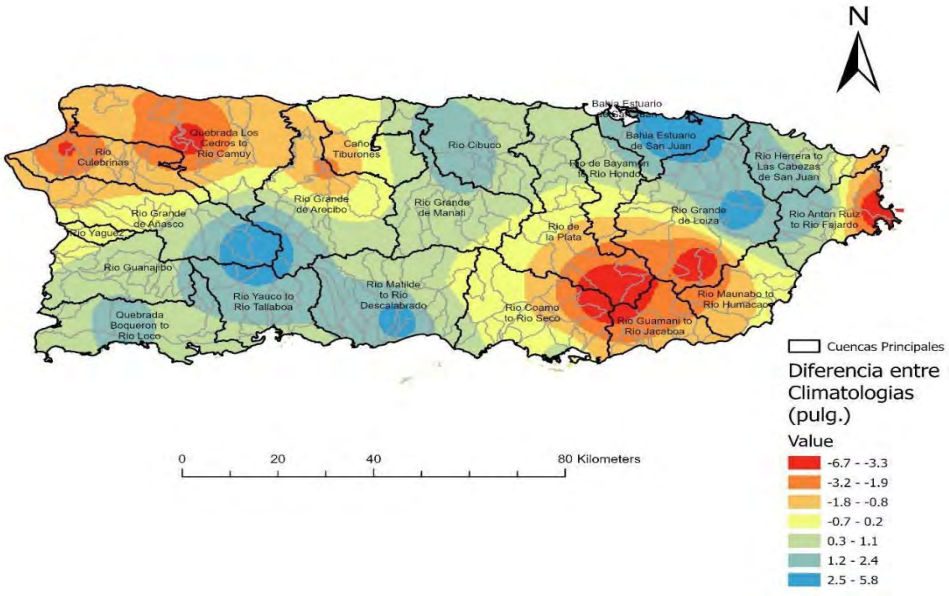
El análisis de tendencia de lluvia anual por temporada y diaria realizado por especialistas del CEACC –presentado en las secciones 3.2-3.4– concluyó que varias regiones de la isla (noroeste y sureste) experimentaron una reducción en la precipitación entre 1955 al 2022 y que otras zonas (centro-sur y noreste) experimentaron un aumento. Cuando examinamos la reducción en la lluvia total anual promedio por cuenca hidrográfica entre la climatología de la precipitación del 1955-1987 y la del 1988-2022, observamos que las cuencas donde hubo reducción (-6.7 a 1.8 pulgadas) son las ubicadas en el noroeste (ríos Culebrinas y Guajataca y las quebradas Los Cerros y Río Grande de Arecibo) y en el sureste (río Coamo, río Guamaní y río Maunabo).

Cabe destacar que las cuencas ubicadas en el centro-sur se encuentran en áreas en donde hubo un leve incremento en la precipitación total promedio anual (0.3-2.4 pulgadas). Áreas en el interior oeste y en el noroeste muestran un incremento en la lluvia anual promedio de 2.5 a 5.8 pulgadas. No está claro si estos cambios en la climatología de la precipitación son producto de la variabilidad natural del clima o producto del cambio climático ya que, como mencionado, la lluvia en Puerto Rico se debe a muchos factores. No obstante, cabe recalcar que la mayoría de los modelos climáticos proyectan una disminución en la lluvia para la región de Puerto Rico, por lo que algunas de estas tendencias podrían mantenerse o intensificarse.

Las cuencas hidrográficas del noroeste y sureste se identifican como las más comprometidas en cuestión de la precipitación, a base del análisis realizado por especialistas del CEACC (Ilustración 44). Tanto el análisis realizado por el CEACC y datos recientes del Monitor de Sequía federal identifican episodios de sequía severos en esas cuencas en los últimos diez años. Por lo tanto, el buen manejo del recurso hídrico de esas cuencas comprometidas debe ser prioridad para todas las agencias pertinentes (DRNA, AAA, AEE) y para las comunidades ubicadas en esas zonas más vulnerables a la sequía.

Ilustración 44.

Cambios en la climatología de la lluvia en Puerto Rico a nivel de cuencas hidrográficas



A medida que el cambio climático agrava los eventos climáticos extremos en Puerto Rico como las sequías, es esencial abordar la desigualdad en el acceso al agua y la falta de recursos para adaptarse y recuperarse de estos eventos. La justicia climática implica también abordar las causas subyacentes de la sequía, como la deforestación, la agricultura insostenible y la falta de acción climática efectiva. En última instancia, la justicia climática y la sequía están inextricablemente relacionadas y deben abordarse de manera integral para proteger a las comunidades más vulnerables y construir un futuro más justo y sostenible.

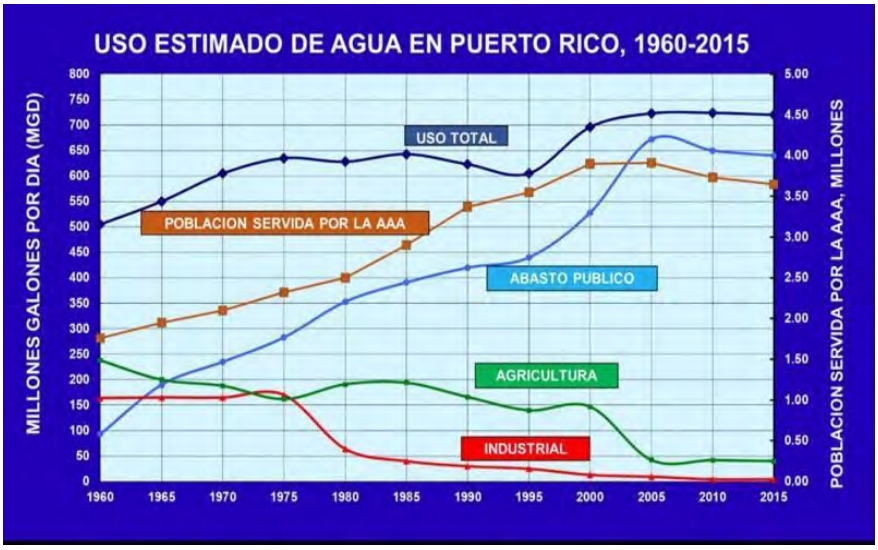
4.7.1.1. Uso del recurso agua (estatal y ciudadano)

La AAA es el principal consumidor de agua, con una extracción aproximada de 541 millones de galones diarios (mgd) provenientes de diversas fuentes como quebradas, ríos, embalses y acuíferos en el año 2021[395]. La AAA cuenta con 113 plantas de filtración que suministran agua potable al 97 % de los 3.3 millones de habitantes, a través de una red de tuberías que abarca más de 20,000 kilómetros.

La AAA administra también 51 plantas sanitarias que reciben alrededor de 207 mgd de aguas residuales provenientes de hogares, comercios e industrias pequeñas, que son descargadas en otros cuerpos de agua o directamente en el océano. La Agencia de Protección Ambiental (EPA) y el Departamento de Salud de Puerto Rico supervisan la operación de las plantas de filtración y de las plantas sanitarias de la AAA para garantizar el cumplimiento de las leyes federales relacionadas con la calidad del agua potable y las descargas sanitarias. Cuando observamos el uso estimado de agua por sector (Ilustración 45), vemos que el uso total aumentó a través de los años, pero el uso del recurso en el sector agrícola, el industrial y en la población servida mermó en las últimas décadas.

Ilustración 45.

Uso estimado de agua en Puerto Rico por sector (AAA)



[395] Información provista en el portal Recursos de Agua de Puerto Rico.

La AEE es responsable de operar una red de 18 embalses principales que cuentan con 20 plantas generadoras hidroeléctricas distribuidas en toda la isla, de las cuales 11 están en operación. La AEE administra los embalses en función de las necesidades de generación de energía del sistema. Ni el DRNA ni la AAA tienen la facultad de intervenir en la operación de esos embalses.

Además, la AEE es responsable de administrar todos los sistemas de riego, incluyendo la facultad legal de vender el excedente de agua que no se utiliza en los distritos de riego a usuarios que no necesariamente son agrícolas. La AAA es el principal usuario de los embalses propiedad de la AEE, de los que obtiene alrededor de 200 millones de galones de agua por día. El DRNA vuelve a ser el custodio del agua una vez que el recurso sale del embalse y vuelve al cauce del río.

Según la AAA, estudios llevados a cabo por la Oficina del Plan de Aguas del DRNA estimaron el consumo promedio per cápita de agua potable en 85 galones por persona por día (gp/d). A base de la población estimada en el Censo federal del 2010 (3.7 millones de habitantes), el consumo total se estima en 325 mgd, incluyendo el consumo en comercios e instalaciones públicas. Esto resulta en aproximadamente 350 mgd de agua "no-contabilizada". Teóricamente, si la AAA recuperara el 25 % del agua no-contabilizada (87.5 mgd), podría reducir significativamente sus inversiones en infraestructura nueva para producir agua potable.

En el informe más reciente completado en el 2021, la AAA realizó un análisis del agua no-contabilizada en sus sistemas de producción, almacenaje y distribución de agua potable. Los resultados se resumen en que la AAA factura solo el 33.53 % del agua que produce (reducción en facturación comparada con el 2020, cuando facturaba cerca del 34 %). La corporación pública estima sus pérdidas reales por filtraciones en el 57.7 % de su producción de 540.6 mgd, un aumento de 9 % en sus pérdidas comparado con el 48.7 % de la producción diaria de 647 mgd en el 2015.

En Puerto Rico, las áreas propensas a racionamiento de agua varían dependiendo de la época del año y las condiciones climáticas. Sin embargo, históricamente, las zonas más afectadas por el racionamiento de agua están en el sur y este, debido a la menor disponibilidad de agua y la alta demanda durante los meses secos.

En particular, las áreas en la región de Ponce y sus alrededores, así como en las áreas de Humacao y Yabucoa, han experimentado escasez de agua y racionamiento en el pasado. También se han reportado problemas en otras zonas como en Arecibo, Mayagüez y San Juan.

Es importante destacar que el racionamiento de agua en Puerto Rico se relaciona a menudo con la falta de infraestructura adecuada, la mala gestión del agua y la falta de inversión en el mantenimiento y mejora de la infraestructura existente. Por lo tanto, se necesitan esfuerzos a largo plazo para garantizar el acceso equitativo y sostenible al agua en toda la isla.

Por otra parte, existen numerosos sistemas de agua comunitarios que no están bajo la administración de la AAA. Estos sistemas suelen ser pequeños, operados por residen-

tes locales y a menudo no cumplen con los estándares de calidad del agua establecidos por la EPA.

Los sistemas comunitarios y de autoabastecimiento pueden proporcionar agua potable a las personas, aunque también presentan desafíos significativos. La falta de recursos y la capacitación adecuada para la gestión de esos sistemas puede llevar a problemas de calidad del agua y al incumplimiento de los estándares de la EPA. Además, la falta de regulación y supervisión de esos sistemas puede poner en riesgo la salud de los usuarios y la sostenibilidad a largo plazo de los recursos hídricos.

4.7.2. Aguas subterráneas

Puerto Rico cuenta con una gran cantidad de acuíferos que proveen agua potable a gran parte de la población. Estos acuíferos son formaciones geológicas de depósitos aluviales, roca caliza cárstica y roca ígnea saturadas de agua con un volumen y permeabilidad suficientes para sostener una extracción significativa del recurso. Los acuíferos de la zona sur se forman a partir de depósitos aluviales[396].

El acuífero del norte es el más extenso y provee agua a la mayoría de los municipios de la zona metropolitana. El acuífero del sur es el segundo en importancia y abastece a las regiones sur y oeste. El acuífero de la costa norte es el más vulnerable a la contaminación debido a su proximidad a zonas urbanas y agrícolas.

La sobreexplotación de los acuíferos es un problema en Puerto Rico, especialmente en la costa sur donde se encuentra el acuífero de Santa Isabel. El aumento en la demanda de agua ha provocado una disminución en los niveles freáticos, lo que ha dejado a los acuíferos más vulnerables a la intrusión salina y otros tipos de contaminación. La AAA ha tomado medidas para reducir la extracción de agua de los acuíferos y fomentar el uso eficiente del agua.

Asimismo, la calidad del agua subterránea es un problema importante debido a la contaminación causada por actividades humanas y eventos naturales. Algunas de las actividades humanas que han contribuido a contaminar los acuíferos son la agricultura, la industria, la minería y la eliminación inadecuada de residuos. Además, eventos naturales como huracanes y terremotos pueden causar daños en las infraestructuras de almacenamiento y distribución del agua potable. Esas amenazas pueden afectar la calidad del agua subterránea. Es importante implementar medidas para proteger y conservar los acuíferos, ya que son una fuente vital de agua potable para la población.

El balance de abastos de agua para Puerto Rico proviene de aproximadamente 600 pozos profundos dispersos en la isla (90 mgd, primordialmente en los valles aluviales costeros de las regiones norte y sur) y unos 80 mgd de tomas en quebradas y ríos.

396 Méndez Tejeda, Rafael; Richards, Ronald T.; and Emiliano Anastacio, “Analysis of Groundwater in Puerto Rico.” *American Journal of Water Resources,* vol. 4, no. 3 (2016): 68-76. doi: 10.12691/ajwr-4-3-3.

Según un informe del USGS[397], el agua subterránea se usa en Puerto Rico principalmente para riego en la agricultura, para consumo humano y en fábricas e industrias. Investigaciones del Servicio Geológico federal indican que en 1980 se usaban cerca de 246 mgd de agua subterránea. Se estima que el uso aumenta un promedio de cerca de 1.5 mgd por año.

Los acuíferos más extensos e intensamente desarrollados son el sistema acuífero de piedra caliza de la costa norte y el sistema acuífero de la planicie aluvial de la costa sur. Las extracciones de estos dos sistemas acuíferos constituyen casi el 70 % del total de agua subterránea extraída en Puerto Rico[398].

El sistema acuífero del norte abarca una extensión espacial de alrededor de 2,000 km2. Sin embargo, la mayor utilización de aguas subterráneas se concentra en un área de aproximadamente 800 km2 entre el Río Grande de Arecibo y el Río de la Plata. Esta zona es de gran interés debido a la creciente preocupación sobre el uso futuro de las aguas subterráneas como fuente principal de agua para consumo doméstico e industrial. En el 1985 se estimó una extracción de 280,000 metros cúbicos por día (m3/d) de agua subterránea, siendo esta la principal fuente de agua para industrias y suministros públicos. Esto representó el 100 % de la fuente de agua autoabastecida y alrededor del 85 % del suministro público de agua. No obstante, para el 2005, la extracción de agua subterránea se redujo a 150,000 m3/d.

En cuanto al sistema acuífero de la llanura aluvial de la costa sur, su extensión espacial es de alrededor de 470 kilómetros cuadrados (km2). La extracción consuntiva (relativa al consumo) estimada de agua subterránea de este sistema acuífero fue de 190,000 m3/d en 1980 y de 170,000 m3/d en el 2005. El suministro público de agua y el riego consumieron alrededor del 60 % y el 40 % de la extracción de agua subterránea, respectivamente.

En las islas de Vieques, Culebra y Mona, solo Vieques depende en gran medida de los acuíferos. Los acuíferos Resolución y Esperanza subyacen en un área de 16 km2 en Vieques. Antes del 1978, cuando se instaló una tubería de suministro de agua pública submarina que conecta a Vieques con la isla principal de Puerto Rico, la extracción de agua subterránea de ambos acuíferos era de hasta 2,500 m3/d. Sin embargo, para el 2005, las extracciones de agua subterránea en Vieques se estimaron en menos de 100 m3/d.

El cambio climático está teniendo un impacto significativo en las aguas subterráneas de todo el mundo, incluyendo Puerto Rico. Uno de los mayores efectos es la variación de la precipitación y la recarga de agua subterránea, ya que los patrones de lluvia están cambiando en todo el mundo debido al cambio climático. En Puerto Rico, las sequías más frecuentes y severas están reduciendo la recarga de agua subterránea, lo que afecta su disponibilidad y calidad.

---

397 Quiñones, P. F., & Alicea-Ortiz, J. (1985). “Agua subterránea en Puerto Rico”. *US GEOLOGICAL SURVEY OPEN-FILE REPORT*, 85, 642.

398 Gómez-Gómez, F., Rodríguez-Martínez, J., & Santiago, M. (2014). *Hydrogeology of Puerto Rico and the outlying islands of Vieques, Culebra, and Mona*. Washington, D.C., USA: U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey.

Además, el aumento del nivel del mar provoca una intrusión salina en los acuíferos costeros de Puerto Rico, en especial en el sur. Esto reduce la cantidad de agua dulce disponible. La intrusión salina puede afectar también la calidad del agua subterránea, lo que hace que sea más difícil y costoso tratarla para su uso.

Otro impacto del cambio climático en las aguas subterráneas es el aumento de las temperaturas del aire y del agua. Este aumento puede afectar la calidad del agua subterránea al aumentar la tasa de reacciones químicas y biológicas. El fenómeno puede provocar la liberación de sustancias químicas y contaminantes en el agua subterránea, haciéndola inadecuada para el consumo humano y animal.

4.7.2.1. Realimentación de los acuíferos

La recarga de los acuíferos es esencial para mantener un suministro sostenible de agua subterránea en Puerto Rico. La recarga de los acuíferos se refiere al proceso natural de recarga de agua dulce en el subsuelo, que se produce a través de la infiltración de la lluvia (y la nieve donde aplique) en el suelo. También puede producirse por la infiltración de agua en ríos, lagos y otros cuerpos de agua superficiales.

En Puerto Rico, la recarga de los acuíferos puede verse afectada por varios factores, como la cantidad de lluvia, la calidad del suelo y la topografía. Por ejemplo, los acuíferos aluviales en la zona sur reciben una cantidad significativa de agua de lluvia, mientras que los acuíferos cársticos en la zona norte dependen en gran medida del agua infiltrada desde las montañas.

Además, las prácticas humanas, como la extracción excesiva de agua subterránea y el desarrollo urbano, pueden reducir la recarga de los acuíferos. Por lo tanto, es importante tomar medidas para fomentar la recarga de los acuíferos, como promover la conservación de los suelos y las áreas naturales, y limitar la extracción excesiva de agua subterránea.

La recarga artificial de acuíferos es otra técnica que se puede utilizar para aumentar la cantidad de agua que se infiltra en el suelo y, por lo tanto, aumentar la recarga de los acuíferos. La técnica se puede lograr mediante la construcción de embalses, la infiltración de agua tratada o la recarga de pozos específicos. La recarga artificial de acuíferos es una herramienta importante en la gestión del agua y puede ayudar a mantener un suministro sostenible de agua subterránea en el futuro.

El desarrollo potencial de recursos de agua subterránea relativamente sin explotar se limita al valle del Río Grande de Añasco y al valle del río Culebrinas en la parte occidental y a la parte del Río Grande de Arecibo del sistema acuífero de piedra caliza de la costa norte. En general, los sistemas acuíferos del norte y del sur muestran evidencia de sobreexplotación, según lo indican los aumentos regionales en las concentraciones de sólidos disueltos.

Optimizar las extracciones mediante el uso conjunto de fuentes de aguas superficiales y subterráneas y mediante medidas de conservación del agua tiene el mayor potencial para garantizar el uso continuo de los recursos de aguas subterráneas. Para apoyar estos esfuerzos, podrían implementarse programas para mejorar la información de la base

de datos con respecto a las extracciones de agua subterránea y la contribución de las desviaciones de agua superficial al flujo de agua superficial, especialmente dentro de la planicie costera del sur de Puerto Rico.

En el 2015, la orden ejecutiva 2015-011[399] llevó a la formación de un comité interagencial para abordar la crisis del agua y proteger los acuíferos en la región sur. Encabezado por el DRNA, el comité discutió varias alternativas, incluidas reducir el suministro de agua a usuarios agrícolas para abastecer una nueva planta de filtración de agua, construir un nuevo acueducto para transportar agua desde una zona distante y desalinizar. Después de considerarlas, el comité decidió que ninguna de las opciones sería adecuada para Salinas, ya que todas eran costosas y las dos primeras reducirían el suministro de agua disponible para otros usuarios.

No obstante, se consideró factible otro plan para desviar el agua de otros lugares y almacenarla en el acuífero, una estrategia llamada almacenamiento y recuperación del acuífero. La estrategia funciona al recolectar parte del agua del cercano embalse de Patillas que normalmente se derrama en el mar. Un sistema de canales transportaría el agua al área de Salinas, donde se usaría para recargar y restaurar el acuífero. Los análisis mostraron que el almacenamiento y la recuperación de acuíferos serían mucho menos costosos que las otras alternativas que consideraron. La estrategia podría mejorar también la disponibilidad de agua para la agricultura y otros usuarios, además de mantener el suministro municipal existente. Un informe interagencial federal con fecha de octubre de 2019, indica que el gobierno de Puerto Rico proveería $714,053 y que FEMA desembolsó $2.1 millones para el proyecto en agosto del 2017[400].

4.7.2.2. *Intrusión salina en los acuíferos*

Uno de los problemas principales que afectan los acuíferos costeros de Puerto Rico es la intrusión de agua salina debido al aumento del nivel del mar asociado al cambio climático. La intrusión salina en los acuíferos es un problema ambiental que se produce cuando el agua salada se infiltra y contamina los acuíferos de agua dulce. Esto puede ocurrir debido a una variedad de factores, como la sobreexplotación de los acuíferos, el aumento del nivel del mar por el cambio climático, la construcción de represas y embalses que alteran el flujo de agua, entre otros.

A medida que el nivel del mar aumenta, el agua salada puede avanzar tierra adentro a lo largo de los acuíferos costeros, contaminándolos. Asimismo, el aumento del nivel del mar puede aumentar la presión hidrostática en los acuíferos costeros, lo que puede empujar el agua salada más profundamente en el acuífero y hacer que la intrusión salina sea más difícil de controlar.

Cuando la intrusión salina ocurre, puede tener graves consecuencias para las comunidades que dependen de los acuíferos para el suministro de agua potable y la agricultura. El agua salada es inapropiada para el consumo humano y puede ser perjudicial para los cultivos. La intrusión salina es un problema importante en Puerto Rico debido a su ubi-

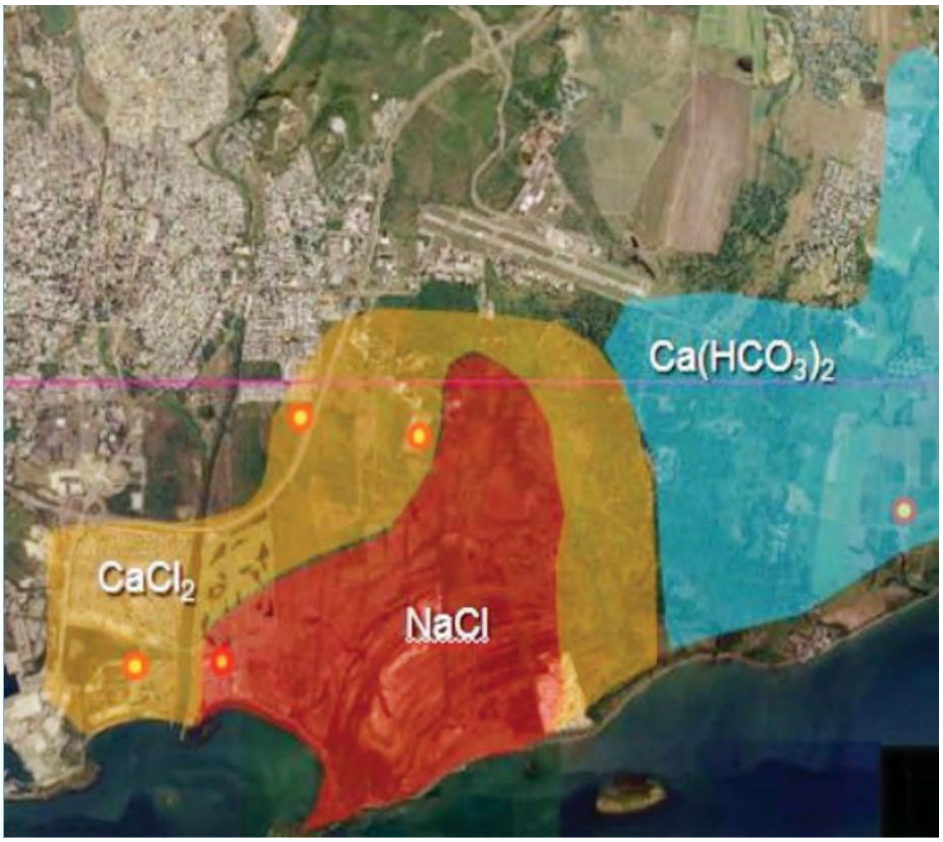
[399] Véase la OE-2015-011.
[400] Véase *Aquifer Storage and Recovery: A Strategy for Long-Term Water Security in Puerto Rico*.

cación en el mar Caribe y la dependencia de la isla de los acuíferos subterráneos para el suministro de agua dulce.

Un informe del DRNA[401] indica que, en sectores del sur, el agua salada se ha estado desplazando hacia tierra adentro debido a la extracción de pozos por parte de las comunidades locales y la AAA (Ilustración 46). El acuífero de Santa Isabel es el que presenta el mayor problema de contaminación entre los acuíferos del sur. Este acuífero experimenta una sobreexplotación aguda debido a que toda su población, junto con el 70 % de la población de Coamo, depende de él para abastecerse de agua. Como resultado de esta sobreexplotación, los niveles freáticos han disminuido hasta 14 pies por debajo del nivel del mar en algunos sectores, según datos del USGS publicados en el 2008. Esta disminución en los niveles freáticos hace que el acuífero sea especialmente vulnerable a la intrusión salina.

Ilustración 46.

Mapa de la condición hidroquímica en el acuífero del área de Ponce, 2012. Los puntos rojos representan los pozos analizados por el USGS



Fuente: Rodríguez & Gómez, 2009.

[401] DRNA. (2014). Informe técnico para la declaración de área crítica – Acuíferos del sur.

Entre otras medidas, las agencias de gobierno han llevado a cabo proyectos de desalinización y tratamiento de agua salada para reducir la dependencia de los acuíferos subterráneos y mitigar los efectos de la intrusión salina. Sin embargo, la intrusión salina sigue siendo un problema importante y se necesitan esfuerzos continuos para proteger y gestionar adecuadamente los recursos hídricos subterráneos de la isla.

Para prevenir la intrusión salina, se pueden tomar medidas como limitar la extracción de agua subterránea en áreas vulnerables, mejorar la gestión del agua y aumentar la eficiencia en su uso. Además, se puede considerar construir estructuras de protección costera para evitar el avance del agua salada hacia los acuíferos. También es importante monitorear regularmente la calidad del agua en los acuíferos para detectar la intrusión salina temprano y tomar medidas para limitar su impacto.

4.7.3. Aguas superficiales y escorrentías

En Puerto Rico se observa un aumento en la escorrentía de agua debido a diversos factores, como la urbanización y la deforestación, que han alterado los patrones naturales de drenaje del agua. La urbanización ha aumentado la cantidad de superficies impermeables, como calles y edificios. Con ello disminuye la capacidad del suelo para absorber y retener agua. La deforestación elimina la vegetación que ayuda a absorber el agua y mantenerla en el suelo. Como resultado, una mayor cantidad de agua fluye rápidamente sobre la superficie del suelo y llega a los cuerpos de agua, lo que provoca inundaciones y erosión del suelo.

Además, el alza en la frecuencia e intensidad de los eventos de lluvia extrema como resultado del cambio climático aumenta la cantidad de escorrentía. Los cambios en las escorrentías tienen un impacto significativo en la disponibilidad y calidad del agua, ya que pueden disminuir la recarga de los acuíferos y aumentar la contaminación del agua debido a la escorrentía de productos químicos y otros contaminantes.

Por otro lado, Puerto Rico es propensa a experimentar inundaciones extremas que podrían agravarse por los impactos del cambio climático en la región. Algunas de las zonas en más riesgo de estos eventos son:

- La costa norte es particularmente vulnerable a inundaciones durante la temporada de huracanes, en especial las áreas cercanas a ríos y arroyos.
- La costa sur, especialmente en áreas cercanas a las pendientes inclinadas de la cordillera central, la costa y los ríos.
- Las zonas bajas del área metropolitana de San Juan por la alta densidad poblacional y el sistema de drenaje limitado por la gran extensión de sus superficies urbanas.
- El Valle de Caguas, debido a la topografía de la región y a la cantidad de ríos y arroyos que la atraviesan.
- Las áreas montañosas del centro.

Los cambios en frecuencia y distribución espacial de la precipitación afectan también las aguas superficiales y escorrentías. Uno de los impactos más preocupantes del cambio climático es que las fuertes escorrentías ocasionen inundaciones severas. Mucha de la literatura científica analiza los eventos extremos de precipitación causantes de reacciones hidrológicas que pueden provocar inundaciones severas. Con las proyecciones de más eventos de lluvia extrema por el cambio climático, también podemos anticipar que la probabilidad de que estos causen inundaciones en el futuro es muy alta.

Muchas de las mediciones máximas récord de descarga de ríos y escorrentías en Puerto Rico se asociaron con ciclones tropicales, como el huracán Donna en septiembre de 1960[402], el huracán Hortense en septiembre de 1996[403] y el huracán Georges en septiembre de 1998[404]. Las inundaciones extremas asociadas con estos ciclones provocaron efectos devastadores que se tradujeron en pérdidas multimillonarias. La tormenta tropical Eloise (1975) dejó más de 19.7 pulgadas (500 mm) sobre algunas áreas en la región central con inundaciones repentinas que causaron 34 muertos y pérdidas de $458 millones. Las inundaciones causadas por el huracán Georges provocaron pérdidas por más de $2,000 millones. Asimismo, el huracán David (1979) provocó siete muertes y pérdidas por $200 millones. El huracán Hortense causó 18 muertos y daños por $128 millones.

En las últimas décadas, algunas estaciones que miden flujo de agua en los ríos registraron un aumento en el número de eventos extremos de descarga (Ilustración 47A). La última década marcó el promedio más alto (Ilustración 47B). Estudios recientes encontraron que, aunque el huracán María provocó una respuesta hidrometeorológica más extrema, algunas de las características hidrometeorológicas del huracán Fiona estuvieron entre las más altas jamás registradas en Puerto Rico, particularmente para las partes centro-sur y este. A su vez, mostró el nivel actual de vulnerabilidad de la isla a lluvias extremas e inundaciones.

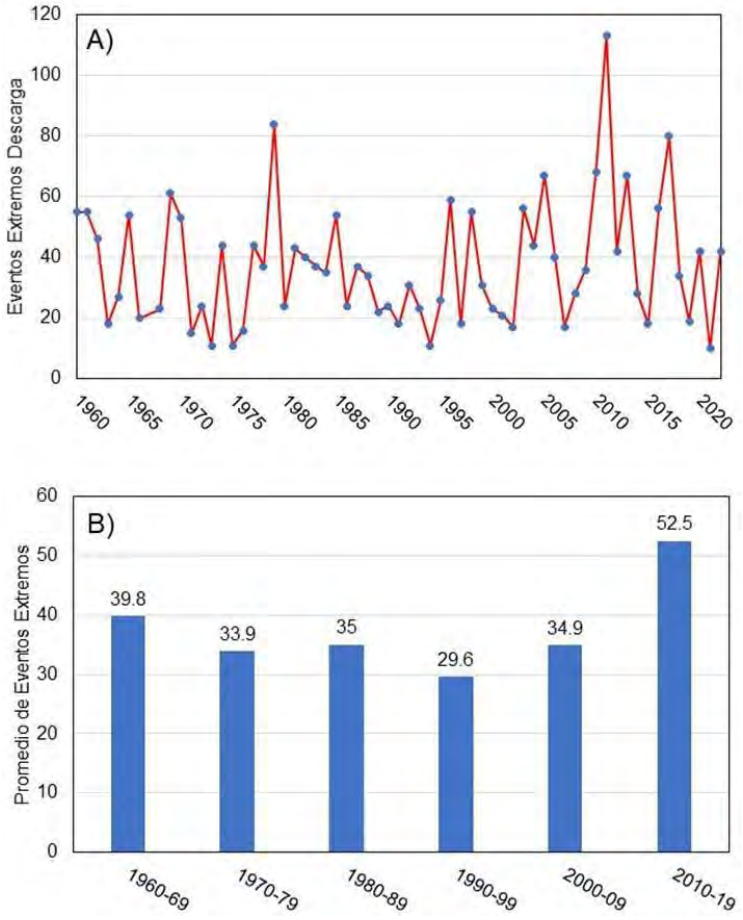
[402] Barnes, H.H. and Bogart, D.B., 1961. “Floods of September 6, 1960,” in Eastern Puerto Rico. Vol. 451. *US Government Printing Office*.

[403] Torres-Sierra, H., 1997. “Hurricane Hortense: impact on surface water in Puerto Rico,” (No. 014-97). *U.S. Geological Survey*. [Google Scholar]

[404] Larsen, M.C. and Román, A.S., 2001. “Mass wasting and sediment storage in a small montane watershed: an extreme case of anthropogenic disturbance in the humid tropics.” In: J.M. Dorava, D.R. Montgomery, B.B. Palcsak and F.A. Fitzpatrick, eds. *Geomorphic Processes and Riverine Habitat*. Washington, D.C.: *American Geophysical Union*, 119–138. Doi: https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/WS004p0119

Ilustración 47.

Descarga de río en o por encima del 90 percentil (a) y promedio de eventos de inundaciones extremas por década (b) para la estación hidrológica del Río Grande de Loíza en Caguas



4.7.4. Manejo de los embalses y tomas de agua

Los embalses son fuente importante de agua para el consumo humano, la irrigación y la generación de energía hidroeléctrica. Estos experimentaron también cambios significativos en los últimos años debido a factores como el cambio climático y la urbanización.

Uno de los cambios más evidentes es el aumento de la sedimentación, lo que reduce su capacidad de almacenamiento y afecta la calidad del agua. El cambio puede deberse a la erosión del suelo causada por la deforestación, la construcción de carreteras y otras actividades humanas. Además, el aumento de las lluvias extremas asociadas al cambio climático puede intensificar la erosión del suelo y, por lo tanto, la sedimentación en los embalses.

Otro cambio importante es la disminución en la disponibilidad de agua en algunos embalses debido a la disminución de las lluvias en las últimas décadas. El cambio climá-

tico ha provocado una mayor variabilidad en los patrones de lluvia en la región, con períodos más largos de sequía seguidos de lluvias torrenciales. La alteración lleva a una disminución en la recarga de los embalses y, por lo tanto, reduce su capacidad de almacenamiento.

Por último, el cambio climático aumenta también la temperatura del agua en algunos embalses, lo que puede afectar la calidad del agua y en los ecosistemas acuáticos. Las altas temperaturas pueden aumentar el crecimiento de algas y otros organismos, con lo que disminuye la cantidad de oxígeno en el agua y se afecta la vida acuática. Además, puede favorecer el crecimiento de bacterias y otros microorganismos patógenos potencialmente peligrosos para la salud humana.

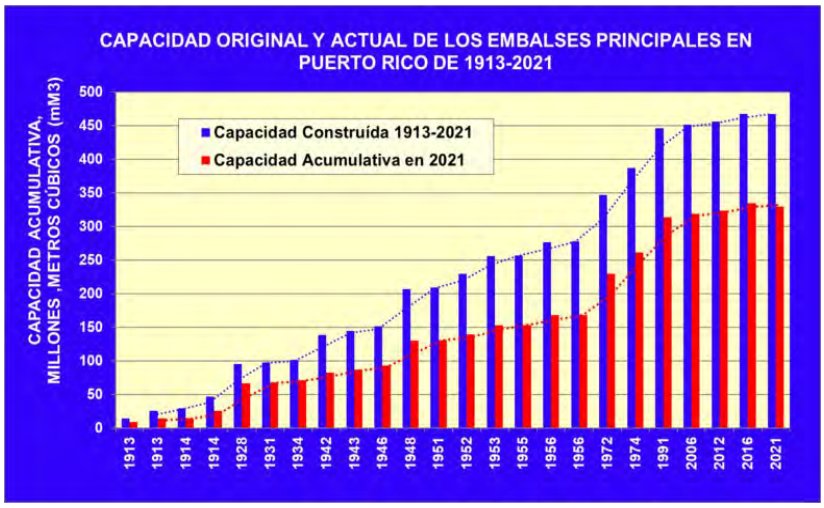
Los embalses representan la fuente principal de agua para las plantas de filtración de la AAA. Proporcionan alrededor del 67 % del total de agua extraída en el 2014, principalmente de embalses propiedad de la AEE. Actualmente existen 36 embalses, tanto en el cauce fluvial como fuera de él en la región este, que contribuyen con el 68 % de toda el agua que la AAA purifica y distribuye para abastecer al 97 % de la población. Además, los embalses son la fuente principal de suministro de agua para el riego agrícola en los distritos de riego del noroeste, sureste y suroeste. Un 1.7 % de la electricidad que la AEE genera proviene de unidades hidroeléctricas ubicadas en las represas de estos embalses, y son también centros con áreas recreativas y de pesca deportiva.

Entre 1914 y 1952 se llevó a cabo el primer período de desarrollo de los embalses en Puerto Rico por la Autoridad de las Fuentes Fluviales (actualmente la AEE) y el *U.S. Bureau of Reclamation* (BuRec), agencia federal del Departamento del Interior. El segundo período, de 1952 a 1974, incluye embalses desarrollados por agencias estatales en colaboración con varias agencias federales, como el BuRec y el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de Estados Unidos (USACE). En 1991 se completó el embalse Cerrillos, cerca de Ponce, con la colaboración del USACE y del DRNA. Los embalses Fajardo y Río Blanco (Naguabo) se completaron en 2004 y 2009, respectivamente, por la AAA. El embalse Portugués es el más reciente, construido por el DRNA con asistencia financiera y técnica de la USACE en 2014.

La AAA informa que el volumen original de los embalses en Puerto Rico suma 456.6 millones de metros cúbicos (equivalente a 370,000 acres-pies), mientras que la capacidad actual es de aproximadamente 339.4 millones de metros cúbicos (unos 275.1 acres-pies) (Ilustración 48). Los datos indican que el porcentaje de capacidad perdida en los embalses debido a la sedimentación es de alrededor del 25.5 % de la capacidad construida. Los embalses Carraízo (Trujillo Alto), Dos Bocas (Utuado) y Lucchetti (Yauco) han perdido más capacidad debido a la acumulación de sedimentos, y suministran el 30 % del agua que la AAA potabiliza. Actualmente, no existe un programa organizado para prevenir la sedimentación de los embalses. Dragar los embalses principales más sedimentados (Loíza, Dos Bocas, Lucchetti y Guayabal) costaría cerca de $1.6 mil millones, una cantidad que ninguna de las entidades dueñas (AEE, DRNA y AAA) puede financiar.

Ilustración 48.

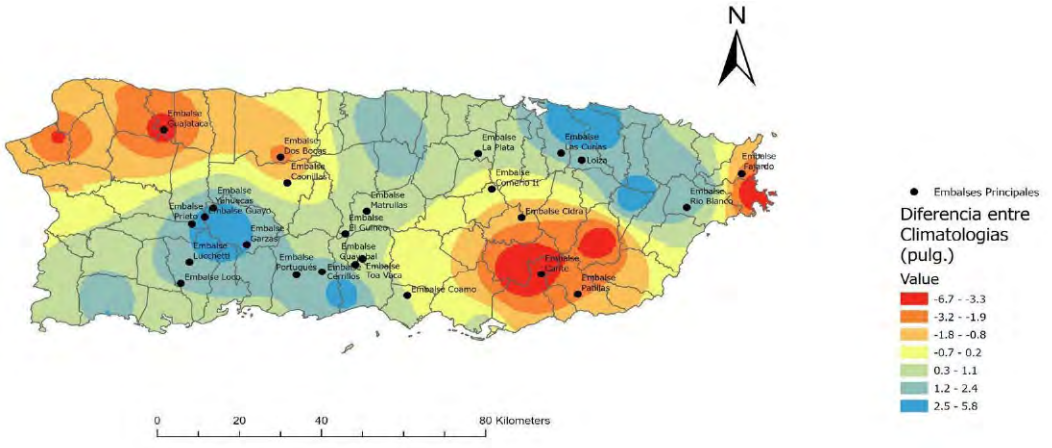
Capacidad original y actual de los embalses principales (Recursos de agua de Puerto Rico)



A base del análisis de tendencias de lluvia realizado por especialistas del CEACC (véase la sección 3.4 del P-MARCC), se identificaron varios embalses cuyos niveles podrían disminuir en los próximos años debido a las tendencias históricas de lluvia anual-mensual y las proyecciones de sequía que se esperan en la región. Cuando se examinan los cambios en la climatología de la lluvia anual para Puerto Rico, se observa que ocho embalses principales se encuentran en áreas que han experimentado una disminución en la cantidad de lluvia total promedio. Estos son los embalses de Guajataca, Dos Bocas, Caonillas, Comerío, Cidra, Carite, Patillas y Fajardo (Ilustración 49). Esos embalses suplen una cantidad significativa de agua potable a la AAA, por lo que una disminución en sus niveles podría ocasionar serios problemas de acceso al recurso.

Ilustración 49.

Los principales embalses de Puerto Rico y las diferencias de precipitación anual total promedio entre las climatologías de 1956-1987 y 1988-2022



Por otro lado, varios embalses están en zonas que han experimentado un aumento en la lluvia total anual en la última climatología (1988-2022). La mayoría de estos se encuentra en la región centro-oeste y sur. Es importante destacar que todas las proyecciones de precipitación para la región donde se encuentra Puerto Rico son de una disminución continua en la lluvia hasta finales de siglo. Así que, aunque la última climatología nos muestra que varios embalses estuvieron en áreas donde hubo un aumento general de lluvia anual total promedio, eso no significa que la tendencia se mantendrá así. Ahora, otro de los impactos del cambio climático es que se proyecta un aumento en la frecuencia de eventos extremos de lluvia que podrían ocasionar problemas serios de acumulación y eventual desbordamiento de agua en las represas impactadas.

En varias represas han ocurrido desbordamientos y en varios casos se han tenido que abrir las compuertas para deshacerse de la gran cantidad de agua acumulada, ocasionando inundaciones extremas en comunidades aledañas. Algunas de las represas más importantes identificadas como propensas a desbordarse en caso de eventos extremos de lluvia son Carraízo, Portugués, La Plata, Guajataca y Dos Bocas.

Durante el paso del huracán María (2017), el nivel de agua en la represa Carraízo subió significativamente y se temió que pudiera desbordarse. En el 1985, el agua en la represa Portugués se desbordó, lo que resultó en la muerte de varias personas y daños significativos en la infraestructura. También en la represa La Plata hubo desbordamientos durante eventos extremos que ocasionaron inundaciones en comunidades cercanas. Durante el embate del huracán María, desbordamientos en las represas Guajataca y Dos Bocas causaron inundaciones y daños significativos en la infraestructura.

Es muy probable que muchos de los embalses –en especial los del noroeste y sureste– enfrenten retos en su capacidad de mantener niveles de seguridad en los próximos años debido a la reducción de precipitación asociada al cambio climático. Por tal razón, es imprescindible promover e implementar prácticas de buen manejo de embalses de agua. En la sección 7.7 presentamos una serie de estrategias con ese fin.

4.7.5. Pérdida de agua

Entre los factores que amenazan la disponibilidad del agua está la pérdida del recurso en el sistema de distribución de la AAA, que admite perder alrededor del 60 % del agua que produce. La misma cantidad de agua se pierde también en los canales de riego de la AEE. A ello se suma la situación precaria de los acuíferos. El DRNA declaró el acuífero del sur en “estado crítico”. A pesar de que la agencia prohibió la construcción de nuevos pozos y ha limitado el aumento del agua que se extrae de los pozos existentes en un esfuerzo por proteger el acuífero en Salinas, las medidas han sido insuficientes y hubo que establecer una prohibición de construcción.

Por otro lado, las lluvias torrenciales aumentan vertiginosamente los niveles de turbiedad, al punto que saturan las plantas potabilizadoras de la AAA. La ocurrencia de lluvias extremas aumenta la erosión en las cuencas hidrográficas, colmatando (rellenando con) sedimentos a nuestros embalses principales y disminuyendo la capacidad de almacenaje de agua. La destrucción de los millones de árboles por el huracán María agrava la acumulación de sedimentos y niveles de turbiedad. La situación fuerza a la AAA a suspender

el servicio de agua hasta que bajen los niveles de turbiedad. Las cuencas hidrográficas de mayor erosión son aquellas que experimentan un alto índice de precipitaciones y que tienen una topografía muy inclinada.

Algunas de las cuencas hidrográficas con mayor erosión son: las cuencas del Río Grande de Loíza y del río Espíritu Santo, en el noreste; cuencas de los ríos Guayanés y Cibuco, la parte central-norte; cuencas del Río Grande de Manatí y del río Arecibo, en el norte; y las cuencas del río Guayanilla y del río Portugués, en el sur.

Estas cuencas hidrográficas son especialmente vulnerables a la erosión del suelo y la sedimentación en los embalses debido a la alta cantidad de sedimentos y materiales arrastrada por los ríos durante las lluvias intensas. Por lo tanto, es importante implementar prácticas de conservación de suelos y manejo de cuencas para reducir la erosión y la sedimentación en los embalses y mejorar la calidad del agua.

Además, el gran volumen de agua de escorrentía provocado por las grandes superficies de terreno impermeabilizadas por construcciones, como centros comerciales y urbanizaciones, causan la colmatación de los embalses y la pérdida de la capacidad del sistema de drenaje pluvial para funcionar adecuadamente. En el caso de la agricultura, las precipitaciones extremas pueden provocar una mayor erosión del terreno y la pérdida de la valiosa capa superior del suelo, lo que afecta tanto a la agricultura como a la ganadería. En resumen, son múltiples los factores que afectan la disponibilidad del recurso hídrico en Puerto Rico.

4.7.6. Alteración del ciclo hidrológico por el cambio climático

El cambio climático está alterando el ciclo hidrológico en Puerto Rico de diversas maneras. En primer lugar, el aumento de la temperatura del aire intensifica la evapotranspiración. Esto significa que la tierra pierde agua más rápidamente, ya que el calor provoca que las plantas liberen agua de sus hojas y el suelo se evapore con mayor rapidez. Como resultado, la disponibilidad de agua en el suelo disminuye y se reduce la cantidad de agua que llega a los ríos y arroyos.

Por otro lado, el cambio climático hace que las lluvias sean más intensas e irregulares desencadenando una serie de efectos adversos en torno al recurso agua que hemos abordado en esta sección.

Además, el aumento de temperatura asociado al cambio climático incrementa la cantidad de agua que los humanos ingerimos para hidratarnos. Las temperaturas más altas aumentarán la demanda de agua para los sistemas de enfriamiento de hospitales, centros comerciales, edificios de oficinas y hoteles. Otro impacto del cambio climático es que podría aumentar el consumo de agua en las centrales generatrices de la AEE debido a que tienen que producir más electricidad para suplir el aumento de demanda por el uso de abanicos y acondicionadores de aire.

En cuestión de seguridad alimentaria, en el Trópico se requerirá un aumento de 20 % en el riego agrícola para mantener el mismo nivel de productividad de los cultivos, de acuerdo con la Oficina de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación

y la Agricultura. Por lo tanto, una disminución en la cantidad o calidad del agua tendrá fuertes implicaciones para el sector agrícola de la isla.

En la sección 7.7 presentamos los cursos de acción para la mitigación, adaptación y resiliencia necesarios para proteger el recurso agua.

4.8. Sistemas marinos y zonas costeras

La zona costera se conoce como la franja de transición entre tierra y mar, que está compuesta de diversas formaciones y ecosistemas tales como playas, dunas, humedales costeros como los mangles, arrecifes de coral, praderas de hierbas (o yerbas) marinas, estuarios, depósitos de arena, bosques costeros, islotes y cayos, entre otros.[405] La Zona Costanera (ZC) en su definición legal es la franja de terreno costanero y las aguas adyacentes a Puerto Rico y de las islas dentro de su jurisdicción, delimitada por el Departamento de Recursos Naturales y Ambientales (DRNA) y aprobada por la Junta de Planificación (JP) y por el gobernador de Puerto Rico. Se extiende 1,000 metros lineales tierra adentro desde la línea de costa y, además, distancias adicionales, hasta donde sea necesario para asegurar que se incluyan los sistemas naturales claves de la costa, así como las aguas y el suelo oceánico o marítimo que se extiende 3 leguas marinas (10.35 millas terrestres) aguas adentro[406]. Dentro de la ZC se incluye la Zona Marítimo Terrestre (ZMT) y una diversidad de componentes naturales que hacen de esta franja costera una de gran riqueza ecológica. Estudios previos realizados por la academia, el gobierno federal y el gobierno local reconocen que los componentes naturales de la ZC tienen un rol importante como ecosistemas[407] [408], hábitat[409] [410], barreras protectoras[411] [412]

[405] Short, A. D. (2012) "Coastal Processes and Beaches." *Nature Education Knowledge* 3(10):15.

[406] DRNA. (2017). Conociendo el ecosistema del humedal. Retrieved February 18, 2023, from https://www.drna.pr.gov/wp-content/uploads/2017/04/GuiaEducativa_ConociendoElHumedal.pdf.

[407] Murry, B.A. (2019) "Wetland Conservation Requires Transition toward Landscape-Scale Interdisciplinary Approaches." *Wetlands*, 39, 1249-254. https://doi.org/10.1007/s13157-019-01237-9.

[408] National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). "Coral Reef Ecosystems." 2019. Retrieved February 18, 2023, from https://www.noaa.gov/education/resource-collections/marine-life-education-resources/coral-reef-ecosystems.

[409] Appeldoorn, R.S.; Bouwmeester, B.L.K. (2022) "Ontogenetic Migration of Juvenile Grunts (Haemulon) across a Coral Reef Seascape: Pathways and Potential Mechanisms." *Diversity*, 14, 168. https://doi.org/10.3390/d14030168.

[410] Griffin, L. P., Brownscombe, J. W., Gagné, T. O., Haak, C. R., Cormier, R., Becker, S. L., Cooke, S. J., Finn, J. T., and Danylchuk, A. J. (2023). "There's no place like home: High site fidelity and small home range of bonefish (Albula Vulpes) inhabiting fringing reef flats in Culebra, Puerto Rico." *Environmental Biology of Fishes*, *106*(2), 433-447. https://doi.org/10.1007/s10641-022-01312-x.

[411] Storlazzi, C.D., Reguero, B.G., Cumming, K.A., Cole, A.D., Shope, J.B., Gaido L., C., Viehman, T.S., Nickel, B.A., and Beck, M.W. (2021) Rigorously valuing the coastal hazard risks reduction provided by potential coral reef restoration in Florida and Puerto Rico: *U.S. Geological Survey Open-File Report* 2021–1054, 35 p., https://doi.org/10.3133/ofr20211054.

[412] Cumming, K.A., Cole, A.D., Storlazzi, C.D., Reguero, B.G., Shope, J.B., Gaido L., C., Viehman, T.S., Nickel, B.A., and Beck, M.W., 2021, Projected flooding extents and depths based on 10-, 50-, 100-, and 500-year wave-energy return periods for the State of Florida, the Commonwealth of Puerto Rico, and the Territory of the U.S. Virgin Islands for current and potentially restored coral reefs: *U.S. Geological Survey Data Release*, https://doi.org/10.5066/P9ZQKZR9.

[413] y fuentes de desarrollo económico y social[414] [415]. Conocer el estado de estos recursos costeros permitirá identificar cómo estos servicios tan importantes podrían ser afectados y las implicaciones que tendría la pérdida de estos, especialmente ante el escenario de cambio climático. Entre las implicaciones, es de vital urgencia entender cómo la pérdida de los servicios de estos recursos costeros puede aumentar la exposición y vulnerabilidad de las poblaciones, especialmente de aquellos grupos de alta vulnerabilidad social, para enfrentar nuevos eventos.

Son varios los componentes marinos y costeros identificados a lo largo de los aproximados 1,187 kms (kilómetros) de línea de costa y aguas de Puerto Rico, incluyendo las islas municipios de Vieques y Culebra, y sus islotes. Entre los componentes naturales están: las playas, dunas, eolianitas, rocas de playas (*beachrocks*), costas rocosas acantiladas, (*coastal blufs*), formaciones cársicas costeras, costas rocosas, manglares, praderas de hierbas marinas, algas calcáreas, arrecifes de coral, salitral, ciénaga de agua salada, marismas, bahías bioluminiscentes, lagunas costeras, desembocaduras de ríos, estuarios y caños. Los componentes marinos y costeros son diversos, con funciones y servicios únicos de gran importancia. Entre estos, el arrecife de coral se considera uno de los componentes marinos y costeros más afectados por el cambio climático.

Hay que subrayar que existe una importante conexión geográfica-física entre los componentes marinos y costeros con la cuenca hidrográfica, especialmente a escala isleña. Por consiguiente, la mayoría de los procesos que ocurren a nivel de cuenca hidrográfica asociados a actividades naturales o antropogénicas puede incidir en la calidad y distribución de los componentes marinos y costeros. Por ejemplo, es conocido que los cambios en el uso de terrenos y sus efectos en la calidad del agua inciden en la salud de los componentes marinos y costeros, haciéndolos más vulnerables a los efectos del cambio climático. Por lo tanto, el manejo integrado de las cuencas hidrográficas debe ser prioridad como estrategia de planificación para la protección de estos sistemas.[416] [417]

---

[413] Beck, M.W., and Lange, G.M., eds. (2016) Guidelines for coastal and marine ecosystem accounting—Incorporating the protective service values of coral reefs and mangroves in national wealth accounts: *World Bank*, Washington, D.C., 14p.

[414] Leeworthy, V.R., Conant, P. and Schwarzmann, D. (2018). Non-market Economic Value by Reef Using Visitors for Recreation on Puerto Rico's Coral Reef Ecosystems, An Attributes Approach: Policy/ Management Scenarios. Silver Spring, MD: Office of National Marine Sanctuaries. National Oceanic and Atmospheric Administration, April 2018.

[415] The Nature Conservancy (TNC), Caribbean Division. (2020). From mountains of green to miles of blue this Caribbean treasure needs protecting. Caribbean Puerto Rico Fact Sheet. Retrieved February 23, 2023, from https://www.nature.org/content/dam/tnc/nature/en/documents/Caribbean-Puerto-Rico-Fact-Sheet.pdf.

[416] Programa del Estuario de la Bahía de San Juan (PEBSJ). (2022, April 13). Simposio de Cuencas hidrográficas de Puerto Rico 2022. Retrieved April 6, 2023, from https://estuario.org/schpr2022/.

[417] NCCARF - National Climate Change Adaptation Research Facility. (2016) NCCARF and Coast Adapt Archive Library. (n.d.).

4.8.1. Deterioro de ecosistemas marinos y costeros: arrecifes de coral, hierbas marinas y humedales

El deterioro de los ecosistemas marinos y costeros representa un reto que urge atender ante el escenario del cambio climático por el importante servicio que estos ofrecen como hábitat, ecosistema y barrera natural, entre otros. A continuación, se incluye una descripción de la situación de los arrecifes, hierbas marinas y humedales en la isla.

4.8.1.1 Arrecifes de coral

Puerto Rico está rodeado de aproximadamente 5,000 km^2 de ecosistemas de arrecifes de coral poco profundos[418]. Estos protegen las aguas del interior y las costas. Ofrecen servicios como barrera costera, hábitat de especies, fuente de alimentos y nuevos medicamentos[419], y fuente de empleos y recreación[420]. El valor económico neto de los arrecifes a nivel mundial se estima en decenas de miles de millones de dólares por año[421].

Como barrera costera, atenúan las olas, protegiendo vidas y propiedades, incluyendo a la infraestructura crítica[422].

Según el informe *El estado de los arrecifes de coral en Puerto Rico*, entre 2014-2017 (antes de los huracanes del 2017) la condición de los arrecifes de coral de la isla se clasificó como "regular" con un valor de 70 %, según la escala utilizada, que indica que los corales y las algas estaban de moderadamente impactados a muy impactados[423]. Respecto a la cobertura de coral duro, el informe del Programa de Monitoreo de Arrecifes de Coral de la NOAA reportó una disminución de cerca de 5 % entre 2013 y 2019, y que hubo prevalencia de blanqueamiento en el 2019. También reportaron observaciones de que la enfermedad de pérdida de tejido de coral duro (SCTLD, por sus siglas en inglés) estaba causando mortalidad rápida y acelerada[424]. Entre los estresores que afectan la calidad y distribución de los arrecifes de coral en la isla están: 1) el impacto de los huracanes, 2) alta sedimentación por descarga de ríos, 3) alta sedimentación por escorrentías de suelo expuesto sin vegetación, 3) enfermedades y 4) altas temperaturas, entre otros.

Luego del paso del huracán María, varios estudios sobre el estado de estos ecosistemas

---

418 NOAA. Coral Reef Conservation Program. (2018, December 10). National Coral Reef Monitoring Program - Status Reports. NOAA Coral Reef Information System (CoRIS) Home Page. Recuperado en línea de: https://www.coris.noaa.gov/monitoring/status_report/

419 NOAA (2011, July 5). "Medicines from the sea." *Ocean Today*. Retrieved March 27, 2023, from https://oceantoday.noaa.gov/medicinesfromthesea/

420 NOAA. Office for Coastal Management. Coral reefs. (Last Modified: 03/22/2023 a). Retrieved March 27, 2023, from https://www.coast.noaa.gov/states/fast-facts/coral-reefs.html.

421 Ídem.

422 Burke, L., & Spalding, M. (2022). "Shoreline protection by the world's coral reefs: Mapping the benefits to people, assets, and infrastructure." *Marine Policy*, 146, 105311. https://doi.org/10.1016/j. marpol.2022.105311.

423 NOAA. Coral Reef Conservation Program. (2018, December 10).

424 Edwards, K.F., J. Blondeau, L.J.W. Grove, S.H. Groves, S.D. Hile, M.W. Johnson, C. Langwiser, L. Siceloff, E.K., Towle, T.S. Viehman, and B. Williams. (2021) National Coral Reef Monitoring Program, Biological monitoring summary – U.S. Virgin Islands and Puerto Rico: 2019. NOAA Technical Memorandum NOS CRCP 40. 27 pp. doi:10.25923/fdp6-qv15.

identificaron que sufrieron daños importantes. Específicamente, los corales quedaron partidos, virados y/o arrancados de su posición original[425]. Se determinó que aproximadamente el 11 % se afectó. Los corales más afectados fueron 1) *pillar coral* (*Dendrogyra cylindrus*), 2) *elkhorn coral* (*Acropora palmata*), 3) *lobed star coral* (*Orbicella annularis*), y 4) *staghorn coral* (*A. cervicornis*), todos constructores de arrecife (*reef building*) y listados bajo el *Endangared Species Act* (ESA). Los daños variaron en intensidad por área geográfica. Los mayores daños se observaron en el noreste, incluyendo las islas de Culebra (sur de la isla) y Vieques (norte de la isla), y secciones del oeste y norte de la isla grande. En términos generales se encontró que las regiones norte, noreste (incluyendo Culebra), Vieques y el oeste presentaron aproximadamente el doble de daños, comparado con regiones del sureste y el suroeste de Puerto Rico[426]. En el 2018 se replantaron cerca de 5,400 pedazos de esos corales fragmentados; en marzo del 2019, otros 1,200 corales se replantaron en Culebra[427]. Los esfuerzos de reimplantación han continuado en conjunto con proyectos de restauración y viveros de corales. Varias iniciativas de restauración en curso incluyen: replantación de fragmentos de *A. cervicornis y A. palmata* en La Parguera, fincas *"in situ"* en Culebra y viveros "en tierra" en La Parguera y Ceiba[428]. Una iniciativa novedosa es la de utilizar arena de botellas trituradas para cementar fragmentos de *A. palmata* en el área oeste[429]. Hace varios años, en Culebra existen fincas de corales de *A. cervicornis*, que han reportado más de un 90 % de éxito de sobrevivencia[430] [431] [432] [433].

Además del impacto mecánico de los huracanes del 2017, otros estresores asociados a los eventos afectan la calidad y distribución de los corales en los arrecifes. Entre ellos: al-

[425] Federal Emergency Management Agency (FEMA), NOAA, (2018). Status of Puerto Rico's Coral Reefs in the Aftermath of Hurricanes Irma and Maria Assessment Report Submitted by NOAA to the FEMA Natural and Cultural Resources Recovery Support Function.

[426] Viehman, T.S., M. Nemeth, S.H. Groves, C.A. Buckel, S. Griffin, D. Field, T.D. Moore, J. Moore. 2020. Coral assessment and restoration in the U.S. Caribbean after 2017 hurricanes. NOAA National Ocean Service, National Centers for Coastal Ocean Science. NOAA Technical Memorandum 278. Silver Spring, MD. 64 pp. https://coastalscience.noaa.gov/news/coral-assessment-and-restoration-results-released-for-u-s-caribbean-after-2017-hurricanes/

[427] Viehman et al., 2020.

[428] Williams, S. (2022, April 20). Our efforts on coral reef restoration in Puerto Rico. I SER Caribe. https://www.isercaribe.org/coral-reef-restoration

[429] Islamar Expeditions (2022). First 100 corals planted using recycled glass sand. Isla Mar. Retrieved March 26, 2023, from https://www.islamarexp.com/post/first-100-corals-planted-using-recycled-glass-sand.

[430] Hernández-Delgado, E. A., Mercado-Molina, A. E., Alejandro-Camis, P. J., Candelas-Sánchez, F., Fonseca-Miranda, J. S., & González-Ramos, C. M. (2014). "Community-Based Coral Reef Rehabilitation in a Changing Climate: Lessons Learned from Hurricanes, Extreme Rainfall, and Changing Land Use Impacts." *Open Journal of Ecology*, 918-944.

[431] Patria I. Aponte-Marcano, Samuel E. Suleimán-Ramos, Alex E. Mercado-Molina (2023 Submitted manuscript). *Demography of the threatened coral Acropora cervicornis growing in distinct nurseries designs in Culebra, Puerto Rico.*

[432] Bayraktarov E, Banaszak AT, Montoya Maya P, Kleypas J, Arias-González JE, Blanco M, et al., (2020) "Coral reef restoration efforts in Latin American countries and territories." *PLOS ONE 15*(8): e0228477. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0228477.

[433] Hernández-Delgado E, Mercado-Molina A, Suleimán-Ramos S. (2018) "Multi-disciplinary lessons learned from low-tech coral farming and reef rehabilitation practices." I. Best management practices. In: Duque-Beltrán C, Tello-Camacho E, editors. *Corals in a Changing World* in *Tech Publ*; 2018. p. 213-43.

tas precipitaciones, descargas de sedimentos en suspensión, altas temperaturas y cambios en la acidificación del agua. Los huracanes del 2017 ocasionaron altas precipitaciones que resultaron en importantes impactos en los ecosistemas costeros y bentónicos por las fuertes lluvias y descargas fluviales[434]. La calidad del agua se ha señalado como una amenaza significativa a los arrecifes de coral poco profundos en Puerto Rico[435] [436] [437]. Varios estudios locales demuestran los impactos de la sedimentación sobre la calidad y distribución de los corales en los arrecifes. Entre estos se puede mencionar el impacto de los sedimentos suspendidos en la cobertura de coral ubicados en la costa cerca de la desembocadura del Río Grande de Manatí y el Río Loco, en Yauco. Parte del aumento de la sedimentación a lo largo de las cuencas hidrográficas se asocian a actividades relacionadas con cambios de uso de terrenos, como la deforestación. Los sedimentos terrígenos inhiben el crecimiento del coral al aumentar la turbidez, reduciendo la cantidad de luz que requieren las algas que viven en simbiosis con el coral, afectan el reclutamiento (larvas que logran asentarse), bajan las tasas de crecimiento, aumentan la mortalidad y la susceptibilidad a las enfermedades ("como se citó en"[438])[439]. Un proyecto en curso tiene como objetivo el desarrollo e implementación de un programa de monitoreo de la calidad del agua en áreas de arrecifes de coral poco profundos alrededor de Puerto Rico[440]. Además, la acidificación en el océano (disminución del pH), está afectando las estructuras de los corales duros, inhibiendo la formación de las estructuras duras por el coral, que son la base del arrecife[441] [442]. Las anomalías en temperatura afectan la prevalencia de los corales, ya que al aumentar la temperatura estos expelen el alga que vive en sus tejidos causando blanqueamiento. La temperatura óptima para que los corales estén saludables

[434] Hernández-Delgado, E.A.; Ortiz-Flores, M.F. (2020) "The Long and Winding Road of Coral Reef Recovery in the Anthropocene: A Case Study from Puerto Rico." *Diversity*: 14, 804. https://doi.org/10.3390/d14100804.

[435] Connell, J.H. (1997) "Disturbance and recovery of coral assemblages." *Coral Reefs*, 16, 101–113.

[436] Hernández-Delgado, E.A.; Ortiz-Flores, M.F. (2020) "The Long and Winding Road of Coral Reef Recovery in the Anthropocene: A Case Study from Puerto Rico." *Diversity*: 14, 804. https://doi.org/10.3390/d14100804.

[437] González-Figueroa, M.C., & E.A. Hernández-Delgado. (2021). "Variación espacial en los patrones de recuperación natural de los arrecifes de coral someros urbanos en Puerto Rico". *Perspectivas en Asuntos Ambientales*, 9:90-1 https://documento.uagm.edu/cupey/perspectivas/p_perspectivas_9_2021_90-111.pdf

[438] Torres-Pérez JL, Ramos-Scharrón CE, Hernández WJ, Armstrong RA, Barreto-Orta M, Ortiz-Zayas J, Guild LS, and Viqueira R. (2021) "River Streamflow, remotely Sensed Water Quality and Benthic Composition of Previously Undescribed Nearshore Coral Reefs in Northern Puerto Rico." *Front. Mar. Sci.* 8:720712. doi:10.3389/fmars.2021.720712.

[439] Hernández-Delgado et at., 2020 (b).

[440] Development and implementation of a water quality monitoring program in shallow coral reef areas around Puerto Rico and the implementation of a "BCG" model. https://www.uprm.edu/ccri/research/development-and-implementation-of-a-water-quality-monitoring-program-in-shallow-coral-reef-areas-around-puerto-rico/#background

[441] Meléndez, M., Salisbury, J., Gledhill, D., Langdon, C., Morell, J. M., Manzello, D., Musielewicz, S., Rodríguez-Abudo, S., and Sutton, A. (2020) "Seasonal variations of carbonate chemistry at two western Atlantic coral reefs." *Journal of Geophysical Research: Oceans*, https://doi.org/10.1029/2020JC016108.

[442] Meléndez, M., Salisbury, J., Gledhill, D., Langdon, C., Morell, J. M., Manzello, D., and Sutton, A. (2022). "Net ecosystem dissolution and respiration dominate metabolic rates at two western Atlantic reef sites." *Limnology and Oceanography, 67*(3), 527-539. https://doi.org/10.1002/lno.12009.

es de 73 °F - 84 °F [443]. Se considera que las manifestaciones del cambio climático se han convertido en una de las mayores amenazas para los arrecifes de coral[444] [445].

De igual forma, se han reportado distintas enfermedades en los corales desde la década de 1980[446]. En el 2019 se identificó en Puerto Rico el primer caso documentado de la SCTLD en la costa oeste de Culebra[447], siendo de rápida propagación[448]. A partir de septiembre de 2021, continuó extendiéndose hacia el oeste de arrecife a arrecife en el norte y al sur de Puerto Rico[449]. La cobertura de coral ha disminuido significativamente en sitios donde la SCTLD está presente, con una mortalidad estimada del 50 % desde el 2019[450]. En el 2021, el DRNA estableció un plan de intervención para mitigar la SCTLD basado en aplicar un ungüento con el antibiótico amoxicilina[451]. Para agosto del 2022, se habían tratado 2,279 colonias de diferentes especies de coral y el promedio en todas las colonias y sitios marcados era de 89 %[452]. El Programa de Evaluación Rápida de Arrecifes del Atlántico y Golfo (AGRRA, por sus siglas en inglés) mantiene una página con información actualizada sobre la SCTLD que incluye a Puerto Rico[453]. Los factores mencionados, entre otros, pueden tener profundas implicaciones para la persistencia de los arrecifes de coral en Puerto Rico a largo plazo[454].

---

[443] NOAA. (2010, March 15*). What is coral bleaching?* NOAA's National Ocean Service. https://oceanservice.noaa.gov/facts/coral_bleach.html#:~:text=Warmer%20water%20%20temperatures%20can%20result,This%20is%20called%20coral%20bleaching

[444] Hughes, T.P., Linares, C., Dakos, V., van de Leemput, I.A., and van Nes, E.H. (2013) "Living Dangerously on Borrowed Time during Slow, Unrecognized Regime Shifts." *Trends in Ecology and Evolution*, 28, 149-155. http://dx.doi.org/10.1016/j.tree.2012.08.022.

[445] Gibbs DA, West JM (2019) "Resilience assessment of Puerto Rico's coral reefs to inform reef management." *PLOS ONE 14*(11): e0224360. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0224360.

[446] Weil E, Rogers CS (2011) "Coral reef diseases in the Atlantic-Caribbean." In: Dubinsky Z, Stambler N, editors. *Coral reefs: an ecosystem in transition*. Springer, pp 465-91.

[447] Weil, E., Hernández-Delgado, E., Williams, S., Suleimán, S., Figuerola, M., & Metz-Estrella, T. (2019, December). *Reef encounter spread of the new coral disease "SCTLD" into the Caribbean: implications for Puerto Rico*. Retrieved October 6, 2022, from https://www.researchgate.net/publication/342477916_REEF_ENCOUNTER_Spread_of_the_new_coral_disease_SCTLD_into_the_Caribbean_implications_for_Puerto_Rico.

[448] Lucas, Matthew & Collazo, D & Mercado, M & Fain, E & Toledo, Daniel & Weil, Ernesto (2022). "Stony Coral Tissue Loss Disease (SCTLD) induced mass mortality at Peñón de Mera and Cueva del Indio, Arecibo, Puerto Rico." *Inter Scientific Marine Biology & Ecology* (PREPRINT).

[449] Williams SM, García-Sais J and Sabater-Clavell J (2021*)* "Prevalence of Stony Coral Tissue Loss Disease at El Seco, a Mesophotic Reef System off Vieques Island, Puerto Rico." *Front. Mar. Sci.* 8:668669. doi: 10.3389/fmars.2021.668669.

[450] Nilda Jiménez (DRNA), comunicación personal.

[451] Department of Natural and Environmental Resources. 2021. *Puerto Rico Stony Coral Tissue Loss Disease Intervention Plan*. Coral Reef Conservation and Management Program, DNER. Environmental Agencies Building Dr. Cruz A. Matos, 8th floor, Sector El Cinco, Río Piedras, San Juan.

[452] Morales, Catalina. (2022) Response to Stony Coral Tissue Loss Disease outbreak with antibiotic treatment. *Progress Report:* November 2020 to August 2022. Sea Ventures Inc. Progress report submitted to DENR.

[453] AGRRA, Atlantic and Gulf Rapid Reef Assessment. (2021) Coral Disease Outbreak. www.agrra.org.

[454] Puerto Rico Climate Change Council (PRCCC) (2022). *Puerto Rico's State of the Climate 2014-2021: Assessing Puerto Rico's Social-Ecological Vulnerabilities in a Changing Climate*. Puerto Rico Coastal Zone Management Program, Department of Natural and Environmental Resources, NOAA Office of Ocean and Coastal Resource Management. San Juan, PR.

Se identifican varias brechas en los esfuerzos de mitigación, adaptación y resiliencia de los arrecifes de coral en Puerto Rico. Entre estas está la necesidad de: 1) promover más monitoreos continuos para todas las áreas de arrecifes, 2) reducir las fuentes terrestres de contaminación, 3) aumentar el uso de soluciones basadas en la naturaleza (*nature-based solutions*) como alternativa para la mitigación y 4) establecer más sistemas para observar cómo se comportan los sistemas biogeoquímicos marinos (acidificación, entre otros). La adaptación y resiliencia al cambio climático deben ser una prioridad en el diseño de los proyectos de restauración. Esto significa anticipar cómo los cambios en el clima podrían afectar los arrecifes y otros ecosistemas marinos y adaptar los métodos de restauración para garantizar su efectividad a largo plazo.

4.8.1.2. Hierbas marinas

Las hierbas marinas son plantas que están adaptadas a vivir sumergidas en el mar. Conforman praderas en regiones extensas del fondo marino costero. Pertenecen al grupo de plantas vasculares con raíces acuáticas. Normalmente, en la región del Caribe las praderas se componen de las siguientes especies: hierba de tortuga (*Thalassia testudinum*), hierba de manatí (*Syringodium filiforme*), hierba de estuario (*Halodule wrightii*), hierba de lago (*Halophila decipiens*) y hierba de zanja (*Ruppia* marítima). De todas, la *Thalassia testudinum* es la común y abundante en el Caribe. De otra parte, la hierba invasora *Halophila stipulacea*, que fue reportada en Puerto Rico en el 2017[455], desplaza a especies nativas y altera el equilibrio natural del ecosistema[456] [457]. Las praderas de hierbas marinas se consideran uno de los ecosistemas costeros más comunes en Puerto Rico. Son más extensas en la costa sur y este, pero se pueden encontrar en el norte y oeste, en las áreas protegidas del oleaje fuerte. El informe del DRNA del 2001 indica que en las aguas costeras existen 278 millas cuadradas de praderas de hierbas marinas[458]. Son de gran valor en el ecosistema marino porque: 1) filtran los nutrientes y sedimentos, 2) controlan la erosión, 3) estabilizan los sedimentos, 4) proporcionan alimento y refugio para los animales marinos como manatíes y tortugas, 5) sus hojas hospedan un gran número de organismos que son consumidos por peces e invertebrados y 6) las hojas retardan la velocidad de las corrientes. Además, tienen la capacidad de capturar carbono hasta 35

[455] Ruiz, H., D. L. Ballantine and J. Sabater. 2017. "Continued Spread of the seagrass Halophila stipulacea in the Caribbean: Documentation in Puerto Rico and the British Virgin Islands." *Gulf and Caribbean Research 28*(1): SC5-SC7. Retrieved from https://aquila.usm.edu/gcr/vol28/iss1/7 DOI: https://doi.org/10.18785/gcr.2801.05.

[456] Smulders, Fee O. H., Naomi Slikboer, Marjolijn J. A. Christianen, and Jan Arie Vonk. 2023. "Battle for the mounds: Niche competition between upside-down jellyfish and invasive seagrass." *Ecology 104*(4): e3980. https://doi.org/10.1002/ecy.3980.

[457] Hernández-Delgado, E. A., Toledo-Hernández, C., Ruíz-Díaz, C. P., Gómez-Andújar, N., Medina-Muñiz, J. L., Canals-Silander, M. F., & Suleimán-Ramos, S. E. (2020, January 8). "Hurricane impacts and the resilience of the Invasive Sea Vine, *halophila stipulacea*: A case study from Puerto Rico - estuaries and coasts." SpringerLink. Retrieved April 10, 2023, from https://link.springer.com/article/10.1007/s12237-019-00673-4.

[458] Ruíz, H. DRNA. (2018). Hierbas Marinas. Importancia de nuestras praderas de hierbas marinas y su relación con los arrecifes de coral. Retrieved February 20, 2023, from https://drna.pr.gov/wp-content/uploads/2018/06/Relaci%C3%B3n-de-las-hierbas-marinas-y-los-arrecifes-de-coral_H-Ruiz-HJR-Reefscapingcompressed.pdf.

veces más rápido que los bosques tropicales y, aunque solo cubren el 0.2 % del fondo marino global, absorben el 10 % del carbono del océano al año, lo que las hace una herramienta importante contra el cambio climático[459].

Los huracanes del 2017 causaron daños significativos a las comunidades de hierbas marinas de aguas someras a través de todo Puerto Rico[460]. La mayoría de los impactos documentados se asoció con la carga de sedimentos, que resultó en entierro y asfixia. También hubo perturbación física localizada del hábitat en áreas expuestas a la acción de olas fuertes, lo que creó cicatrices y dejó la estructura subterránea sujeta a una mayor desintegración por futuros eventos de tormentas. Además, un hallazgo notable fue la recuperación rápida, expansión y dominancia de la hierba invasiva *Halophila stipulacea*. Los huracanes desencadenaron un cambio localizado en la vegetación marina, favoreciendo la invasión de *H. stipulacea*, con consecuencias potencialmente significativas en la resiliencia del ecosistema y en la capacidad de las hierbas marinas nativas para persistir y adaptarse a los impactos proyectados del cambio climático. La invasión generalizada de *Halophila stipulacea* nativa del océano Índico en el Caribe oriental en combinación con la dispersión a gran escala de sargazo representan amenazas recientes a la persistencia de las hierbas nativas[461]. La Sociedad Ambiente Marino tiene proyectos activos, financiados por la NOAA, para evaluar los impactos de especies invasoras y para restaurar la continuidad de corales y hierbas marinas en áreas impactadas por huracanes en Culebra[462]. Los ecosistemas de hierbas marinas en general han sido menos estudiados que los de corales y mangles. Se recomienda establecer monitoreos y evaluaciones a largo plazo para poder establecer una base de referencia, documentar cambios, evaluar la resiliencia y establecer planes de mitigación de estos importantes ecosistemas ante el cambio climático.

4.8.1.3. Humedales

La Ley de política pública sobre los humedales en Puerto Rico define esos ecosistemas como: “un área natural saturada por aguas superficiales o subterráneas a un intervalo y duración suficiente como para sostener, y el cual bajo circunstancias normales sostiene o sostendría una vegetación típicamente adaptada a condiciones de suelos saturados, inundados o empozados”[463]. En Puerto Rico, los humedales representan parte esencial de los ecosistemas costeros. Los humedales localizados en la zona costera incluyen áreas dentro de las cuencas costeras que podrían o no estar influenciadas por la marea, y que son inundadas por agua dulce, salinas o salobres. Pueden estar saturados de agua durante todo el año, durante ciertas estaciones o durante parte del día. Estas áreas han sido grandemente impactadas a consecuencia del desarrollo turístico, comercial y urba-

[459] World Wildlife Fund WWF (2023) Planting hope - how seagrass can tackle climate change. Retrieved April 6, 2023, from https://www.wwf.org.uk/what-we-do/planting-hope-how-seagrass-can-tackle-climate-change.
[460] Hernández-Delgado et al., 2018.
[461] Hernández-Delgado et al., 2020.
[462] Sociedad Ambiente Marino (SAM) (2023, February 28). *Projects*. Retrieved April 6, 2023, from https://www.sampr.org/projects/.
[463] Ley 314-1998. Véase: https://www.drna.pr.gov/documentos/ley-num-314-de-24-de-diciembre- de-1998/.

no[464] [465]. En Puerto Rico, los tipos de humedales costeros son: acuático de agua salada (ej. praderas de hierbas marinas); llano costero de agua (ej. salitral); ciénega de agua salada (ej. áreas detrás de los manglares); pantano de agua salada (ej. manglares)[466]. Los humedales están amenazados por el desarrollo de urbanizaciones, rellenos sanitarios de residuos sólidos o vertederos (estos pueden interferir con el agua subterránea que va al humedal), canalizaciones, construcción de carreteras y marinas, proyectos agrícolas (abonos, insecticidas y herbicidas), así como por el desmonte en las zonas de captación de las cuencas hidrográficas.

Luego de los huracanes del 2017, se realizó una evaluación rápida en cinco humedales boscosos cerca de zonas urbanas o de infraestructura de importancia económica: Punta Tuna (Maunabo), Punta Santiago (Humacao), Piñones (Carolina/Loíza), Ciénaga Las Cucharillas (Cataño) y Jobos (Isabela)[467]. Se compararon cambios en el tipo de vegetación y su mortalidad con imágenes de satélite de 2010 y 2018, así como por evaluaciones en tierra. Se identificó que la mortalidad promedio de este componente costero en todos los sitios y hábitats estudiados fue de 27 %. En la Ciénaga Las Cucharillas se alteraron los tipos de vegetación debido a un cambio en el régimen hidrológico de la zona. En un estudio realizado en la ciénaga durante los dos años siguientes a los huracanes se encontró el 87 % de cobertura vegetal. Se concluyó que esa vegetación mostró resiliencia ante los efectos iniciales de los huracanes[468].

Los manglares son un tipo de bosque de plantas leñosas que se desarrollan en lagunas, riberas y en costas tropicales protegidas del oleaje. Debido a su ubicación costera están siempre en contacto con cuerpos de agua de origen marino, o en combinación con el agua que llega a través de escorrentías o por la desembocadura de los ríos. En la ZMT de Puerto Rico se pueden identificar las especies: *Rhizophora* mangle (rojo), *Avicennia germinans* (negro), *Laguncularia racemosa* (blanco) y *Conocarpus erectus* (botón). Según el Instituto de Investigación y Planificación Costera de Puerto Rico (CoRePI), el 28% de la línea costera isleña presenta vegetación, compuesta mayormente de manglar[469]. Este ecosistema se destaca por: 1) su alta productividad y producción de materia orgánica, 2) promueve la biodiversidad, ya que sus raíces sumergidas proveen habitáculo y refugio para una rica fauna de peces, mamíferos e invertebrados, 3) tiene un alto valor ecológico y económico, ya que actúa como criadero para muchos peces y crustáceos,

[464] Mena., L., Carrubba, L., & Torres, J. (2007, septiembre). *Guía de los reglamentos y biología para oficiales del orden público en Puerto Rico*. Caribbean Fishery Management Council.

[465] Programa de Manejo de la Zona Costanera para Puerto Rico, revisión y actualización. (septiembre de 2009). https://www.drna.pr.gov/wp-content/uploads/2021/08/PMZCPR-ingles-2009-final.pdf.

[466] DRNA. (2017). Estudio sobre la integración de estrategias para la adaptación y el desarrollo de resiliencia en la planificación de usos de terrenos. Retrieved April 6, 2023, from https://www.drna.pr.gov/wp-content/uploads/2017/08/Estudio-estrategias-de-adaptacion-en-la-planificacion-de-usos-de-terrenos.pdf.

[467] Branoff, B.L. “Mangrove Disturbance and Response Following the 2017 Hurricane Season in Puerto Rico.” *Estuaries and Coasts* 43, 1248–1262 (2020). https://doi.org/10.1007/s12237-019-00585-3.

[468] Hernández E, Cuevas E, Pinto-Pacheco S and Ortiz-Ramírez G (2021) “You Can Bend Me but Can’t Break Me: Vegetation Regeneration After Hurricane María Passed Over an Urban Coastal Wetland in Northeastern Puerto Rico.” *Front. For. Glob. Change* 4:752328. doi: 10.3389/ffgc.2021.752328.

[469] El Estado de las playas de Puerto Rico post-María. (2022). ArcGIS StoryMaps. https://storymaps.arcgis.com/stories/61653d2d9a1748168488235d866f3e89.

4) alberga y provee áreas de anidaje a aves residentes y migratorias, vulnerables o en peligro de extinción, 5) protege las costas contra la erosión y las marejadas ocasionadas por los huracanes, 6) atrapa sedimento y hojarasca entre sus raíces y ayuda a rellenar y recobrar terreno y 7) secuestra carbono (captura de dióxido de carbono de la atmósfera (*Blue Carbon*). Además, es espacio para la recreación pasiva y actividades turísticas[470].

Los manglares en Puerto Rico están amenazados por el dragado para la agricultura y la expansión urbana, la contaminación de las aguas residuales y la destrucción de los ecosistemas de barrera, como las dunas y los arrecifes de coral. Asimismo, se afectan por eventos extremos tales como huracanes, terremotos y anomalías en la precipitación[471]. Estudios demuestran que la pérdida de mangles a través de múltiples eventos ciclónicos se influencia por el estado previo de la costa y afecta la susceptibilidad a eventos futuros[472]. El huracán María devastó varios ecosistemas de manglares alrededor de la isla[473], ya fuera por los efectos mecánicos del viento o por los cambios hidrológicos y de salinidad[474]. En el 2018, una evaluación rápida en cinco humedales (Maunabo, Humacao, San Juan, Cataño e Isabela) mostró una mortalidad promedio en esas áreas de 53 %. Los de Isabela tuvieron el mayor de los daños, con el 95 % de mortalidad. En los de Maunabo se observó entre 68 % - 98 % del hábitat de manglar clasificado como muerto[475]. Datos satelitales y modelos de aprendizaje automático utilizados para evaluar los cambios en la extensión de los manglares en la Bahía de Jobos en Salinas entre 2010-2020 revelaron una pérdida total de 4.85 km de hábitat de manglares[476].

Existen varios esfuerzos de restauración de mangle, entre los que destacan los del Programa del Estuario de la Bahía de San Juan[477]. Luego de los huracanes del 2017 comenzaron nuevos proyectos. El Centro de Restauración Ecológica y Conservación Costera Vida Marina obtuvo fondos para restaurar un total de 59 hectáreas de manglares de cuenca en tres comunidades costeras del noreste: playa Espinar, en Aguada, playa Jobos y playa *Secret Spot*, en Isabela, y la reserva natural Finca Nolla, en Camuy[478]. En conjunto con *Ocean Foundation*, en la Reserva Nacional de Investigación Estuarina de Bahía de Jobos se estableció un vivero de mangle rojo y se pretende restaurar cerca de

[470] NOAA. National Oceanographic and Atmospheric Administration. (2019, December 5). Coastal Blue Carbon. NOAA's National Ocean Service. Retrieved April 4, 2023, from https://oceanservice.noaa.gov/ecosystems/coastal-blue-carbon/.

[471] NASA DEVELOP (2022, February 7). El cambio comienza en las raíces. ArcGIS StoryMaps. Retrieved April 6, 2023, from https://storymaps.arcgis.com/stories/0842554e827742219fdc4b25414d72d7.

[472] Bhargava R and Friess DA (2022) "Previous Shoreline Dynamics Determine Future Susceptibility to Cyclone Impact in the Sundarban Mangrove Forest." *Front. Mar. Sci.* 9:814577. doi: 10.3389/fmars.2022.814577.

[473] Joosse, T. (2020), "Hurricane Maria killed mangroves months after storm." *Eos,* 101, https://doi.org/10.1029/2020EO152709. Published on 15 December 2020.

[474] Del Valle Huertas, L. Y. (2022, 28 de octubre). "Puerto Rico: El gran reto de restaurar los manglares y dunas que protegen a la isla. Noticias ambientales." *Mongabay*. Retrieved April 6, 2023, from https://es.mongabay.com/2022/10/el-reto-de-restaurar-manglares-y-dunas-en-puerto-rico/.

[475] Branoff et al., 2020.

[476] NASA DEVELOP, 2022.

[477] PEBSJ. (2022) Estuario Revive. Retrieved April 6, 2023, from https://relief.estuario.org/.

[478] Del Valle Huertas, L. Y. (2022).

695 acres, incluyendo restauración hidrológica[479]. Recientemente comenzó el dragado del Caño Martín Peña para restablecer la conexión hidráulica entre la laguna San José y la bahía de San Juan. El proyecto incluirá áreas de conservación para humedales de manglares[480]. La continuación de estos proyectos debe alinearse a monitoreos a largo plazo a través en toda la isla, para poder tener una caracterización de la distribución y diversidad del ecosistema y establecer criterios para enfrentar los efectos del cambio climático.

El deterioro de los componentes marinos y costeros, en donde se encuentran los hábitats críticos de especies de importancia comercial, puede causar un impacto importante en el recurso pesquero y, por consiguiente, en la actividad pesquera. En la isla, las pesquerías comerciales son esencialmente artesanales o en pequeña escala ya que la mayoría de ellas se realiza en el hábitat costero o sobre la plataforma insular. Las principales artes de pesca que se utilizan son: las líneas de mano, las nasas para la captura de peces de arrecifes, los llamados cajones (que son nasas modificadas de madera) para capturar langostas, las redes de agalla y los mallorquines, los palangres horizontales y verticales (a este último se le conoce como cala), la pesca de corrida o "de silga" como también se le conoce, la recolección a mano cuando se pesca carrucho (*Lobatus gigas*) y por medio de arpón o fisga utilizando equipos de buceo. Otras dos artes que algunos pescadores utilizan con frecuencia son el lazo para capturar langostas y el bichero para pulpos. Durante los últimos años se ha registrado un incremento en el número de pescadores que utilizan el buceo con arpón.

En las últimas décadas, las pesquerías locales han confrontado desafíos entre los que podemos mencionar: la contaminación de los océanos, la destrucción de habitáculos esenciales, la sobrepesca y, recientemente, los dramáticos efectos provocados por el cambio climático. En Puerto Rico no existe un plan de manejo integrado para pesquerías en aguas bajo la jurisdicción local (0-9 millas náuticas). Existe un plan para aguas bajo jurisdicción federal elaborado por el *Caribbean Fishery Management Council*[481]. Además, actualmente se está realizando un plan de manejo de pesquerías basado en ecosistemas para aguas federales. Ese tipo de plan es una forma holística de gestionar la pesca y los recursos marinos teniendo en cuenta todo el ecosistema de las especies con el objetivo de mantener los ecosistemas en una condición saludable, productiva y resistente para que puedan proporcionar los servicios que los humanos desean y necesitan. Asimismo, provee un mejor entendimiento de cómo los ecosistemas y sus componentes responden a múltiples estresores, incluyendo los causados por el cambio climático.

Desde hace varios años, las cifras de capturas muestran descensos que posiblemente se deben a una reducción en el número de pescadores y, tal vez, a la merma en los abas-

[479] Logan, M. (2022, March 24). "Advancing nature-based solutions in Puerto Rico." *The Ocean Foundation.* Retrieved April 6, 2023, from https://oceanfdn.org/advancing-nature-based-solutions-to-promote-climate-resilience-in-puerto-rico/.

[480] Environmental Protection Agency EPA. (2022, June). Ongoing Projects in Caño Martín Peña. Retrieved April 6, 2023, from https://www.epa.gov/urbanwaterspartners/ongoing-projects-cano-martin-pena.

[481] CFMC (2023). Fishery Management Plans. Caribbean Fishery Management Council. Retrieved April 6, 2023, from https://caribbeanfmc.com/fishery-management.

tos de algunas especies. Las estadísticas pesqueras en Puerto Rico no se consideran las más certeras, entre otras razones, porque muchos pescadores ya no se inscriben para las licencias[482].

4.8.1.4. *Impacto del sargazo sobre los ecosistemas marinos y costeros*

Desde el 2011 se han reportado floraciones masivas de algas del género *Sargassum sp.* en el Caribe[483]. La biomasa de sargazo puede beneficiar al medioambiente en densidades moderadas, proporcionando alimento y refugio a varias especies, puede ayudar a combatir la erosión de las playas y proporciona nutrientes a los hábitats de las playas. Sin embargo, cuando la biomasa es muy alta puede tener efectos adversos: impedir la penetración de la luz, afectando a los corales y comunidades bentónicas[484]. En el mar Caribe, estas floraciones han causado enormes eventos de varamiento en las playas de toda la región[485]. Ahora está clasificada como una planta marina invasora y destructiva, ya que se ha convertido en una pesadilla continua para el turismo en toda la cuenca del Caribe[486]. Su descomposición resulta en una serie de consecuencias para los ecosistemas, de naturaleza biológica, económica y de salud[487]. Los efectos perjudiciales sobre los recursos vivos parecen ser el resultado de la reducción de la luz, el oxígeno (hipoxia o anoxia) y el pH, el aumento de altas concentraciones de amonio y sulfuro de hidrógeno y la perturbación física[488].

La entrada y acumulación de sargazo en todas las costas de Puerto Rico tiene efectos notables con cambios en la vegetación costera relacionados. Evaluaciones de 2010 a 2020 en cayos, bahías, ensenadas y ambientes cercanos a la costa en La Parguera, al suroeste, encontraron alteraciones significativas en la vegetación costera y la composi-

---

[482] Manuel Valdés Pizzini (2011). Una mirada al mundo de los pescadores en Puerto Rico: Una perspectiva global. Programa de Colegio Sea Grant de la Universidad de Puerto Rico, Impresos Sea Grant.

[483] Elizabeth M. Johns, Rick Lumpkin, Nathan F. Putman, Ryan H. Smith, Frank E. Muller-Karger, Digna T. Rueda-Roa, Chuanmin Hu, Mengqiu Wang, Maureen T. Brooks, Lewis J. Gramer, Francisco E. Werner (2020). "The establishment of a pelagic Sargassum population in the tropical Atlantic: Biological consequences of a basin-scale long-distance dispersal event." *Progress in Oceanography*, Volume 182. https://doi.org/10.1016/j.pocean.2020.102269.

[484] Van Tussenbroek, B.I.; Hernández Arana, H.A.; Rodríguez-Martínez, R.E.; Espinoza-Avalos, J.; Cañizales-Flores, H.M.; González-Godoy, C.E.; Barba-Santos, M.G.; Vega-Zepeda, A.; Collado-Vides, L. "*Severe impacts of brown tides caused by Sargassum spp. on near-shore Caribbean seagrass communities*". *Mar. Pollut. Bull.* 2017, 122, 272–281.

[485] Mariana C. León-Pérez, Anthony S. Reisinger, James C. Gibeaut, "Spatial-temporal dynamics of decaying stages of pelagic *Sargassum* spp. along shorelines in Puerto Rico using Google Earth Engine." *Marine Pollution Bulletin,* Volume 188, 2023, 114715, ISSN 0025-326X, https://doi. org/10.1016/j.marpolbul.2023.114715.

[486] Programa de las Naciones Unidas para el Medioambiente, 2018.

[487] Chávez, V.; Uribe-Martínez, A.; Cuevas, E.; Rodríguez-Martínez, R.E.; Van Tussenbroek, B.I.; Francisco, V.; Estévez, M.; Celis, L.B.; Monroy-Velázquez, L.V.; Leal-Bautista, R.; et al., "Massive influx of pelagic *Sargassum* spp. On the coasts of the Mexican Caribbean 2014–2020: Challenges and opportunities." *Water* 2020, 12, 2908.

[488] Rodríguez-Martínez, R.E., Medina-Valmaseda, A.E., Blanchon, P., Monroy-Velázquez, L.V., Almazán-Becerril, A., Delgado-Pech, B., Vásquez-Yeomans, L., Francisco, V., García-Rivas, M.C., 2019. "Faunal mortality associated with massive beaching and decomposition of pelagic *Sargassum*." *Mar. Pollut. Bull.* 146, 201–205.

ción bentónica, incluidos los manglares[489]. Investigaciones en curso, estudian la calidad de agua y las comunidades zooplanctónicas asociadas al sargazo en el suroeste[490] [491]. La acumulación y subsiguiente descomposición del sargazo puede tener efectos devastadores en el hábitat crítico de especies amenazadas, con un impacto sobre los recursos pesqueros[492].

El manejo del sargazo en las costas es un gran reto. En otras regiones del Caribe utilizan equipos para intervenir antes de que llegue a la costa. Estos sistemas minimizan los impactos ecosistémicos, socioeconómicos y de salud pública[493]. El DRNA ya cuenta con un protocolo para el manejo de acumulaciones extremas de sargazo en las costas[494].

Las grandes acumulaciones de sargazo aparentan ser resultado del insumo de nutrientes al Caribe por los ríos Orinoco y Amazonas, y todo apunta a que será la nueva norma[495]. Ya a esta nueva masa de sargazo en el Atlántico se le conoce como "el gran cinturón de sargazo del Atlántico" (*The Great Atlantic Sargassum Belt)*[496]. Los efectos del cambio climático pueden magnificar la proliferación y consecuencias de estas acumulaciones[497].

4.8.2. Erosión costera

La erosión costera es un proceso natural que se transforma en un problema cuando los materiales sedimentarios producidos por eventos naturales y antropogénicos no regresan a la franja costera, especialmente playas. Eventos naturales como los huracanes, las marejadas asociadas a sistemas ciclónicos diversos, marejadas invernales, descargas de ríos y la presencia de cañones submarinos tienen la capacidad de mover fuera del sistema costero grandes cantidades de sedimentos que alimentan las playas. Las

---

[489] William J. Hernández, Julio M. Morell & Roy A. Armstrong. 2022. "Using high-resolution satellite imagery to assess the impact of *Sargassum* inundation on coastal areas." *Remote Sensing Letters*, 13:1, 24-34, DOI: https://doi.org/10.1080/2150704X.2021.1981558.

[490] Para la Naturaleza. (2021). La NASA otorga subvención al RUM para investigar sargazo con tecnología satelital. Retrieved April 6, 2023, from https://www.paralanaturaleza.org/la-nasa-otorga-subvencion-al-rum-para-investigar-sargazo-con-tecnologia-satelital/.

[491] Comunicación personal Áurea E. Rodríguez, 2023.

[492] NOAA Atlantic Oceanographic and Meteorological Laboratory-AOML. Communications (2021, August 16). Chasing *sargassum*: New insights on coastal *Sargassum* invasions. NOAA's Atlantic Oceanographic and Meteorological Laboratory. Retrieved April 10, 2023, from https://www.aoml.noaa.gov/chasing-sargassum/.

[493] Ricardou, F.-X. (2022, March 29). "The sargaboat, a solution to clean up the massive arrival of *Sargassum*." *Boating* Culture, BoatsNews.com. Retrieved April 6, 2023, from https://www.boatsnews.com/story/39832/the-sargaboat-a-solution-to-clean-up-the-massive-arrival-of-sargassum.

[494] Véase el *Protocolo para el manejo de acumulaciones extremas de sargazo en las costas de Puerto Rico, 2023*: https://www.drna.pr.gov/documentos/protocolo-sargazo-drna-2023/.

[495] León-Pérez et al., 2023.

[496] Smallman, D. (2022). What is the Great *Sargassum* Belt? Seaweed Generation. Retrieved April 6, 2023, from https://www.seaweedgeneration.com/education/what-is-the-great-sargassum-belt.html.

[497] Rafael Aquino, Carlos Noriega, Angela Mascarenhas, Mauricio Costa, Sury Monteiro, Leandro Santana, Iranilson Silva, Yuri Prestes, Moacyr Araujo, Marcelo Rollnic, "Possible Amazonian contribution to *Sargassum* enhancement on the Amazon Continental Shelf." *Science of The Total Environment*, Volume 853, 2022, 158432, ISSN 0048-9697, https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158432.

actividades antropogénicas asociadas al cambio de uso de terrenos, descargas de sedimentos suspendidos y la presencia de estructuras rígidas, entre otros, afectan también la estabilidad del sistema costero. La pérdida de los servicios de las barreras naturales es uno de los eventos que se identifica como causa de erosión en playas y costas elevadas. Estudios realizados por CoRePI, adscrito a la Escuela Graduada de Planificación de la UPR, Recinto de Río Piedras, indican que la isla presentó eventos de erosión y acreción de diversas magnitudes (baja, moderada y alta) a lo largo de las diversas playas entre los años 2017 y 2018[498] . De 29,895 transectos de ancho de playa medidos a lo largo de la franja costera, se encontró que el 42 % de estas localidades presentó algún tipo de erosión y el 58 % presentó ganancia de ancho de playa, inmediatamente luego del paso del huracán María. A diez meses del huracán, en julio 2018, se identificó que el 60 % de los 29,895 transectos estudiados presentaron acreción y el 40 % erosión. Es importante señalar que parte de la acreción o ganancia de ancho de playa identificada se produce por: 1) ganancia de ancho de playa por depósitos nuevos (*overwash*; depósitos ribereños); y 2) ganancia de ancho de playa por la migración de la línea de agua y la parte detrás de la playa hacia tierra adentro. En muchos casos, la migración de la playa hacia tierra adentro ocurrió en zonas donde no había estructuras duras, lo cual permitió la movilidad de los sedimentos tierra adentro. Esta movilidad de depósitos de sedimentos costeros tierra adentro no se observó en las secciones de costas playeras donde había presencia de estructuras duras ubicadas en la línea de agua o áreas cercanas.

Entre los municipios que presentaron mayor problema de erosión en secciones de playas para septiembre del 2017 están: Vieques, Arecibo, Loíza, Isabela, Culebra, Luquillo, Ponce, Hatillo, Cabo Rojo, Manatí, Patillas y Santa Isabel. Este aumento en erosión se relaciona con variables naturales y antropogénicas como son la ocurrencia de marejadas asociadas a eventos extratropicales y frentes de frío, aumento del nivel del mar, deterioro de las barreras naturales por la alta sedimentación transportada por los ríos, cambios en la ordenación y uso del terreno e instalaciones de estructuras rígidas en la línea costera. El huracán María provocó que la mayoría de las playas perdieran elevación y se redujera el ancho de playa en secciones costeras del noroeste, norte-central y sureste[499]. Los cambios morfológicos costeros ocurrieron mayormente por la combinación del evento de la marejada ciclónica (nivel de inundación de 1.8 a 2.74 m al este), el estado de marea alta y el oleaje asociado al huracán (1.5 a 6.0 metros de altura)[500]. Este impacto incrementó en zonas costeras afectadas por actividades antropogénicas. A un año del paso del huracán, varias secciones de playas experimentaron erosión. La mayor erosión se detectó en secciones de las costas de Vieques, Culebra, Isabela, Loíza, Luquillo, Patillas, Humacao, Dorado, Ponce y Yabucoa. Para este período, fue la primera vez que se identificó un evento de erosión importante en el sur y sureste, específicamente en Santa Isabel, Guayama y Patillas. Este evento pudiera estar relacionado con la pérdida de barreras naturales como mangles, hierbas marinas y arrecifes en la zona luego del paso del huracán María.

[498] Barreto Orta, 2022.
[499] Barreto Orta, M., Méndez-Tejeda, R., Rodríguez, E., Cabrera, N., Díaz, E., Pérez, K. 2019. “State of the beaches in Puerto Rico after Hurricane Maria (2017).” *Shore and Beach*, V. 87, N.1, p. 16-23.
[500] National Weather Service, 2017.

Uno de los hallazgos más relevantes sobre el estado de las playas que se identifica es la migración de la línea de costa y unidades de playas tierra adentro en varias secciones costeras. Aproximadamente 99 kms de línea de costa presenta migración tierra adentro a lo largo de los 44 municipios costeros. Los municipios con mayor migración de línea de costa tierra adentro son Vieques (19 kms), Cabo Rojo (5.3 kms), Arecibo (4.8 kms), Humacao (4.4 kms), Isabela (3.5 kms), Vega Baja (3.5 kms), Fajardo (3,3 kms), Luquillo (2.9 kms), Loíza (2.6 kms) y Hatillo (2.6 kms). La implicación del movimiento de línea de agua tierra adentro es el aumento de exposición de la zona costera a inundaciones ante nuevos eventos. Por otro lado, aproximadamente 58 kms de costa presentan migración de playas tierra adentro. La migración de playa consiste en el movimiento tierra adentro de la unidad geomórfica de la playa a partir del desplazamiento de la línea de costa y parte detrás de la playa. Los municipios incluidos en este estudio que presentaron mayor migración de playas para dicho período son: Vieques, Humacao, Hatillo, Mayagüez, Aguada, Arecibo, Camuy e Isabela. El movimiento de playa tierra adentro podría delinear una nueva delimitación de la ZMT.

Además, se identificó erosión en secciones de playas adyacentes a estructuras rígidas en la mayoría de los municipios. Muchas de estas son estructuras de mitigación como rocas, gaviones y paredes de concreto. Esto sugiere que las estructuras rígidas identificadas a lo largo de la línea de costa de las áreas de estudio podrían tener un impacto o control en los procesos de erosión/acreción de las playas. Los municipios con más estructuras rígidas de mitigación en sus franjas de costas para el 2018 eran: San Juan (64%), Rincón (33 %), Humacao (32 %), Aguadilla (18 %) y Arecibo (13 %).

Otros atributos importantes de la línea costera identificados para la isla son la ubicación de estructuras en la parte detrás de la playa (50.89 km), estructuras ubicadas en la línea de agua (199.01 km) y estructuras de mitigación duras (47.53 km). Las estructuras duras de mitigación identificadas mayormente en la línea de agua son las estructuras de rocas (*rip-raps*/35.33 km de la costa) y las paredes de concreto (7.40 km). No hay duda de que el conocer en detalle el estado de erosión costera y los atributos costero es vital para identificar las prioridades para atender este problema, especialmente en comunidades con alta vulnerabilidad social que en muchos casos han estado en la invisibilidad por años.

4.8.3. Inundaciones costeras

Puerto Rico está expuesto a eventos de inundaciones costeras que tienen la capacidad de impactar la seguridad de la población e infraestructura que se ubica en la franja costera. Estas inundaciones pueden ser producidas por marejadas asociadas a sistemas ciclónicos como tormentas tropicales y huracanes, marejadas de invierno y marejada ciclónica, entre otros. Diversos estudios anticipan que el alcance de las inundaciones costeras empeorará por el cambio climático[501] [502]. El aumento del nivel del mar puede

[501] Storlazzi, C.D., Reguero, B.G., Viehman, T.S., Cumming, K.A., Cole, A.D., Shope, J.A., Groves, S.H., Gaido L., C., Nickel, B.A., and Beck, M.W., 2021, *Rigorously valuing the impact of Hurricanes Irma and Maria on coastal hazard risks in Florida and Puerto Rico*: U.S. Geological Survey Open-File Report 2021–1056, 29 p. https://doi.org/10.3133/ofr20211056.

[502] Collini, R.C., J. Carter, L. Auermuller, L. Engeman, K. Hintzen, J. Gambill, R.E. Johnson, I. Miller, C.

elevar la magnitud y frecuencia de las inundaciones costeras causando daños mayores en menos tiempo. Los efectos de la ocurrencia de estos nuevos eventos deben ocupar a los tomadores de decisiones en generar estrategias proactivas que ayuden a reducir la exposición de la población y la infraestructura en el presente.

Además, el impacto de las inundaciones costeras puede incrementar cuando se reduce la capacidad y el servicio de amortiguación que ofrecen las barreras naturales costeras como los arrecifes de coral, depósitos de arenas, playas y dunas en la costa. Por ejemplo, recientemente, el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) indicó que los arrecifes de coral son una de las primeras líneas de defensa de la costa ante el impacto de marejadas relacionadas con sistemas ciclónicos. Estas tienen la capacidad de disipar la energía de la ola hasta un 97 %[503]. Se muestra que la degradación de los arrecifes de coral puede traer consecuencias importantes sobre la integridad de la población e infraestructura. También se indica que el daño en los arrecifes de coral producidos por los huracanes Irma y María aumentó el riesgo por inundación anual, por $178 millones anuales para Puerto Rico. De acuerdo con este estudio, las secciones de costas donde pueden ocurrir los daños mayores al aumentar el riesgo anual de inundaciones debido al impacto de los arrecifes de coral causado por los huracanes Irma y María se localizan en la costa de San Juan-Carolina, Mayagüez, Aguadilla, Rincón, Guayanilla y Arecibo-Hatillo.

El USGS tiene una herramienta cartográfica donde presenta los resultados del modelaje de alcance de inundación en escenarios antes y después de ambos huracanes en escenario de daños de los arrecifes de coral[504]. Los resultados de este modelo demuestran que, en muchas áreas de la isla, el alcance de la inundación costera proyectado es mayor en condiciones de deterioro de los arrecifes de coral luego del huracán. San Juan, Carolina, Añasco, Mayagüez, Salinas, Vega Baja, Vega Alta y Manatí son algunos de los municipios que presentan secciones de costas donde podría haber mayor alcance de inundaciones en eventos futuros debido al deterioro de los arrecifes de coral luego del paso de los huracanes del 2017.

Por otro lado, los estudios de Storlazzi et al. (2021) presentan proyecciones de reducción de inundaciones costeras a medida que se restauren los arrecifes de coral que fueron afectados por los huracanes. Se indica que, a través de la restauración de corales, Puerto Rico puede prevenir más de $40 millones en daños en la costa por inundaciones.

Otros componentes que hay que evaluar cuando se habla de los impactos de las inundaciones costeras es el efecto cascada y acumulativo de estos eventos. El continuo impacto de las inundaciones sobre la franja costera reduce el umbral geomórfico de tal modo que eventos de inundaciones de menor magnitud y mayor frecuencia podrían producir daños en la infraestructura similar a eventos de mayor magnitud. También hay que considerar el impacto de eventos co-sísmicos asociados al terremoto de enero del 2020

Schafer, and H. Stiller. 2022. *Application Guide for the 2022 Sea Level Rise Technical Report*. National Oceanic and Atmospheric Administration Office for Coastal Management, Mississippi–Alabama Sea Grant Consortium (MASGP-22-028), and Florida Sea Grant (SGEB 88). https://www.cakex.org/documents/application-guide-2022-sea-level-rise-technical-report.

503 Storlazzi et al., 2021.

504 Cumming et al., 2021.

y modificaciones del territorio sobre el alcance de inundaciones ante nuevos eventos. El hundimiento del terreno luego de la ocurrencia del terremoto de 2020 podría influenciar sobre el alcance de inundación en secciones costeras[505]. La NOAA desarrolla continuamente herramientas cartográficas consultivas que ayuden a visualizar el alcance de inundaciones costeras que permitan planificar y hacer preparaciones ante nuevos eventos, especialmente ante las manifestaciones del cambio climático[506].

4.9. Ecosistemas terrestres

4.9.1. Impacto del cambio climático: Ecosistemas y biodiversidad

El informe más reciente sobre el índice de reducción de especies a nivel mundial[507] establece que, desde el 1970, las poblaciones de mamíferos, aves, peces, reptiles y anfibios han disminuido en un 68 % en promedio a escala global. La región del Caribe y América Latina es la de mayor pérdida con un 94 %. Este índice monitorea casi 21,000 poblaciones que representan a 4,392 especies de vertebrados. En cuanto a la diversidad vegetal, el informe indica que el número documentado de plantas extintas es el doble que la de los mamíferos, aves y anfibios juntos. Una muestra de miles de especies representativas de la variedad taxonómica y geográfica de la biodiversidad vegetal global muestra que una de cada cinco especies (22 %) está en amenaza de extinción, la mayoría en zonas tropicales[508]. Esto es de gran preocupación, ya que estos organismos representan la base productora de los ecosistemas terrestres y, por consiguiente, tiene efectos directos en la productividad, funcionamiento y servicios ecosistémicos.

Las principales causas para la degradación de ecosistemas y la pérdida de biodiversidad incluyen prácticas insostenibles sumadas a los efectos del cambio climático sobre la estructura y funcionamiento de los ecosistemas. Esta combinación promueve la fragmentación del hábitat y variaciones en los condicionantes abióticos de los ecosistemas, tales como: la temperatura ambiental, patrones de precipitación, disponibilidad de agua y composición edáfica, entre otros[509] [510] [511]. Los cambios en los usos de la tierra, la modificación de patrones hidrológicos, el efecto de contaminantes, entre otros, exacerban

[505] Pérez-Valentín, K.; Barreto-Orta, M.; Castro, A.; Montañez-Acuña, A. and Cabrera-Valentín, N. 2021. "Revealing geomorphic changes after the occurrence of a seismic event on the south coast of Puerto Rico." *Shore and Beach*. Vol. 89, No. 1, Winter 2021.

[506] Véase: https://coast.noaa.gov/digitalcoast/stories/cfem-pr.html.

[507] WWF (2020). Informe Planeta Vivo 2020: Revertir la curva de la pérdida de biodiversidad. Resumen. Almond, R.E.A., Grooten M. y Petersen, T. (Eds). WWF, Gland, Suiza.

[508] WWW, 2020.

[509] Mitsch, W.J. & J.G. Gosselink (2000). *Wetlands,* 3rd ed. John Wiley & Sons, New York, 2000, NRCS. National Resource Inventory: Background and Highlights. USDA-NRCS, Washington, D.C.

[510] Feng, X., Uriarte, M., González, G., Reed, S., Thompson, J., Zimmerman, J. K., & Murphy, L. (2018). Improving predictions of tropical forest response to climate change through integration of field studies and ecosystem modeling. *Global change biology, 24*(1), 213-232. https://doi.org/10.1111/gcb.13863.

[511] Farber S., Costanza R., Childers D., Erickson J. & Gross K., et. al, (2006). "Linking Ecology and Economics for Ecosystem Management." *BioScience*, 56,2,121-133.*San Juan, Puerto Rico. Herndon, VA: American Water Resources Association: 193-198.*

los efectos del cambio climático sobre los ecosistemas terrestres[512] [513] [514]. En Puerto Rico, la historia de usos de la tierra ha demostrado que la actividad agrícola, el desarrollo industrial y la expansión urbana han promovido alteraciones en las condiciones ambientales de los ecosistemas, la fragmentación de los hábitats y la deforestación de extensas áreas de bosques[515]. Estos impactos sumados a los efectos del cambio climático promueven procesos de retroalimentación que afectan directamente la estructura y función de los ecosistemas terrestres[516]. En áreas costeras de Puerto Rico, donde la expansión urbana es mayor, el incremento en las temperaturas entre 1.8 a 3.6 ºF por la influencia de estructuras urbanas induce cambios en los patrones de precipitación y temperatura en ecosistemas circundantes y de mayor elevación, generando a su vez modificaciones en las dinámicas hidrológicas, cambios en la estructura y composición de los suelos y alteraciones en la distribución de las especies[517].

Ecológicamente, la estructura y el funcionamiento de los ecosistemas está determinada por la influencia del clima, su dinámica hidrológica, las características edáficas y geológicas y la diversidad de especies[518] [519] [520]. Las manifestaciones del cambio climático y los escenarios proyectados para la región del Caribe y Puerto Rico, discutidos en el capítulo 3 y en la sección 4.14 de este capítulo, modifican los rangos de temperatura diurna y los patrones de precipitación y fomentan la prevalencia de condiciones secas y el desarrollo de eventos naturales intensos como huracanes, inundaciones e incendios forestales, entre otros[521] [522]. Estudios desarrollados en el Bosque Nacional El Yunque –ecosistema de tipo bosque tropical lluvioso y perteneciente a la red nacional de bosques experi-

[512] Velastegui-Montoya, A., Montalván-Burbano, N., Peña-Villacreses, G., de Lima, A., & Herrera-Franco, G. (2022). "Land Use and Land Cover in Tropical Forest: Global Research." *Forests*, *13*(10), 1709.

[513] Kayitesi, N. M., Guzha, A. C., & Mariethoz, G. (2022). "Impacts of land use land cover change and climate change on river hydro-morphology-a review of research studies in tropical regions." *Journal of Hydrology*, 128702.

[514] Ehrenfeld J.G. (2000). "Evaluating wetlands within an urban context." *Urban Ecosystems*, 4, 69-85.

[515] Seguinot Barbosa, J. (1996). "La ecología urbana de San Juan (una interpretación geográfica- social)". *Anales de Geografía de la Universidad Complutense*, 16,161- 184.Servicio de Publicaciones, Universidad Complutense, Madrid, España.

[516] Campbell, J. L., Driscoll, C. T., Jones, J. A., Boose, E. R., Dugan, H. A., Groffman, P. M., ... & Zimmerman, J. K. (2022). "Forest and freshwater ecosystem responses to climate change and variability at US LTER sites." *BioScience*, *72*(9), 851-870.

[517] Scatena, F. N. (1998). An assessment of climate change in the Luquillo Mountains of Puerto Rico. In: Segarra-García, RI, editor. Proceeding tropical hydrology and Caribbean water resources, Third international symposium on tropical hydrology and Fifth Caribbean Islands water resources congress.

[518] Lambs L., Bompy F., Imbert D., Corenblit D. & Dulormne M. (2015). "Seawater and Freshwater Water Circulations through Coastal Forested Wetlands on a Caribbean Island." *Water*, 7, 4108-4128; doi: 10.3390/w7084108.

[519] Cardona-Olarte, P., Krauss K. & Twilley, R.R. (2014). "Leaf Gas Exchange and Nutrient Use Efficiency Help Explain the Distribution of Two Neotropical Mangroves under Contrasting Flooding and Salinity." *International Journal of Forestry Research*, 2013, 1-10. http://dx.doi.org/10.1155/2013/524625.

[520] Chapin III, F.S., Matson, P.A. & Mooney, H.A. (2002). *Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology*. Springer-Verlag, Stanford, CA.

[521] Campbell et al., 2022.

[522] Van Beusekom, A. E., González, G., & Rivera, M. M. (2023). "Tropical Forest Microclimatic Changes: Hurricane, Drought, and 15–20 Year Climate Trend Effects on Elevational Gradient Temperature and Moisture." *Forests*, *14*(2), 325.

mentales bajo el programa *Long Term Ecological Research* (LTER) del Servicio Forestal Nacional de los Estados Unidos– han demostrado que la disminución de los eventos de lluvia y la prevalencia de períodos secos altera las dinámicas hidrológicas del ecosistema limitándose las entradas de agua dulce y, por consiguiente, la disponibilidad de agua en los suelos[523]. Por su parte, el incremento en las temperaturas promueve condiciones de estrés térmico, cambios en parámetros químico/físicos de los suelos y modificaciones en los gradientes de temperatura y precipitación altitudinal, trayendo como consecuencia alteraciones en la composición y distribución de las especies[524] [525]. Análisis microclimáticos por los pasados 20 años en los que se han considerado eventos extremos del clima –como los huracanes Irma y María y sequías intensas como la ocurrida en el 2015– sugieren que, en efecto, este tipo de ecosistema ha experimentado cambios en sus gradientes ambientales, en sus patrones de precipitación y temperatura y en la disponibilidad de agua en los suelos, promoviendo modificaciones en la composición de las especies, que en muchos casos son únicas de estos hábitats[526].

En ecosistemas de bosque seco y de características cársicas, como el Bosque Seco de Guánica, se ha demostrado la dependencia de la recarga de los acuíferos con los eventos de precipitación y su impacto en las comunidades vegetales. La limitación de los eventos de lluvia tiene un efecto directo en la recarga de los acuíferos, los cuales representan un recurso hídrico importante en estos ecosistemas y para las comunidades vegetales, en especial en las épocas secas[527]. Por lo tanto, la prevalencia de un clima cada vez más seco limita la recarga de acuíferos y genera escenarios de estrés hídrico más intensos sobre los organismos asociados a estos ecosistemas en Puerto Rico[528]. Las tendencias de cambios en nuestros ecosistemas terrestres son evidentes y también incluyen impactos en nuestros sistemas agroforestales y en nuestros ecosistemas marinos y costeros, cuyas tendencias de cambios se abordan en las secciones 4.6 y 4.8 de este capítulo. Por lo tanto, los impactos a la estructura y funcionamiento de estos ecosistemas, las modificaciones en sus condicionantes abióticos y los cambios en la composición de las especies se relacionará directamente con los efectos combinados del cambio climático y las modificaciones del hábitat a consecuencia de la actividad antropogénica.

Como se ha resaltado, el cambio climático modifica las condiciones ambientales a nivel del ecosistema y los condicionantes abióticos, los cuales interaccionan con los diversos organismos (Ilustración 50). Tales modificaciones pueden generar escenarios de estrés ambiental, en especial, sobre aquellas especies que se encuentran amenazadas y en peli-

[523] McDowell, W. H., Leon, M. C., Shattuck, M. D., Potter, J. D., Heartsill-Scalley, T., González, G., ... & Wymore, A. S. (2021). "Luquillo experimental forest: Catchment science in the montane tropics." *Hydrological processes*, *35*(4), e14146.

[524] Willig, M. R., Presley, S. J., Bloch, C. P., Castro-Arellano, I., Cisneros, L. M., Higgins, C. L., & Klingbeil, B. T. (2011). "Tropical metacommunities along elevational gradients: effects of forest type and other environmental factors." *Oikos*, *120*(10), 1497-1508.

[525] Scatena,1998.

[526] Van Beusekom et al., 2023.

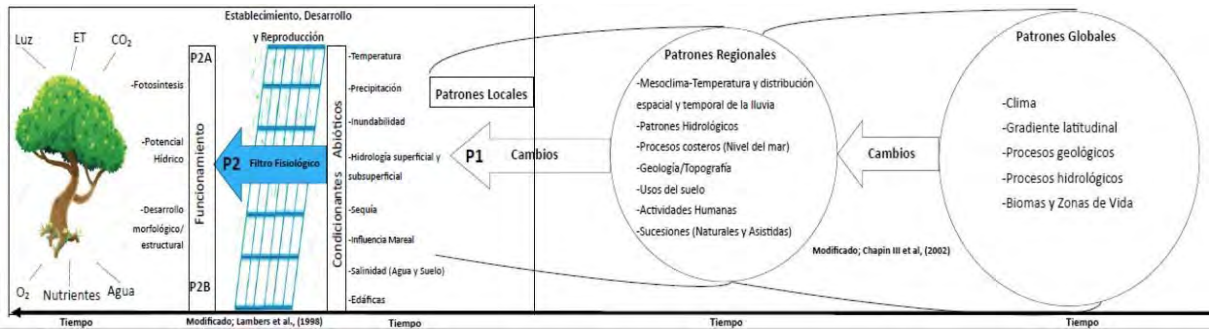
[527] Govender, Y., Cuevas, E., Sternberg, L. D. S., & Jury, M. R. (2013). "Temporal variation in stable isotopic composition of rainfall and groundwater in a tropical dry forest in the northeastern Caribbean." *Earth Interactions*, *17*(27), 1-20.

[528] Govender et al., 2023.

gro de extinción[529] [530]. Considerando este aspecto ecológico, el incremento de condiciones estresantes afecta la tolerancia y la capacidad de aclimatación de los organismos, su fisiología y el comportamiento del individuo durante sus fases de crecimiento, reproducción y establecimiento en el hábitat[531] [532]. La tolerancia de un organismo se refiere a la resistencia que puede presentar un individuo a condiciones estresantes al mantener su funcionamiento fisiológico[533] [534]. Por lo tanto, la tolerancia que presenta un organismo determina el rango de condiciones ambientales en el cual el mismo puede persistir y sobrevivir. En este aspecto, científicos han encontrado que el aumento en las temperaturas del ambiente modifica el tamaño corporal de nuestros coquíes y por consiguiente el tono del canto de estos organismos[535]. Los anfibios muestran una gran sensibilidad a cambios en temperatura y humedad y una forma de tolerar y aclimatarse a estas condiciones es modificando su tamaño corporal, lo cual repercute en la forma en como cantan[536]. Como medida de adaptación y resiliencia al cambio climático es importante fomentar el desarrollo de estudios que se enfoquen en determinar cómo los cambios ambientales que experimentan nuestros ecosistemas afectan la tolerancia de nuestras especies y su sobrevivencia.

Ilustración 50.

Modelo conceptual que relaciona la estabilidad y sobrevivencia de un organismo en función de condicionantes abióticos a nivel de ecosistema



Estos condicionantes abióticos se modifican a su vez por cambios que se generan en los patrones climáticos a escala regional y global (Rivera-De Jesús & Rivera-Ocasio, 2022).

[529] Rivera-De Jesús, W.O. & Rivera-Ocasio, E. (2022). "Tolerance and recuperation capacity of tropical native tree species to hydric and saline stress: An experimental approach for wetlands rehabilitation." *Wetland Science & Practices*. *40*(1), 51-59.

[530] Lambs et al, 2015.

[531] Schaefer, H. C., Jetz, W., & Böhning-Gaese, K. (2008). "Impact of climate change on migratory birds: community reassembly versus adaptation." *Global Ecology and Biogeography, 17*(1), 38-49.

[532] Scatena, 1998.

[533] Lambers H., Stuart-Chapin III F. & Pons T.L. (2008). *Plant Physiological Ecology*. 2nd ed. Springer-Sciences. New York, N.Y.

[534] Osmond C.B, et al., (1987). "Stress Physiology and the Distribution of Plants." *BioScience*, *37*(1),38-48.

[535] Narins, P. M., & Meenderink, S. W. (2014). "Climate change and frog calls: long-term correlations along a tropical altitudinal gradient." *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, *281*(1783), 20140401.

[536] Ídem.

La zona del Caribe es una de las regiones del mundo particularmente vulnerable a las amenazas del cambio climático por la alta riqueza de su biodiversidad y por el nivel de endemismos que posee[537]. Puerto Rico se destaca por su gran variedad de ecosistemas terrestres con características ambientales únicas, que alberga una alta diversidad de especies de flora y fauna endémica y nativa. Puerto Rico está en el epicentro (*hotspot*) de biodiversidad del Caribe[538], región reconocida internacionalmente por su alta riqueza de especies y tasa de endemismo. La isla cuenta con una diversidad vegetal que incluye cerca de 3,126 especies de plantas con semillas y es el hábitat de 426 especies de vertebrados terrestres, incluyendo 360 especies nativas, muchas de ellas endémicas de la isla o de la región del Caribe[539] [540]. En cuanto a ecosistemas, se pueden destacar los bosques lluviosos, húmedos y secos, ecosistemas marinos/costeros, humedales, ecosistemas asociados a las zonas del karso (cuevas, acuíferos y mogotes, entre otros), ecosistemas de agua dulce asociados a cuencas hidrográficas y arrecifes de coral[541] [542]. Considerando que los modelos de cambio climático para la región del Caribe y Puerto Rico establecen un aumento acelerado en el nivel del mar, períodos más frecuentes y prolongados de sequía, y cambios en la intensidad, frecuencia y distribución de los eventos de lluvia, urge conocer cómo las condiciones ambientales en nuestros ecosistemas terrestres están cambiando y qué impacto ejercen estas modificaciones sobre nuestra biodiversidad. También, es importante evaluar cómo las modificaciones ambientales en nuestros hábitats y ecosistemas favorecen la colonización y expansión de especies exóticas que invaden nichos importantes de la flora y fauna autóctona trayendo como consecuencia su desplazamiento o, por otro lado, cómo algunas de estas especies –como es el caso del Tulipán africano (*Spathodea campanulata*)– mejoran la calidad de los hábitats promoviendo la expansión de muchas de nuestras especies de flora y fauna y la expansión de bosques. Estudios sobre los impactos de las especies exóticas en las islas del Caribe han demostrado que los cambios en las temperaturas del ambiente fomentan la expansión de estas especies una vez son introducidas a la flora y fauna local, provocando alteraciones en las estructuras tróficas de los ecosistemas, reducciones en las especies nativas y hasta impactos a las cosechas que generan pérdidas económi-

[537] Sekercioglu, Ç.H., Primack, R.B., & Wormworth, J., (2012), "The effects of climate change on tropical birds." *Biological Conservation*, 148(1), 1-18.

[538] Myers, N., Mittermeier, R. A., Mittermeier, C. G., Da Fonseca, G. A., & Kent, J. (2000). "Biodiversity hotspots for conservation priorities." *Nature*, *403*(6772), 853-858.

[539] Joglar, R. (2005). *Biodiversidad de Puerto Rico: Vertebrados Terrestres y Ecosistemas*. Serie de Historia Natural. San Juan, PR, EE.UU.: Editorial Instituto de Cultura Puertorriqueña. 563 p.

[540] Gould, W.; Alarcón, C.; Fevold, B.; Jiménez, M.; Martinuzzi, S.; Potts, G.; Quiñones, M.; Solórzano, M.; Ventosa, E. (2008). The Puerto Rico Gap Analysis Project Volume 1: Land cover, vertebrate-species distributions, and land stewardship. General Technical Report. Río Piedras, PR: International Institute of Tropical Forestry, U.S. Forest Service-Department of Agriculture, USA. 39 p.

[541] Castro-Prieto, Jessica; Gould, William A.; Ortiz-Maldonado, Coralys; Soto-Bayó, Sandra; Llerandi- Román, Ivan, Gaztambide-Arandes, Soledad; Quiñones, Maya; Cañón, Marcela; Jacobs, Kasey R. (2019). Inventario detallado de áreas protegidas y otros mecanismos de conservación en Puerto Rico. Gen. Tech. Report IITF-GTR-50. San Juan, PR: Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, Servicio Forestal, Instituto Internacional de Dasonomía Tropical.

[542] Miller, G. & Lugo, A. (2009). Guide to the Ecological Systems of Puerto Rico, U.S. Department of Agriculture, Forest Service. General Technical Report IITF-GTR-35.

cas importantes[543] [544]. Considerando estos aspectos, es necesario desarrollar estudios y monitoreos ambientales actualizados para evaluar parámetros poblacionales en las especies, las variaciones en condiciones abióticas de los ecosistemas y el impacto de estos cambios en la diversidad de especies de flora y fauna, principalmente en las especies vulnerables.

4.9.1.1 Importancia de la biodiversidad

La biodiversidad promueve la estabilidad y funcionamiento de los ecosistemas, y provee, a su vez, bienes necesarios como alimento, agua y oxígeno. Este importante recurso proporciona materias primas que favorecen el desarrollo económico, fuentes de energía que se utilizan como combustible y paisajes que se pueden disfrutar como bien cultural y patrimonial. Por ejemplo, el desarrollo de fármacos cuenta con una gama de productos de origen natural. Además, un amplio sector de la población utiliza plantas locales como forma principal de medicación[545]. Cerca del 40 % de la actividad económica mundial y el 80 % de las provisiones para atender las necesidades en comunidades pobres se derivan directamente de recursos asociados a la biodiversidad. Por esto también, la conservación de las especies y de los ecosistemas es tan importante pues contribuye a la seguridad alimentaria, la lucha contra el hambre, la pobreza y la desigualdad social, elementos claves de la justicia climática. A consecuencia de la pérdida de biodiversidad, la organización *Conservation International* (2018) advierte que las industrias de alimento, comercio forestal y ecoturísticas podrían perder cerca de $338,000 millones anuales a consecuencia de la pérdida de biodiversidad.

Tomando en consideración estos aspectos, los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Organización de las Naciones Unidas incluyen atender la pérdida de la biodiversidad mediante proyectos de rehabilitación enfocados en el manejo eficiente de los recursos naturales, combatir las amenazas del cambio climático, conservar la diversidad biológica y proteger los ecosistemas críticos. El desarrollo sostenible contempla el crecimiento económico y social que permite hacer frente a las necesidades del presente sin poner en peligro la capacidad de los recursos que nos provee la naturaleza a corto y largo plazo[546]. Desarrollar un balance entre elementos sociales, económicos y ambientales es el reto que nos impone la sostenibilidad. Considerando estos objetivos, las propuestas para la conservación de los ecosistemas y de las especies deben incluir metas para atender la desigualdad social, erradicar la pobreza, promover la producción y consumo responsable y atender la vida en los ecosistemas terrestres y marinos. Cabe resaltar que la restauración y rehabilitación efectiva de ecosistemas y de su biodiversidad pre-

[543] Graham, N. A. J., Wilson, S. K., Carr, P., Hoey, A. S., Jennings, S., & MacNeil, M. A. (2018). “Seabirds enhance coral reef productivity and functioning in the absence of invasive rats.” *Nature*, 559, 250–253.

[544] Bodey, T. W., Angulo, E., Bang, A., Bellard, C., Fantle-Lepczyk, J., Lenzner, B., & Courchamp, F. (2023). “Economic costs of protecting islands from invasive alien species.” *Conservation Biology*, *37*(2), e14034.

[545] Martín-López B., González J.A., Díaz S., Castro I. & García-Llorente M. (2007). “Biodiversidad y bienestar humano: el papel de la diversidad funcional”. *Ecosistemas*, *16*(3), 69-80.

[546] Brundtland, G. (1987). Informe: Nuestro futuro común. Comisión Mundial sobre Medio Ambiente y Desarrollo: Asamblea #83 de las Naciones Unidas.

senta grandes retos, ya que las condiciones climáticas actuales establecen una nueva realidad ecológica que puede complicar la efectividad de estas iniciativas.

4.9.2. Especies amenazadas y en peligro de extinción en Puerto Rico

En Puerto Rico, la Ley de Vida Silvestre (Ley 241-1999) habilita al DRNA para aplicar los mecanismos en ley con el propósito de proteger, conservar y fomentar las especies de vida silvestre tanto nativas como migratorias de Puerto Rico, entre otras disposiciones. La ley define las especies vulnerables o en peligro de extinción como aquellas cuyos números poblacionales son tales que a juicio del secretario(a) del DRNA requieren especial atención para asegurar su perpetuación en el tiempo y en el espacio físico donde existen y que se designen las mismas mediante reglamento.

A tales efectos, el reglamento DRNA 6766 –Reglamento para regir las especies vulnerables y en peligro de extinción en el Estado Libre Asociado de Puerto Rico– establece los mecanismos para designar una especie como vulnerable y/o en peligro de extinción, establecer los criterios para la designación de hábitat crítico, regular el manejo de estas especies, establecer planes de recuperación, procesos para la adquisición de hábitat y, a su vez, proveer una lista de especies en peligro de extinción y de hábitats críticos. El reglamento expone criterios cuantitativos tomando en cuenta la reducción en la densidad poblacional de la especie, mediante observación directa e inferida o al aplicar índices de abundancia en un rango de tiempo de 10 años o más. Según los datos de abundancia o de densidad poblacional disponibles, se establecen las siguientes categorías para clasificar las especies como: en Peligro crítico (CR-80 % en reducción poblacional), especie En peligro (EN-50 % en reducción), Vulnerable (VU-20 % en reducción), En menor riesgo (LR-No se encuentra en los porcentajes previamente designados) o Deficiencia de datos (DD-Cuando no hay datos para descartar las categorías anteriores).

A base del marco legal antes expuesto y los criterios para la designación y clasificación de especies de flora y fauna en peligro de extinción, el estatuto federal y el Reglamento 6766 establecen que se deberá presentar una lista general actualizada cada cinco años sobre el estado de estas especies con sus áreas de distribución, bajo la jurisdicción de Puerto Rico. También, se debe incluir información disponible o la necesidad de información sobre el estado poblacional de estas especies con el propósito de tener un perfil o estado de situación actualizado y establecer recomendaciones para el manejo efectivo de las mismas. La lista existente expone datos estimados de abundancia poblacional, pero no detalla la fuente de estos datos correspondientes a tasas de sobrevivencia o mortalidad por estadios de vida ni autores que proporcionen tales datos. En resumen, están enlistadas 133 especies de flora y fauna y 5 especies con designación de hábitat crítico. De las especies de animales enlistadas, las siguientes, excluyendo peces, están bajo las categorías de crítico, en peligro y vulnerables*:* 2 especies de mamíferos marinos, 2 especies de mamíferos terrestres, 17 especies de aves, 12 especies de reptiles, 8 especies de anfibios y 4 especies de invertebrados para un total de 45 especies de animales (Tabla 14).

Tabla 14.

Especies de fauna: Lista estatal, según el Reglamento DRNA-6766 (2004)

Grupo animal	Cantidad de especies	Categoría
Mamíferos marinos (ballena jorobada y manatí antillano)	2	1 - Vulnerable 1 - En peligro
Mamíferos terrestres (murciélagos)	6	2 - Vulnerables 1 - Menor riesgo 3 - Deficiencia de datos
Aves	27	7 - Críticas 5 - En peligro 5 - Vulnerables 1 - Menor riesgo 9 - Deficiencia de datos
Reptiles	17	3 - Críticas 6 - En peligro 3 - Vulnerables 5 - Deficiencia de datos
Anfibios	9	4 - Críticas 4 - Vulnerables 1 - Deficiencia de datos
Invertebrados (terrestres y acuáticos), principalmente especies del Filo Artrópoda (jueyes, langostas y camarones)	20	3 - Críticas 1 - Vulnerables 8 - Menor riesgo 8 - Deficiencia de datos

En cuanto a las especies de flora (arbóreas y herbáceas), cabe resaltar que todas las especies enlistadas están bajo las categorías de crítico, en peligro y vulnerables con un total de 48 especies de plantas (Tabla 15).

Tabla 15.

Especies de flora: Lista estatal, según el reglamento DRNA-6766 (2004)

Grupo	Cantidad de especies	clasificación
Arbóreas y herbáceas	48	30 - Críticas 15 - En peligro 3 - Vulnerables

Bajo la jurisdicción federal, la Ley de Especies en Peligro de Extinción (ESA, 1974) define una especie en peligro como aquella que presenta peligro de extinción en su totalidad o en una porción significativa de su área de distribución, excluyendo a organismos de la clase Insecta. Se determina que una especie está amenazada o en peligro de extinción cuando se cumple con alguno de los siguientes criterios:

a. Por la destrucción, modificación del hábitat o disminución del área de distribución de la especie.
b. La sobreexplotación o utilización de la especie para propósitos comerciales, recreacionales o científicos.
c. Reducción de la especie por enfermedades o depredación.
d. La falta de mecanismos reguladores existentes u otros factores naturales o artificiales que afecten la existencia continua de la especie.

Las disposiciones de esta ley aplican a los estados y territorios de Estados Unidos y faculta al Servicio de Pesca y Vida Silvestre (USFWS, por sus siglas en inglés) para aplicar los mecanismos legales para su cumplimiento. Por regulación, se le requiere al USFWS actualizar cada cinco años las listas de especies amenazadas y en peligro de extinción con la información científica disponible y sus áreas de distribución en los estados y territorios bajo la jurisdicción federal. Para estas listas se aplican las siguientes clasificaciones basadas en las definiciones expuestas en la ley y en función de los datos poblacionales disponibles: Amenazada, En peligro de extinción, Excluida de la lista por recuperación y Propuesta en peligro.

En Puerto Rico, el USFWS ha designado cerca de 87 especies de animales y plantas como especies amenazadas o en peligro de extinción. Bajo la ley ESA se requiere que el secretario(a) del Interior y/o de Comercio (según la especie) designe un hábitat crítico federal. En la actualidad, hay 18 especies de plantas y animales bajo ESA con hábitats críticos designados en Puerto Rico. En la lista federal, el USFWS debe revisar el estatus

de las especies de flora y fauna enlistadas como amenazadas y en peligro de extinción. La última actualización se hizo en el 2020. A diferencia de la lista estatal, la federal no contempla especies de mamíferos terrestres (murciélagos) y solo expone al manatí antillano como la única especie de mamífero marino bajo la categoría de peligro de extinción. En la lista federal actual tenemos las siguientes especies de animales bajo la categoría de Peligro, Amenazadas y Propuestas en peligro: 1 especie de mamífero, 12 especies de aves, 10 especies de reptiles, 4 especies de anfibios y 1 especie de invertebrado (Mariposa arlequín) propuesta para enlistar. En total son 28 especies de animales (Tabla 16).

Tabla 16.

Especies de fauna en la lista federal del USFWS (2020)

Grupo animal	Cantidad de especies	Clasificación
Mamíferos (Manatí antillano)	1	1 - En peligro
Aves	13	7 - En peligro 4 - Amenazadas 1 - Propuesta en peligro 1 - Recuperada
Reptiles	17	6 - En peligro 4 - Amenazadas 1 – Recuperada
Anfibios	4	1 - En peligro 3 - Amenazadas
Invertebrados (Mariposa arlequín de Puerto Rico)	1	1 - Propuesta amenazada

Publicada en https://www.fws.gov/office/caribbean-ecological-services/species.

En cuanto a las especies de flora, la lista federal las agrupa como Arbóreas, Helechos, Cactáceas, Orquídeas y Herbáceas. Bajo las categorías de peligro, amenazadas y propuestas en peligro, la lista expone 52 especies y 1 propuesta en peligro (*Salanum conocarpum* - Marrón bacora) para un total de 53 especies de plantas bajo estas categorías (Tabla 17). Al igual que en la lista estatal, todas las especies de plantas están bajo categorías que implican una mayor atención a su estado poblacional.

Tabla 17.

Especies de flora en la lista federal del USFWS (2020)

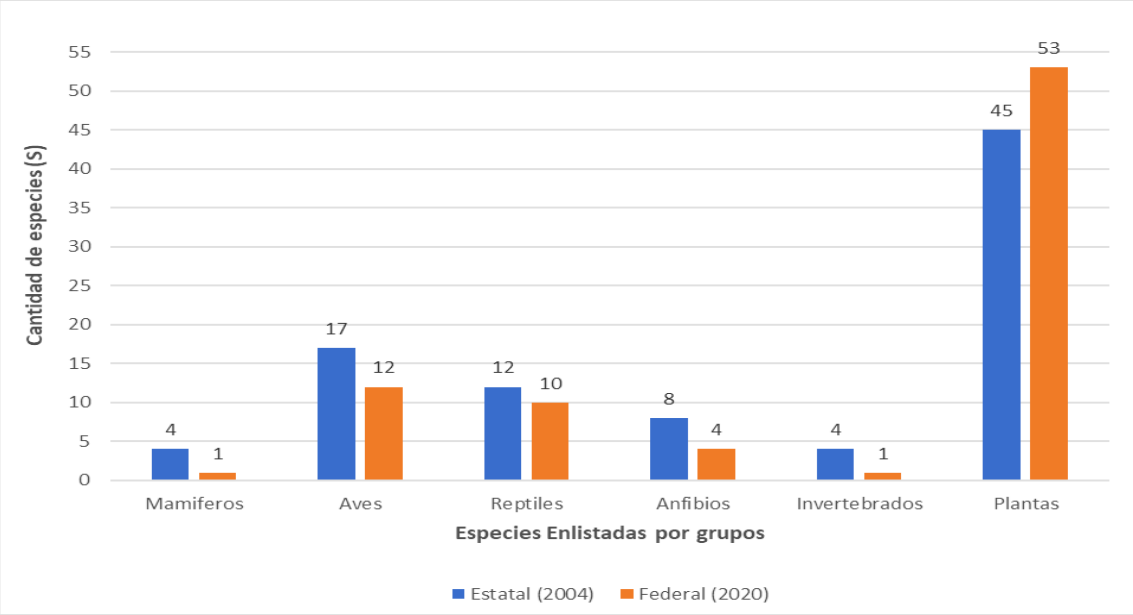
Grupos	Cantidad de especies	Clasificación
Arbóreas, Helechos, Cactáceas, Orquídeas y Herbáceas	53	46 - En peligro 6 - Amenazadas 1 - Propuesta en peligro

Publicada en https://www.fws.gov/office/caribbean-ecological-services/species.

A base de las categorías de mayor preocupación incluidas en las listas, tanto estatal como federal, cabe resaltar que los grupos de especies de animales que encabezan las mayores designaciones son las aves, seguidas por los reptiles y anfibios y, en menores números, los mamíferos (Ilustración 51). En cuanto a las especies de plantas, los números son bastante cercanos, entre la lista estatal y la federal, y todas bajo categorías de especie crítica, en peligro, amenazadas o propuesta en peligro.

Ilustración 51.

Especies de flora y fauna enlistadas por grupos de organismos, azul-estatal (2004) y naranja-federal (2020), bajo las categorías de especies crítica, en peligro, amenazadas o propuestas en peligro



4.9.3. Hábitats críticos en Puerto Rico

Para la designación de hábitat crítico, el reglamento 6766 establece que estos podrán clasificarse como Hábitat natural crítico y Hábitat natural crítico esencial. Para la designación de esencial, debe ser el lugar único donde la especie considerada desarrolla toda o gran parte de su ciclo de vida y considera, mediante la información científica disponible, que el hábitat cuenta con las condiciones abióticas y bióticas únicas y esenciales que permiten el desarrollo de la especie y que la alteración de tales condiciones puede promover un riesgo alto de extinción en la especie en un futuro inmediato o a corto plazo. Bajo la categoría de Hábitat natural crítico, debe tratarse de un lugar donde se encuentra o se puede reintroducir una especie designada como vulnerable o en peligro de extinción, que el lugar posee las características abióticas y bióticas esenciales para la conservación de la especie y que necesita protección o manejo especial. Bajo el DRNA se han designado solo 5 especies con hábitat crítico. Cabe resaltar que el reglamento incluye otras categorías para la designación de hábitat de acuerdo con su valor ecológico. Define y desglosa los tipos de hábitat en las siguientes seis categorías:

1. Hábitat irremplazable
2. Hábitat esencial
3. Hábitat de alto valor ecológico
4. Hábitat de valor ecológico
5. Hábitat natural con gran potencial de convertirse en hábitat esencial de alto valor ecológico o de valor ecológico
6. Hábitat natural con bajo potencial de convertirse en hábitat esencial de alto valor ecológico o de valor ecológico

En cuanto a la jurisdicción federal y al amparo de la ley ESA, se define el hábitat crítico como las áreas geográficas específicas que contienen características esenciales para la conservación de una especie amenazada o en peligro de extinción que puede requerir una gestión y protección especial. El hábitat crítico puede incluir también áreas que no están ocupadas actualmente por la especie, pero que serán necesarias para su recuperación. Establecer un hábitat crítico alerta a las agencias federales para que lleven a cabo esfuerzos especiales de conservación para la especie cuando trabajen, financien o permitan actividades en estas áreas. La designación de hábitat crítico no tendrá impacto en acciones que se hagan en propiedades privadas que no requieren fondos o permisos federales. Dentro de las áreas ocupadas por la especie, los biólogos consideran los elementos físicos y biológicos necesarios para los procesos de vida en los que se incluye:

- Espacio para el crecimiento individual y poblacional y para el comportamiento normal de la especie.
- Refugio o cobertura.
- Alimento, agua, aire, luz, minerales u otros requerimientos nutricionales o fisiológicos de la especie.
- Lugares de reproducción y crianza de progenie.

© Hábitats que están protegidos de perturbaciones o son representativos de las distribuciones geográficas y ecológicas históricas de una especie.

Bajo la lista federal actualizada (agosto 2020) descrita previamente, el USFWS identifica 18 especies de animales y plantas con designación federal de hábitat crítico en Puerto Rico (Tabla 18). A pesar de que existe una lista de reservas y áreas naturales protegidas, urge atemperar las designaciones de hábitat crítico en función de la cantidad de especies de flora y fauna incluidas tanto en la lista estatal como en la federal.

Tabla 18.

Especies de flora y fauna con designación federal de hábitat crítico en Puerto Rico

Agave eggersiana **(No common name)**	**09/09/2014**	**79 FR 53315**
Agelaius xanthomus **(Mariquita)**	**09/22/1977**	**42 FR 47840**
Ameiva polops **(Lagartijo de Santa Cruz)**	**09/22/1977**	**42 FR 47840**
Ano/is roosevelti **(Lagartijo gigante de Culebra)**	**09/22/1977**	**42 FR 47840**
Catesbaea melanocarpa **(Sin nombre común)**	**08/28/2007**	**72 FR 49212**
Chelonia mydas **(Peje blanco)**	**09/02/1998**	**63 FR 46693**
Cyclura cornuta stejnegeri **(Iguana de Mona)**	**02/03/1978**	**43 FR 4618**
Dermochelys coriacea **(Tinglar)**	**09/26/1978**	**43 FR 43688**
Ereutherodactylus cooki **(Guajón)**	**10/23/2007**	**72 FR 60068**
Ereutherodactylus jasperi **(Coquí dorado)**	**11/11/1977**	**42 FR 58756**
Ereutherodactylus juanariveroi **(Coquí llanero)**	**10/04/2012**	**77 FR 60778**
Epicrates monensis monensis (*Chilabothrus monensis)* **(Boa de Mona)**	**02/03/1978**	**43 FR 4618**
Eretmochelys imbricata **(Carey)**	**06/24/1982**	**47 FR 27295**
Gonocalyx concolor	**9/9/2014**	**79 FR 53315**

Lista federal USFWS (2020) publicada en https://www.fws.gov/office/caribbean-ecological-services/species. Actualizada en agosto de 2020.

Los impactos del cambio climático a la biodiversidad de Puerto Rico son evidentes y generan presiones ambientales que alteran la estructura y el funcionamiento de nuestros ecosistemas. También producen cambios importantes en nuestras poblaciones de flora y fauna de alto valor ecológico. Ante estos escenarios se necesitan cursos de acción

que atiendan de forma efectiva una gestión ambiental que fomente la resiliencia de los ecosistemas, el desarrollo de planes de manejo, en especial para ecosistemas y hábitats críticos, que utilicen un monitoreo ambiental actualizado, el desarrollo y auspicio de estudios científicos que se enfoquen en la tolerancia de nuestras especies y su plasticidad a condiciones ambientales estresantes y la creación de alianzas efectivas entre el sector gubernamental y comunitario para el desarrollo de proyectos efectivos de monitoreo ambiental, reforestación y rehabilitación de nuestros ecosistemas. La sección 7.9 detalla las estrategias para encaminarlos.

4.10. Forestación

Los bosques en Puerto Rico han sido históricamente subvalorados como recurso natural, puestos por debajo de usos de la tierra asociados a la agricultura y la ganadería o al crecimiento de los núcleos urbanos. A pesar de su importancia para la sociedad y la economía como fuente de materia prima para actividades agrícolas e industriales, su conservación y manejo ha recaído en manos de propietarios de tierras cuyo interés tiende a estar dominado por sus consideraciones económicas (individuales o de clase) más que por alguna función social o ecológica (colectiva). El rol del Estado a nivel estatal y federal se ha circunscrito principalmente al establecimiento de reservas forestales, cuyo manejo pasivo se explica por sus usos mayormente recreativos que cada vez tienen más baja prioridad para el otorgamiento de fondos gubernamentales.

En este contexto es evidente que la mayoría de los bosques en manos privadas suelen estar expuestos al vaivén de los mercados, pero coexisten con una serie de núcleos de bosques públicos que cuentan con mayor protección, pues son manejados por el Estado para su conservación y con fines recreativos. Sin embargo, la fórmula predilecta del Estado para asegurar la conservación de los bosques públicos ha sido excluir a sectores de la población que encuentran en el bosque vivienda o una fuente de recursos renovables para su sustento material. Como consecuencia de estas dinámicas socioeconómicas, la relevancia de los bosques en el día a día de las personas ha disminuido en Puerto Rico. Se han relegado a servir solo para la recreación o como cubierta de tierra temporera, a pesar de su gran valor intrínseco como proveedor de múltiples servicios ecosistémicos y su potencial de productividad sustentable. El más importante de estos servicios es como absorbente de los GEI y, por tanto, mitigador del calentamiento global.

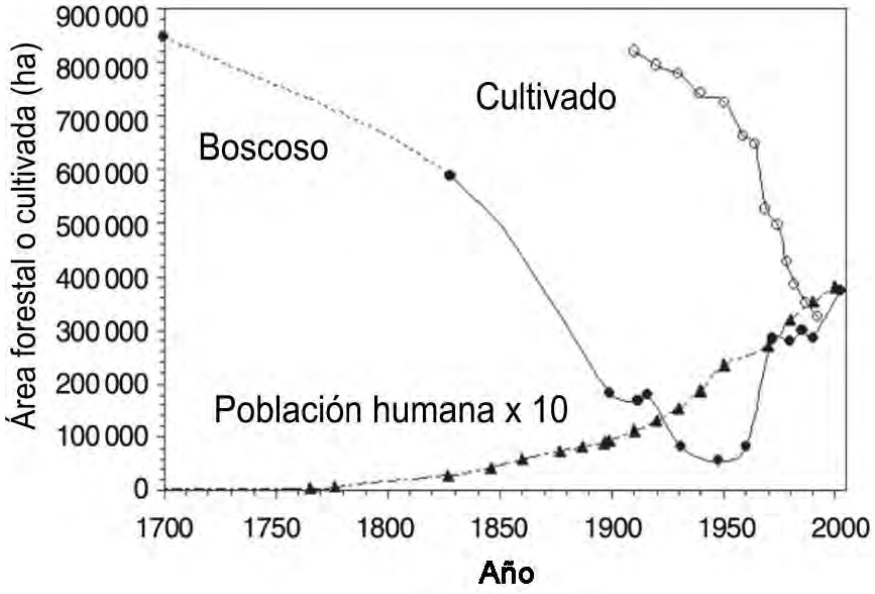
Tal y como definimos la justicia climática en la sección 2.7, estas dinámicas de historia ambiental imponen una carga desproporcionada sobre la mayoría de la población que no tiene participación en la toma de decisiones sobre los bosques, mientras recibe los efectos adversos de su destrucción o de su uso y manejos insostenibles.

Para comprender mejor estas dinámicas y su efecto ecológico es importante tomar en consideración el fenómeno de la transición forestal, descrito para varias regiones del mundo incluyendo a Puerto Rico. De hecho, la transición forestal de Puerto Rico ha sido una de las más drásticas documentadas, siendo estudiada a profundidad por cien-

tíficos como Ariel E. Lugo[547] y Thomas Rudel[548], entre otros. El motor principal para las transiciones forestales tiende a ser de naturaleza económica. En Puerto Rico se relacionan con los procesos de colonización española y estadounidense, dada la creciente intensidad de actividades extractivas de la tierra (minería, ganadería, agricultura, etc.). Previo a la colonización española, se estima que al menos el 90 % de la isla se mantenía forestada continuamente. Esta cubierta de bosques nativos disminuyó a través de los siglos, llegando a un mínimo de 5 % durante las primeras décadas del siglo xx, al aumentar la intensidad del uso de la tierra y la densidad poblacional, en parte por el flujo de capital estadounidense en el sector extractivo agrícola[549] [550].

Ilustración 52.

Tendencias en la densidad poblacional y e uso de tierras en Puerto Rico desde el siglo xviii



Al ocurrir el cambio de modelo económico en Puerto Rico de agrícola a industrial luego de la Segunda Guerra Mundial, se reduce la presión del uso de la tierra para la agricultura por la decadencia de las industrias de la caña, el café y el tabaco. La tendencia inversa se observa durante ese período para la cubierta de bosques, que muestra una recuperación acelerada al ocurrir una reforestación espontánea luego del abandono de

[547] Lugo, A. E. (2020), Effects of Extreme Disturbance Events: From Ecesis to Social–Ecological–Technological Systems, *Ecosystems*, doi:10.1007/s10021-020-00491-x.

[548] Rudel, T. K., M. Pérez-Lugo, and H. Zichal (2000), When Fields Revert to Forest: Development and Spontaneous Reforestation in Post-War Puerto Rico, *The Professional Geographer*, *52*(3), 386-397, doi:10.1111/0033-0124.00233.

[549] Álvarez-Berríos, N., D. Redo, T. Aide, M. Clark, and R. Grau (2013), "Land Change in the Greater Antilles between 2001 and 2010," *Land*, *2*(2), 81-107, doi: 10.3390/land2020081.

[550] Lugo, A. E. (2004), "The outcome of alien tree invasions in Puerto Rico." *Frontiers in Ecology and the Environment*, *2*(5), 265-273.

tierras agrícolas. A pesar del continuo aumento de la población en Puerto Rico hasta el 2000, el proceso de reforestación espontánea continuó su curso desde el 1950 hasta el presente. Durante el período de 1950 a 1990, el crecimiento anual de la cubierta de bosques en Puerto Rico fue el mayor del mundo, con una tasa de 0.63 % al año[551]. Otro estudio enfocado en el período de 1970 a 2014 documentó un crecimiento del porcentaje de cubierta de bosques de 15.7 % a 45.7 %, confirmando que la tendencia positiva continuó en las primeras décadas del siglo XXI[552]. La recuperación y estabilización de la cubierta de bosques representa la última etapa de la transición forestal. En esta etapa coexisten los nuevos bosques (también conocidos como bosques secundarios o bosques noveles) dentro una matriz de usos mixtos, con una creciente presión por el desarrollo urbano[553] [554] [555] [556] [557] [558]. Determinar el mejor uso posible para estos bosques es un gran reto para la sociedad, considerando la urgencia impuesta por el cambio climático para conservar y aumentar la capacidad de los sumideros de carbono naturales[559] [560] [561].

[551] Rudel et al., 2000.

[552] Yuan, F., J. J. Lopez, S. Arnold, A. Brand, J. Klein, M. Schmidt, E. Moseman, and M. Michels-Boyce (2017), *Forestation in Puerto Rico, 1970s to Present, 2017*, *9*(3), https://doi.org/10.5539/jgg.v9n3p30.

[553] Grau, H. R., T. M. Aide, J. K. Zimmerman, J. R. Thomlinson, E. Helmer, and X. Zou (2003), "The ecological consequences of socioeconomic and land-use changes in postagriculture Puerto Rico." *BioScience*, *53*(12), 1159-1168.

[554] Helmer, E., T. Ruzycki, B. Wilson, K. Sherrill, M. Lefsky, H. Marcano-Vega, T. Brandeis, H. Erickson, and B. Ruefenacht (2018), "Tropical Deforestation and Recolonization by Exotic and Native Trees: Spatial Patterns of Tropical Forest Biomass, Functional Groups, and Species Counts and Links to Stand Age, Geoclimate, and Sustainability Goals." *Remote Sensing*, *10*(11), 1724.

[555] Helmer, E. H., O. Ramos, T. d. M. López, M. Quiñones, and W. Díaz (2002), "Mapping the Forest Type and Land Cover of Puerto Rico, a Component of the Caribbean Biodiversity Hotspot." *Caribbean Journal of Science*, *38*, 165-183.

[556] Lugo, A. E., and E. Helmer (2004), "Emerging forests on abandoned land: Puerto Rico's new forests." *Forest Ecology and Management*, *190*(2-3), 145-161, doi:10.1016/j.foreco.2003.09.012.

[557] Parés-Ramos, I. K., W. A. Gould, and T. M. Aide (2008), "Agricultural abandonment, suburban growth, and forest expansion in Puerto Rico between 1991 and 2000." *Ecology & Society*, *13*(2).

[558] Rudel, T. K., P. Meyfroidt, R. Chazdon, F. Bongers, S. Sloan, H. R. Grau, T. Van Holt, and L. Schneider (2019), "Whither the forest transition? Climate change, policy responses, and redistributed forests in the twenty-first century." *Ambio*, doi:10.1007/s13280-018-01143-0.

[559] Chazdon, R. L., et al., (2016), "Carbon sequestration potential of second-growth forest regeneration in the Latin American tropics." *Science Advances*, *2*(5), doi:10.1126/sciadv.1501639.

[560] Schwartz, N. B., T. M. Aide, J. Graesser, H. R. Grau, and M. Uriarte (2020), "Reversals of Reforestation Across Latin America Limit Climate Mitigation Potential of Tropical Forests." *Frontiers in Forests and Global Change*, *3*, doi:10.3389/ffgc.2020.00085.

[561] Sloan, S. (2022), "Reforestation reversals and forest transitions." *Land Use Policy*, *112*, 105800, doi:https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2021.105800.

4.10.1. Inventario Forestal Nacional en Puerto Rico y el huracán María

Tabla 19.

Descripción histórica del inventario forestal nacional de Puerto Rico

Ciclo del inventario	Período de ejecución	Nivel	Diseño de muestreo	Número de unidades de muestreo	Publicaciones del Inventario Forestal Nacional de Puerto Rico
IFN 1	1980	Nacional	Sistemático	978	Birdsey and Weaver, 1982
IFN 2	1990	Nacional	Sistemático	978	Franco, Weaver, and Eggen-McIntosh, 1997
IFN 3	2001-2004	Nacional	Sistemático	514	Brandeis, Helmer, and Oswalt, 2007
IFN 4	2006-2009	Nacional	Sistemático	550	Brandeis and Turner, 2013
IFN 5	2010-2014	Nacional	Sistemático	574	Marcano-Vega, 2019
IFN 6	2016-2019	Nacional	Sistemático	581	Brandeis and Marcano-Vega, 2021

La mejor referencia para estudiar los cambios en la cubierta forestal –así como en la estructura y composición de los bosques en los Estados Unidos y sus territorios– es el Inventario Forestal Nacional (FIA, por sus siglas en inglés) liderado por el Servicio Forestal. El inventario se lleva a cabo en el archipiélago de Puerto Rico (Puerto Rico, Vieques y Culebra) desde el 1980. La naturaleza sistemática de este inventario provee una base de datos forestales comparables a través del tiempo que documentan el proceso de desarrollo y maduración de los nuevos bosques (aunque excluyen manglares y bosques urbanos). Una de las conclusiones más importantes que se derivan de los seis inventarios hechos en Puerto Rico hasta el momento ha sido confirmar el crecimiento en la cubierta de bosques, el cual fue acelerado del 1980 al 2004 y luego se ha mantenido relativamente estable en el siglo XXI (>50 % desde el 2004).

Esta cubierta forestal representa en su mayoría ecosistemas jóvenes que se encuentran en activo desarrollo estructural, y que también experimentan cambios en composición de especies a medida que se cierra el dosel y cambia el microclima del sotobosque (la vegetación formada por matas y arbustos que crece bajo los árboles de un bosque). Por ejemplo, ha continuado creciendo la biomasa y el volumen de los árboles durante el mismo período en que la cubierta de bosques se ha mantenido estable (2004 a 2019), especialmente en las zonas de vida húmeda, muy húmeda y pluvial (*subtropical moist and wet/rain*) que tienen mayor productividad. Además, gracias a estos inventarios se ha podido documentar el crecimiento del área de bosque en la zona de vida seca (*subtropical dry*) de 2004 a 2014. La estabilización de la cubierta de bosques representa un hito importante para la transición forestal en Puerto Rico, pero ocurre dentro de un contexto muy dinámico con disturbios naturales de alta intensidad (huracanes), alta diversidad de condiciones ambientales (geología, suelos y clima) y

crecientes presiones antropogénicas para urbanizar. Lidiar con este dinamismo ecológico de Puerto Rico es uno de los retos principales al plan de reforestación.

Un grupo de bosques al que no se le ha prestado mucha atención son los bosques urbanos. Sin embargo, el 6 % de la cubierta forestal de Puerto Rico son bosques urbanos[562] que ocupan más área que los manglares y mantienen la salud de los ambientes urbanos donde viven casi todos los puertorriqueños. En el bosque urbano de San Juan se documentó que dentro de la ciudad hay alta diversidad ecológica[563] que propicia beneficios significativos a la ciudad[564].

Los efectos del huracán María en el 2017 merecen atención especial, considerando la gran intensidad del evento y que todavía puede considerarse que los bosques se encuentran en proceso de recuperación. El análisis preliminar del Inventario Nacional Forestal más reciente (2019) provee información sobre el porcentaje de mortalidad calculado para distintas zonas de vida, así como una comparación del efecto sobre especies de árboles introducidas y nativas. Por ejemplo, se indica que hubo un gradiente de mortalidad de árboles, aumentando de la zona de vida seca (4 %) a las zonas de vida húmedas, muy húmedas y pluviales (12 % y 15 %, respectivamente), pues a mayor elevación y con árboles más altos, estos bosques son más vulnerables a las ráfagas de vientos. En las parcelas del inventario (bosques, excluyendo zonas urbanas y manglares) la mortalidad promedio por el huracán María fue de 10 %, lo que equivale a 144 millones de árboles muertos estimados a base de los árboles vivos en el inventario anterior.

Además del aumento en mortalidad por el huracán, que ocurre paralelo al proceso natural de mortalidad por la edad de los árboles (~6 %), se pudo documentar que hubo una disminución significativa de la biomasa de los árboles a causa de la pérdida de sus doseles o ramas principales[565] [566]. El efecto estructural fue mayor en las especies de árboles introducidas que dominan la mayoría de los bosques estudiados (76 % para *S. campanulata*), comparado con las especies nativas que están mejor adaptadas a los huracanes (38 % para *T. heterophylla* y *B. simaruba*). Finalmente, también se calculó el efecto del huracán María sobre la cubierta de bosque en 2019, la cual se redujo en 5 % en comparación con el inventario de 2014. Estos cambios en la estructura provoca-

[562] Martinuzzi, S., A. E. Lugo, T. J. Brandeis, and E. H. Helmer. 2013. “Geographic distribution and level of novelty of Puerto Rican forests.” Pages 81-87 in R. J. Hobbs, E. S. Higgs, and C. Hall, editors. *Novel ecosystems: Intervening in the new ecological world order*. Wiley, Oxford.

[563] Lugo, A. E., O. M. Ramos González, and C. Rodríguez Pedraza. 2011. The Río Piedras watershed and its surrounding environment. USDA Forest Service FS-980, Washington, DC.

[564] Brandeis, T. J., F. J. Escobedo, C. L. Staudhammer, D. J. Nowak, and W. C. Zipperer. 2014. San Juan Bay Estuary Watershed urban forest inventory. USDA Forest Service, Southern Forest Experiment Station General Technical Report SRS-190, Asheville, NC.

[565] Hall, J., R. Muscarella, A. Quebbeman, G. Arellano, J. Thompson, J. K. Zimmerman, and M. Uriarte (2020), “Hurricane-Induced Rainfall is a Stronger Predictor of Tropical Forest Damage in Puerto Rico Than Maximum Wind Speeds.” *Scientific Reports*, *10*(1), 4318, doi: 10.1038/s41598-020-61164-2.

[566] Leitold, V., D. C. Morton, S. Martinuzzi, I. Paynter, M. Uriarte, M. Keller, A. Ferraz, B. D. Cook, L. A. Corp, and G. González (2021), “Tracking the Rates and Mechanisms of Canopy Damage and Recovery Following Hurricane Maria Using Multitemporal Lidar Data.” *Ecosystems*, https://doi.org/10.1007/s10021-021-00688-8.

dos por el huracán son un proceso natural que provee oportunidad para el desarrollo y maduración de estos bosques relativamente jóvenes. A base de estimados hechos en el bosque de tabonuco luego del huracán Hugo en 1989, los bosques deben recuperar su biomasa en un período de 5 a 10 años, dependiendo del clima[567].

El huracán María causó unos 100,000 derrumbes en la cordillera central[568] y expuso suelos previamente forestados a la erosión a causa de las lluvias extremas. Estos derrumbes deben revegetarse para proteger los suelos y la calidad del agua que emana de la cordillera. En la ciudad, el huracán causó estragos en la vegetación y a pesar de la resiliencia de los bosques urbanos, se perdió el 40 % de la producción de alimento[569].

4.10.2. El ciclo de carbono en los bosques de Puerto Rico

Los bosques tropicales, como los que existen en Puerto Rico, son los ecosistemas con las tasas de productividad primaria más altas del mundo[570]. Estos ecosistemas pueden sostener grandes cantidades de biomasa por las condiciones climáticas favorables que los caracterizan[571]. Las zonas de vida de Puerto Rico con mayor biomasa son los bosques húmedos, muy húmedos y pluviales, que representan la mayoría de la cobertura de bosques concentrada en las zonas montañosas, el karso y los valles aluviales[572] [573]. Igualmente, los bosques tropicales almacenan en el suelo cantidades de carbono similares a las de biomasa. Esto resulta en un ecosistema con alta densidad de carbono[574]. Estos bosques ricos en carbono fueron deforestados a través de los siglos, resultando en la pérdida de este importante recurso a la atmósfera en la forma de dióxido de carbono**.** Con la reforestación espontánea que ha ocurrido en Puerto Rico, se ha podido documentar cómo los nuevos bosques han recuperado mucho del carbono perdido en

[567] Scatena, F. N., S. Moya, C. Estrada, and J. D. Chinea (1996), "The First Five Years in the Reorganization of Aboveground Biomass and Nutrient Use Following Hurricane Hugo in the Bisley Experimental Watersheds, Luquillo Experimental Forest, Puerto Rico." *Biotropica*, *28*(4), 424-440, doi: 10.1007/s10021-021-00688-8.

[568] Bessette-Kirton, E. K., C. Cerovski-Darriau, W. H. Schulz, J. A. Coe, J. W. Kean, J. W. Godt, M. A. Thomas, and K. S. Hughes. 2019. Landslides triggered by Hurricane Maria: assessment of an extreme event in Puerto Rico. GSA Today. The Geological Society of America, doi.org/10.1130/GSATG383A.1.

[569] Olivero Lora, S., J. Rojas Sandoval, E. J. Meléndez Ackerman, and J. L. Orengo Rolón. 2022. "Hurricane driven changes in vegetation structure and ecosystem services in tropical urban yards: a study case in San Juan, Puerto Rico." *Urban Ecosystems*, Pre-print:1-14.

[570] Malhi, Y., D. Baldocchi, and P. Jarvis (1999), "The carbon balance of tropical, temperate and boreal forests." *Plant, Cell & Environment*, *22*(6), 715-740.

[571] Ewel, J. J., and J. L. Whitmore (1973), The ecological life zones of Puerto Rico and the U.S. Virgin Islands *Rep. ITF-18*, Institute of Tropical Forestry, Río Piedras, Puerto Rico.

[572] Harris, N. L. (2006), The carbon balance of a tropical forested ecosystem along an elevational gradient in the Luquillo Mountains, Puerto Rico: An empirical and modeling study scaled from leaves to landscapes, Dissertation thesis, 212 pp, State University of New York.

[573] Heartsill Scalley, T. (2017), "Insights on Forest Structure and Composition from Long-Term Research in the Luquillo Mountains". *Forests*, *8*(6), 204.

[574] Marin-Spiotta, E., W. L. Silver, C. W. Swanston, and R. Ostertag (2009), "Soil organic matter dynamics during 80 years of reforestation of tropical pastures." *Global Change Biology*, *15*(6), 1584-1597, doi:10.1111/j.1365-2486.2008.01805.x.

la biomasa y en el suelo[575] [576]. Al inicio de la recuperación, la tasa de almacenaje de carbono es muy alta, pues el ecosistema se encuentra en una etapa inicial de desarrollo y existe una alta disponibilidad de recursos (luz, agua, nutrientes). Los suelos agrícolas abandonados se caracterizan por bajos niveles de materia orgánica dada la extensa exposición al cultivo, y al aumentar la caída de hojarasca y biomasa de raíces por la reforestación, también ocurre un aumento significativo del carbono almacenado en el suelo[577] [578]. Al proceder la recuperación, las diferencias en el almacenaje de carbono entre bosques primarios y secundarios disminuyen, siendo ambos importantes sumideros de carbono. Luego de más de medio siglo, los bosques secundarios recuperan su capacidad funcional con una productividad o potencial de secuestro de carbono comparable a los bosques maduros.

Dos estudios sobre el balance de carbono en el bosque urbano de San Juan coinciden en que el bosque tiene una alta capacidad de asimilar carbono de la atmósfera y almacenarlo en sedimentos y biomasa[579] [580]. Se encontró que la siembra de árboles en los sectores deforestados de la ciudad aumenta desproporcionalmente la remoción de carbono de la atmósfera[581]. Reforestar la ciudad beneficia la mitigación del cambio climático y las islas de calor a la vez que beneficia el entorno urbano y la salud de los residentes.

[575] Aide, T. M., J. K. Zimmerman, J. B. Pascarella, L. Rivera, and H. Marcano-Vega (2000), "Forest Regeneration in a Chronosequence of Tropical Abandoned Pastures: Implications for Restoration Ecology." *Restoration Ecology*, *8*(4), 328-338, doi:https://doi.org/10.1046/j.1526-100x.2000.80048.x.

[576] Marín-Spiotta, E., D. F. Cusack, R. Ostertag, and W. L. Silver (2008), Trends in above and belowground carbon with forest regrowth after agricultural abandonment in the neotropics, in *Post- Agricultural Succession in the Neotropics*, edited, págs. 22-72, Springer.

[577] Silver, W. L., A. E. Lugo, and D. Farmer (2002), Soil Organic Carbon in Tropical Forests of the United States of America, in *The Potential of U.S. Forest Soils to Sequester Carbon and Mitigate the Greenhouse Effect*, edited by J. Kimble, R. Birdsey, L. Heath, R. Follett and R. Lal, CRC Press.

[578] Silver, W. L., R. Ostertag, and A. E. Lugo (2000), "The Potential for Carbon Sequestration Through Reforestation of Abandoned Tropical Agricultural and Pasture Lands." *Restoration Ecology*, *8*(4), 394- 407, doi:10.1046/j.1526-100x.2000.80054.x.

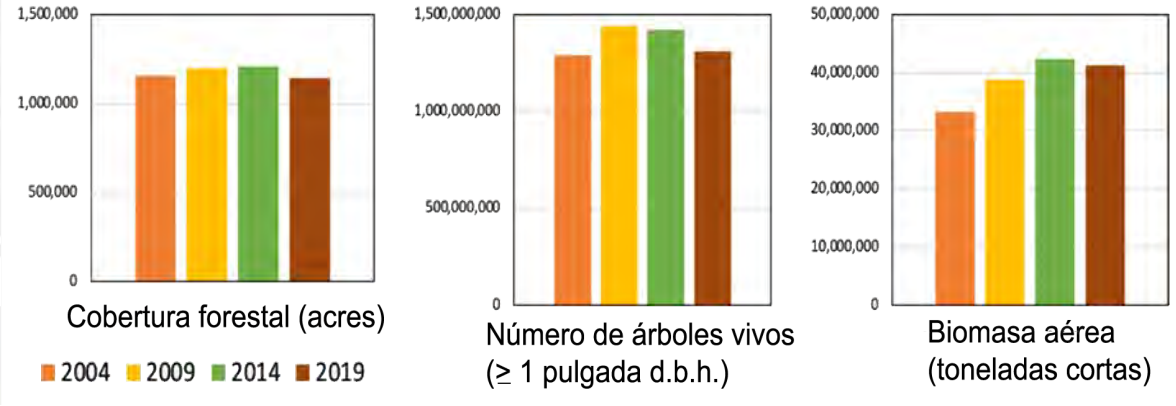
[579] Brandeis et al., 2014.

[580] Wigand, C., M. Eagle, B. L. Branoff, S. Balogh, K. M. Miller, R. M. Martin, A. Hanson, A. J. Oczkowski,E. Huertas, J. Loffredo, and E. B. Watson. 2021. "Recent carbon storage and burial exceed historic rates in the San Juan Bay estuary peri-urban mangrove forests (Puerto Rico, United States)." *Frontiers in Forests and Global Change* 07 June 2021 https://doi.org/10.3389/ffgc.2021.676691.

[581] Lugo, A.E. and J.F. Bauzá Ortega. 2023. San Juan Bay estuary: research history and opportunities. Estuario de la Bahía de San Juan, San Juan, Puerto Rico.

Ilustración 53.

Comparación de datos del inventario nacional forestal en y antes del huracán María



Existe gran preocupación entre los científicos sobre el futuro de los nuevos bosques secundarios que representan la última fase de la transición forestal[582]. Considerando la extensa deforestación de los bosques tropicales, y la inmensa resiliencia que han demostrado al recuperarse luego del uso humano, es crítico reconocer el valor que proveen los bosques como infraestructura para la sociedad[583]. El creciente reconocimiento de los servicios ecosistémicos y su valor ambiental, social y económico debe facilitar esfuerzos de conservación de bosques, especialmente considerando el alto potencial que tienen como sumideros de carbono para mitigar el cambio climático[584].

4.10.3. El cambio climático y los bosques de Puerto Rico

Los bosques de Puerto Rico se han desarrollado bajo un régimen climático que ya está cambiando, y estos ecosistemas tendrán que adaptarse a una mayor frecuencia de huracanes intensos, olas de calor y períodos de sequía, entre otros cambios globales[585] [586] [587]. En Puerto Rico, se ha estudiado extensamente el efecto de los huracanes sobre

[582] Rudel et al., 2019.

[583] Poorter, L., et al. (2016), Biomass resilience of Neotropical secondary forests, Nature, advance online publication, doi:10.1038/nature16512. https://www.nature.com/articles/nature16512#citeas

[584] Schwartz et al., 2020.

[585] Bhardwaj, A., V. Misra, A. Mishra, A. Wootten, R. Boyles, J. H. Bowden, and A. J. Terando (2018), "Downscaling future climate change projections over Puerto Rico using a non-hydrostatic atmospheric model." *Climatic Change*, doi:10.1007/s10584-017-2130-x.

[586] Henareh Khalyani, A., W. A. Gould, E. Harmsen, A. Terando, M. Quiñones, and J. A. Collazo (2016), "Climate change implications for tropical islands: Interpolating and interpreting statistically downscaled GCM projections for management and planning." *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, doi:10.1175/JAMC-D-15-0182.1.

[587] Wood, T. E., M. A. Cavaleri, and S. C. Reed (2012), "Tropical forest carbon balance in a warmer world: a critical review spanning microbial –to ecosystem– scale processes." *Biological Reviews*, *87*(4), 912-927.

la estructura y funcionamiento de los bosques[588] [589] [590] [591]. Aunque se han documentado las múltiples adaptaciones que confieren resistencia y resiliencia a las especies nativas ante estos eventos naturales, es importante considerar los efectos que puedan tener las proyecciones de una mayor frecuencia e intensidad de huracanes sobre los bosques[592] [593]. Estudios con modelos y experimentos sugieren que los bosques tendrían menos cantidad de biomasa si aumenta la frecuencia de los huracanes, pues la pronta recurrencia no permite tiempo para la recuperación del ecosistema[594] [595] [596]. Una mayor frecuencia de huracanes provocaría también cambios en la composición de especies, promoviendo la dominancia de especies comunes en la sucesión temprana que toleran ambientes con alta intensidad de luz[597] [598].

Las proyecciones de precipitación para el Caribe sugieren una disminución por el cambio climático para mediados del siglo XXI, que puede reflejarse tanto en cambios en la estacionalidad como en aumentos en la frecuencia de períodos de sequía[599]. Los eventos de sequía tienen efectos significativos sobre la productividad de los bosques dado el aumento en el nivel de estrés foliar causado por la baja humedad relativa y las

[588] Lugo, A. E. (2000), "Effects and outcomes of Caribbean hurricanes in a climate change scenario." *Science of The Total Environment*, *262*(3), 243-251, doi:http://dx.doi.org/10.1016/S0048- 9697(00)00526-X.

[589] Shiels, A. B., G. González, D. J. Lodge, M. R. Willig, and J. K. Zimmerman (2015), "Cascading Effects of Canopy Opening and Debris Deposition from a Large-Scale Hurricane Experiment in a Tropical Rain Forest." *BioScience*, *65*(9), 871-881, doi:10.1093/biosci/biv111.

[590] Zimmerman, J. K., M. R. Willig, and E. A. Hernández-Delgado (2020), "Resistance, resilience, and vulnerability of social-ecological systems to hurricanes in Puerto Rico." *Ecosphere*, *11*(10), e03159, doi:10.1002/ecs2.3159.

[591] Zimmerman, J. K., T. E. Wood, G. González, A. Ramírez, W. L. Silver, M. Uriarte, M. R. Willig, R. B. Waide, and A. E. Lugo (2021), "Disturbance and resilience in the Luquillo Experimental Forest." *Biological Conservation*, *253*, 108891, doi:https://doi.org/10.1016/j.biocon.2020.108891.

[592] Emanuel, K. (2021), "Atlantic tropical cyclones downscaled from climate reanalyses show increasing activity over past 150 years." *Nature Communications*, *12*(1), doi:10.1038/s41467-021-27364-8.

[593] Knutson, T. R., J. L. McBride, J. Chan, K. Emanuel, G. Holland, C. Landsea, I. Held, J. P. Kossin, A. K. Srivastava, and M. Sugi (2010), "Tropical cyclones and climate change." *Nature Geosci*, *3*(3), 157-163, doi:http://www.nature.com/ngeo/journal/v3/n3/suppinfo/ngeo779_S1.html.

[594] Hogan, J. A., et al., (2018), "The Frequency of Cyclonic Wind Storms Shapes Tropical Forest Dynamism and Functional Trait Dispersion." *Forests*, *9*(7), 404.

[595] Holm, J. A., S. J. Van Bloem, G. R. Larocque, and H. H. Shugart (2017), "Shifts in biomass and productivity for a subtropical dry forest in response to simulated elevated hurricane disturbances." *Environmental Research Letters*, *12*(2), 025007.

[596] Lin, T.-C., J. A. Hogan, and C.-T. Chang (2020), "Tropical Cyclone Ecology: A Scale-Link Perspective." *Trends Ecol. Evol.*, *35*(7), 594-604, doi:https://doi.org/10.1016/j.tree.2020.02.012.

[597] Feng, X., M. Uriarte, G. González, S. Reed, J. Thompson, J. K. Zimmerman, and L. Murphy (2018), "Improving predictions of tropical forest response to climate change through integration of field studies and ecosystem modeling." *Global Change Biology*, *24*(1), e213-e232, doi:10.1111/gcb.13863.

[598] Shiels, A. B., J. K. Zimmerman, D. C. García-Montiel, I. Jonckheere, J. Holm, D. Horton, and N. Brokaw (2010), "Plant responses to simulated hurricane impacts in a subtropical wet forest, Puerto Rico." *Journal of Ecology*, *98*(3), 659-673, doi:10.1111/j.1365-2745.2010.01646.x.

[599] Bhardwaj et al.*, 2018;* Henareh Khalyani et al., 2016.

altas temperaturas[600] [601]. Las sequías más severas pueden también reducir la humedad del suelo y reducir las tasas de descomposición de materia orgánica, lo que afecta la disponibilidad de nutrientes. Los bosques en Puerto Rico con mayor vulnerabilidad a los cambios en precipitación y humedad atmosférica son los bosques nublados, que solo se encuentran en las cimas de las montañas de la Cordillera Central y la Sierra de Luquillo[602]. Estos bosques reciben las mayores cantidades de precipitación documentadas en Puerto Rico y se espera que su distribución se encoja drásticamente como consecuencia de la disminución de precipitación, junto al efecto perjudicial del aumento en la temperatura[603] [604].

Los bosques tropicales se caracterizan por tener climas con una temperatura cálida con pocas variaciones estacionales. Por ende, son más vulnerables a los aumentos en temperatura proyectados por los modelos[605]. En los bosques de Puerto Rico, se ha encontrado que las hojas operan a su temperatura óptima, sugiriendo que aumentos en temperatura puedan reducir la productividad dominante de las especies de árboles por estrés térmico[606]. También es esencial tomar en consideración la interacción entre los cambios climáticos (y otros cambios globales, como la fragmentación o degradación), pues estos pueden llevar a los ecosistemas a un punto crítico donde ocurre un cambio extremo en estructura y funcionamiento[607]. De ocurrir estos cambios extremos, perderíamos los servicios ecosistémicos asociados a los bosques y habría una serie de consecuencias críticas para la sociedad tales como el aumento en erosión y sedimentación de cuerpos de agua, el aumento en las escorrentías e inundaciones, entre otros.

Ante este cuadro de incertidumbre, se puede diseñar un plan de reforestación que establezca bosques resilientes y sostenibles. Tal plan debe tomar en consideración la experiencia de la década del 1940[608] y los principios más avanzados de la ecología moderna. De esta forma, se utilizan los procesos naturales de regeneración y sucesión

---

[600] Beard, K. H., K. A. Vogt, D. J. Vogt, F. N. Scatena, A. P. Covich, R. Sigurdardottir, T. G. Siccama, and T. A. Crowl (2005), "Structural and functional responses of a subtropical forest to 10 years of hurricanes and drought." *Ecological Monographs*, *75*(3), 345-361, doi:10.1890/04-1114.

[601] Scholl, M. A., M. Bassiouni, and A. J. Torres-Sánchez (2021), "Drought stress and hurricane defoliation influence mountain clouds and moisture recycling in a tropical forest." *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, *118*(7), e2021646118, doi: 10.1073/pnas.2021646118.

[602] Murphy, S. F., R. F. Stallard, M. A. Scholl, G. González, and A. J. Torres-Sánchez (2017), "Reassessing rainfall in the Luquillo Mountains, Puerto Rico: Local and global ecohydrological implications." *PLOS ONE*, *12*(7), e0180987, doi:10.1371/journal.pone.0180987.

[603] Helmer, E. H., E. A. Gerson, L. S. Baggett, B. J. Bird, T. S. Ruzycki, and S. M. Voggesser (2019), "Neotropical cloud forests and páramo to contract and dry from declines in cloud immersion and frost." *PLOS ONE*, *14*(4), e0213155, doi: 10.1371/journal.pone.0213155.

[604] Van Beusekom, A. E., G. González, and M. A. Scholl (2017), "Analyzing cloud base at local and regional scales to understand tropical montane cloud forest vulnerability to climate change." *Atmos. Chem. Phys.*, *17*(11), 7245-7259, doi: 10.5194/acp-17-7245-2017.

[605] *Wood et al.*, 2012.

[606] Carter, K. R., T. E. Wood, S. C. Reed, K. M. Butts, and M. A. Cavaleri (2021), "Experimental warming across a tropical forest canopy height gradient reveals minimal photosynthetic and respiratory acclimation." *Plant, Cell & Environment*, *n/a*(n/a), doi: https://doi.org/10.1111/pce.14134.

[607] Feng et al., 2018.

[608] Marrero, J. 1950. "La reforestación de tierras degradadas de Puerto Rico." *Caribbean Forester* 11:16-24.

en combinación con técnicas silviculturales noveles para establecer bosques diversos y adaptados al cambio climático.

4.11. Turismo

4.11.1. El turismo y el cambio climático

En Puerto Rico, históricamente, el turismo ha sido reconocido como un sector económico estratégico (Tabla 20, aunque como veremos a través de esta sección su impacto a nivel local está extremadamente centralizado en uno o dos pueblos. Dicha realidad tiene importancia cuando hablamos del cambio climático, ya que la concentración de turistas en un área geográfica implica considerar la capacidad de carga[609] de la misma y la sostenibilidad de los ecosistemas terrestres y marinos de ese entorno.

Tabla 20.

Impacto económico del turismo en Puerto Rico 2022

$116 M	$5,700 M	4.4 %	91,500
Recaudo de impuesto por alojamiento	Gasto de los turistas	PIB	Empleos

Fuente: *Discover Puerto Rico*[610]

Desde sus inicios como destino turístico y hasta el presente, Puerto Rico ha sido clasificado como un destino de sol y playa. Ante el cambio climático, ello tiene serias implicaciones tanto para la competitividad como para la sostenibilidad del sector turístico y del propio destino. El clima –y con ello el cambio climático– y la gestión ambiental del turismo deben ser factores determinantes para la planificación presente y futura del destino. Una estrategia turística ambiental para atender el cambio climático es fundamental para nuestra subsistencia como destino turístico.

Los desafíos climáticos conllevan retos sociales, económicos y ambientales que son los tres componentes de la sostenibilidad turística a la que debe aspirar todo destino. Ya la población sufre los efectos del cambio climático y así lo reconoce. Nuestra infraestructura natural, marina, agrícola, cultural, industrial y la construida, así como nuestros ecosistemas están expuestos a los efectos negativos del cambio climático y comienzan a mostrarlos. Las proyecciones anticipan que el cambio climático tendrá un impacto signifi-

609 La capacidad de carga es el número máximo de visitantes que puede contener un determinado espacio, recurso o destino turístico sin comprometer su integridad ni su sostenibilidad.

610 Véase más en: https://www.discoverpuertorico.com/industry/download/602496-discover-puerto-rico-revela-el-perfil-de-los-visitantes-que-llegaron-en-el-2022.pdf

cativo en la viabilidad, competitividad y sostenibilidad del sector turístico en los próximos años. Por lo anterior, es ineludible e impostergable que el sector turístico puertorriqueño integre en su planificación la adaptación y resiliencia de la infraestructura turística, tanto la infraestructura gris, como la infraestructura natural.

Las variables que influyen en el turista a la hora de seleccionar un destino son múltiples, entre ellas, atracciones, costos, seguridad y tiempo de vuelo. Sin embargo, no podemos ignorar que el clima es uno de los criterios más importantes para la selección del destino porque este condicionará la temporada del año a viajar y las actividades a poder realizarse dentro del mismo.

En Puerto Rico prevalecen condiciones de alta vulnerabilidad ante el cambio climático ya que las playas y el clima tropical y caribeño determinan la elección de la isla como destino turístico, además de la duración y calidad de la experiencia turística. Es de suma importancia ser proactivos en las medidas de adaptación y resiliencia, sobre todo en los productos turísticos, para que el destino sea competitivo y sostenible. Algunas de las amenazas del cambio climático al sector turístico identificadas son:

1. Cambios en las condiciones atmosféricas como las olas de calor, que afectarán la demanda turística y las actividades en el destino.
2. Cambios climáticos extremos que modificarán el paisaje y sus atractivos, lo cual conllevará pérdida de competitividad.
3. Aumento en la frecuencia de desastres naturales como huracanes, tormentas y olas de calor, que provocarán la interrupción de actividades.
4. Contaminación más frecuente de las playas, uno de los atractivos turísticos principales.
5. El 79 % de la infraestructura hotelera turística es vulnerable al aumento del nivel del mar.
6. Desaparición de playas por erosión.
7. Mortandad de los arrecifes de coral.
8. Impacto significativo del cambio climático sobre el Aeropuerto Internacional Luis Muñoz Marín.
9. Impacto del cambio climático sobre los muelles donde atracan los cruceros.

Los entes públicos informan continuamente los resultados económicos positivos que genera el sector turístico y los empleos que crea. Sin embargo, no podemos ignorar que, además de los efectos de las manifestaciones del cambio climático, el uso intenso de los recursos de la isla como parte de las prácticas relacionadas con algunas actividades turísticas conlleva efectos negativos para el destino.

4.11.2. Perfil y preferencias geográficas del visitante[611] [612]

Para un destino turístico es de crucial importancia conocer el perfil del turista que lo elige como destino para poder atender con efectividad los retos del cambio climático. Este tipo de análisis permite definir estrategias efectivas para la competitividad y sostenibilidad turística ante posibles cambios de preferencia del turista por los efectos del cambio climático, a la vez que sirve de herramienta de planificación para definir y adoptar estrategias de adaptación y resiliencia. La llamada geografía turística[613] nos permite analizar las conductas y preferencias geográficas de los turistas, y la organización y transformación del territorio por las dinámicas turísticas en el territorio (destino). Si no conocemos de dónde vienen nuestros turistas y dónde pernoctan, poco o nada podremos planificar para atender el cambio climático.

En la Tabla 21 incluimos el perfil geográfico del turista que nos visita (emisor) relacionado con su procedencia y sus preferencias de pernoctación en el destino, que pudieran afectarse con el cambio climático.

Tabla 21.

Desglose de comportamientos según el perfil del visitante exclusivamente de vacaciones

Tema	Preferencias	% 2017 JP
País	EE. UU.	90.2
Área geográfica	Este - EE. UU.	54.3
	Sur - EE. UU.	29.4
	Oeste - EE. UU.	14.9
Estados	Nueva York	22.1
Región de estadía	Zona Metro	59.3
	Porta del Este	16.2
	Porta del Sol	7.2
	Porta Atlántico	6.1
	Porta Caribe	4.6
	Distrito Especial Turístico de la Montaña	2.6
Actividad realizada	Actividades acuáticas y playa	74.6
	Ecoturismo	27.2

Fuente: Junta de Planificación de Puerto Rico. *Perfil del Visitante, 2017.*

[611] Solo se han incluido los datos relevantes para este diagnóstico en torno al tema de procedencia del visitante (emisor) y estancia (pernoctación) en el destino tomados del *Perfil del Visitante 2017* de la Junta de Planificación de Puerto Rico.

[612] Aunque *Discover Puerto Rico* publicó el *Visitor Profile Report* 2022, el mismo no sigue el modelo del *Perfil del Visitante* de la Junta de Planificación sobre el comportamiento de pernoctación del turista en las regiones turísticas, sino que analiza el comportamiento de las visitas.

[613] Véase Vera Rebollo, J.: López Palomeque, F.: Marchena, M.: Antón Clave, S. (2013) *Análisis territorial del turismo y planificación de destinos turísticos,* Tirant Humanidades, Valencia, España.

De estos datos resulta evidente que Puerto Rico como destino turístico tiene grandes retos ya que el destino emisor está limitado al turista de los Estados Unidos. Como destino, tenemos un reto en cuanto a la diversificación del destino emisor ya que el 90.2 % (y 94 % según el *Discover Puerto Rico*) de nuestros turistas proviene de Estados Unidos. La misma concentración ocurre cuando examinamos las regiones de procedencia: el 54.3 % proviene del este de Estados Unidos, solo el 29.4 % del sur y un

14.9 % del oeste. Es de resaltar que el 28.7 % proviene solo del estado de Nueva York. Estas concentraciones tan altas en un solo destino, región o estado emisor nos hace extremadamente vulnerables ante los efectos del cambio climático. Por ejemplo, una mayor frecuencia de tormentas invernales puede impedir el desplazamiento hacia Puerto Rico. También el aumento de la temperatura que extiende los períodos de verano o de calor podría desalentar los desplazamientos a Puerto Rico, pues los visitantes potenciales tendrían en sus ciudades temperaturas más cálidas.

Otro hallazgo del perfil geográfico de los turistas que nos visitan –y que se convierte en un reto para el destino– es que el 59.3 % de los turistas pernoctan en la región metropolitana de San Juan y Carolina (Condado e Isla Verde). Si a ello le sumamos los que pernoctan en la región este, con 16.2 %, entre ambas regiones suman el 75.5 % de las preferencias de pernoctación de los turistas que eligen a Puerto Rico como destino. El dato debe tomarse en cuenta a la hora de definir estrategias territoriales en el marco del cambio climático, ya que es evidente la concentración turística en esas dos regiones y los impactos que ello genera. El estudio del *Discover Puerto Rico* encontró que las regiones preferidas por los turistas son: región metropolitana (84 %), este (38 %), sur (25 %), oeste (21 %), norte (19 %) y la montaña (9 %). Otra vez, el patrón geográfico muestra que el área metropolitana y la región este son las más frecuentadas por los turistas.

Un análisis de las actividades (preferencias) que realizan los turistas indica que el uso de los recursos acuáticos y las playas abarca el 74.6 %, mientras que el ecoturismo alcanza un 27.2 % de preferencia. El estudio del *Discover Puerto Rico* segmenta las actividades acuáticas con un 53 % de preferencia y el uso playas con un 80 %. Los datos confirman el gran atractivo turístico de esos recursos. Algunas manifestaciones del cambio climático que pueden limitar las actividades acuáticas y playeras son las olas de calor, la erosión costera, la pérdida de la superficie de playa, la intrusión salina en los cuerpos de agua dulce y la destrucción de la infraestructura turística construida en la zona costera. Lo anterior implica que se tiene que comenzar a diseñar una estrategia para diversificar los productos turísticos en las dos regiones y en todas las demás para no perder competitividad. La estrategia debe considerar productos turísticos de la ruralía y la montaña, entre otros.

Cuando se analizan las preferencias sobre municipios para pernoctar, casi el 60 % de los turistas pernoctan en la región metropolitana. En la Tabla 22 vemos los municipios que ocupan las primeras 15 posiciones de mayor preferencia. Es evidente que San Juan y Carolina reciben a más del 50 % de los turistas. El dato es más relevante dado que la oferta hotelera en ambos municipios se concentra en las áreas de Condado e Isla Verde.

Tabla 22.

Preferencias de pernoctación por municipio del visitante exclusivamente de vacaciones

Posición en preferencia	Municipio	Porcentaje de visitantes en 2017
1	San Juan	42
2	Carolina	11.5
3	Río Grande	5.3
4	Fajardo	3.6
5	Dorado	2.4
6	Bayamón	2.3
7	Humacao	1.7
8	Rincón	1.6
9	Ponce	1.5
10	Vieques	1.4
11	Luquillo	1.3
12	Caguas	1.3
13	Guaynabo	1.2
14	Arecibo	0.9
15	Cabo Rojo	0.9

Fuente: Junta de Planificación de Puerto Rico. Perfil del Visitante, 2017

Conocer las procedencia y preferencias geográficas de pernoctación de nuestros visitantes nos permite establecer estrategias de diversificación de destinos emisores y, por otro lado, estrategias de descentralización en la pernoctación en Puerto Rico ante los efectos del cambio climático. Con ello se reparte la carga del impacto medioambiental que conlleva la concentración de turistas. Se trata de estrategias a medio y largo plazo que requieren de instrumentos de planificación y mercadeo si el destino quiere ser competitivo y sostenible.

4.11.3. Riesgos, amenazas y vulnerabilidades para el sistema turístico puertorriqueño ante el cambio climático

El clima es un elemento identitario de Puerto Rico como destino turístico. Hoy día no existe relación alguna entre la planificación y gestión del turismo por parte de la Compañía de Turismo (CTPR)[614] y la conservación y preservación de los recursos territoriales. Por la exposición y vulnerabilidad de la isla al cambio climático, se debe insertar en la gestión del destino un modelo turístico de *gobernanza ambiental del turismo.* Planificar y gestionar el turismo bajo criterios e indicadores ambientales como modelo turístico permite establecer estrategias de adaptación y resiliencia, así como soluciones basadas en

[614] Aun cuando la Ley 10-1970 (según enmendada) cambia el nombre de Compañía de Turismo de Puerto Rico a Oficina de Turismo del Departamento de Desarrollo Económico y Comercio de Puerto Rico, toda

la naturaleza. La Tabla 23 muestra los impactos y consecuencias del cambio climático a los que Puerto Rico está expuesto, que requieren de estrategias de gestión ambiental turística. Una vez identificadas, corresponde a la CTPR establecer alianzas con las entidades de gobierno, la UPR y el tercer sector ambiental para que de los ingresos que produce el sector turístico se reinviertan en acciones de adaptación y resiliencia, y en el desarrollo de infraestructura turística básica.

Tabla 23.

Impactos principales asociados al cambio climático y sus implicaciones para el turismo en Puerto Rico

Impacto	Consecuencias para el turismo	Sección del P-MARCC que se usa como fuente de referencia
Aumento de la temperatura y de la temperatura media anual	Cambios en los patrones de estacionalidad, olas de calor, aumento en los costos de aire acondicionado, cambio en las poblaciones y distribución de plantas, animales e insectos, cambios en la distribución de enfermedades infecciosas y el sargazo. Limitación de actividades turísticas al aire libre y boicot turístico en ciertas épocas del año.	3.4.1 3.4.1.2 4.5.1.8
Aumento de temperaturas en la superficie del mar	Aumento en el blanqueamiento de corales y degradación de los recursos marinos y de la estética en los destinos de buceo y esnórquel. Aumento de desarrollo y prevalencia de organismos patógenos en las playas.	3.4.6 4.8.4
Aumento del nivel del mar	Erosión e inundaciones costeras, pérdida de la superficie de playa, mayores costos para proteger y mantener los frentes marítimos e intrusión de aguas salinas en cuerpos de agua dulce. Aumento en el número de escombros, casas y edificios en abandono que no son removidos después de desastres o eventos de marejadas. Impacto significativo sobre el Aeropuerto Internacional Luis Muñoz Marín y algunos aeropuertos regionales. Impacto sobre el 79 % de la infraestructura hotelera y sobre los muelles de cruceros.	3.4.4 4.8.1 4.8.2 4.7.2

la comunicación recibida a mayo del 2023 es bajo el nombre de Compañía de Turismo de Puerto Rico, nombre que se usará en el P-MARCC.

Impacto	Consecuencias para el turismo	Sección del P-MARCC que se usa como fuente de referencia
Reducción en la precipitación y aumento en la evaporación	Escasez en recursos hídricos, conflictos sobre el uso del agua entre sectores, aumento en incendios forestales amenazando infraestructuras y recursos y afectando la demanda turística. Racionamiento de agua a hoteles turísticos.	3.4.2 3.4.1.1 4.7 4.10
Mayor frecuencia e intensidad de tormentas	Riesgo para las infraestructuras y recursos turísticos, mayores costos y pérdidas en seguros, costos asociados a la interrupción del suministro de energía eléctrica y de agua para hoteles y operaciones comerciales.	3.4.3 4.7.3
Mayor frecuencia de precipitaciones extremas o torrenciales[615]	Contaminación potencial de cuerpos de agua que puede influir en la calidad de las aguas subterráneas, lagunas y zonas de arrecife. Daños por inundaciones al patrimonio arquitectónico, cultural y natural, daños a infraestructura turística y efectos en la estacionalidad. Aumento de la contaminación de las playas y el consecuente cierre de playas.	3.4.3 4.5.1.5 4.7.2 4.7.3
Pérdida de la calidad del aire y del paisaje	La intrusión del polvo sahariano afectará la calidad de vida y el paisaje. Además, limitará actividades al aire libre. En casos extremos puede afectar el transporte aéreo.	3.4.7 4.5.1.5 4.8 4.9
Mayor frecuencia e intensidad de incendios forestales	Daños o pérdida de atractivos naturales y especies del destino, aumento en el riesgo de inundaciones y daños a la infraestructura turística.	3.4.1.3 4.9
Cambios en la biodiversidad terrestre y marina	Daños o pérdida de atractivos naturales y especies, alteración en la distribución natural de especies y aumento en aparición de enfermedades en áreas tropicales. Posible pérdida de bahías bioluminiscentes.	4.5.1 4.8.1 y 4.8.2
Cambios en el suelo (ej. niveles de humedad, erosión y acidez)	Daños o pérdida de recursos arqueológicos y otros recursos naturales con impacto en los atractivos del destino. Modificación o destrucción del paisaje.	4.6, 4.9 y 4.10
Playas afectadas por sargazo	Afectará el turismo porque los visitantes no quieren tomar sol o bañarse en una playa cubierta de sargazo.	4.8

Fuente: Traducido y adaptado de Becken (2010)[616]

[615] Véanse en la sección 3.4.2 ilustraciones sobre tendencias y proyecciones de precipitación, además de un análisis de períodos (1955-1987 y 1988-2021).

[616] Becken, S. (2010). *The importance of climate and weather for tourism: literature review*, *Land, Environment and People* (LEaP Lincoln University).

Aunque se deben atender todos los impactos, las áreas de desafío para el sector turístico que requieren acción inmediata de parte de la CTPR son el aumento en la temperatura (olas de calor) y el aumento del nivel del mar. Las olas de calor[617] serán las que más incidirán directamente en la demanda turística tanto geográfica como estacional, por lo que se anticipa una disminución en el número de viajes a la costa (sol y playa). Ante ese reto surge la oportunidad de comenzar a planificar nuestros destinos del interior que ofrecerán mejor confort climático. Las zonas rurales, bosques y áreas naturales protegidas se convertirán en activos de alto valor en la búsqueda de los turistas por ese confort climático y esto requiere estrategias inmediatas de planificación turística, conservación y preservación. Nótese del estudio de *Discover Puerto Rico* antes citado que solo el 9 % de los turistas visitan en la actualidad la región de la montaña. Se prevé que en los próximos años eso cambiará, por lo que es momento de planificar.

De la misma forma, el aumento del nivel del mar[618], así como la erosión costera son manifestaciones del cambio climático que ya tienen efectos en nuestro destino, lo que implica pérdida de millas de playas y en algunos casos pérdida de espacios turísticos por completo.

En la Tabla 24 podemos ver los movimientos de línea de agua y playa, así como la erosión por zonas de interés turístico designadas en nuestro destino, donde casi el 5 % de estas presentan al menos dos efectos negativos. Llama la atención que las zonas de interés turístico de Naguabo-Humacao y Arecibo-Barceloneta muestran los cuatro impactos negativos presentados.

Tabla 24.

Ejemplo del impacto del cambio climático en las zonas de interés turístico designadas en Puerto Rico

Zona de interés turístico	Migración de playa tierra adentro	Migración de línea de costa tierra adentro	Erosión costera	Erosión costera severa
Condado				
Isla Verde				
Ponce				X
Coamo				
Río Grande-Luquillo-Fajardo		X	X	X
Guánica-Lajas				

[617] Véanse en la sección 3.4.1. una ilustración sobre Trayectorias de concentración representativas de la temperatura superficial promedio para Puerto Rico y, en la sección 3.4.1.2, una ilustración sobre eventos de temperatura mínima y máxima en estaciones de San Juan y Ponce.

[618] Véase en la sección 4.3.2.1 un mapa sobre la proyección del alza del nivel del mar para el 2050, de 5 pies, en el Aeropuerto Internacional Luis Muñoz Marín y sus posibles efectos.

Zona de interés turístico	Migración de playa tierra adentro	Migración de línea de costa tierra adentro	Erosión costera	Erosión costera severa
Cabo Rojo		X	X	
Hatillo-Camuy-Quebradillas	X	X	X	
Aguadilla-Isabela	X	X	X	
Aguirre-Bahía Jobos				
Naguabo-Humacao	X	X	X	X
Vega Alta-Dorado-Toa Baja	X	X		X
Rincón-Añasco	X			
Guayama-Arroyo				
Arecibo-Barceloneta	X	X	X	X

Fuente: Proyecto del Estado de las Playas Post María, Instituto de Investigación y Planificación Costera de Puerto Rico, UPR-RP.

El aumento en el nivel del mar como consecuencia directa del cambio climático producirá daños en las zonas portuarias, aeropuertos y pérdida de infraestructura turística en la región costera. Las proyecciones anticipan que se producirán inundaciones en las áreas de playa en territorios de llanura como es la región este. El destino tiene que tomar medidas a corto, mediano y largo plazo sobre dichas infraestructuras turísticas.

En síntesis, las manifestaciones del cambio climático propiciarán una redistribución del movimiento turístico, tanto para la selección de Puerto Rico como destino turístico como sus preferencias geográficas en el país por nuestra dependencia al turismo de sol y playa. Se requiere delinear estrategias de diversificación del producto turístico para ofrecer al turista opciones más allá de sol y playa. Las oportunidades para Puerto Rico van desde el turismo de naturaleza (aventura, ecoturismo y rural), turismo cultural[619], turismo musical, turismo gastronómico y turismo astronómico, entre otros.

A los efectos de entender la magnitud del reto que enfrenta Puerto Rico como destino turístico, la Tabla 25 detalla la infraestructura turística en riesgo, que requiere de medidas de adaptación y resiliencia, además de soluciones basadas en la naturaleza.

[619] Véase Organización Mundial del Turismo (2016) Alianza entre turismo y cultura en el Perú - Modelos de colaboración entre turismo, cultura y comunidad y OECD (2009) El impacto de la cultura en el turismo, OECD, París. (Traducción al español SECTUR México).

Tabla 25.

Infraestructura turística en riesgo

Impacto	Categoría	Cantidad
Construida	Hoteles	122
	Aeropuertos	7
	Puertos	12
	Marinas	18
	Clubes náuticos	13
	Hospitales	15
	Plantas de generación eléctrica	7
	Kilómetros de carretera principal	249
	Kilómetros de infraestructura de agua potable	200
	Kilómetros de infraestructura de aguas sanitarias	260
	Plantas de tratamiento de aguas usadas	19
Natural[620] [621] [622]	Reservas de la biosfera	2
	Playas arenosas	235
	Áreas naturales protegidas	156
	Áreas marinas	27
	Manglares	67 km2
	Arrecifes	+ 5,000 km2
	Ríos	224
Cultural[623]	Propiedades del Registro Nacional	348
	Edificios, estructuras, sitios, objetos o distritos	2,007
	Museos	74

Fuente: DRNA, Programa de Manejo de la Zona Costanera; Reimagina Puerto Rico; USDA, Inventario Detallado de Áreas Protegidas; y Oficina Estatal de Conservación Histórica.

[620] Sobre infraestructura natural refiérase al Inventario Detallado de Áreas Protegidas y Otros Mecanismos para la Conservación de Terrenos en Puerto Rico (USDA 2019) y Reimagina Puerto Rico Infraestructura Natural (Comisión Asesora para Puerto Rico Resiliente 2018).

[621] Sobre playas y acceso público a costas refiérase al Plan Estratégico para la Conservación y Mantenimiento de las Playas de Puerto Rico (DRNA 2014) y al Plan Maestro de Acceso Público a las Costas de Puerto Rico (DRNA 2014).

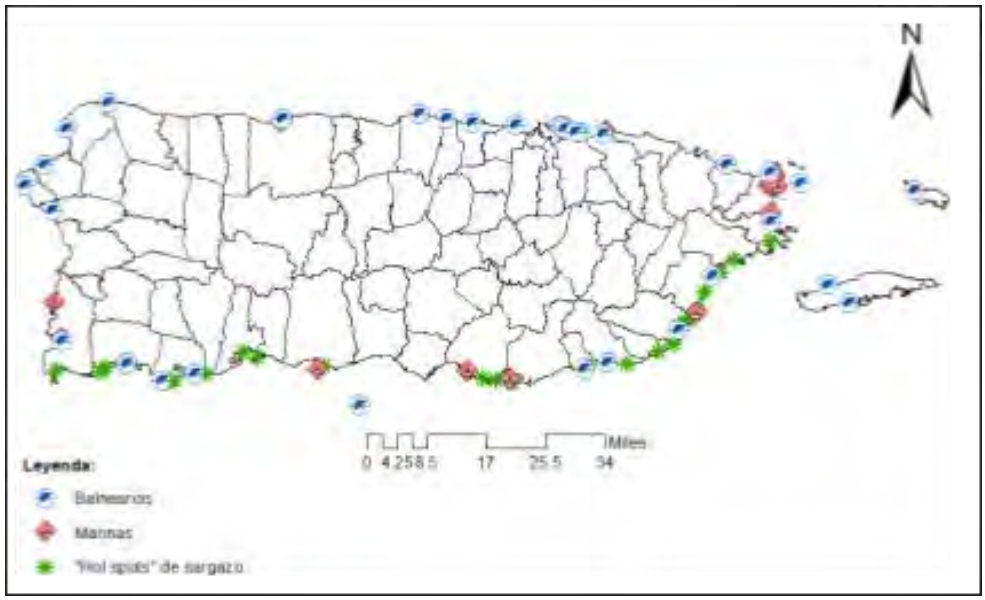
[622] Véanse las secciones de la 4.8 a la 4.10 del Plan.

[623] Oficina Estatal de Conservación Histórica.

La base de datos de la CTPR contiene información de 154 hospederías y 157 empresas endosadas y sus vulnerabilidades[624]. De este informe podemos ver en el Mapa # 1 la alta exposición de nuestra infraestructura hotelera. De las 154 hospederías endosadas, 122 (79 %) ubican en las zonas expuestas al aumento en el nivel del mar asociado al cambio climático.

Mapa 1.

Hospederías endosadas en zona costera



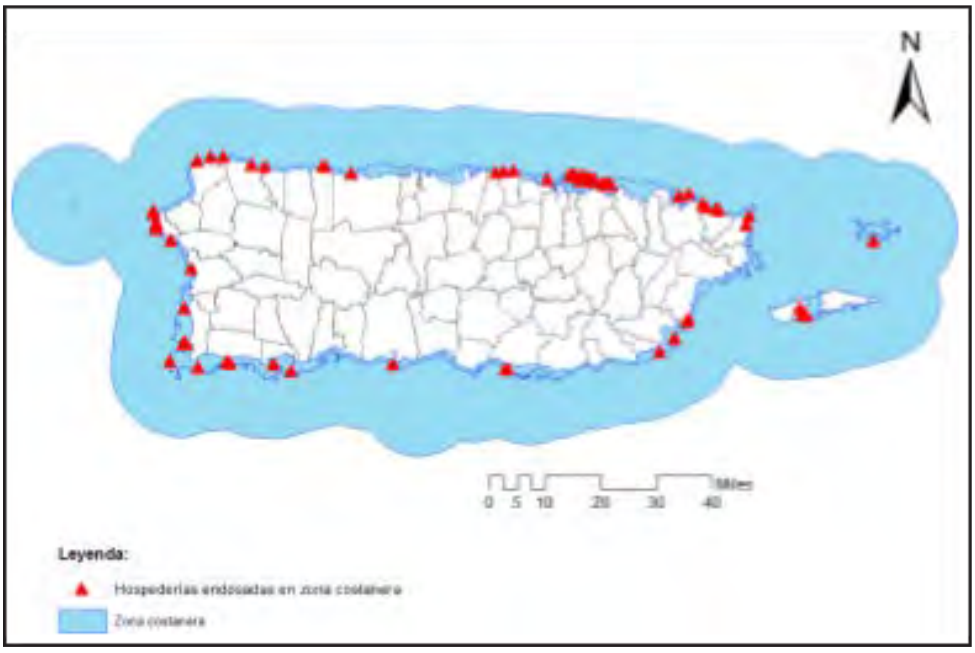
Fuente: CTPR

Del mismo informe se desprende que el 50 % (16/32) de los balnearios y el 72 % (13/18) de las marinas identificadas se encuentran en zonas de mayor tendencia a depósitos de sargazo (Mapa # 2). Esto representa un reto de calidad del producto turístico y de salud para el destino y sus visitantes. En los mapas # 3 y # 4 se observa la vulnerabilidad de las hospederías endosadas a la erosión costera y a las áreas inundables, respectivamente. Es evidente la alta exposición de estas instalaciones a los efectos del cambio climático.

[624] Véase el anejo 6, Informe de la Vulnerabilidad Turística de Puerto Rico redactado por la División de Turismo Sostenible de la Compañía de Turismo.

Mapa 2.

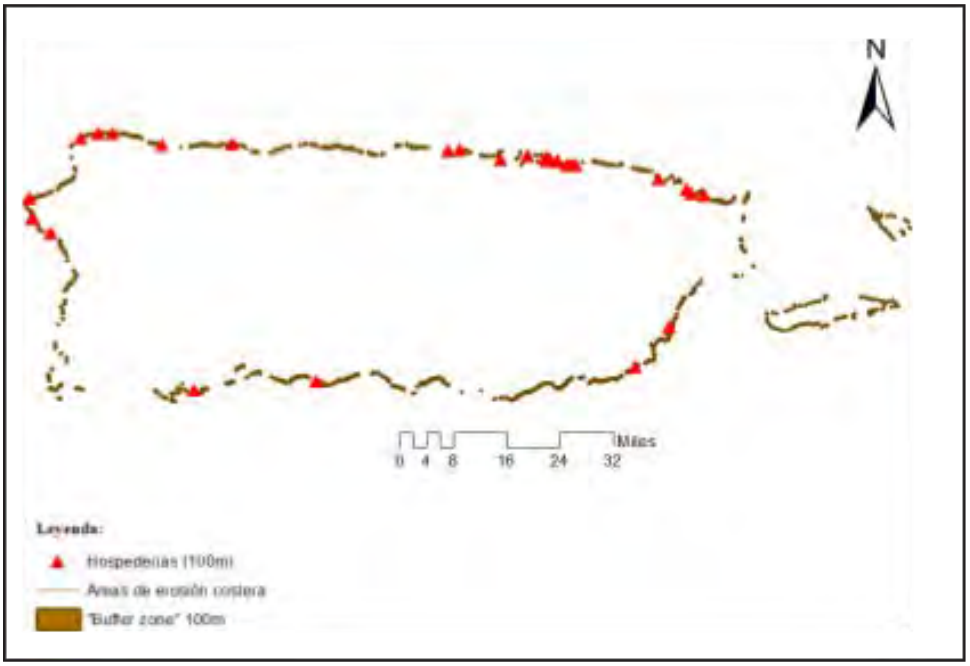
Distribución espacial del sargazo, balnearios y marinas en Puerto Rico



Fuente: CTPR

Mapa 3.

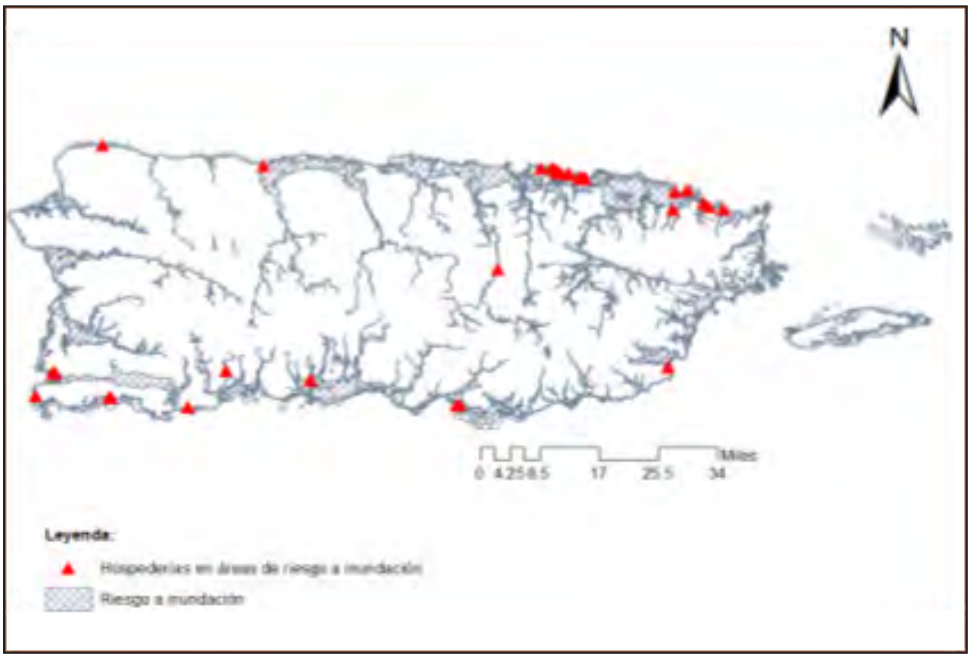
Hospederías endosadas en áreas erosión costera



Fuente: CTPR

Mapa 4.

Hospederías endosadas en áreas inundables



Fuente: CTPR

4.11.4. El sistema turístico puertorriqueño ante el cambio climático

4.11.4.1. Políticas públicas de planificación territorial del turismo

Para que un destino turístico pueda atender con efectividad los retos del cambio climático se requiere que opere bajo un sistema de gestión turística climática, pero sobre todo que esté planificado para el turismo. Este sistema lo integran las leyes, reglamentos, planes y programas de desarrollo turístico que provean un marco de planificación estratégica basado en la conservación y preservación de los recursos territoriales.

El primer esfuerzo para la planificación territorial del turismo en Puerto Rico se hizo en el 1972 con la Ley 374 de 1949. El estatuto creó las zonas de interés turístico. No obstante, la primera designación se aprobó en el 1980. Al presente, hay quince designaciones. La política pública detrás de las zonas de interés turístico era, por un lado, identificar áreas del territorio con vocación y recursos territoriales con potencial turístico y, a la vez, delimitar el espacio territorial para la actividad turística. Sin embargo, este instrumento de planificación territorial del turismo no incluyó herramientas para su planificación, gestión y desarrollo, por lo que luego de su designación no se implementaron planes ni programas. Tampoco se estableció quién tenía la jurisdicción (o funciones) para impulsar las mismas. Ni los municipios ni la CTPR gestionan estas zonas,

salvo para atender solicitudes de incentivos para desarrollo turístico. En la Tabla 26 y el Mapa # 5 se muestran las quince zonas de interés turístico designadas. Salvo Coamo, todas están ubicadas en la costa y ninguna en zonas rurales o la montaña.

Tabla 26.

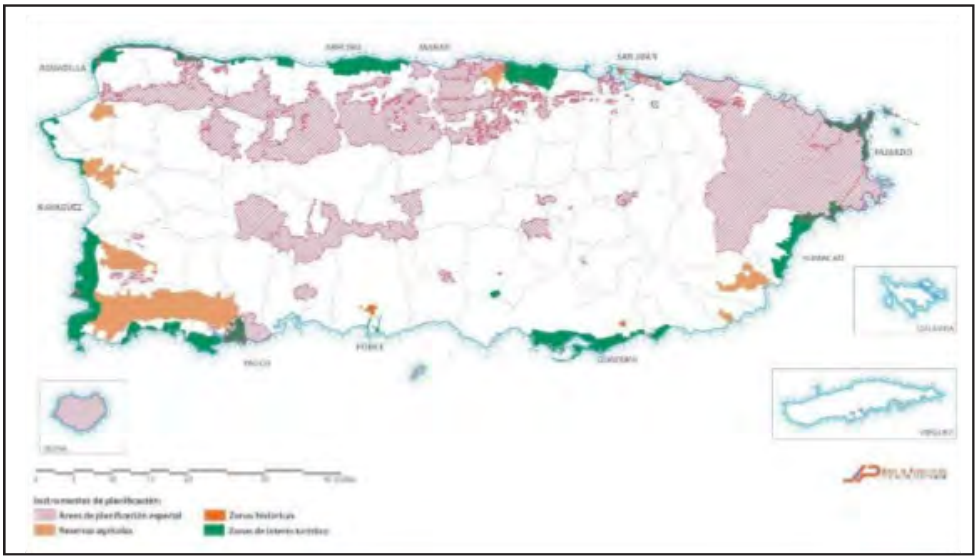
Zonas de interés turístico designadas en Puerto Rico

Orden de designación	Nombre	# Resolución	Año
1	Condado	RP-16-0-80 (ZIT-1)	1980
2	Isla Verde	RP-16-0-80 (ZIT-2)	1980
3	Ponce	RP-4-13-91 (ZIT-3)	1991
4	Coamo	RP-4-17-93 (ZIT-4)	1993
5	Río Grande-Luquillo-Fajardo	RP4-18-93 (ZIT-5)	1993
6	Guánica-Lajas	JP-ZIT-1994-006	1994
7	Cabo Rojo	JP-ZIT-1994-007	1994
8	Hatillo-Camuy-Quebradillas	JP-ZIT-1996-008	1996
9	Aguadilla-Isabela	JP-ZIT-1997-009	1997
10	Aguirre-Bahía Jobos	JP-ZIT-2000-10	2000
11	Naguabo-Humacao	JP-ZIT-2000-12	2000
12	Vega Alta-Dorado-Toa Baja	JP-ZIT-2000-014	2000
13	Rincón-Añasco	JP-ZIT-2000-011	2001
14	Guayama-Arroyo	JP-ZIT-71-72	2011
15	Arecibo-Barceloneta	JP-ZIT-06-07-01	2012

Fuente: Junta de Planificación de Puerto Rico.

Mapa 5.

Zonas de interés turístico e histórico (2015)



Fuente: Junta de Planificación. 2015

El segundo esfuerzo de planificación territorial del turismo se dio en el 2006 con la creación de las zonas de turismo sostenible en la Ley de Política Pública para el Desarrollo Sostenible del Turismo (Ley 254-2006), que las define como aquellas áreas con valor ecológico y cultural con potencial de desarrollo ecoturístico. Al presente no se conoce la designación de una sola zona de turismo sostenible.

El tercer y último esfuerzo surgió entre el 2005 y el 2016[625] cuando, sin considerar la existencia de las zonas de interés turístico ni las zonas de turismo sostenible, se impulsó el concepto de regiones turísticas (Mapa # 6) que al presente se componen del Destino Turístico Porta del Sol - Puerto Rico, el Distrito Especial Turístico de la Montaña, Porta Caribe, Porta Atlántico, Porta del Este y Región Metropolitana. El diseño de estas regiones tiene como reto la cantidad de municipios que las componen y la extensión territorial que abarcan. Ello impide una gestión efectiva del destino. Según todas las publicaciones del Perfil del Visitante de la Junta de Planificación que se han hecho luego del 2005, cuando se creó la Región Porta del Sol, esta nunca ha podido superar a la zona metropolitana ni a la zona este en desarrollo turístico. Haberla convertido en una región no representó un impulso o desarrollo turístico significativo.

[625] Ley 158 de 2005, Ley 54 de 2009, Ley 125 de 2016 y Ley 254 de 2006.

Mapa 6.

Regiones turísticas de Puerto Rico (2005-2016)



Aun cuando designar las zonas de interés turístico fue la primera legislación para la planificación territorial del turismo y pese a que la misma establece criterios claros para las designaciones, la regionalización turística utilizada como estrategia de mercadeo de destino es la más conocida. Desde que la Asamblea Legislativa o la Junta de Planificación designaron zonas de interés turístico, nunca se han aprobado planes de desarrollo o de infraestructura ni una estructura de gestión para estas.

El sistema de planificación y de gestión del destino es clave para poder responder con éxito a los retos del cambio climático. Se requiere que el Estado defina una política pública clara y uniforme de planificación y gestión del territorio turístico que empodere a los municipios para implantarla.

4.11.4.2. Plan de Adaptación al Cambio Climático (PACC 2016) de la Compañía de Turismo de Puerto Rico

Esta es una excelente herramienta que, según informa la CTPR, está bajo revisión. No se tiene constancia de que el PACC se haya implantado o divulgado. Una revisión del documento permite conocer que, desde el 2016, la CTPR tiene un instrumento para la adaptación al cambio climático que no se logró implantar.

4.11.4.3. Indicadores de vulnerabilidad, adaptación y resiliencia[626]

En el contexto del cambio climático y el turismo, los indicadores sirven para proporcionar información y datos estratégicos que permiten medir la sostenibilidad de un destino y de sus recursos mediante la relación de las condiciones climáticas con el turismo. No se encontró ningún documento en que el sector turístico puertorriqueño definiera indicadores ni la forma en que el sector habría de medirlos, aunque se reconoce que el PACC hace un acercamiento a definir medidas de adaptación y resiliencia que nunca se implantaron.

4.11.4.4. Retos detectados para el sistema turístico puertorriqueño ante el cambio climático

Antes de actuar para enfrentar el cambio climático es preciso conocer lo que el turismo representa para Puerto Rico en números de visitantes. En la Tabla 27 se desglosa por años la cantidad de turistas que llegan a Puerto Rico y se observa que el visitante no residente supera en números a la población residente.

Tabla 27.

Visitantes

Visitantes	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Total de turistas (M)	8,119	7,046	6,989	8,303	4,873	8,109
Turista no residente	5,115	4,476	4,725	5,434	2,901	4,723
Turista residente	3,004	2,569	2,264	2,869	1,972	3,386

Fuente: *Discover Puerto Rico*

Lo anterior es un dato de importancia extrema por la carga sobre los recursos y servicios que ello representa. A la carga de los más de 3 millones de residentes hay que sumarle la presencia durante el año de unos 4,723 millones de turistas consumiendo recursos y generando impacto. Si a ello se le suma el hallazgo expuesto en la sección 4.11.2 de que el 75 % pernocta en las regiones metropolitana y este, la carga sobre esas áreas es significativa. Los recursos son limitados y muchos de ellos están en estado crítico y expuestos a los efectos del cambio climático. Cuando la población de turistas en el destino supera por mucho a la población residente, agrava las condiciones del suministro de servicios básicos que ya afectan a los locales.

[626] Véase UNWTO (2004). *Indicators of sustainable development of tourism destinations: a guidebook*. Madrid: United Nations World Tourism Organization.

De la investigación realizada y a base de los criterios que establece la Ley 33-2019, el primer diagnóstico que podemos hacer es que resulta imposible determinar la aportación o impacto que el sector turístico puertorriqueño tiene sobre los servicios básicos, como exponemos en la Tabla 28. No existen datos ni análisis al respecto. Por lo anterior, la CTPR tiene el reto de incorporar a su gestión la recopilación y el análisis de datos sobre los efectos medioambientales de su sector.

Tabla 28.

Servicios básicos y el sector turístico en Puerto Rico

Recurso	Comentario
Agua potable[627]	Se desconoce el impacto del sector turístico en el consumo de agua. No existe un indicador de consumo por empresa turística como estrategia de sostenibilidad. Ante el cambio climático y los períodos de sequía[628] asociados, el sector turístico representa una demanda adicional del recurso agua, por lo que se deben establecer indicadores de consumo sostenible.
Suministro de energía[629]	El sector turístico disfruta de tarifas especiales y es un cliente con alta demanda del servicio eléctrico. No se tienen datos ni indicadores sobre un el impacto del sector en un sistema en estado crítico en Puerto Rico.
Disposición de residuos[630]	No se tienen datos de la cantidad de residuos que el sector turístico produce. El sector hotelero dispone de los desechos mediante proveedores de servicios privados. Tampoco se identificaron indicadores.
Reciclaje	No existe un programa de reciclaje del sector turístico. Puede haber programas en algunas empresas turísticas. No se tienen datos ni indicadores.
Atención primaria de salud[631]	No se tienen datos de las incidencias de salud de los turistas ni del uso del sistema de servicios de salud hospitalarios o ambulatorios. Ante el cambio climático es un reto incluir en la recopilación de estadísticas, por ejemplo, turistas atendidos por olas de calor y pueblo de ocurrencia, entre otros indicadores.

[627] Véase la sección 4.7 del Plan.
[628] Véanse en la sección 4.7.1 Ilustraciones sobre episodios de sequía (2002-2022 y 1981-2022) y cambios en la climatología.
[629] Véase la sección 4.1 del Plan.
[630] Véase la sección 4.4 del Plan.
[631] Véase la sección 4.5 del Plan.

4.11.4.5. Oportunidades detectadas para el sector turístico puertorriqueño

Ante los efectos del cambio climático surge sin duda una presión sobre los recursos naturales de la ruralía y la montaña que nos debe invitar a planificar y gestionar el turismo desde una mirada medioambiental para conservar y preservar nuestros recursos territoriales. Si el sector turístico cuenta para su crecimiento con nuestros recursos naturales, no solo debemos pensar con urgencia en un modelo turístico con una estrategia de sostenibilidad turística. También debemos entender que los efectos del cambio climático podrían condicionar nuestra competitividad como destino afectando, por ejemplo, la demanda turística por las condiciones del clima o la pérdida de atractivos turísticos como las playas.

Algunas oportunidades para el destino son:

1. Incrementar el turismo en el área de la montaña durante los meses en que se registrarán temperaturas extremas (mayo a septiembre).

2. Las marejadas severas que causan los huracanes ayudarán a los arrecifes de coral a sobrevivir los efectos dañinos de las temperaturas extremas en el mar, como el fenómeno del blanqueamiento de corales.

3. Según se ha creado el nicho del turismo médico, se podría explorar la viabilidad de establecer el nicho de turismo científico dirigido a estudiar los impactos de las manifestaciones del cambio climático en el medioambiente tropical.

4.12. Educación

Puerto Rico y otras islas del Caribe son susceptibles a los efectos negativos del cambio climático antropogénico; “por ello, es importante que la educación sobre el cambio climático se desarrolle e implemente en la isla para que la población, especialmente su juventud, pueda adaptarse adecuadamente a sus efectos”[632]. En Puerto Rico se han aunado esfuerzos para educar a las personas sobre cómo los efectos del cambio climático afectan la vida y propiedad. Sin embargo, queda mucho por hacer. Los efectos del cambio climático en Puerto Rico se evidencian en múltiples estudios realizados por científicos locales, quienes afirman que todas las administraciones gubernamentales han ignorado estos análisis, vitales para la elaboración de un plan de adaptación que permita construir un país más resiliente y sostenible[633]. Se necesita educar a la población y a los líderes sobre la vulnerabilidad de las comunidades costeras al aumento del nivel del mar, los efectos del fenómeno isla de calor, los extremos de sequías, precipitación y erosión costera, entre muchos otros efectos del cambio climático.

Los eventos atmosféricos deben ser parte de la educación ambiental con énfasis en salvar vida y propiedad. Es importante enfatizar en los indicadores que afectan la sa-

[632] Raymond, E., Gagliano, M. & Cloutier, P. (2014). Developing an Educational Module on the Impacts of Climate Change on Puerto Rico and its Inhabitants. Obtenido de https://digitalcommons.wpi.edu/iqp-all/1519.

[633] Estrada et al., (2018).

lud, la economía y el aspecto socioecológico. Por la posición geográfica, el país está propenso a experimentar todos los años temporadas de huracanes activas, por lo que la preparación para estos eventos suele ser parte de cada plan familiar. Sin embargo, otros efectos del cambio climático pueden aumentar la vulnerabilidad de muchas comunidades que no están preparadas con un plan de mitigación y adaptación.

La educación consiste en la creación y desarrollo evolutivo e histórico del sentido de vida y la capacidad de aprovechamiento de todo el trabajo con el que las personas se esfuerzan y al cual se dedican durante su vida, de manera individual y colectiva; ya sea bajo su propia administración, la dirección de otros, de organizaciones públicas, privadas o bajo la administración del Estado[634]. Uno de los mayores retos de la educación moderna es incorporar temas relacionados con el cambio climático. Antes del huracán María en el 2017, no se tenía una percepción clara de las implicaciones del cambio climático en Puerto Rico. Sí se conocía que existían. A pesar de que se ha evaluado la vulnerabilidad socioecológica debido al cambio climático, la educación al respecto no es suficiente.

El informe *Puerto Rico's Blueprint for Climate Change Mitigation and Adaptation* establece como un pilar y punto de referencia que es meritorio implementar un currículo escolar en temas de mitigación, adaptación y resiliencia al cambio climático. Para enfrentar los efectos del cambio climático no basta con adoptar políticas de adaptación y mitigación. Es preciso también contar con altos niveles de comprensión, consenso y trabajo participativo entre la ciudadanía, las empresas y las diferentes instancias del poder público si se quiere trascender las fronteras y actuar a nivel local, regional y global[635]. El desconocimiento de la población sobre el cambio climático debe considerarse como un asunto de emergencia.

Durante la década de 1970, el medioambiente tomó prominencia en Puerto Rico, no solo desde el ámbito comunitario, sino también a nivel político. Esto dio paso a la creación de la Ley Núm. 9 de Política Pública Ambiental. Las agencias de gobierno crearon departamentos y divisiones dedicadas a la educación ambiental y a brindar información a la comunidad, a través de eventos educativos tales como seminarios y conferencias cónsonos con esta ley. La creación del estatuto permitió el nacimiento de instituciones gubernamentales como la Junta de Calidad Ambiental y abrió el camino para nuevas leyes que resultaron en la creación del DRNA en el 1972. Esta ley surgió como consecuencia de la creación en 1970, en Estados Unidos, de la *National Environmental Policy Act*, bajo la jurisdicción de la EPA.

En la década de 1980, la UPR, Recinto de Rio Piedras, creó el Departamento de Ciencias Ambientales con el propósito de fomentar las carreras interdisciplinarias a nivel ambiental, desarrollar profesionales aptos para el campo laboral y promover la investigación y la educación en ciencias ambientales. En 2001, se creó el primer programa de televisión *Geoambiente*, dedicado a la conservación ambiental y a la discusión de los problemas ambientales de la isla. En 2002, la Universidad Metropolitana del Sistema

[634] León, A. (2007). "¿Qué es la educación?". *Enducere*. *11*(39): 595-604. Obtenido de http://www. redalyc.org/pdf/356/35603903.pdf.
[635] Cerati y Queiroz (2016).

Universitario Ana G. Méndez (ahora Universidad Ana G. Méndez, Recinto de Cupey) creó el Centro de Estudios para el Desarrollo Sostenible.

En 2005, la UPR, Recinto de Carolina, en conjunto con la Universidad Complutense de Madrid y la *NASA Space Grant Consortium* presentaron el primer curso de verano titulado *Gases de efecto invernadero y cambio climático*. En este curso participaron científicos de diferentes países con el propósito de proveer recomendaciones para crear conciencia en el gobierno y en la población sobre los efectos del cambio climático.

En 2013, el PRCCC junto a colaboradores y afiliados redactaron el documento titulado *Evaluando la vulnerabilidad socioecológica de Puerto Rico en un clima cambiante*. A pesar de que el documento contiene toda la información necesaria para "formular e implantar política pública, la planificación y el desarrollo de las áreas costeras, así como fortalecer los procesos de educación y concienciación ciudadana sobre los riesgos y las alternativas de adaptación a escenarios climáticos futuros"[636], no contiene una sección específica donde se describa qué se podría hacer para educar más al público en general, y solo se concentra en áreas costeras. Sin embargo, el documento menciona la importancia de los estudios de percepción para conocer la manera en que las personas piensan y perciben la costa, los ecosistemas marinos, la infraestructura, la agricultura y los recursos hídricos, por ejemplo, para poder crear programas de educación destinados a informar al público.

En 2016, el DRNA redactó el primer borrador de un plan de adaptación ante los cambios climáticos. En este plan tampoco se incluyó una sección dirigida a cómo se educaría a la población general sobre el cambio climático.

El Centro de Educación en Cambio Climático y Ambiental (CenECCA) es un proyecto de *Sea Grant Puerto Rico* con el propósito de atender las necesidades de información científica orientada al desarrollo de acciones, programas, actividades y política de adaptación relacionadas al cambio climático, que incluye peligros naturales y el aumento del nivel del mar, con tal de minimizar los impactos sociales y ambientales adversos en potencia"[637]. Desde el 2013, CenECCA educa al público general sobre la complejidad que implica el cambio climático, por medio de una variedad de actividades. Junto con la EPA, el DRNA y CariCOOS, se dirigen a sus pares, al público, a los manejadores de recursos, a los responsables de la toma de decisiones y a los oficiales de gobierno con el objetivo de instruir, educar, crear capacidad y diseño de políticas destinadas al desarrollo de acciones para la formación de un público informado y de una zona costera resiliente que enfrente los retos y desafíos del cambio climático, los peligros naturales, el aumento en el nivel del mar y las actividades humanas. Además, *Sea Grant* creó unas guías curriculares para maestros sobre los ecosistemas marinos, así como una guía específica sobre el cambio climático. Esta guía incluye un trasfondo científico sobre el tema, planes educativos alineados a los estándares del Departamento de Educación de Puerto Rico, actividades, una preprueba y posprueba, y un manual para los estudiantes, entre otros[638].

[636] PRCCC, 2013.
[637] *Sea Grant Puerto Rico*, 2021.
[638] Alicea, 2021.

Hasta el 2021, alrededor de 1,047 maestros se habían adiestrado con estas guías y 163,737 estudiantes participaron en estas actividades[639]. Además, en 2019 se presentó el libro *Puerto Rico y el Mundo: el Cambio Climático*, escrito por expertos en colaboración con la Fundación Amigos de El Yunque. Este libro funciona también como guía de estudio para que los maestros puedan impartir los temas relacionados con el cambio climático de forma sencilla y puntual. La profesora Minnuette Rodríguez preparó una guía para que los maestros pudieran utilizar el libro en sus clases de forma fácil y sencilla. Es importante discutir otros temas o conceptos que tienen conexión con el cambio climático: Ley de conservación de masa, eras geológicas, ciclos biogeoquímicos, atmósfera terrestre y zonas climáticas[640]. La guía ayuda al maestro a encontrar esa conexión a la hora de enseñar el tema de cambio climático. Otro recurso educativo es el libro *Calentamiento Global: La huella humana*, escrito por el Dr. Méndez Tejeda. El texto se enfoca en la divulgación del conocimiento científico que nos conduce a identificar y ejecutar cursos de acción para atender los problemas causados por el cambio climático.

Como programa de educación científica a las comunidades, el EcoExploratorio: Museo de Ciencias de Puerto Rico cubre el tema del cambio climático. Bajo la plataforma digital Ciencia Virtual, el museo ha ofrecido decenas de talleres con científicos y expertos sobre cambio climático para las comunidades, al igual que desarrolla actividades comunitarias. El museo tiene el proyecto “Tierra Viva”, que incluye una publicación de 12 páginas con información sencilla sobre el cambio climático. Se destaca un proyecto que realizó para niños bajo subvención de la Fundación Comunitaria de Puerto Rico, que ofrece acciones positivas para todas las edades. También consta de videos que ilustran estos conceptos para niños y jóvenes. El EcoExploratorio es miembro de la Comisión Europea bajo el Directorado de Ambiente en Bruselas en la Comisión de Biodiversidad para educar junto a otros 100 museos del mundo sobre el cambio climático y la biodiversidad.

Por otro lado, la meteoróloga Ada Monzón hizo el primer y único documental educativo sobre cambio climático en la isla, conocido como *Puerto Rico ante el Cambio Climático*, transmitido a través de WAPA TV el martes, 20 de abril de 2021. También preparó un video para la Organización Meteorológica Mundial.

4.12.1. ¿Qué impactos ha tenido la información divulgada en Puerto Rico sobre el cambio climático en todos los sectores?

A continuación, se resumen los hallazgos de investigaciones y estudios realizados en Puerto Rico sobre percepción ciudadana ante el cambio climático:

1. Consejo de Cambio Climático de Puerto Rico (2013). Estado del Clima de Puerto Rico 2010-2013 Resumen Ejecutivo: Evaluación de vulnerabilidades socio-ecológicas en un clima cambiante[641].

[639] Ídem.
[640] Rodríguez (2021).
[641] Véase en: https://research.fit.edu/media/site-specific/researchfitedu/coast-climate-adaptation-library/latin-america-and-caribbean/puerto-rico-usvi-bvi/PRCCC.--2013.--Assessing-Social-ecological-Impacts-PR-CC.--[ESP].pdf.

Del estudio realizado se resalta el siguiente aspecto más importante que justifica y permite establecer estrategias educativas eficientes según la percepción ciudadana: De todos los planes de mitigación de riesgos para los municipios de Puerto Rico, solo Naguabo, Peñuelas, Yauco, Hatillo, Salinas y Toa Baja mencionan los términos “cambio climático”, “calentamiento global” o “aumento del nivel del mar”. Estos términos importantes fueron incorporados en el 2020, luego de que se revisaran y aprobaran los nuevos planes de mitigación contra peligros naturales para los 78 municipios, de los cuales FEMA aprobó 62.

2. Diálogo sobre política pública para adaptación al cambio climático: diagnóstico y recomendaciones (2015).

Contexto del estudio: El Programa *Sea Grant* convocó a un diálogo en mesa redonda con 17 expertos que incluyeron científicos, académicos, representantes de agencias gubernamentales estatales y federales, comunicadores y representantes de organizaciones ambientales. Además, se realizaron entrevistas con 11 expertos que no participaron en la mesa redonda**.** En el estudio realizado bajo la Iniciativa de Adaptación al Cambio Climático en Comunidades Costeras (2015) los participantes expresaron sus percepciones y recomendaciones de las cuales se pueden resaltar los siguientes aspectos más importantes que justifican y permiten establecer estrategias educativas eficientes según la percepción ciudadana:

a. Prevaleció la percepción de que la ciudadanía en general, a excepción de la comunidad académica y del sector ambientalista, sabe poco sobre el cambio climático, y no tiene una idea clara de su efecto sobre Puerto Rico.
b. Los ciudadanos no saben cómo prepararse ante los posibles impactos y piensan que las acciones que se requieren para atender los problemas que puedan surgir están fuera de su control.
c. La ciudadanía no percibe los riesgos y efectos del cambio climático de manera inmediata.
d. Señalaron que la ciudadanía depende de que FEMA u otras agencias le comuniquen oportunamente qué hacer en casos de emergencia.
e. Señalaron un estudio de percepción pública realizado por el DRNA en 2009 que reveló que aproximadamente el 81 % de la población de ocho municipios costeros del oeste están conscientes de los riesgos que enfrentan y tienen un grado de preocupación sobre el cambio climático.
f. Expresaron que en la ciudadanía hay falta de un sentido de país y de dirección y la práctica de que hasta que la ciudadanía no experimenta los estragos de un evento de peligro máximo (por ejemplo, un huracán de categoría 3 o mayor) no internaliza la necesidad de tomar medidas preventivas y de preparación.
g. Enfatizaron que las medidas de educación, divulgación y acción a nivel comunitario deben proveerse prioritariamente en comunidades costeras y de mayor vulnerabilidad a la pérdida de la costa y a inundaciones.

Recomendaciones presentadas:

a. Capitalizar las pequeñas crisis relacionadas con el clima que ocurren en Puerto Rico y vincularlas con los pronósticos del cambio climático, con el fin de ilustrar

la inmediatez y lo cotidiano de la problemática. Ejemplos tangibles ayudarían a la ciudadanía a entender qué puede esperar.

b. Reformular el concepto de cambio climático para que sea accesible e inmediato a los intereses del público en general, que lo pueda entender e internalizar. Por ejemplo, presentar el tema en términos de "adaptación a eventos climáticos".

c. Contextualizar el tema dentro de la realidad de Puerto Rico para que la ciudadanía pueda relacionarse con el mensaje.

d. Llevar la discusión del tema más allá del campo de las ciencias; perseguir que se convierta en tema de conversación cotidiana entre los ciudadanos.

3. Percepción sobre el cambio climático en un periodo de crisis económica: el caso de Puerto Rico (2017).

Contexto del estudio: Cuestionario suministrado en el área metropolitana y la región este central con un total de 374 participantes mayores de 21 años. Del estudio realizado por Méndez Tejeda en 2017 se pueden resaltar los siguientes aspectos más importantes que justifican y permiten establecer estrategias educativas eficientes según la percepción ciudadana:

a. No existe un conocimiento informado de los impactos del cambio climático en la ciudadanía.

b. Los ciudadanos expresan que para combatir el cambio climático confían mayormente en las organizaciones ambientales (46.15 %), seguido por la comunidad científica (42.73 %).

c. El nivel de responsabilidad para enfrentar el cambio climático se les adjudica mayormente a los ciudadanos 81.87 %, luego a las empresas 78.20 %, y al Estado 70.72 %.

d. El 82.69 % de la población entiende que el gobierno debe darle prioridad a educar a la población sobre los impactos del cambio climático. La acción del Estado debe dirigirse a proteger el recurso de agua potable y la reforestación, opinó el 82 % de los encuestados.

e. El 75.21 % de los encuestados expresó que las acciones individuales no serán efectivas si los responsables principales no participan de forma activa.

f. El 81.62 % de los participantes manifestó interés en participar en actividades para combatir el cambio climático. Esto es cónsono con que el gobierno y las organizaciones ambientales deben ser más activos en las campañas educativas.

4. Estudio de percepción pública sobre el riesgo y la resiliencia al cambio climático en Puerto Rico (2018).

Contexto del estudio: Se realizó por Estudios Técnicos, Inc. solicitado por el Programa de la Zona Costera y Cambio Climático del DRNA. Se encuestó a personas en 1,000 hogares del área metropolitana de San Juan. Del estudio se pueden resaltar los siguientes aspectos más importantes que justifican y permiten establecer estrategias educativas eficientes según la percepción ciudadana:

a. Los medios de comunicación tradicionales y emergentes son los preferidos por la población para informarse sobre el cambio climático y los riesgos asociados: televisión (58.6 %) y redes sociales (45.5 %).

b. El cambio climático ocupaba la novena posición entre los principales problemas indicados, junto con la crisis fiscal. Los primeros fueron: la criminalidad, el desarrollo económico y la corrupción.

c. El 66.7 % de las personas encuestadas indicó desconocer lo que es el cambio climático.

d. Las personas encuestadas expresaron que el ámbito municipal y el país en general no están preparados para el cambio climático.

e. Los municipios no costeros tienen el promedio mayor de personas que piensan que la Legislatura, los municipios (alcaldes y legislaturas municipales), las organizaciones sin fines de lucro y comunitarias, y su comunidad deben darle mayor prioridad al tema de cambio climático en su gestión.

f. En la Tabla 29 se presentan las preocupaciones que más se asocian al cambio climático en Puerto Rico y son de prioridad para los encuestados.

Tabla 29.

Preocupaciones principales asociadas al cambio climático en Puerto Rico

	Frecuencia	%
Huracanes o tormentas tropicales más fuertes	620	62.0
Aumento de plagas (ej. mosquitos)	331	33.1
Más calor (o calor intenso que le dificulta o impide hacer sus actividades cotidianas)	315	31.5
Más erosión costera	274	27.4
Se inundan áreas que antes no se inundaban	246	24.6
Mayores inundaciones costeras	226	22.6
Lluvias más fuertes no asociadas a tormentas o huracanes	204	20.4
Mayores inundaciones por el desbordamiento de ríos, quebradas o sumideros	196	19.6
Más sequía o falta de agua por poca lluvia	183	18.3
Marejada más fuerte (no asociada a tormentas o huracanes)	146	14.6
Terremotos	4	0.4
Más basura	2	0.2

Tabla # 27 del Estudio de percepción pública sobre el riesgo y la resiliencia al cambio climático en Puerto Rico (2018). La tabla en el documento original incluye la siguiente nota: La base numérica de esta tabla está compuesta por las 1,000 personas que participaron en la encuesta. Al ser una pregunta de respuestas múltiples, se realiza un conteo independiente para cada una de las respuestas mencionadas y la suma de porcientos puede ser distinta al 100 %. Por otro lado, esta pregunta incluye las respuestas mencionadas por más de una persona.

Acciones inmediatas para el componente educativo, según los encuestados:

a. El 97.6 % expresó que se debe educar para que las personas conozcan los riesgos en las áreas donde viven y trabajan.
b. El 96.6 % expresó que se debe educar sobre las medidas existentes para la protección y adaptación.
c. El 93.4 % expresó que se debe educar sobre las oportunidades de negocios que surgen de la adaptación al cambio climático.
d. El 68.4 % expresó que la barrera o limitación principal para que las personas lleven a cabo actividades o acciones dirigidas a abordar los impactos del cambio climático es la falta de información específica sobre las medidas o acciones disponibles.
e. La Tabla 30 identifica los temas que los participantes entienden que se deben considerar a la hora de educar a la ciudadanía y que son de su interés.

Tabla 30.

Temas para educar a la ciudadanía

Tema	%
Las distintas causas del cambio climático	**90.8**
Los posibles riesgos y consecuencias del cambio climático en Puerto Rico	**90.7**
Las formas en que me puedo preparar para manejar (adaptarme) a los efectos del cambio climático	**90**
Los posibles riesgos y consecuencias asociados al cambio climático en mi hogar	**90.2**
Medidas para reducir los efectos del cambio climático (luchar contra el cambio climático)	**89.5**
Los posibles riesgos y consecuencias del cambio climático en mi comunidad	**88.5**
Las oportunidades que surgen del cambio climático	**84.3**
No sabe / No indica	**1.9**

Tabla basada en la Gráfica 39 del Estudio de percepción pública sobre el riesgo y la resiliencia al cambio climático en Puerto Rico (2018). El documento original señala que la base numérica está compuesta por las 1,000 personas que participaron en la encuesta. Al ser una pregunta de respuestas múltiples, se realiza un conteo independiente para cada una de las respuestas mencionadas y la suma de porcientos puede ser distinta al 100 %. Por otro lado, esta pregunta incluye las respuestas mencionadas por más de una persona.

a. Los participantes mencionaron como sus medios preferidos para aprender sobre el cambio climático: televisión (58.6 %); redes sociales (45.5 %); radio (40.9 %); internet (35.4 %); charlas, orientaciones y ferias informativas (20.4 %); literatura, hojas sueltas y otra promoción escrita (19.3 %); correo electrónico (*email*) y correo postal (18.8 % cada una).

5. Estudio de necesidades: Construyendo resiliencia a través de la innovación educativa (2020). EcoExploratorio.

Contexto del estudio: El personal del EcoExploratorio realizó este estudio con maestros, estudiantes y con el público en general que participa en las actividades del EcoExploratorio. En total, 102 personas de todo el país respondieron el cuestionario virtual. Sus edades fluctuaron entre los 14 y 45 años. Del estudio se pueden resaltar los siguientes aspectos más importantes que justifican y permiten establecer estrategias educativas eficientes según la percepción ciudadana:

a. Las personas expresaron que desean aprender sobre el tema de resiliencia y fenómenos naturales.
b. Las personas indicaron que tienen acceso a plataformas digitales para poder conectarse y aprender más sobre estos temas.

6. *Perceptions of Climate Change in Puerto Rico before and after Hurricane Maria* (2021).

Contexto del estudio: Lo dirigió el Dr. Méndez Tejeda en seguimiento al estudio previo, seis meses después del impacto del huracán María. Este estudio mostró que la cantidad de personas con conocimiento general sobre el cambio climático global aumentó de 43% a 62 %[642]. Considerando la destrucción severa que el fenómeno atmosférico provocó en el país, los investigadores entienden que este aumento es leve. Aquellas consecuencias devastadoras del huracán que se prolongaron por meses no provocaron que la ciudadanía en general tomara la iniciativa de llevar a cabo acciones diferentes que le protegieran de situaciones similares en el futuro. Este es el primer estudio en Puerto Rico que demuestra que después de un evento catastrófico muchas personas reconocen los impactos del cambio climático y sus efectos, pero no necesariamente se correlaciona con hacer cambios trascendentales en su percepción ambiental. Es de suma importancia que se promueva la enseñanza no solamente sobre el cambio climático sino para el manejo de emergencias como individuos y familias.

Es necesario considerar que los niveles de pobreza y la falta de viviendas asequibles limita a muchas familias a tomar la decisión de mudarse a zonas menos vulnerables a eventos atmosféricos y de mayor susceptibilidad a los efectos de cambio climático. Ante estos escenarios sobre el conocimiento público en torno al cambio climático, las escuelas tienen un rol importante en el desarrollo de las comunidades, ya que proveen espacios saludables para la incorporación de toda la ciudadanía[643]. Esto permite que toda la comunidad colabore en conjunto como un ecosistema saludable y sustentable con sentido de pertenencia, con el fin de crear centros educativos de alto rendimiento a través de alianzas y acuerdos de colaboración que promuevan la gestión educativa de excelencia.

[642] Méndez-Tejeda, R., Santos-Corrada, M. y Mena, S. (2021). "Perceptions of Climate Change in Puerto Rico Before and After Hurricane Maria." https://www.scirp.org/pdf/ajcc_2021042615214652.pdf.

[643] Mendoza Indalecio, U & Rodríguez López, O. (2021). "Percepción social del cambio climático en estudiantes de Bachillerato Técnico en Jiutepec, Morelos, México". *Revista Iberoamericana Ambiente & Sustentabilidad* (4), DOI: https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8426224

7. Estudio de Percepción sobre el Cambio Climático en Maestros/as de Ciencias del Sistema Público y Privado de Puerto Rico y Encargados de Educación en el Hogar (*Homeschooling*) (2023).

Contexto del estudio: Este estudio se realizó para conocer la percepción de maestros de ciencias de escuelas públicas y privadas, y encargados de *Homeschooling* de Puerto Rico. En total, 102 participantes completaron el cuestionario. La muestra incluyó a maestros y encargados de *Homeschooling* de 40 pueblos que contaban con experiencia laboral de entre 4 hasta 40 años como docentes en diversas materias. Del estudio realizado por la Dra. Keyla Soto se pueden resaltar los siguientes aspectos más importantes que justifican y permiten establecer estrategias educativas eficientes según la percepción ciudadana:

1. El 84.3 % expresó que la falta de conocimiento en el país sobre el cambio climático le causa mucha preocupación como docente.

2. El 88.2 % está completamente de acuerdo en que el tema de cambio climático y sus efectos requiere más información con imágenes y visuales pertinentes a Puerto Rico a la hora de educar.

3. El programa de preparación de maestros de ciencias en las universidades debe incluir en el currículo un curso de educación ambiental y cambio climático; de los participantes, el 87.3 % expresó estar totalmente acuerdo con la premisa.

4. Se deben colocar letreros en áreas públicas que orienten a las personas sobre la importancia del consumo responsable de agua, manejo de desperdicios sólidos y el ahorro de energía. El 89.2 % expresó estar de acuerdo.

5. Los resultados presentan que solo el 39.2 % utiliza siempre el material del DE para enseñar el tema de cambio climático.

Para abril de 2022, Puerto Rico tenía 753 escuelas públicas hábiles y 107 en construcción[644]. El Departamento de Educación tiene alrededor de 26,000[645] maestros en los planteles. La comunidad de aprendizaje era de 254,997 estudiantes en el año académico 2021-2022[646]. Las escuelas están divididas por regiones educativas entre San Juan, Bayamón, Caguas, Humacao, Arecibo, Ponce y Mayagüez. El Programa de Ciencias del DE les ofrece a los estudiantes desde kínder hasta duodécimo grado cursos que integran Ciencias en el nivel elemental, Ciencias Biológicas, Ciencias Físicas y Ciencias Terrestres para el nivel intermedio y Biología, Química, Física o Ciencias Am-

[644] Portal Informativo del Ciudadano, Educación. https://datos.pr.gov/datacardscollection/regreso-a-clases.

[645] Colón Dávila. J. (3 de mayo de 2022). "Educación deberá llenar al menos 2,685 plazas de maestros que han mostrado interés de jubilarse". *Primera Hora.* https://www.primerahora.com/noticias/gobierno-politica/notas/educacion-debera-llenar-al-menos-2685-plazas-de-maestros-que-han-mostrado-interes-de-jubilarse/.

[646] Portal Informativo del Ciudadano, Educación. https://datos.pr.gov/datacard/distribucion-de-matricula-por-dias-presenciales?parent=UmVncmVzbyBhIGNsYXNlcw==&parentPath=ZGF0YWNhcmRzY29sbGVjdGlvbi9yZWdyZXNvLWEtY2xhc2Vz

bientales para el nivel superior. En su reciente revisión curricular de 2022, el Programa de Ciencias identifica como una de sus metas que los estudiantes tengan conciencia ambiental y ecológica, y reconozcan que son parte del ambiente al proceder como ciudadanos responsables por medio de acciones, cualidades, valores y destrezas. Según la Carta Circular Núm. 07-2022-2023, con estos cambios se fomentarán experiencias educativas que redunden en el desarrollo o el fortalecimiento del pensamiento crítico y creativo de los estudiantes para ser ciudadanos hacedores del cambio para alcanzar un futuro sustentable para Puerto Rico.

El nuevo currículo provee la oportunidad de concienciar desde el nivel primario sobre el impacto humano o impacto antropogénico en los sistemas de la tierra y promueve que sean los estudiantes quienes busquen alternativas para mitigar ese impacto. Dentro del enfoque actual, los estudiantes estudian también los aspectos biológicos, físicos y químicos de los sistemas terrestres y, por medio del currículo, se fomenta la educación en materia de mitigación y de adaptación al cambio climático. Uno de los grandes efectos que tendrá este nuevo cambio curricular es a través de los temas transversales.

Estos temas se trabajan en las áreas del currículo como una serie de elementos del aprendizaje, integrados a las diferentes áreas de conocimiento. El programa de Ciencias ha trabajado uno de los temas transversales que se relaciona directamente con el artículo 4 de la Ley 33-2019: la educación para la concienciación ambiental y ecológica.

4.12.2. Deficiencia en la divulgación sobre cambio climático en todos los sectores

Según el informe de la Biblioteca Jurídica Virtual del Instituto de Investigaciones Jurídicas de la Universidad Nacional Autónoma de México (2019), la educación se considera una alternativa de adaptación; por lo tanto, lo que se proponga debe ser pensado desde un enfoque local, considerando las características y las necesidades de las personas. Asimismo, se deben establecer procesos pedagógicos que ayuden a gestionar el aprendizaje que se quiere transmitir, pues el contenido y la forma en que se enseñen no pueden ser iguales para todas las personas.

La divulgación del cambio climático se debe desarrollar teniendo en cuenta la educación formal, la educación no formal y la educación informal, ya que estos tres tipos de educación se complementan. Los tres contribuyen en nuestra formación a lo largo de nuestras vidas. Además, de esta manera se puede llegar a más personas y no solo centrarse en los sistemas escolarizados. La educación formal se refiere al sistema educativo escolar, institucionalizado y organizado. La educación no formal se refiere al conjunto de actividades educativas organizadas y sistemáticas que se realizan fuera del sistema escolar formal para facilitar determinados tipos de aprendizaje a subgrupos particulares de la población, tanto de adultos como de niños. La educación informal es el proceso no organizado y no sistematizado de adquisición de conocimientos, habilidades, actitudes y pautas de conducta a través de la convivencia diaria, la influencia generalizada y los medios de comunicación, y que además en la actualidad se ve reforzada por la posibilidad que ofrecen las tecnologías de la información.

Según el PRCCC en su informe *Ruta hacia la Resiliencia*, para que todo ciudadano pueda anticipar, responder o adaptarse a los cambios, necesitará contar con información confiable para conocer y priorizar las medidas de acción preventiva. Es sumamente importante que las personas responsables de la toma de decisiones conozcan con claridad cuáles poblaciones, sectores y ecosistemas están en mayor riesgo, para así poder evaluar las consecuencias del cambio climático y poder enfocar las acciones de mitigación, adaptación y resiliencia. Del proceso de entrevistas a los diversos sectores identificamos que muchas agencias han presentado información sobre aspectos educativos relacionados con el cambio climático que han realizado como iniciativas, pero la gran mayoría de estas agencias no posee evidencias ni análisis del alcance que han tenido, el resultado de las iniciativas ni la continuidad de estas.

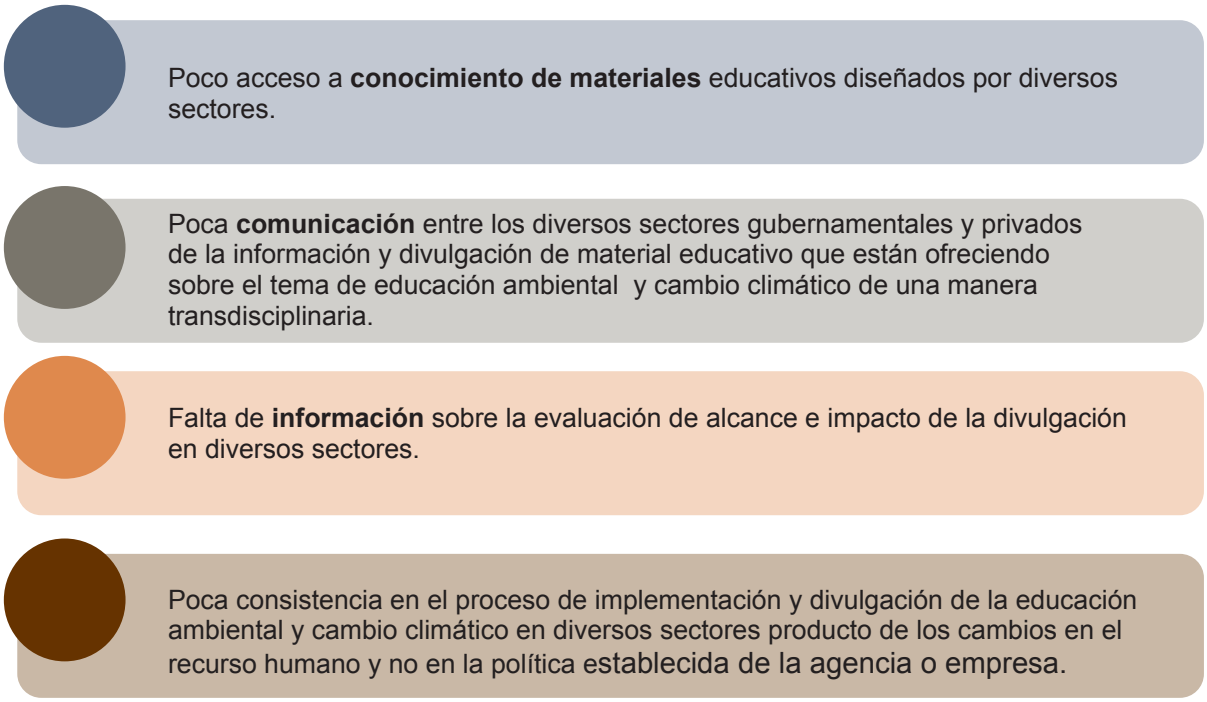
En el 2014, se realizó un Plan de Comunicación Ambiental para la Conservación de los Arrecifes de Coral de Puerto Rico. Los hallazgos más relevantes del estudio sobre los materiales educativos diseñados para la divulgación en diversos sectores fueron los siguientes:

a. Existe una amplia diversidad de materiales educativos dirigidos a diferentes grupos de interés sobre el tema de conservación y protección de los arrecifes de coral.
b. Los materiales educativos no necesariamente tienen conexión entre ellos para conformar una unidad coherente de comunicación sobre conservación y protección de los arrecifes de coral.
c. Las actividades para la distribución y la promoción de estos materiales son esencialmente las conferencias en las escuelas ofrecidas por los desarrolladores de los materiales, los talleres a los maestros, celebraciones de significado ambiental, tales como el Día del Planeta Tierra y los simposios científicos.
d. Existe poca o ninguna comunicación entre las oficinas del DRNA, al punto de que en ocasiones el personal no reconoce la información producida por la misma agencia.
e. No hay comunicación con otras agencias de gobierno ni con organizaciones no gubernamentales previo a la producción de materiales de comunicación y educación ambiental para evitar duplicidad o promover proyectos colaborativos entre las organizaciones.

Estos hallazgos ponen en perspectiva una problemática en cuanto al manejo de la información, divulgación y material educativo que en muchas ocasiones no se comparte entre las agencias para evitar la duplicidad de los trabajos y recursos. La deficiencia en la divulgación del tema de cambio climático y la educación ambiental se resume en la Ilustración 54.

Ilustración 54.

Deficiencias identificadas



Un estudio realizado en el 2020 por Cruz & Páramo sobre la educación para la mitigación y adaptación al cambio climático en América Latina analizó el estado actual de la investigación en educación sobre el cambio climático en la región, a partir de una revisión de las publicaciones incluidas en las bases de datos *Scielo*, *Ebsco Host*, *Dialnet* y *Redalyc*, desde 2009 a 2019. Los resultados indicaron que en Puerto Rico se ha realizado solo una publicación, lo cual representa un 2.8 % en divulgación científica. Con estos hallazgos, se concluye que la mayoría de los trabajos no evalúa la efectividad de las intervenciones sobre el cambio directo del comportamiento y que aún son predominantes los artículos de carácter descriptivo, aunque se reconoce que son la línea de base que abre las puertas a estudios de intervención o experimentales. Es necesario entonces aumentar y afinar el conocimiento básico y aplicado sobre la percepción social del cambio climático en América Latina, para poder diseñar, aplicar y legitimar acciones educativas en el marco de las políticas de respuesta.

Esta revisión sistemática muestra la necesidad de llevar a cabo estudios que generen impacto en la formación de las personas y evalúen las incidencias de estas experiencias educativas en la mitigación y adaptación al cambio climático. Es fundamental que se establezcan acciones a corto y largo plazo que permitan atender estas deficiencias para que la información alcance a los diversos sectores de Puerto Rico.

4.13. Justicia climática

En noviembre del 2022, se llevó a cabo la COP27, 27ª cumbre del clima de la ONU en Sharm el Sheij, Egipto, con la participación de más de 190 países para trabajar en favor del medioambiente y contrarrestar el cambio climático y sus efectos. Se llegó a un acuerdo que establece un mecanismo de financiación para compensar a las naciones más vulnerables por las pérdidas y los daños causados por los desastres climáticos. En un mensaje de vídeo emitido desde la sede de la conferencia en Egipto, el secretario general de la ONU, António Guterres afirmó: "Esta conferencia ha dado un paso importante hacia la justicia. Acojo con satisfacción la decisión de establecer un fondo para las pérdidas y los daños, y de ponerlo en marcha en el próximo período". Subrayó que las voces de quienes están en primera línea de sentir los efectos de las manifestaciones climáticas deben escucharse.

Puerto Rico es un territorio no incorporado (Estado Libre Asociado con estatus de autogobierno) de los Estados Unidos, uno de los países con mayor responsabilidad del cambio climático. Sin embargo, pese a su estado geopolítico a nivel internacional, Puerto Rico genera unas características distintas a nivel social, económico y político si se compara con los 50 estados de EE. UU.

Un ejemplo de lo planteado es el Índice de Riesgo Climático Global (IRC) de Germanwatch[647] del 2021 que considera a Puerto Rico entre los más afectados por eventos climáticos extremos entre el período del 2000 al 2019. Se atribuye a las secuelas del acontecimiento excepcional devastador que fue el huracán María en 2017. Este estudio se basa en datos disponibles sobre los impactos de los eventos climáticos extremos y los datos socioeconómicos asociados. Indica el nivel de exposición y la vulnerabilidad de los países a estos fenómenos. Es importante destacar que en este estudio no se incluye el efecto del aumento del nivel del mar, el derretimiento de los glaciares o los mares más ácidos y cálidos, así como tampoco se registran impactos indirectos de las sequías o la escasez de alimentos provocadas por olas de calor. En términos humanos, cuantifica las víctimas mortales, pero no recoge el número total de personas afectadas[648].

Todavía en 2023, las poblaciones empobrecidas vivían de cerca la devastación social y económica que dejó el huracán María. De 3.4 millones de personas en Puerto Rico en el 2017, los estimados de población para el 2021 cerraron en 3.263 millones, según el censo de EE. UU. Es importante destacar que, a partir de la descripción del perfil demográfico, gran parte de la población que se queda en la isla para este período luce ser más vulnerable. Del 18 % de la población con 65 años o más en el 2017, el promedio ascendió a 21.3 % en 2021. Con datos del Instituto de Desarrollo de la Juventud, en el *IV Informe hacia la Recuperación Justa* de la organización Ayuda Legal Puerto Rico se

647 *Germanwatch* es una organización no gubernamental independiente con base en Bonn (Alemania). Bajo el lema «Observar, Analizar, Actuar», promueve activamente la equidad global y la preservación de los medios de vida concentrándose en la política y economía de los países del Norte y sus repercusiones en todo el mundo. Su labor se centra en la mitigación del y adaptación al cambio climático, la seguridad alimentaria global, la responsabilidad corporativa, la educación para el desarrollo sostenible y la financiación de la lucha contra el cambio climático y de desarrollo/alimentación. Véase más en: https://www.germanwatch.org/es.

648 Germanwatch. Global Climate Risk Index 2021. https://www.germanwatch.org/es/19777

indica que a la vez que la población de menores disminuyó considerablemente en Puerto Rico los últimos años, la inseguridad económica de los mayores de 65 años y sus núcleos familiares se mantuvo igual[649].

Luego del huracán María se destinaron fondos para atender el desastre. Muchas organizaciones sin fines de lucro, de base comunitaria, religiosa y la academia, entre otras, generaron diversas iniciativas para conocer los derechos y exigir justicia climática a los entes gubernamentales, empresas privadas y otros sectores como parte de los procesos de adjudicación de fondos. Algunas son Amnistía Internacional[650], Para la Naturaleza, la Universidad del Sagrado Corazón[651]; comunidades de fe como la Iglesia Episcopal, Diócesis de Puerto Rico[652]; AMANESER 2025, Puerto Rico (*The Alliance for Sustainable Resources Management*)[653] y Casa Pueblo[654]

Muchas de estas organizaciones entienden que la recuperación no ha sido justa para las comunidades vulnerables. En su *IV Informe*, publicado en septiembre del 2022, Ayuda Legal Puerto Rico señala como una amenaza principal a las familias sobrevivientes "el desplazamiento por diseño". Plantea que el impacto en estas familias "es de múltiples niveles: la imposibilidad de obtener un techo seguro, el enfrentamiento con un mercado de vivienda predatorio y no regulado y las relocalizaciones carentes de participación o planificación efectiva". Según la entidad, sin acción inmediata, la falta de vivienda segura y asequible aumenta el riesgo de la población a la hora de enfrentar futuros desastres o el cambio climático con un nivel mayor de desigualdad.

Otro escenario paralelo es a nivel municipal; 16 municipios han presentado la primera demanda colectiva en su tipo contra compañías del sector del petróleo y el carbón. Reclaman una compensación financiera, acusándolas de contribuir al cambio climático al impulsar una multimillonaria y fraudulenta campaña publicitaria que minimizó los impactos catastróficos de los combustibles fósiles. La demanda culpa a las grandes compañías petroleras por los miles de millones de dólares en daños que sufrió la isla tras la devastadora temporada de huracanes en 2017, por la que miles de personas murieron y se destruyó infraestructura de vital importancia en Puerto Rico[655].

---

649 Ayuda Legal Puerto Rico. Cuarto informe *Hacia una recuperación justa*. *La lucha contra el desplazamiento por diseño.* Septiembre 2022. Pág 05. Véase: https://www. ayudalegalpuertorico.org/publicaciones/.

650 Amnistía Internacional Puerto Rico – Iniciativa Justicia Climática. Véase: https://www.amnistiapr.org/justicia-climatica/.

651 Véase https://insagrado.sagrado.edu/manifiesto-por-la-justicia-climatica/.

652 El 25 de febrero de 2023, un grupo ecuménico que incluyó al liderato de la Iglesia Episcopal, Diócesis de Puerto Rico y la Iglesia Evangélica Luterana, Sínodo del Caribe, celebró el evento Fe y Justicia Climática en Puerto Rico. El encuentro consistió en conferencias y mesas de diálogo en las que también participaron miembros de las iglesias Discípulos de Cristo, Metodista y Católica, entre otras, para intercambiar ideas, conocimientos y propuestas que adelanten la justicia climática desde las comunidades de fe en Puerto Rico. Véase: https://www.youtube.com/watch?v=TadoT8bSAog. Véase además: https://www.youtube.com/@sinododelcaribe4761.

653 Véase https://www.globalministries.org/partner/lac_partners_amaneser_2025/

654 Casa Pueblo. Adjuntas Pueblo Solar. Véase: https://casapueblo.org/adjuntas-pueblo-solar/.

655 Democracy Now! (En línea) Dieciséis municipios de Puerto Rico presentan una demanda climática contra las grandes empresas petroleras | Democracy Now! Cision Distribution. Milberg representa a los municipios de Puerto Rico contra las grandes empresas del sector del petróleo y el carbón

Como se ha mencionado, existen iniciativas importantes que presentan enfoques de la justicia climática en la isla. Sin embargo, actualmente, son muy pocas las publicaciones arbitradas e informes técnicos enfocados en el estudio de la justicia climática en Puerto Rico. Entre ellas, se destaca una investigación[656] que mostró una realidad de nuestra niñez, en particular, la de bajos recursos. El informe de la investigación invita a la acción climática de todas las partes para proteger el bienestar de esas generaciones más jóvenes, sustentado en datos que resumimos a continuación:

- Los investigadores califican como una injusticia que los niños, especialmente los que viven en comunidades de menor riqueza, ya soportan la mayor parte de los daños causados por los huracanes, las sequías, los incendios forestales y las olas de calor que las emisiones de GEI agudizan, sin que puedan ejercer control sobre las fuentes de emisiones.
- Afirman que la niñez necesita acceso a agua potable, aire limpio y alimentos nutritivos para mantenerse saludable. Señalan que luego de los huracanes María (2017) y Fiona (2022) muchos perdieron esos accesos a la energía y al agua potable.
- En el caso del huracán María, pasaron meses para que el suministro de energía se restableciera por completo.
- Los investigadores indican que, después de Fiona, aproximadamente 4 de cada 5 hogares perdieron el acceso a la energía y al agua potable segura.
- La inseguridad alimentaria que ya afecta a cerca del 40 % de la niñez puertorriqueña se extendió.
- Los autores advierten que la pérdida de energía puede ser nefasta para los niños que dependen de la electricidad para equipos médicos vitales, como ventiladores, o que toman medicamentos, como insulina, que necesitan refrigeración.
- En el informe mencionan que la falta de servicio eléctrico tras el huracán Fiona "trajo de vuelta los temidos sonidos de los generadores de energía".
- Además, reconocen que, aunque los generadores pueden proporcionar una línea vital de electricidad, queman diésel y otros combustibles que generan contaminantes del aire perjudiciales para los embarazos, pues dañan el cerebro y los pulmones en desarrollo y aumentan el riesgo de propagación de enfermedades infecciosas en el aire.
- Añaden que, después de María, muchas familias se convirtieron en migrantes climáticos. Indican: "La migración separó a los niños de sus familias extendidas y transgredió una base de la cultura puertorriqueña. También, preparó el escenario para eventos adversos en la infancia, que pueden aumentar los riesgos de cargas de enfermedades importantes en la edad adulta".

---

por más de $100,000 millones en pérdidas a causa del cambio climático. (*On-line*) https://www.prnewswire.com/news-releases/milberg-representa-a-los-municipios-de-puerto-rico-contra-las-grandes-empresas-del-sector-del-petroleo-y-el-carbon-por-mas-de-100-000-millones-en-perdidas-a-causa-del-cambio-climatico-829321292.html.

656 Gredia H. and Aaron B., 2023. "Children, Climate Justice, and Lessons from Puerto Rico." *JAMA Pediatric*. Volume 177, Number 1.

- Los autores del estudio afirman que el cambio climático hace que los huracanes sean más intensos, como fue María, y hace más frecuentes otros eventos como los incendios forestales, las olas de calor, inundaciones y sequías. Subrayan que estos choques climáticos pueden crear y aumentar las disparidades de salud que ya aquejan a la niñez. Particularmente, a la que vive en comunidades de bajos ingresos que puede tener menos recursos para recuperarse de los desastres.
- Añaden que "es más probable que sus comunidades hayan recibido menos inversión en infraestructura de protección" e identifican específicamente a las zonas rurales del oeste y sur y las islas municipios de Vieques y Culebra.
- Además, los investigadores citan datos de la EPA que señalan que en Puerto Rico hay 250 sitios bajo el programa *Superfund* activos. De estos, 19 están en la "lista de prioridades nacionales" de la agencia, que incluye sitios con mayor probabilidad de liberar compuestos tóxicos. Esto significa que cuando los huracanes impactan a Puerto Rico es más probable que liberen compuestos tóxicos hacia las comunidades vecinas.
- En el informe se consigna que Puerto Rico depende en gran medida de los combustibles fósiles. Los datos de la investigación muestran que el 96 % de la energía utilizada para los vehículos y la red eléctrica proviene de la quema de carbón, petróleo y gas. Los autores añaden que esta energía es costosa (indican que la electricidad de Puerto Rico cuesta más del triple del promedio nacional de los EE. UU.) y es peligrosa, pues empeora enfermedades como el asma, de alta incidencia en la isla.

En el estudio se destaca que hay leyes estatales y federales como la Ley 17-2019, la Ley de Reducción de la Inflación del Congreso de los EE. UU. y la Ley de Inversión en Infraestructura y Empleos que pueden propiciar que se mejore la resiliencia de las comunidades en riesgo. La Ley de Reducción de la Inflación dispone que se realicen inversiones en transporte, generación de electricidad y otra infraestructura que permita que el 40 % de la energía provenga de fuentes renovables con almacenamiento para 2030. Afirma que, a la asignación de recursos debe seguir la "aplicación diligente". Los autores del estudio argumentan que, en Puerto Rico, los residentes "han soportado episodios en serie de mala gestión del gobierno" y sostienen: "Aprovechar los fondos federales requiere competencia del gobierno estatal y local".

De lo expuesto, se evidencia la validez y pertinencia del tema de justicia climática para Puerto Rico. Hay muchas iniciativas por parte de entidades no gubernamentales liderando este enfoque. Por lo tanto, se debe insertar con urgencia este importante principio en el marco legal y político a nivel nacional para promover un desarrollo que respete siempre los derechos humanos. Este plan propone un enfoque de política pública que sitúe a las personas como centro, protegiendo sobre todo a quienes son más vulnerables a los efectos del cambio climático (como la población bajo el nivel de pobreza, nuestra niñez y la población adulta mayor, entre otros grupos desatendidos, desfavorecidos y desventajados).

4.14. Escenarios sobre las proyecciones de aumento del nivel del mar sobre Puerto Rico (2030, 2050, 2100) y marejada ciclónica

Una de las manifestaciones del cambio climático es el aumento del nivel del mar. El aumento del nivel del mar ocurre mayormente por el efecto de la expansión térmica producida por el aumento de temperatura de los océanos y el derretimiento de las capas de hielo a nivel mundial.

Es muy claro que el aumento del nivel del mar no es solo un evento del futuro sino también del presente. Así lo demuestran los datos de los mareógrafos a nivel mundial que presentan un ascenso sin precedente y donde los sistemas de islas y los territorios de baja elevación son las áreas geográficas más expuestas a dicho aumento. Entre los impactos que tiene el aumento del nivel del mar sobre el territorio están las inundaciones costeras que, a su vez, amplifican los efectos de las marejadas ciclónicas, la erosión costera y la pérdida de humedales, incluso en ausencia de cambios en la frecuencia e intensidad de las tormentas657. El aumento del nivel del mar incrementa también la intrusión de agua salina a los acuíferos y a los segmentos de los ríos cercanos a la costa. El resultado del aumento de esta intrusión salina es la merma de agua subterránea y el abandono de plantas potabilizadoras que ubican cerca de la costa.

Varios informes presentan la situación actual, así como las proyecciones del aumento del nivel del mar a escala global, regional y local. Se destaca, entre otros, el informe más reciente del IPCC que prevé con un nivel alto de confianza que los eventos extremos del nivel del mar que solían ocurrir en períodos de 1 en 100 años ocurran al menos anualmente en más de la mitad de todas las ubicaciones de mareógrafos para el 2100 en todos los escenarios considerados[658] [659]. Estos informes se basan en la mejor ciencia, modelos y análisis disponibles con el propósito de que la información se utilice para ejecutar la mejor preparación de los territorios para enfrentar la amenaza. De los informes disponibles a nivel regional y local, el CEACC de Puerto Rico acogió el informe *Global and Regional Sea Level Rise Scenarios for the United States: Updated Mean Projections and Extreme Water Level Probabilities Along U.S. Coastlines* como la línea base para evaluar la exposición de la población, la infraestructura, los recursos costeros y servicios en Puerto Rico. El informe es un esfuerzo de las agencias federales, publicado en el 2022.

Específicamente, el CEACC se alinea a las proyecciones de aumento del nivel del mar a escala regional de los Estados Unidos, así como a la proyección de escala local del Caribe que se incluye en el informe. Las proyecciones presentadas en el informe

657 Sweet, W.V., B.D. Hamlington, R.E. Kopp, C.P. Weaver, P.L. Barnard, D. Bekaert, W. Brooks, M. Craghan, G. Dusek, T. Frederikse, G. Garner, A.S. Genz, J.P. Krasting, E. Larour, D. Marcy, J.J. Marra, J. Obeysekera, M. Osler, M. Pendleton, D. Roman, L. Schmied, W. Veatch, K.D. White, and C. Zuzak, 2022: Global and Regional Sea Level Rise Scenarios for the United States: Up-dated Mean Projections and Extreme Water Level Probabilities Along U.S. Coastlines. NOAA Technical Report NOS 01. National Oceanic and Atmospheric Administration, National Ocean Service, Silver Spring, MD, 111 pp., https://oceanservice.noaa.gov/hazards/sealevelrise/sealevelrise-tech-report-sections. html.

658 IPCC. 2023.

659 Véase también US Army Corps of Engineers, Sea-Level Tracker: https://climate.sec.usace.army.mil/slr_app/.

citado se basan en la integración de datos de modelaje a partir de la combinación de escenarios de emisiones, aumento de temperatura y datos de los mareógrafos locales.

El informe presenta cinco escenarios de proyecciones a escala regional para los años 2030, 2050, 2100 y 2150. Estas son: baja, intermedia-baja; intermedia; intermedia-alta y alta. Además, el informe incluye una proyección a escala a corto y largo plazo donde la incertidumbre es reducida en la proyección a corto plazo (Tabla 31) .

Tabla 31.

Proyecciones sobre el aumento del nivel del mar a escala regional

Proyección de aumento del nivel del mar					
Año	**Escenario bajo**	**Escenario intermedio bajo**	**Escenario intermedio**	**Escenario intermedio alto**	**Escenario alto**
2030	0.59 pies (0.18 metros)	0.66 pies (0.20 metros)	0.69 pies (0.21 metros)	0.72 pies (0.22 metros)	0.72 pies (0.22 metros)
2050	1.02 pies (0.31 metros)	1.18 pies (0.36 metros)	1.31 pies (0.40 metros)	1.51 pies (0.46 metros)	1.71 pies (0.52 metros)
2100	1.97 pies (0.6 metros)	2.30 pies (0.70 metros)	3.94 pies (1.20 metros)	5.58 pies (1.70 metros)	7.22 pies (2.20 metros)
2150	2.62 pies (0.8 metros)	3.94 pies (1.20 metros)	7.22 pies (2.20 metros)	9.19 pies (2.80 metros)	12.8 pies (3.90 metros)

Para el Caribe, el informe presenta los siguientes escenarios para el 2050:

- 0.62 pies (0.19 metros) para el escenario bajo
- 0.79 pies (0.24 metros) para el escenario intermedio-bajo
- 0.92 pies (0.28 metros) para el escenario intermedio
- 1.15 pies (0.35 metros) para el escenario intermedio-alto, y
- 1.38 pies (0.42 metros) para el escenario alto

Estos escenarios a corto y largo plazo son importantes para definir la exposición de sectores como vivienda, infraestructura portuaria, vial, hídrica y eléctrica, ecosistemas costeros y terrestres, y la seguridad alimentaria, entre otros de gran importancia para proteger vidas, propiedades y la economía de Puerto Rico.

Uno de los efectos importantes del aumento del nivel del mar es que el alcance de inundaciones costeras podría ser mayor cada vez con la ocurrencia de nuevos eventos. Los informes consideran que entre otros factores físicos que contribuyen directamente al

riesgo de inundaciones costeras están la precipitación local, las corrientes de los ríos, el hundimiento de terreno, las condiciones del oleaje, las aguas subterráneas y las mareas.

Esto se complica cuando se sobreponen otros efectos multirriesgo como la ocurrencia de la marejada ciclónica. La marejada ciclónica impacta la infraestructura y las viviendas ubicadas cerca de la costa. El CEACC determinó utilizar la información sobre la marejada ciclónica generada por el huracán María en el 2017, contenida en el informe *National Hurricane Center Tropical Cyclone Report: Hurricane María* publicado por el *National Hurricane Center* el 4 de enero de 2023. El informe incluye toda la costa de Puerto Rico. Según este informe, la marejada ciclónica alcanzó 9.5 pies donde el huracán entró a Puerto Rico. La marejada ciclónica llegó hasta 7 pies en el resto de la costa este de la isla. En la costa norte, fluctuó entre 2 y 4 pies. La marejada ciclónica en la costa sur fluctuó entre 3 y 5 pies. En la costa oeste y en la costa del suroeste, la marejada ciclónica fluctuó entre 2 y 3 pies.

En los casos en que las proyecciones del nivel del mar y la marejada ciclónica incidan sobre los COA incluidos en los capítulos 6 y 7, la entidad identificada como responsable de tales acciones deberá evaluar su implantación a la luz de los informes acogidos por el CEACC mencionados en este capítulo. Cuando, durante la vigencia de este plan, surjan nuevos informes que el CEACC determine que se deben utilizar para la implantación de dichos COA, lo notificará en su página oficial y a través de comunicación interna a todas las entidades responsables de implantar las acciones.

Se recomienda que para la aplicación del informe *Global and Regional Sea Level Rise Scenarios for the United States* se tenga en cuenta la guía titulada *APPLICATION GUIDE for the 2022 Sea Level Rise Technical Report*[660], debido a que contiene recomendaciones sobre cómo aplicar dicho informe a la planificación.

[660] Accese el enlace donde se encuentra la guía para su descarga: Sea Level Rise Technical Report: Download and FAQs (noaa.gov). Véanse además: https://oceanservice.noaa.gov/hazards/ sealevel-rise/sealevelrise-data.html e Interagency Sea Level Rise Scenario Tool – NASA Sea Level Change Portal.

CAPÍTULO 5.

Análisis de diagnósticos de los sectores: fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas (FODA)

En este capítulo se presenta un análisis de las fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas (FODA) de los diagnósticos presentados para los sectores incluidos en el capítulo 4 del Plan. El análisis FODA es importante desde la perspectiva de planificación ya que apoya la identificación de los factores claves de éxito en cada sector estudiado o el factor crítico para alcanzar el éxito en los temas de mitigación, adaptación y resiliencia ante el cambio climático. Además, es la base para formular estrategias, programas y proyectos definidos en los cursos de acción presentados en este instrumento de planificación.

Descripción y objetivo de la matriz FODA[661]:

1. Fortalezas: los atributos o destrezas que el sector tiene para alcanzar el objetivo.

2. Debilidades: lo que es perjudicial o factores desfavorables para la ejecución del objetivo.

3. Oportunidades: las condiciones externas, lo que está a la vista por todos o la popularidad y competitividad que sea útil para alcanzar el objetivo.

4. Amenazas: lo perjudicial, lo que amenaza la estabilidad del sector por factores externos, los cuales pudieran convertirse en oportunidades para alcanzar el objetivo.

El análisis FODA usa como base el diagnóstico de la situación para los sectores que proviene del análisis de los mejores y más recientes datos e información disponibles. Para esto, el proceso de elaborar el P-MARCC requirió la ejecución de distintas estrategias metodológicas descritas en la sección 2.3 –Proceso del desarrollo del plan– y en la sección 2.3.1 –Metodología del Plan.

A continuación, el análisis FODA para: 1) fuentes antropogénicas de GEI; 2) energía; 3) infraestructura; 4) transporte y movilidad; 5) residuos sólidos; 6) salud y bienestar; 7) agricultura y ganadería; 8) agua; 9) sistemas marinos y zonas costeras; 10) ecología terrestre; 11) turismo; 12) educación; 13) justicia climática y 14) forestación.

[661] Riquelme Leiva, M. (2016). FODA: Matriz o Análisis FODA - Una herramienta esencial para el estudio de la empresa. Recuperado de https://www.analisisfoda.com/.

Tabla 32.

Matriz o análisis FODA de ***fuentes antropogénicas de emisiones de gases de efecto de invernadero (GEI)***

ORIGEN INTERNO	**Fortalezas**
	¿Cuáles son las ventajas? • La Ley 33-2019 requiere en su artículo 4 regular las emisiones de gases y compuestos de efecto de invernadero para lograr una reducción de sus concentraciones a un nivel que impida las intervenciones humanas peligrosas en el sistema climático y fijar los instrumentos de seguimiento de las emisiones de GEI para los diversos sectores, productos y servicios. Por lo tanto, se promueve el desarrollo de un reglamento para el control de emisiones de GEI como mecanismo para lograr la meta de reducirlas al 50 %. La misma ley exige al DRNA realizar un inventario anual de GEI. Se requiere que para el 2028 la flota pública de vehículos del Gobierno de Puerto Rico sea híbrida o a base de métodos alternativos a los combustibles fósiles. También, la Ley 33-2019 requiere que para el 2050 toda la energía eléctrica sea a base de fuentes renovables o alternativas. • La Ley del Plan de Rescate Estadounidense (ARPA, por sus siglas en inglés) del 2021 provee fondos de transición hacia la energía renovable. • La Ley de Política Pública Energética de Puerto Rico (Ley 17-2019) promueve reducir los GEI en sus artículos 1.5 y 1.6. **¿Qué se está haciendo bien?** • Existe el Negociado de Energía de Puerto Rico creado por la Ley de Transformación y Alivio Energético de Puerto Rico (Ley 57-2014, según enmendada) como un ente regulador independiente encargado de reglamentar, supervisar, fiscalizar y asegurar el cumplimiento con la política pública energética del Gobierno de Puerto Rico. • Existe el CEACC, que tiene entre sus deberes y facultades atender asuntos relacionados con los GEI. • Existe el Consejo de Cambio Climático de Puerto Rico (PRCCC) que reúne a científicos, académicos y representantes del gobierno, el sector privado y el tercer sector para analizar e intercambiar información científica local e internacional sobre las manifestaciones del cambio climático en la isla y las proyecciones a futuro. • Se cuenta con un nuevo inventario de GEI del 2019-2021.
ORIGEN	**Debilidades**
	¿Qué falta por integrar? • Un reglamento para el control de emisiones de GEI en Puerto Rico. • Implantar un programa masivo de reforestación. • Incorporar el mercado de bonos de carbono. • Se debe enmendar la Ley 33-2019 para requerir la neutralidad en emisiones de carbono (net zero CO_2 emissions).

INTERNO

¿Qué área necesita mejoras?

- Continuidad en la realización de los inventarios de GEI, tal y como la Ley 33-2019 lo exige al DRNA.
- Agilizar la transformación del sistema de generación de energía eléctrica a un sistema que funcione a base de fuentes renovables o alternativas.
- Modernizar el sistema de transmisión y distribución de energía eléctrica para que permita integrar los sistemas de generación a base de fuentes renovables o alternativas con fondos de FEMA y otros aplicables para ese fin.
- Cumplimiento con la veda gubernamental de comprar vehículos de motor de combustión interna para la flota pública.
- Avanzar en la construcción de las estaciones de carga de vehículos eléctricos.
- Utilizar rápida y efectivamente los incentivos federales para allegar sistemas de energía renovable a comunidades vulnerables.

ORIGEN EXTERNO

Oportunidades

¿Se identifican tendencias de beneficio?

- La reconstrucción de viviendas y edificios afectados por el huracán María puede propiciar la aclimatación de estas estructuras para ayudar a reducir la demanda de energía eléctrica.
- Los fondos para reconstruir el sistema de transmisión y distribución eléctrica permitirán poner a la red en condiciones para integrar los sistemas de generación a base de energía renovable y de fuentes alternas.
- Las aguas profundas cerca de Yabucoa podrían permitir la construcción de un sistema de generación de energía oceanotérmica para la red eléctrica.
- La climatización de los techos y las paredes urbanas para disminuir el efecto de isla del calor contribuye a disminuir la demanda energética y, por tanto, las emisiones de GEI.

ORIGEN

Amenazas

¿Qué obstáculos se identificaron?

- La falta de continuidad anual del inventario de GEI por disponibilidad de fondos.

¿Cuáles son las condiciones económicas?

- Se evidencia la carencia de un fondo para monitorear los GEI de manera permanente.

¿Cómo afectan las regulaciones en el gobierno?

- Burocracia en los procesos.

ORIGEN EXTERNO	¿Qué áreas permanecen vulnerables?
	• La EPA identificó en el 2017 a las centrales generatrices San Juan, Palo Seco y Aguirre, de la AEE, como las fuentes principales de emisiones de CO_2[662].
	• El inventario de GEI más reciente (2021) indica que los contribuyentes principales a las emisiones netas de Puerto Rico incluyen al sector de suministro eléctrico (52 % del total de emisiones al 2021), asociado principalmente a la quema de combustibles para producir electricidad.
	• Puerto Rico ocupa el puesto 19 entre los 38 países de América Latina y el Caribe con las mayores emisiones de CO_2, según datos de la Comisión Europea citados por el PRCCC en su informe del 2022.

Tabla 33.

Matriz o análisis FODA del ***sector energía***

ORIGEN INTERNO	Fortalezas
	¿Cuáles son las ventajas?
	• Existe la Ley de Política Pública Energética de Puerto Rico (Ley 17-2019).
	• Existe la Ley 33-2019 (Ley de Mitigación, Adaptación y Resiliencia al Cambio Climático).
	• La Ley del Plan de Rescate Estadounidense (ARPA) otorga fondos para desarrollar energía renovable. Esta ley asignó $2,470 millones a Puerto Rico. Quedan fondos disponibles, siempre y cuando se obliguen antes del 31 de diciembre del 2024 y se deben utilizar antes del 31 de diciembre del 2026.
	• La Ley de Reducción de la Inflación (IRA) incluye fondos para reducir las emisiones de CO_2.
	• FEMA tiene fondos disponibles para integrar el sistema de distribución y transmisión.
	• El PIR de la AEE traza la ruta de transición hacia la energía renovable.
	• Están vigentes órdenes ejecutivas del presidente de EE. UU. dirigidas a atender el tema energético frente al cambio climático, estas son: ○ Orden Ejecutiva 13990 del 20 de enero de 2021: Protección de la salud pública y el medioambiente y restauración de la ciencia para abordar la crisis climática.

[662] Alvarado León, G.E. (domingo 23 de enero de 2022). “Sanciones a la vista por la mala calidad del aire en Puerto Rico”. *El Nuevo Día.* https://www.elnuevodia.com/noticias/locales/notas/sanciones-a-la- vista-por-la-mala-calidad-del-aire-en-puerto-rico/?r=27344.

ORIGEN INTERNO

- Orden Ejecutiva 14008 del 27 de enero de 2021: Abordar la crisis climática en el país y en el extranjero.
- Orden Ejecutiva 14057 del 8 de diciembre de 2021: Catalizando industrias y empleos de energía limpia a través de la sostenibilidad federal.

¿Qué se está haciendo bien?

- Existe el PIR de la AEE. Aunque la AEE es la responsable por cumplir con lo establecido en el PIR, tanto Genera PR como LUMA, ambos en carácter de contratistas de AEE, se ven en la obligación de seguir el mandato de ley.
- Hay incentivos y fondos federales disponibles para la compra de equipos que propicien el autoconsumo energético a base de energías renovables. La segunda versión de la guía sobre el IRA incluye un resumen de estos diferentes programas y fondos. El DDEC, por medio del Programa de Política Pública Energética, administra el Programa Estatal de Energía (*State Energy Program*, conocido por las siglas SEP), el Programa de Asistencia de Climatización (*Weatherization Assistance Program*, conocido por las siglas WAP) y Apoyo Energético.

ORIGEN INTERNO

Debilidades

¿Qué falta por integrar?

- Unificar los procesos relacionados con los fondos disponibles y las empresas de equipos de energía renovable.
- En este sentido, falta por integrar un esfuerzo dirigido a las comunidades en desventaja socioeconómica que las ayude a determinar qué equipos de energía renovable necesitan para la demanda básica y ayudarles en la solicitud de los fondos y su aplicabilidad.

¿Qué área necesita mejoras?

- Los retrasos en la adjudicación de contratos para proyectos de generación y almacenamiento de energía renovable.
- Retrasos en la construcción de estaciones de recarga para vehículos eléctricos.
- Retrasos en la negociación de contratos de compra de energía renovable a empresas privadas.
- Solo el 4.25 % de la energía en el sistema de la AEE proviene de fuentes renovables. No se están considerando 98 MW de plantas hidroeléctricas que están fuera de servicio debido a sus altos costos de reparación. Estas son fuentes de energía renovable.
- Falta de asistencia económica para las familias de clase media en la instalación de equipos de energía renovable.

ORIGEN EXTERNO

Oportunidades

¿Se identifican tendencias de beneficio?

- Algunos clientes industriales de la AEE/ LUMA cuentan con equipos de generación de ciclo combinado de calor y electricidad (CHP, por sus siglas en inglés), que permiten reducir las emisiones de CO_2. Existe el potencial de utilizar hidrógeno "verde" como combustible para estos equipos.
- Algunos clientes industriales de la AEE/ LUMA complementan los sistemas de CHP con sistemas de paneles fotovoltaicos con almacenamiento de energía.
- Hay mayor interés por los equipos de bajo consumo eléctrico y sistemas de paneles fotovoltaicos con almacenamiento de energía para residencias y comercios.
- Operación de sistemas eólicos en industrias, por ejemplo, la finca de turbinas en el sur de *Pattern Energy.*
- Potencial de establecer un sistema de generación oceanotérmica en Yabucoa, propuesto por el DDEC.

ORIGEN EXTERNO

Amenazas

¿Qué obstáculos se identificaron?

- Los altos costos de instalación de los sistemas de paneles fotovoltaicos a nivel residencial y comercial.
- El aumento en los costos de estas placas solares.
- Los problemas con la cadena de distribución provocan retrasos significativos en la construcción de nuevos parques de generación de energía renovable.
- La dificultad para contratar personal especializado para instalar equipos de generación de energía renovable.
- La falta de capacitación continua de personal especializado para instalar dichos equipos de energía renovable.

¿Cuáles son las condiciones económicas?

- Los altos niveles de inflación y el encarecimiento de los combustibles fósiles y equipos ecoamigables obstaculizan que la ciudadanía pueda tener un ahorro en el cambio a sistemas renovables.

¿Cómo afectan las regulaciones del gobierno?

- Burocracia en los procesos.

ORIGEN EXTERNO	Amenazas
	¿Qué áreas permanecen vulnerables? • El sistema de generación de energía de la AEE presenta retos geográficos y climáticos dado que las unidades principales de generación de mayor capacidad (70 %) se encuentran en el sur de la isla y la mayor demanda de energía se encuentra al norte. Esto hace vulnerable al sistema. • Los huracanes y tormentas podrían destruir o afectar los sistemas de energía renovable. • La sequía puede afectar la operación de las plantas hidroeléctricas.

Tabla 34.

Matriz o análisis FODA del ***sector infraestructuras***

ORIGEN INTERNO	Fortalezas
	¿Cuáles son las ventajas? • La Orden Ejecutiva 2007-41 fomenta la construcción de edificios verdes en Puerto Rico y requiere utilizar el sistema *LEED* en los proyectos de edificación con área mayor de 35,000 pies cuadrados. • Existe desde el 2011 un prototipo de Casa Ecológica prediseñada. • Están disponibles productos verdes, incluyendo ventanas ecológicas como *BrightShade*, patentada en el 2014, que se considera para instalar en todas las escuelas públicas de Puerto Rico. • Se ha implantado la iniciativa “posterriqueño”, con el propósito de mejorar el sistema de iluminación pública de la isla. La luminaria se basa en la tecnología LED. Fue diseñada por ingenieros y estudiantes de la UPR-Mayagüez y propulsada por el Dr. Arturo Massol de Casa Pueblo. • La Compañía de Turismo de Puerto Rico tiene unas guías de diseño para instalaciones ecoturísticas y de turismo sostenible (2004) que se utilizan de forma voluntaria por diseñadores y empresarios que desean crear instalaciones sostenibles y resilientes que reduzcan los consumos de energía. • El Aeropuerto Internacional Rafael Hernández no es vulnerable al aumento del nivel del mar. • La mayoría de las plantas potabilizadoras de la AAA no son vulnerables al aumento del nivel del mar.

ORIGEN INTERNO	Fortalezas
	¿Qué se está haciendo bien? • El desarrollo de proyectos pioneros en sostenibilidad comunitaria que propulsan el uso de fuentes renovables a nivel comunitario. Entre estos destacan el Bosque Modelo y Casa Pueblo en Adjuntas. • El diseño de la Casa Ecológica. • Existe la escuela ecológica de Culebra que se puede replicar como modelo exitoso. • El uso de pavimento permeable.

ORIGEN INTERNO	Debilidades
	¿Qué falta por integrar? • El Tren Urbano es una estrategia de sostenibilidad que puede mitigar las emisiones de CO2, pero que requiere aumentar las modalidades y opciones de transporte desde cada estación dándole prioridad a la designación de ciclovías y a mejoras en la infraestructura peatonal junto al desarrollo de núcleos urbanos alrededor de cada estación del tren. • Se cuenta con muchos proyectos y casos exitosos en toda la isla, que conviene seguir desarrollando y replicando a nivel de país. **¿Qué área necesita mejoras?** • Restructurar el proceso del programa Permiso Verde como parte del Reglamento Conjunto de Puerto Rico. La complejidad del proceso actual para obtener el permiso ha limitado sustancialmente su implantación y éxito. • Pocos propietarios de edificios en Puerto Rico informan sobre sus emisiones de GEI bajo el programa de la EPA *Green House Gas* (GHG) *Reporting Program*. Hasta el primer semestre del 2023, había ocho informantes registrados. • Se deben auscultar estrategias para promover mejor la certificación bajo el programa *Home* del Departamento de la Vivienda y Desarrollo Urbano federal. A mayo del 2023, solo se habían certificado cuatro unidades de vivienda en la isla bajo este programa. Se han hecho reformas recientes a los requisitos del sistema de certificación para acomodarse mejor a nuestro contexto caribeño. El programa no atiende ese enfoque. Los programas que promueven viviendas resilientes (*Energy Star, Home, LEED for Home*) son de participación voluntaria, no programas del Estado. • El 70 % de la capacidad de tratamiento de aguas usadas de la AAA está ubicada en zonas vulnerables al aumento del nivel del mar y la marejada ciclónica. • El 79 % de la infraestructura hotelera para el turismo está ubicada en zonas vulnerables al aumento del nivel del mar y la marejada ciclónica.

	Debilidades
INTERNO	• A nivel general, existen 250,000 estructuras de todo tipo vulnerables al aumento del nivel del mar y la marejada ciclónica. • La mayoría de los embalses de Puerto Rico están sedimentados. • La mayoría de los arrecifes de coral de Puerto Rico están en estado crítico. Esta infraestructura azul disipa la energía de la marejada ciclónica. • Según el Instituto de Dasonomía Tropical, el huracán María destruyó 144 millones de árboles Esta destrucción propicia una mayor sedimentación de los embalses e inundaciones urbanas. • Todas las plantas generatrices de electricidad están ubicadas en áreas vulnerables al aumento del nivel del mar, a la marejada ciclónica y otras marejadas.

	Oportunidades
ORIGEN EXTERNO	**¿Se identifican tendencias de beneficio?** • Al 13 de marzo de 2023 se han certificado 136 proyectos LEED. Doce de estos son escuelas que se remodelaron o construyeron durante la vigencia del Programa ARRA. Estas escuelas sirven como instrumento pedagógico sobre el cambio climático y permitirán que las nuevas generaciones de estudiantes, profesores y administradores aprendan y vean los edificios sostenibles y descarbonizados como la norma y no como la excepción. • Desde la fundación del Capítulo del Caribe del USGBC se han acreditado 198 profesionales en el sistema LEED para cumplir con el proceso de certificación de edificios verdes que reduzcan su impacto al ambiente y sus emisiones de CO_2. • Para el 2023, Puerto Rico tenía un total de 37 edificios (con un equivalente a casi dos millones de pies cuadrados de construcción) con programas *Energy Star, Water Sense y Air Plus* de la EPA. La EPA ha conferido el *Environmental Quality Award* a varios proyectos verdes construidos en Puerto Rico. • Se cuenta con el *PR Energy Center* (PREC), operado por la Universidad Ana G. Méndez - Campus de Gurabo con la participación activa de docentes e investigadores de diferentes disciplinas y universidades. • Existe un estudio sobre la potencial viabilidad de un programa de créditos de carbono titulado *Assessing Forest Carbon Offsetting Potential in Puerto Rico's Para la Naturaleza (PLN) Land Trust.* • Hay un proyecto demostrativo de vivienda sostenible, resiliente y asequible en las comunidades aledañas al Caño Martín Peña. Se construyeron dos unidades a un costo aproximado de $95,000 cada una, demostrando que la resiliencia y la sostenibilidad pueden ser viables económicamente. • Hay fondos ARRA para la aclimatación de viviendas de personas de escasos recursos. • Hay fondos de EPA para la reubicación de plantas de tratamiento de aguas usadas. • Hay fondos disponibles para la transformación del sistema de generación eléctrica existente a uno a base de energía renovable.

ORIGEN EXTERNO

Amenazas

¿Qué obstáculos se identificaron?

- Desde la aprobación de la Ley 229-2009 –Ley para promover la eficiencia en el uso de energía y recursos de agua en las edificaciones nuevas y existentes del Estado Libre Asociado de Puerto Rico– se han presentado numerosos proyectos enfocados en la sostenibilidad, el diseño y la construcción de edificios verdes para reducir los consumos energéticos y las emisiones de CO_2, pero el resultado neto es que la mayoría no se han aprobado. Por lo tanto, la ley carece de fuerza en su implantación.
- El aumento del nivel del mar.
- La frecuencia e intensidad de los eventos de lluvias fuertes. Esto provocará incrementos dramáticos en la turbiedad del agua, lo que interrumpirá las operaciones de las plantas potabilizadoras.
- Infiltración de agua salina a los acuíferos debido al aumento del nivel del mar. Esto provocará el cierre de pozos de la AAA y pozos agrícolas que proveen agua potable a industrias menores.
- El aumento de la mortandad de los arrecifes de coral causará mayores daños a la infraestructura ubicada cerca de la costa.
- Los eventos de temperatura extrema provocan una demanda de electricidad que excede la capacidad de generación de la AEE.
- Los eventos de temperatura extrema incrementan la demanda de agua de la AAA.
- La merma de lluvias a causa del cambio climático reducirá la capacidad asimilativade los ríos y las quebradas. Esto requerirá que la AAA y las industrias provean tratamiento avanzado a las aguas usadas.
- Las lluvias intensas provocarán desbordamientos en el alcantarillado sanitario, que a su vez causarán el cierre de playas por contaminación por patógenos.

¿Cuáles son las condiciones económicas?

- Actualmente (2023) el Departamento de Energía de Estados Unidos confecciona el plan PR 100 con la participación de expertos locales y técnicos del National Renewable Energy Laboratories con el fin de estudiar diversos escenarios en la búsqueda de estrategias para llegar a la meta de un Puerto Rico con el 100 % de la energía renovable en o antes del 2050 y a la vez mitigar las emisiones de CO_2 por la quema de combustibles fósiles. Aunque esta iniciativa no incluye acciones de política pública, sus resultados podrían utilizarse con esos propósitos. Viabilizarlas requerirá voluntad política y económica.

¿Cómo afectan las regulaciones del gobierno?

- Falta de voluntad política para impulsar programas y políticas públicas eficaces en la implantación de sistemas ecoamigables.
- Burocracia en los procesos. Por ejemplo, la complejidad del proceso actual para los permisos verdes de uso y construcción ha limitado sustancialmente la implantación y el éxito del programa.

ORIGEN EXTERNO	Amenazas
	• Burocracia en los procesos. Por ejemplo, la complejidad del proceso actual para los permisos verdes de uso y construcción ha limitado sustancialmente la implantación y el éxito del programa. **¿Qué áreas permanecen vulnerables?** • Las plantas termoeléctricas cercanas a las costas. • Las plantas de tratamiento de agua cercanas a cuerpos de agua. • La infraestructura como edificios y viviendas cercanos al mar. Sus cimientos están expuestos a deterioro a causa del aumento del nivel del mar y el arrastre de la arena de las costas, lo que podría restar estabilidad a esas estructuras. • Las carreteras ubicadas en zonas de baja elevación y cerca de la línea de agua. • Por ejemplo, la carretera PR-165 en la costa entre el área metropolitana y Dorado tiene un tramo que se inunda cuando ocurren eventos atmosféricos. • Las carreteras de las costas que son único acceso a comunidades son vulnerables a las marejadas ciclónicas y los ciclones tropicales. Su cierre deja a esos vecindarios incomunicados. Igual ocurre con las carreteras cercanas a ríos caudalosos y carreteras de montaña propensas a deslizamientos de tierra y a la caída de árboles y postes.

Tabla 35.

Matriz o análisis FODA del ***sector transportes y movilidad***

ORIGEN INTERNO	Fortalezas
	¿Cuáles son las ventajas? • La Ley 33-2019 reconoce los sistemas de transportación colectiva como parte de las estrategias para lidiar con el cambio climático y está alineada con la política pública de la administración del presidente Biden que espera que para el 2030 este sector reduzca en un 50-52 % los niveles de emisiones del 2005. • Veda de compra de vehículos de combustión interna para el gobierno, que requiere que los vehículos que se adquieran para la flota pública utilicen métodos alternos a los combustibles fósiles para el 2028. • Los manufactureros de vehículos de motor de Europa y Estados Unidos dejarán de fabricar vehículos de combustión interna para el 2025. • Hay fondos ARPA para la construcción de sistemas de recarga de vehículos eléctricos. • Hay fondos de IRA para subsidiar la compra de vehículos eléctricos.

ORIGEN INTERNO	Fortalezas
	¿Qué se está haciendo bien? • El Departamento de Transporte federal realiza esfuerzos para prevenir o reducir el riesgo de que las manifestaciones del cambio climático afecten o paralicen las operaciones de los sistemas de transportación. • El gobierno federal tiene el programa Desafío de Transportación Colectiva Sostenible para un Planeta Saludable, desde junio de 2021. Los municipios de Yabucoa, Vega Baja y la Autoridad de Transporte Integrado (ATI) participan en el programa. • En febrero de 2023, la AMA anunció la compra de 12 autobuses de 40 pies de largo como parte del programa de reemplazo de flota, utilizando los fondos disponibles de la Ley de Infraestructura de 2021. Estos nuevos autobuses son más eficientes y producen menos emisiones. • La Ley 81-2014 establece un crédito de hasta $2,000 en los arbitrios para vehículos híbridos convencionales. • El Tren Urbano cuenta con conexiones de interés masivo como, por ejemplo: la UPR, el Centro Médico, el recinto de la Universidad Ana G. Méndez en Cupey y otras universidades.

ORIGEN INTERNO	Debilidades
	¿Qué falta por integrar? • Oportunidades de innovación y reingeniería para diseñar y construir una mejor infraestructura y un sistema de transportación resiliente y redundante que mitiguen o eliminen los efectos adversos del cambio climático. • Sincronizar la política pública de la Ley 33-2019 con las políticas federales, para atender y promover la transportación como un sistema nacional multimodal: aéreo, marítimo y terrestre. • La atención a las carreteras y los puentes vulnerables a las lluvias intensas, tormentas tropicales y los huracanes. • Sistemas de transportación complementarios a las estaciones del Tren Urbano. **¿Qué área necesita mejoras?** • Enmendar la Ley 33-2019 para encomendar acciones que tomen en cuenta los otros modos de transportación que no están cobijados en el estatuto, como el aéreo y el marítimo. • Falta un enfoque único para la adaptación al cambio climático y la planificación de la resiliencia para la infraestructura de los puertos. • La AMA ha tenido problemas en cumplir con el itinerario de sus rutas. • El Tren Urbano consume mucha energía eléctrica. Una manera de disminuir ese consumo energético sería colocar placas solares en el techo de sus estaciones. Además, este sistema de transporte presenta problemas para atraer usuarios.

	Debilidades
INTERNO	• Reactivar a los porteadores públicos a través de nuevas rutas, aumentando servicios los domingos. Alinear las rutas con las nuevas tendencias poblacionales y de viaje como estrategia para ayudar a disminuir las emisiones de GEI. • Mejorar y expandir la infraestructura para el mantenimiento de los carros eléctricos. • Desarrollar infraestructura de puertos aéreos y marítimos fuera del área metropolitana.

	Oportunidades
ORIGEN EXTERNO	**¿Se identifican tendencias de beneficio?** • La Administración Federal de Aviación (FAA) creó el Plan de acción climática de la aviación 2021 para afrontar los retos que conlleva mitigar los posibles efectos del cambio climático sobre la infraestructura aeroportuaria y sus potenciales repercusiones sobre la economía nacional. El propósito es alcanzar la meta de cero emisiones para el 2050. • Todos los aeropuertos públicos de Puerto Rico son parte del Plan Nacional de Sistemas Aeroportuarios Integrados de la FAA, el cual tiene como objetivo desarrollar la infraestructura e instalaciones aeroportuarias a través de sus diferentes programas para asignar los fondos y recursos necesarios. • La Autoridad de los Puertos y el Cuerpo de Ingenieros identifican las posibles fuentes de financiamiento para realizar proyectos necesarios para el control de inundaciones en el Aeropuerto Internacional Mercedita de Ponce (PSE). • La Ley de Infraestructura federal (2021) autoriza hasta $108,000 millones para apoyar las iniciativas de los programas de transportación pública por un período de 5 años. De esos fondos, hay $5,600 millones para la compra de autobuses de baja o ninguna emisión y para la construcción de instalaciones de combustible y mantenimiento. Otros $250 millones están asignados para la transición de ferris de baja o ninguna emisión. • Como parte del desarrollo del borrador del P-MARCC, se analizó el índice de especialización industrial por municipio en Puerto Rico para el 2022. En este análisis se identificaron oportunidades de empleo en el sector de transportación, que fortalecen la implantación de los cursos de acción incluidos en la sección 7.3. • Se cuenta con el PIR, que es base para la transición hacia un sistema de energía renovable y alterna. Esto representa una oportunidad paralela para el cambio a vehículos híbridos, eléctricos o que utilicen otros métodos.

	Amenazas
	¿Qué obstáculos se identificaron? • La AMA ha tenido problemas en cumplir con el itinerario de sus rutas. Esto hace al sistema ineficiente y fomenta la pérdida de usuarios. • Problemas de infraestructura para hacer viables la compra y el uso de vehículos eléctricos.

ORIGEN	Amenazas
EXTERNO	• Se evidencia que falta integración de esfuerzos para viabilizar la transformación del parque vehicular de Puerto Rico a uno de vehículos eléctricos. • Varias carreteras principales están amenazadas por el aumento del nivel del mar. **¿Cuáles son las condiciones económicas?** • En el 2014, la AMA anunció la reducción de rutas y la eliminación del servicio los domingos, debido a problemas financieros y a la incapacidad de poner en operación una gran cantidad de sus autobuses. **¿Cómo afectan las regulaciones del gobierno?** • Burocracia en los procesos. **¿Qué áreas permanecen vulnerables?** • Los puertos localizados en la costa este, sur y en Vieques y Culebra tienen una mayor probabilidad de recibir daños significativos por los efectos de los sistemas ciclónicos, cuya trayectoria proviene generalmente del este hacia el oeste o noroeste. • La infraestructura del principal aeropuerto de Puerto Rico, el Aeropuerto Internacional Luis Muñoz Marín es vulnerable al aumento del nivel del mar. Por otro lado, el Aeropuerto Internacional Mercedita de Ponce tiene un problema de inundaciones, en especial cuando ocurren lluvias torrenciales. • Las carreteras construidas en áreas propensas a derrumbes, inundaciones ribereñas y costeras (marejada ciclónica, oleaje asociado a sistemas ciclónicos, marejadas, aumento del nivel del mar o combinadas). • La necesidad de aumentar la redundancia en el sistema de aeropuertos de Puerto Rico. • La dependencia excesiva del vehículo privado. • Los puertos son vulnerables al aumento del nivel del mar. • No hay capacidad de generación de energía eléctrica suficiente para cubrir la demanda de los vehículos eléctricos.

Tabla 36.

Matriz o análisis FODA del sector de residuos sólidos

ORIGEN	Fortalezas
	¿Cuáles son las ventajas? • La Ley 33-2019 fija objetivos iniciales de reducción de los residuos sólidos y provee guías para reducir la vulnerabilidad, las emisiones de GEI, el desperdicio alimentario y el consumo de recursos. • La EPA otorgó $40 millones al DRNA para realizar una actualización de la caracterización de residuos sólidos, cerrar vertederos en incumplimiento con los reglamentos locales y federales y desarrollar estrategias para el manejo de los residuos.

ORIGEN INTERNO	Fortalezas

¿Qué se está haciendo bien?

- El DRNA se encuentra en el proceso de solicitud de propuestas para la elaboración de un Plan Integrado de Manejo de Desperdicios Sólidos que ayude a desarrollar la infraestructura que permita el manejo tecnológico, económicamente adecuado y viable de los residuos sólidos.
- El DRNA otorgó un contrato para la caracterización de residuos sólidos, actualmente en desarrollo (septiembre del 2023).
- El gobernador emitió una orden de emergencia para el manejo de los residuos sólidos.
- El gobernador firmó una orden ejecutiva que requiere el uso de llantas usadas trituradas en el asfalto que se utilice para pavimentar las carreteras.

ORIGEN INTERNO	Debilidades

¿Qué falta por integrar?

- Contabilidad del carbono que genera el manejo y la disposición de los residuos sólidos para entender su impacto en el cambio climático y para generar estrategias que reduzcan la huella de carbono.
- Un sistema de recolección de datos que genere continuamente la información sobre los tipos de residuos que se producen, las cantidades desechadas de cada material, en qué áreas de Puerto Rico se generan, qué productos derivan de qué materiales, dónde se manejan y depositan los residuos sólidos en Puerto Rico y el estado presente de las instalaciones de rellenos sanitarios.
- Generar estrategias de política pública para incentivar la reutilización o reparación de productos, la reducción de residuos y el reciclaje de materiales útiles. Ya existen grupos trabajando con la recuperación y búsqueda de alternativas para residuos como son, por ejemplo, los materiales vegetativos. Hay oportunidad de mayor organización y coordinación.
- Puerto Rico genera cinco libras de residuos per cápita, una tasa mayor que los países industrializados de Europa.
- Faltan mercados locales para el reúso y reciclaje de residuos.

¿Qué área necesita mejoras?

- Según datos provistos por el DRNA, 14 de 25 instalaciones de rellenos sanitarios no cuentan con geomembranas para evitar la fuga de lixiviados.

INTERNO

Debilidades

- Los datos del DRNA indican que la tasa de desvío o reciclaje de 14.58 % en el 2018 está muy por debajo de las metas establecidas en la Ley para la Reducción y el Reciclaje de Residuos Sólidos en Puerto Rico (Ley 70-1992), según enmendada, que estableció una meta de reciclaje del 35 % de los residuos sólidos para el 2006.
- El cierre de todos los vertederos ubicados de la zona del karso para evitar la contaminación del agua subterránea.

ORIGEN EXTERNO

Oportunidades

¿Se identifican tendencias de beneficio?

- El proceso de desarrollo de un plan integrado de manejo sostenible de residuos sólidos liderada por el DRNA es una gran oportunidad integrar las disposiciones contenidas en el P-MARCC y la Ley 33-2019.
- Existen unas órdenes de cierre de rellenos sanitarios que pueden propiciar a corto plazo el desarrollo de un programa efectivo de reciclaje. Actualmente se han emitido once órdenes de cierre.
- La falta de espacio suficiente para cumplir con los criterios mínimos para nuevos rellenos sanitarios provee oportunidades para fortalecer el reúso y reciclaje de residuos.
- Algunas órdenes de cierre de rellenos sanitarios pueden propiciar a corto plazo el desarrollo de un programa efectivo de reciclaje.

ORIGEN EXTERNO

Amenazas

¿Qué obstáculos se identificaron?

- Las regulaciones del comercio interestatal pueden limitar las medidas disponibles para reducir los residuos generados. Prohibir ciertos materiales puede ser difícil.
- La oposición ciudadana a la ubicación de rellenos sanitarios, estaciones sanitarias y otras instalaciones para el manejo de residuos sólidos.
- La veda para recibir residuos de plástico en China, Malasia y Camboya.
- El cierre de vertederos además de los once cierres ordenados por la EPA.

¿Cuáles son las condiciones económicas?

- Los indicadores económicos que usa el gobierno estatal fomentan el consumismo continuo y, por ende, la generación continua de residuos sólidos.
- No hay fondos federales para el diseño y construcción de rellenos sanitarios.

ORIGEN EXTERNO	Amenazas
	¿Cómo afectan las regulaciones del gobierno? • Los empaques de comida, medicinas y productos médicos están regulados por el gobierno federal, lo que presenta retos para hacer empaques con material reciclado. • Los reglamentos federales limitan los lugares donde se pueden ubicar nuevos rellenos sanitarios. **¿Qué áreas permanecen vulnerables?** • A base de los datos de capacidad y años de vida de los rellenos sanitarios, en los próximos cinco años se perderá el 35 % de la capacidad y en 15 años se perderá el 46 % de la capacidad de recibir residuos sólidos. Este escenario está sujeto a que no ocurran eventos climatológicos extremos que generen cantidades atípicas de residuos sólidos y reduzcan su expectativa de vida. Algunos rellenos sanitarios tienen una vida útil de cinco años o menos. • Cuando ocurren huracanes y tormentas tropicales se genera una cantidad atípica de escombros y material vegetativo que pueden disminuir la vida útil de los rellenos sanitarios y vertederos. • La cantidad de residuos que puedan generar cuando se cumpla la vida útil de los sistemas de placas solares y baterías de almacenamiento. • La cantidad de residuos que puedan provenir de las baterías que cumplan su vida útil.

Tabla 37.

Matriz o análisis FODA del ***sector de salud y bienestar***

ORIGEN INTERNO	Fortalezas
	¿Cuáles son las ventajas? • La Ley 33-2019 atiende la necesidad de desarrollar estrategias del sector de salud para la mitigación, adaptación y resiliencia al cambio climático en Puerto Rico. **¿Qué se está haciendo bien?** • Las recomendaciones del Departamento de Salud a las agencias de gobierno y los municipios de que utilicen el modelo conceptual conocido por sus siglas en inglés como BRACE, elaborado por los CDC, para analizar sus actividades, políticas y tecnologías de mitigación y adaptación al cambio climático. • El desarrollo de material educativo sobre los efectos de las olas de calor y el polvo del Sahara. • Divulgación de una guía de salud pública en emergencias y desastres, producida por el Departamento de Salud en el 2022[663].

[663] Véase la guía en: https://www.salud.pr.gov/CMS/DOWNLOAD/5418

ORIGEN INTERNO

Fortalezas

- La colaboración del Departamento de Salud con el *Caribbean Climate and Health Responders Course* de la Universidad de Columbia.
- La colaboración entre la Secretaría de Salud Familiar y Servicios Integrados consistente en campañas educativas sobre las olas de calor y la importancia del consumo de agua.
- Las colaboraciones del Centro Comprensivo de Cáncer con el Recinto de Ciencias Médicas de la Universidad de Puerto Rico relacionadas con el polvo del Sahara y su efecto en la salud, con fondos de la NASA.
- La redacción de un plan sobre control de cáncer que considera eventos de desastres y un plan de preparación y reacción para que los pacientes de cáncer o los servicios preventivos de cáncer no resulten afectados.
- Trabajos de investigación a nivel doctoral en salud ambiental sobre el cambio climático y la salud, en colaboración con el Departamento de Salud.
- La creación de un curso para los estudiantes de Medicina con un contenido de salud pública, dentro del cual se incorporaron temas ambientales y ecológicos.
- El Servicio Nacional de Meteorología tiene un sistema de aviso de olas de calor.

ORIGEN INTERNO

Debilidades

¿Qué falta por integrar?

- Implantar en el Departamento de Salud el modelo conceptual BRACE para identificar cómo el cambio climático ha afectado y afectará la salud humana, y la guía para desarrollar e implantar planes de adaptación con un enfoque en la justicia, equidad, diversidad e inclusión, conocido por sus siglas como JEDI.

¿Qué área necesita mejoras?

- La preparación del sector de la salud pública para mitigar las enfermedades relacionadas con eventos como las nubes de polvo del Sahara, debido a que es baja aún.
- Mejorar la capacidad y confiabilidad del sistema eléctrico para satisfacer las demandas de energía durante las temporadas cálidas. Actualmente es frágil y obsoleto.
- Mejorar la capacidad del sistema de producción y distribución del sistema de agua potable durante eventos de tormentas.
- Instalar placas solares y baterías en casas para mantener el suministro de energía eléctrica durante interrupciones de la red eléctrica.
- Preparar áreas de oasis apoyadas con placas solares y baterías para enfrentar el calor extremo.
- Puerto Rico tiene la mayor tasa de asma en niños de los Estados Unidos. Por lo tanto, se necesita mayor atención en salud.
- Puerto Rico tiene la tercera mayor tasa de diabetes en los Estados Unidos.

ORIGEN INTERNO	Debilidades
	• Puerto Rico tiene el mayor nivel de sobrepeso y obesidad de los Estados Unidos. Afecta al 68.3 % de la población de 18 años o más, en gran medida debido a hábitos alimenticios inadecuados, según estadísticas del Departamento de Salud de Puerto Rico. • La burocracia de las agencias para todo tipo de iniciativas. • La necesidad de diseñar metodologías apropiadas para la investigación comprensiva en el tema de cambio climático y sus efectos en la salud. • Capacitar a las personas a cargo de los sistemas de vigilancia en el sistema de salud para que reconozcan los riesgos y los efectos del cambio climático en la salud. Las personas a cargo de la vigilancia de salud pública no pueden relacionar las sintomatologías de los pacientes con eventos asociados al cambio climático. • No existe un plan a largo plazo para atender los efectos del cambio climático en la salud.

ORIGEN EXTERNO	Oportunidades
	¿Se identifican tendencias de beneficio? • Un estudio titulado Flood protection ecosystem services in the coast of Puerto Rico: *Association between extreme weather, flood hazard mitigation and gastrointestinal illness* encontró que la infiltración natural que provee el suelo del karso puede ayudar a prevenir inundaciones y la ocurrencia de enfermedades gastrointestinales. • Un estudio titulado Trauma and Collective Memory, con enfoque ecosocial, identificó lo crucial que son los esfuerzos comunitarios para la protección efectiva de los grupos más vulnerables. Entre los efectos relacionados mayormente con la salud mental están el trauma, la ansiedad y la depresión. • Una investigación titulada *Puerto Ricans One Year After Hurricane Maria: Secondary Analysis of Factors Affecting Stress Due to Hurricane Effects* resalta la importancia de que los gobiernos tanto locales como federal establezcan planes para aminorar la carga de salud mental y asegurar y facilitar el acceso a los servicios de salud mental luego de desastres naturales. • Los trabajos de facilitadores y psicólogos sociales comprometidos con la justicia climática pueden tener un rol clave en fortalecer los esfuerzos de transformación comunitarios posdesastres. • Existen fondos federales para la aclimatación de hogares por debajo del nivel de pobreza de los Estados Unidos (comunidades desatendidas, desfavorecidas y desventajadas). • Hay fondos federales para la instalación de placas solares y baterías en hogares de personas o familias por debajo del nivel de pobreza de los Estados Unidos.

ORIGEN EXTERNO

¿Qué obstáculos se identificaron?

- Los eventos extremos como los huracanes y tormentas tropicales en Puerto Rico y, en consecuencia, la destrucción de la red eléctrica que afectó las plantas de tratamiento de agua.
- Falta de acceso a datos necesarios para realizar investigaciones sobre las consecuencias del cambio climático en la salud o acceso a bases de datos incompletas.
- Falta de gobernanza adecuada para el manejo de los fondos asignados.

¿Cuáles son las condiciones económicas?

- Según el Centro de Información Censal, en su nota del 2018 titulada Desigualdad social en Puerto Rico vs. el mundo, a Puerto Rico se le catalogó como el tercer país con mayor desigualdad económica y con altos niveles de desigualdad social. El coeficiente de Gini (medida de desigualdad económica entre familias) ha sido relativamente alto en Puerto Rico durante la crisis económica.
- Puerto Rico continúa en una crisis económica y sujeto al Plan Fiscal aprobado, lo que limita las asignaciones presupuestarias locales para iniciativas relacionadas con el cambio climático. Por el momento, el trabajo se tiene que realizar con los recursos existentes. Sin embargo, se han aprobado iniciativas a nivel del gobierno federal de los Estados Unidos para asignar fondos para el desarrollo de competencias, investigaciones e infraestructura que atiendan los efectos del cambio climático en la salud.
- Para el presupuesto federal del 2024 se vislumbra la inversión de $52,000 millones de presupuesto de autoridad discrecional para atender el cambio climático. Esto es $10,900 millones más que los asignados para el 2023, un aumento de cerca del 26 %. Además, el presupuesto federal provee $179 millones al Instituto Nacional de Ciencias de la Salud Ambiental (National Institute of Environmental Health Sciences) para apoyar investigaciones dirigidas al entendimiento de los efectos del cambio climático en la salud. Esto representa $25 millones adicionales al presupuesto federal aprobado para el 2023. A nivel federal se vislumbra una asignación de $4.65 millones para la Oficina de Cambio Climático y Equidad en Salud adscrita al Departamento de Salud y Servicios Humanos de los Estados Unidos que sirve como centro de convocatoria, coordinación y supervisión de los esfuerzos relacionados con el cambio climático en toda la agencia. Sin embargo, es un reto poder accesar los fondos para Puerto Rico, por lo que atender el problema del cambio climático y la salud debe cobrar prioridad al momento de asignar fondos a nivel local.

¿Cómo afectan las regulaciones del gobierno?

- Al momento, más allá de la promulgación de la Ley 33-2019, no existen regulaciones a nivel de Puerto Rico que atiendan el asunto de los estresores provocados por el cambio climático y las consecuencias de sus manifestaciones en la salud.
- Desde el punto de vista de los determinantes sociales de la salud, son múltiples las agencias que tienen un rol muy importante en mejorar aquellas condiciones que exacerban los efectos de las amenazas del cambio climático en la salud.

ORIGEN EXTERNO	Amenazas
	• La falta de regulación adecuada afecta negativamente la protección de la salud ante eventos relacionados con el cambio climático. Por otra parte, las regulaciones pueden añadir burocracia a los procesos. **¿Qué áreas permanecen vulnerables?** • Los determinantes sociales de la salud son vulnerables a los eventos extremos. • Estos son los servicios esenciales como la salud ambiental, el sistema de atención médica y el acceso a la población al sistema de salud y al agua potable. Los eventos extremos afectan negativamente también a las poblaciones vulnerables con impactos a la salud física, mental y la calidad de vida. • Las enfermedades gastrointestinales aumentan luego de eventos de lluvia. • El potencial de transmisión de enfermedades del Aedes aegypti está influenciado por la temperatura y la precipitación. Asimismo, hay contaminación de los ríos y otras fuentes de agua con enterococos y leptospirosis. • En Puerto Rico, las costas este y sur son más vulnerables a cantidades masivas de sargazo. • Alta prevalencia de asma entre niños en la zona metropolitana de San Juan, donde también se han registrado olas de calor intenso. • Eventos más frecuentes e intensos de nubes de polvo del Sahara. • Eventos más frecuentes de niveles altísimos de turbiedad en el agua potable debido a lluvias intensas y mayor frecuencia de niveles insalubres de patógenos en las playas. • Mayor frecuencia de días con temperaturas extremas (golpe de calor).

Tabla 38.

Matriz o análisis FODA del ***sector de agricultura y ganadería***

ORIGEN	Fortalezas
	¿Cuáles son las ventajas? • La Ley 33-2019 contempla medidas para atender el cambio climático bajo el sector. • Sistemas de canales para riesgo agrícola operados por la AEE. • Embalses para agua de riego, operados por la AEE. • Tierras excepcionalmente fértiles en el valle de Lajas y en la costa de Santa Isabel. **¿Qué se está haciendo bien?** • Reúso de aguas usadas tratadas para el riego de pastos.

ORIGEN INTERNO	Debilidades
	¿Qué falta por integrar? • Incrementar el riego agrícola con aguas usadas tratadas. • Detener la introducción salina en los acuíferos con barreras hidráulicas (inyección) establecidas con aguas usadas tratadas. • Reabastecimiento de acuíferos con aguas usadas tratadas. • Eliminar cosechas que requieran un alto consumo de agua como la caña de azúcar. • Desarrollar variedades de cultivos que requieran poco consumo de agua. • Inventario adecuado de terrenos agrícolas con precios de arrendamiento y compra accesibles y razonables. • Riego suplementario agrícola para algunas zonas, especialmente la zona sur, donde se encuentran la mayoría de los suelos fértiles, llanos y mecanizables. • Identificar las áreas que se desean regar y la infraestructura disponible. • Definir el criterio de riego para llegar a los requisitos de agua considerando cultivos, época del año, características de los suelos y la calidad del agua. • Un sistema de gestión de pesca sostenible.

ORIGEN INTERNO	Debilidades
	¿Qué área necesita mejoras? • Se importa el 85 % de los alimentos. • Los canales de riego agrícola de la AEE pierden el 60 % del agua. • Las personas no quieren trabajar en la agricultura. • Los productos agrícolas importados cuestan menos que los producido localmente. • Reducción en las emisiones de GEI por animales y el manejo del estiércol. • Prácticas agrícolas que reduzcan la erosión y devuelvan carbono (C) al suelo, y que se minimice la pérdida de nutrientes, especialmente nitrógeno. • Productividad agrícola de forma sostenible que mejore la resiliencia, reduzca y remueva GEI y que aumente la seguridad alimentaria local. • Dragar embalses que están sedimentados y suplen agua para riego agrícola. • Expeditar las mejoras estructurales a los embalses Guajataca y Patillas para aumentar significativamente la capacidad de almacenamiento de agua de ambos embalses. Ambos embalses suplen agua para riego agrícola. • Vigilancia al creciente número de pescadores que operan sin licencia y a los que no cumplen las reglas, como las vedas por temporadas. • Aumentar la pesca en Puerto Rico; se pesca solo el 10 % del pescado que se consume.

ORIGEN EXTERNO

Oportunidades

¿Se identifican tendencias de beneficio?

- Países que suplen nuestra comida producirán menos debido a los efectos del cambio climático. Esta situación aumentará los precios y disminuirá la disponibilidad de ciertos alimentos. Ambas condiciones propiciarán el cultivo local de alimentos.
- Se evidencia tendencia de desarrollo de huertos caseros.
- El gobierno federal aumentó la asignación de fondos del PAN. Esto le permite a la población desatendida, desfavorecida y desventajada comprar productos locales, aunque cuesten más que los importados.
- El DA busca duplicar el nivel de pesca actual, estimado en el 10 % del pescado que se consume en Puerto Rico.

Amenazas

¿Qué obstáculos se identificaron?

- El aumento de la temperatura requerirá un 20 % más de agua de riego para producir la misma cantidad de alimento, de acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO).
- El aumento del nivel del mar reducirá la disponibilidad de agua subterránea para riego agrícola.
- El cambio del patrón de lluvia podría afectar la siembra y desarrollo de cultivos.
- Las altas temperaturas disminuyen la producción de leche.
- El aumento de frecuencia e intensidad de tormentas tropicales y huracanes aumenta la destrucción de cultivos.
- El impacto del aumento del calor sobre las abejas afectará la polinización de las mismas.

¿Cómo se encuentran las condiciones económicas?

- El gobierno de Puerto Rico continúa en bancarrota, por lo tanto los fondos locales para promover la agricultura son bien limitados.
- El costo de la electricidad, el combustible, los fertilizantes y alimentos es mayor en Puerto Rico que en otras jurisdicciones de los EE. UU. Por lo tanto, los costos de operación son mayores, lo que no nos permite competir.

¿Cómo afectan las regulaciones del gobierno?

- Las leyes de comercio interestatal no permiten prohibir la venta a pérdida (dumping).
- Las leyes federales de protección al trabajador agrícola encarecen el producto agrícola local.
- Las leyes federales de protección ambiental y control de plaguicidas encarecen también el producto local.
- La ley federal de salario mínimo encarece el producto agrícola local.
- Las leyes federales de inmigración obstaculizan el gestionar trabajadores agrícolas extranjeros para compensar la mano de obra local.

ORIGEN EXTERNO

¿Qué áreas permanecen vulnerables?

- La pérdida de área agrícola por factores exógenos sociales, políticos y económicos es un elemento importante que amenaza la sostenibilidad del sector agrícola de Puerto Rico ante el cambio climático, ya que es la base del recurso natural del cual la industria depende.
- La merma de agua ocasionada por el cambio climático es uno de los mayores desafíos para establecer la soberanía alimentaria.
- Las zonas templadas que suplen a Puerto Rico reducirán sus rendimientos de los cultivos y la cría de animales.
- Se afectarán las economías de las empresas agrícolas y la competitividad del sector agrícola a nivel local, y se pondrá en más riesgo aún la seguridad y soberanía alimentaria del país.
- Se evidencia tendencia de reducción en la fuerza laboral del sector y mayor número de personas de edad avanzada para esa labor.
- En áreas con estrés hídrico habrá mayor presión sobre los recursos de riego, principalmente en la zona sur de Puerto Rico.
- La mayoría de la producción agrícola en Puerto Rico se da en secano. Las condiciones de sequía pueden provocar rápidamente reducción en la humedad del suelo, estrés hídrico en la planta y reducción en la magnitud y calidad del rendimiento.
- Los cultivos permanentes de la montaña como frutales y café podrían ser especialmente vulnerables al estrés hídrico.
- Bajo condiciones de sequía, los cultivos pueden ser más susceptibles a la incidencia de plagas, provocando mayor dependencia en el uso de plaguicidas sintéticos.
- El calentamiento excesivo reduce la capacidad de las vacas de producir leche y disminuye las tasas de preñez.
- El alza en la temperatura puede aumentar los costos de enfriamiento de los establos y aumentar los costos de producción por la necesidad de aplicar prácticas de conservación.
- Los efectos de sequías frecuentes y prolongadas afectan la productividad de las
- pasturas y otros cultivos producidos como alimento, reduciendo la disponibilidad de alimentos y aumentando la dependencia de granos importados.
- Las sequías hacen a las pasturas susceptibles a fuegos con pérdidas económicas grandes e inmediatas. En las áreas de pastoreo, el exceso en el pastoreo provoca disminución en la calidad y hace a los suelos más susceptibles a la erosión.
- Los fuegos forestales pueden destruir los cultivos de la montaña.
- Entrevistas a pescadores revelan su percepción de que la contaminación terrestre, el cambio climático, especies invasoras y la sobrepesca han provocado el descenso de la cantidad de peces que pueden ver y capturar.

	Amenazas
	• Pescadores informan de menos peces y creen que están migrando a aguas más profundas a causa del cambio climático y la contaminación. • Un estudio indica que los pescadores han modificado las prácticas de su oficio después del huracán María, por lo que se debe analizar su impacto. • Dependencia de la pesca comercial para la seguridad alimentaria. En Puerto Rico, el 90 % de las principales fuentes de aminoácidos y proteínas del mar son importadas.

Tabla 39.

Matriz o análisis FODA del ***sector agua***

	Fortalezas
ORIGEN INTERNO	**¿Cuáles son las ventajas?** • Hay fondos disponibles provenientes de la recuperación del huracán María que se pueden utilizar para atender los problemas de distribución y calidad de agua. • La AAA ha invertido en recursos para detectar la pérdida del agua, lo cual podría reducir la pérdida del recurso de un 60 % a un 17 % que es la norma internacional. • La AAA suple agua potable al 97 % de la población en Puerto Rico. • La AAA tiene acceso a fondos recurrentes de la EPA para infraestructura de agua potable e infraestructura de aguas usadas. • Actualmente se cuenta con fondos de FEMA para el dragado del embalse Carraízo. **¿Qué se está haciendo bien?** • Se han desarrollado diferentes estudios puntuales en Puerto Rico para ver el comportamiento de precipitación, sequía y demás variables climatológicas que afectan al recurso hídrico. • La OE-2015-026 encomienda al DRNA coordinar la atención a la crisis del agua y proteger los acuíferos en la región sur. • El DRNA declaró al Acuífero del Sur en “estado crítico”. El DRNA prohibió para el área primaria la construcción de nuevos pozos y limitó el aumento del agua que se extrae de los pozos existentes en un esfuerzo por proteger el acuífero (Orden Administrativa 2015 – 018). • El CEACC presentó una serie de cursos de acción en torno al recurso agua en Puerto Rico el 22 de marzo de 2022. • Se está reusando el 90 % de las aguas usadas tratadas de la planta Regional de Tratamiento de Aguas Usadas de Guayama, para las aguas de enfriamiento de AEE.

ORIGEN INTERNO

Debilidades

¿Qué falta por integrar?

- Las cuencas hidrográficas del noroeste y sureste están identificadas como las más comprometidas por las tendencias de precipitación. Por lo tanto, el buen manejo del recurso hídrico de esas cuencas comprometidas debe ser prioridad para todas las agencias pertinentes (DRNA, AAA, AEE) y para las comunidades ubicadas en esas zonas más vulnerables a la sequía.
- La recarga artificial de acuíferos como técnica que se puede utilizar para aumentar la cantidad de agua que se infiltra en el suelo y, por lo tanto, aumentar la recarga de los acuíferos. Esto se puede lograr mediante la construcción de embalses, la infiltración de agua tratada o la recarga de pozos específicos.
- Reúsos de las 228 mgd de las aguas usadas tratadas que genera la AAA.
- Implantar el programa de conservación de agua de WaterSense que bajaría el consumo de un 40 % de los hogares en Puerto Rico.
- Reducir la pérdida de agua en el sistema de distribución.
- Reducir la sedimentación de los embalses mediante un programa de reforestación masiva aguas arriba de los embalses.

¿Qué área necesita mejoras?

- La capacidad de almacenamiento de la mayoría de los embalses está seriamente comprometida por la sedimentación.
- La destrucción de 144 millones de árboles por el huracán María empeoró la situación de la sedimentación de los embalses.
- Racionamiento de agua y grandes pérdidas agrícolas. El racionamiento de agua en Puerto Rico se relaciona a menudo con la falta de infraestructura adecuada, la mala gestión del agua y la falta de inversión en el mantenimiento y mejora de la infraestructura existente. Por lo tanto, se necesitan esfuerzos a largo plazo para garantizar el acceso equitativo y sostenible al agua en toda la isla. Suplir agua a pesar de la sequía para evitar el racionamiento.
- A pesar de la declaración de estado crítico de los acuíferos del sur y las medidas del DRNA para atender esta situación de emergencia, en Salinas estas medidas no han sido suficientes y se ha establecido una prohibición de construcción. Sin embargo, se necesitan estrategias para la recarga de estos acuíferos. Cumplir con el Plan de Manejo establecido para acuíferos en estado crítico en el caso del acuífero del sur.
- Los canales de riego agrícola pierden el 60 % del agua que suplen a plantas potabilizadoras.
- La AAA pierde el 60 % del agua que produce.
- La AAA carece de un mantenimiento preventivo efectivo de todas sus plantas.
- Los sistemas de la AAA carecen de un sistema de redundancia que permitan la continuidad de las operaciones cuando se suspende el servicio de energía eléctrica o se afecte un componente mecánico.
- La AEE no ha dragado los embalses que suplen agua a la AAA.

Debilidades

- La sobreexplotación de los acuíferos es un problema en Puerto Rico, especialmente en la costa sur donde se encuentra el acuífero de Santa Isabel.

ORIGEN

Oportunidades

¿Se identifican tendencias de beneficio?

- Se están identificando mediante investigaciones las áreas más vulnerables a menos lluvias y a sequías. Esto ayudaría a implantar proyectos como, por ejemplo, cosechas de lluvia.
- Se están asignando fondos para el dragado de los embalses críticos.
- Se están empleando recursos para identificar y reparar las averías en el sistema de acueductos que podrían disminuir la pérdida del recurso.
- Se identifican inversiones recientes en el dragado de embalses y mejoras a la infraestructura que disminuirán la pérdida del recurso.

ORIGEN EXTERNO

Amenazas

¿Qué obstáculos se identificaron?

- La AEE administra los embalses en función de las necesidades de generación de energía del sistema y ni el DRNA ni la AAA tienen la facultad de intervenir en la operación de los embalses de la AEE. El DRNA vuelve a ser el custodio del agua una vez que el recurso sale del embalse y vuelve al cauce del río.
- Las sequías se están volviendo más intensas y frecuentes, en especial en la última década.
- Análisis de tendencias realizados por el CEACC muestran zonas de disminución de lluvia en el noroeste y sureste.
- Cuando se examinan dos de los modelos más actualizados basados en las Trayectorias de Concentración Representativas (RCP, por sus siglas en inglés) de temperatura superficial para la región de Puerto Rico, las proyecciones de lluvia para la región anticipan menor precipitación en escenarios medianos (RCP 4.5), conservadores y extremos (RCP 8.5).
- Pérdida del recurso en el sistema de distribución de la AAA, que admite perder alrededor del 60 % del agua que produce.

¿Cuáles son las condiciones económicas?

- Agencias responsables en el sector agua no poseen los fondos suficientes para el desarrollo de proyectos y estrategias.
- En cuestión de fondos estatales, no hay recursos suficientes para invertir en los cambios necesarios.

ORIGEN EXTERNO

Amenazas

- En cuestión de fondos federales, se han aprobado asignaciones económicas para atender ciertos asuntos como el dragado de embalses críticos como Carraízo.
- La AAA está atendiendo con fondos de la corporación y federales los problemas en la infraestructura para disminuir la pérdida del recurso.

¿Cómo afectan las regulaciones del gobierno?

- Burocracia en los procesos. Falta de apoyo y unión de esfuerzos entre agencias para viabilizar proyectos.
- Las regulaciones actuales limitan que los ciudadanos puedan cosechar agua de lluvia en sus hogares.
- El DRNA imposibilita el reúso de aguas usadas.

¿Qué áreas permanecen vulnerables?

- Puerto Rico es la segunda jurisdicción en América Latina con menos disponibilidad de agua dulce por persona, según el Banco Mundial.
- La intrusión de agua de mar a los acuíferos aumentará a medida que siga subiendo el nivel del mar, reduciendo la disponibilidad del agua subterránea.
- Ocho embalses principales se encuentran en áreas que han experimentado una disminución en la cantidad de lluvia total promedio. Estos son los embalses de Guajataca, Dos Bocas, Caonillas, Comerío, Cidra, Carite, Patillas y Fajardo.
- La acumulación de sedimentos en los embalses es una amenaza para la cantidad y calidad del agua.
- Mayor infiltración de agua salina a los acuíferos limitando la disponibilidad de agua subterránea.
- Merma de la lluvia, disminuirá la capacidad asimilativa de los cuerpos de agua. Esto requerirá un mayor tratamiento de parte de la AAA para producir agua potable.
- La merma de la capacidad asimilativa de los cuerpos de agua requerirá que la AAA invierta en plantas de tratamiento avanzado de aguas usadas para compensar por la falta de capacidad asimilativa.
- El aumento de las lluvias intensas incrementará la sedimentación de los embalses.
- El aumento de lluvias intensas incrementará los niveles de turbiedad en los abastos de agua al punto de interrumpir el suministro de agua.
- El aumento de la temperatura incrementará la demanda de agua.
- La mayor frecuencia e intensidad de los huracanes producirá interrupciones prolongadas en el suministro de agua.
- El aumento del nivel del mar y la marejada ciclónica destruirán el 70 % de la capacidad de tratamiento de aguas usadas de la AAA.
- Las lluvias intensas provocarán mayor frecuencia en el cierre de las playas debido al alto potencial de contaminación por patógenos.

Tabla 40.

Matriz o análisis FODA del sector ***sistemas marinos y zonas costeras***

ORIGEN INTERNO	Fortalezas
	¿Cuáles son las ventajas? • La Ley 33-2019 presenta unas guías precisas para la adaptación y resiliencia de los sistemas marinos y zonas costeras ante las manifestaciones del cambio climático. • Existen varios esfuerzos de restauración de mangles, dunas, poblaciones de erizos y arrecifes. • Agencias federales como la NOAA y el USGS desarrollan continuamente herramientas cartográficas consultivas que ayudan a visualizar el alcance de inundaciones costeras, *water level* y proyecciones de aumento del nivel del mar a nivel regional y local. **¿Qué se está haciendo bien?** • Se adjudicaron los fondos sobre el dragado del Caño Martín Peña para restablecer la conexión hidráulica entre la laguna San José y la bahía de San Juan. El proyecto incluirá áreas de conservación para humedales de manglares. • Se cuenta con un plan de pesquería para las aguas bajo jurisdicción federal elaborado por el Caribbean Fishery Management Council. Además, se está realizando un plan de manejo de pesquerías basado en ecosistemas para aguas federales. • Se presentó la OE-2023-009 que declara un estado de emergencia en Puerto Rico por erosión costera. • En el 2021, el CEACC presentó 103 acciones recomendadas para la zona costanera, de los cuales el Gobierno de Puerto Rico acogió 87 para implantar. • Se cuenta con diversos proyectos de mitigación y restauración de componentes costeros que son auspiciados por fondos mayormente federales. • El informe titulado *Rigorously Valuing the Impact of Hurricanes Irma and Maria on Coastal Hazard Risk in Florida and Puerto Rico*, publicado por el USGS en el 2021, documentó tener una herramienta que presenta los daños a los arrecifes de coral en escenarios antes y después de los pasados huracanes. • Estudios presentan proyecciones de reducción de inundaciones costeras a medida que se restauren los arrecifes de coral. • Existen estudios liderados por el Sistema Caribeño de Observación Costera Oceánica (CARICOOS) de la UPR-Mayagüez sobre acidificación de las aguas de Puerto Rico. • Mediante la Orden Ejecutiva OE-2023-009 se ordena al DRNA continuar con la reforestación masiva para reponer los árboles destruidos por los fenómenos atmosféricos que han afectado a Puerto Rico durante los pasados años. La reforestación masiva debe ir dirigida a reducir la sedimentación en los cuerpos de agua y evitar más daños a los arrecifes de coral y las cuencas hidrográficas, entre otros. Como parte de esta reforestación se fomentarán los acuerdos colaborativos con agendas, municipios y entidades privadas y sin fines de lucro para agilizar y acelerar el proceso de reforestación.

INTERNO	Fortalezas
	• El Instituto de Investigación y Planificación Costera de Puerto Rico (CoRePI) establece una línea base del estado de las playas de Puerto Rico luego del huracán María, apoyado con fondos de FEMA (HMGP), que tiene datos e información para entender la situación de erosión de las playas para el 2018. • Existe una gran cantidad de fondos federales que pueden ayudar a estudios e implantación de proyectos encaminados a atender el cambio climático en los sistemas marinos y las zonas costeras de Puerto Rico. • El DRNA ya cuenta con un protocolo para el manejo de acumulaciones extremas de sargazo en las costas.

ORIGEN INTERNO	Debilidades
	¿Qué falta por integrar? • Realizar monitoreos y evaluaciones de hierbas marinas a largo plazo para establecer una base de referencia, documentar cambios y evaluar la resiliencia, y desarrollar planes de mitigación de estos importantes ecosistemas ante el cambio climático. • Manejo del sargazo en las costas. La acumulación y subsiguiente descomposición del sargazo puede tener efectos devastadores en el hábitat crítico de especies amenazadas, con un impacto sobre los recursos pesqueros. • Siembra de mangle. • Incrementar la siembra de corales. • Tomar medidas que permitan el desplazamiento de playas tierra adentro. • Establecer la jerarquía de medidas para proteger la costa, priorizando en la infraestructura natural y dejando como última opción la infraestructura dura. • Faltan fondos para el manejo de sargazo y colaboración con otras entidades gubernamentales y privadas para su manejo. • Establecer monitoreos a largo plazo de componentes costeros como playas, dunas, mangles, arrecifes y hierbas marinas, entre otros. La continuación de proyectos de restauración de mangles debe alinearse a monitoreos a largo plazo a través en toda la isla, para poder tener una caracterización de la distribución y diversidad del ecosistema y establecer criterios para enfrentar los efectos del cambio climático. • En Puerto Rico no existe un plan de manejo integrado para pesquerías en aguas bajo la jurisdicción local (0-9 millas náuticas). • En Puerto Rico no existe un plan de manejo integrado de costas que se atempere a la nueva realidad de la costa. • Insertar en los instrumentos de planificación del Gobierno de Puerto Rico vigentes el efecto del aumento del nivel del mar y la marejada ciclónica en los componentes y comunidades costeras. • Asignación de fondos estatales para implantar los COA que puedan mantenerse en el tiempo.

ORIGEN INTERNO

Debilidades

¿Qué área necesita mejoras?

- El manejo integrado de las cuencas hidrográficas como estrategia de planificación para la protección de los sistemas marinos y costeros.
- Mitigar el aumento de la sedimentación a lo largo de las cuencas hidrográficas asociado a actividades relacionadas con cambios de uso de terrenos, como la deforestación para reducir el impacto en las costas.
- Promover más monitoreos continuos en componentes costeros (arrecifes, playas, mangles, dunas, hierbas marinas), reducir fuentes terrestres de contaminación, aumentar el uso de medidas de mitigación basadas en naturaleza (nature-based solutions) y establecer más sistemas para observar cómo se comportan los sistemas biogeoquímicos marinos (acidificación, entre otros).
- Aumentar las estrategias de manejo para el control de las enfermedades que se han originado en los corales.
- Se evidencia poco personal en las agencias responsables para implantar los cursos de acción y las estrategias presentadas en el P-MARCC.
- Fiscalización para evitar construcciones ilegales en reserva naturales, mangles y humedales.
- No permitir construcción en áreas vulnerables al aumento del nivel del mar y a todo tipo de marejada.
- Establecer un protocolo contemplando la política pública vigente para la demolición y destrucción de estructuras abandonadas en las costas.
- Los geodatos y la información están fragmentados a través de las agencias y unidades que los manejan.

ORIGEN EXTERNO

Oportunidades

¿Se identifican tendencias de beneficio?

- Desde el 2018 se han replantado pedazos de corales fragmentados luego de los huracanes. Los esfuerzos de replantación continúan en conjunto con proyectos de restauración y viveros de corales. En Culebra existen fincas de corales de A. cervicornis, que han reportado más del 90 % de éxito de sobrevivencia
- La Sociedad Ambiente Marino tiene proyectos activos, financiados por la NOAA, para evaluar los impactos de especies invasoras y para restaurar la continuidad de corales y hierbas marinas en Culebra.
- En un estudio realizado en la ciénaga Las Cucharillas (Cataño) durante los dos años siguientes a los huracanes del 2017 se encontró el 87 % de cobertura vegetal. Se concluyó que esa vegetación mostró resiliencia ante los efectos iniciales de los huracanes.
- El Plan de Manejo de la Cuenca Hidrográfica Cabo Rojo está en revisión y actualización por medio del DRNA.
- Siembra de corales.

ORIGEN EXTERNO

Amenazas

¿Qué obstáculos se identificaron?

- Difícil acceso a información sobre proyectos en curso más recientes que no han sido publicados en la literatura científica. La información y los geodatos están fragmentados a través de diversas fuentes. Las entidades lo manejan como información interna y esto repercute en precisar los diagnósticos y en duplicidad.
- Falta de fiscalización para evitar la construcción clandestina en la costa.

¿Cuáles son las condiciones económicas?

- El deterioro de los componentes marinos y costeros en donde se encuentran los hábitats críticos de especies de importancia comercial puede causar un impacto importante en el recurso pesquero y, por consiguiente, en la actividad pesquera.
- Se cuenta con potenciales fuentes de financiamiento federales no recurrentes, pero no se evidencia que se asigne el manejo de los fondos disponibles a entidades estatales responsables de implantar los proyectos y estrategias de los COA para dar continuidad a la implantación y mejora.

¿Cómo afectan las regulaciones del gobierno?

- Burocracia en los procesos.

¿Qué áreas permanecen vulnerables?

- Arrecifes de coral comprometidos por el impacto mecánico de los huracanes, las altas precipitaciones, descargas de sedimentos en suspensión, altas temperaturas, calidad de agua, enfermedades y cambios en la acidificación del agua. Este es uno de los componentes marinos más vulnerables a las manifestaciones del cambio climático.
- La invasión generalizada de *Halophila stipulacea* nativa del océano Índico en el Caribe oriental en combinación con la dispersión a gran escala de sargazo representan amenazas recientes a la persistencia de las hierbas nativas.
- Los humedales están amenazados por el desarrollo de urbanizaciones, rellenos sanitarios de residuos sólidos o vertederos (estos pueden interferir con el agua subterránea que va al humedal), canalizaciones, construcción de carreteras y marinas, proyectos agrícolas (abonos, insecticidas y herbicidas), así como por el desmonte en las zonas de captación de las cuencas hidrográficas.
- Los manglares en Puerto Rico están amenazados por el dragado para la agricultura y el desarrollo urbano, tala ilegal, la contaminación de las aguas residuales y la destrucción de los ecosistemas de barrera, como las dunas y arrecifes de coral. Asimismo, se afectan por eventos extremos tales como huracanes, terremotos y anomalías en precipitación sumado al impacto de rellenos para la agricultura.
- Las playas están expuestas a sufrir impactos al manejo incorrecto del uso del terreno que incrementa ante las manifestaciones del cambio climático.

ORIGEN EXTERNO	Amenazas
	• Para julio de 2018, las secciones costeras con mayor problema de erosión se ubicaban en los municipios de Vieques, Culebra, Isabela, Loíza, Luquillo, Patillas, Humacao, Dorado, Ponce y Yabucoa. • Aproximadamente 99 kilómetros de línea de costa presentan migración de la línea de costa tierra adentro a lo largo de los 44 municipios costeros. Estas áreas con migración de la línea de costa tierra adentro pueden estar más expuestas a mayor alcance de inundaciones en futuros eventos. • Se identificó erosión en secciones de playas adyacentes a estructuras rígidas en la mayoría de los municipios. • El pez león es una especie invasora en las aguas del mar Caribe jurisdiccionales de Puerto Rico. • El aumento del nivel del mar causará más erosión de costas, propiciará un aumento en estructuras abandonadas y provocará la desaparición de playas. • El incremento de episodios del polvo del Sahara afectará los arrecifes de coral. • El cambio climático traerá más sargazo a las costas de Puerto Rico. • El aumento de la frecuencia e intensidad de las lluvias incrementará la cantidad de sedimentos que lleguen a la costa. • Los episodios de altas temperaturas en el mar incrementarán la incidencia de blanqueamientos de corales. • El aumento de la frecuencia e intensidad de huracanes afectará los arrecifes de coral.

Tabla 41.

Matriz o análisis FODA del ***sector de ecosistemas terrestres***

ORIGEN INTERNO	Fortalezas
	¿Cuáles son las ventajas? • La Ley de Vida Silvestre (Ley 241-1999) habilita al DRNA para aplicar los mecanismos en ley con el propósito de proteger, conservar y fomentar las especies de vida silvestre tanto nativas como migratorias de Puerto Rico, entre otras disposiciones. • Ante la necesidad de ser más resilientes y mitigar los efectos del cambio climático, se identifican nuevas oportunidades de programas estatales y federales enfocados en el desarrollo de proyectos de reforestación y de forestación urbana con el fin de incrementar la infraestructura verde en estas zonas y de los servicios ecológicos asociados a esta infraestructura. • El proyecto para la reproducción en cautiverio de la cotorra puertorriqueña se ha replicado en diferentes áreas de Puerto Rico. • El proyecto de recuperación del gavilán de la sierra en Adjuntas. • Proyecto de recuperación del sapo concho puertorriqueño en el Bosque Seco de Guánica.

ORIGEN INTERNO

Fortalezas

- Se cuenta con el reglamento DRNA 6766 del 2004 para regir las especies vulnerables y en peligro de extinción. El reglamento establece los mecanismos para designar una especie como vulnerable o en peligro de extinción, establece los criterios para la designación de especies en peligro crítico, regular el manejo de estas especies y establecer planes.

¿Qué se está haciendo bien?

- Aunque no necesariamente visibles, existen iniciativas a través de ONG y en alianza con dependencias del gobierno estatal y federal para rehabilitar ecosistemas y recuperar especies. Por ejemplo, colaboradores locales está atendiendo al gavilán de sierra o falcón de sierra. Es el Peregrine Fund, que tiene programas de conservación de aves de rapiña por todo el mundo y tiene un programa en Puerto Rico con varios profesionales a tiempo completo.
- El desarrollo de nuevos estudios que contemplan las tendencias de cambio en nuestros ecosistemas, las consecuencias en nuestras especies y la tolerancia de especies a escenarios de estrés ambiental para ser más efectivos al momento de establecer proyectos para rehabilitarlas, conservarlas y recuperarlas.
- Existen programas modelo (LTER - Estación de El Verde en El Yunque y la Reserva de Investigación Estuarina Bahía de Jobos) cuyas ejecutorias pudieran servir de ejemplo al momento de atender las áreas de oportunidad planteadas tanto en los COA como en la respuesta a la pregunta en las que se identifican obstáculos.
- El Fideicomiso de Conservación ha comprado terrenos para proteger especies y bosques.

ORIGEN INTERNO

Debilidades

¿Qué falta por integrar?

- Conocer cómo las condiciones ambientales en nuestros ecosistemas terrestres están cambiando por el efecto del cambio climático y qué impacto ejercen estas modificaciones sobre la biodiversidad.
- Evaluar cómo el cambio climático propicia la colonización y expansión de especies exóticas que invaden nichos importantes de la flora y fauna autóctona trayendo como consecuencia su desplazamiento.
- Falta de un sistema de monitoreo ambiental unificado que facilite la caracterización ambiental actualizada y las tendencias de cambio en nuestros ecosistemas y hábitats críticos.
- En vez de imponer multas, propiciar que el gobierno adquiera terrenos de alto interés ecológico para protegerlo a perpetuidad.
- Existe un marco legal ambiental tanto estatal como federal robusto, pero a consecuencia de la falta de presupuesto, personal y procesos burocráticos se dilata su implantación y las prácticas expuestas por ley que pueden redundar en beneficios para los esfuerzos de conservación y rehabilitación de nuestros ecosistemas y biodiversidad.

ORIGEN INTERNO	Debilidades
	• La falta de un monitoreo periódico establecido por ley (5 años) que fomente la mejor información sobre el estado poblacional de nuestras especies vulnerables. **¿Qué área necesita mejoras?** • La limitación de datos actualizados sobre el estado poblacional de especies que se encuentran amenazadas y en peligro de extinción en especial con especies enlistadas en la reglamentación estatal y no en la federal, de las cuales hace falta nueva información. • La falta de información sobre proyectos de alianza que se pudieran estar desarrollando entre el gobierno y las comunidades enfocadas en la rehabilitación de ecosistemas y la recuperación de especies vulnerables. De esta forma se pueden afinar estrategias para ser más eficientes al momento de establecer planes de manejo y proyectos de rehabilitación. • La limitación o ausencia de planes de manejo integral en ecosistemas y áreas críticas a base de estrategias de rehabilitación bajo el contexto del cambio climático, la caracterización ambiental más completa sobre estos ecosistemas y con medidas de mitigación, adaptación y resiliencia al cambio climático. • Falta de fiscalización de las reservas naturales y áreas críticas naturales. • Falta de control efectivo de invasión de especies exóticas. • Falta de un programa de recuperación de la mayoría de las especies de peligro de extinción.

ORIGEN EXTERNO	Oportunidades
	¿Se identifican tendencias de beneficio? • Establecer un hábitat crítico alerta a las agencias federales para que lleven a cabo esfuerzos especiales de conservación para la especie cuando trabajen, financien o permitan actividades en estas áreas. • La conciencia ambiental que se ve materializada entre diversos sectores de la comunidad que pudieran facilitar el desarrollo de proyectos y alianzas que se enfoquen en la rehabilitación de ecosistemas y la recuperación y monitoreo de nuestra biodiversidad. • El Yunque posee un plan de manejo modelo que puede servir de referencia para el desarrollo de otros planes. • Se evidencia potencial de fuentes de financiamiento solo en ecosistemas en áreas urbanas de fondos federales limitadas para reforestación y restauración de ecosistemas en áreas urbanas.

ORIGEN EXTERNO

Amenazas

¿Qué obstáculos se identificaron?

- El cambio climático puede incidir en la restauración y rehabilitación efectiva de ecosistemas y de su biodiversidad. Esto presenta grandes retos, ya que las condiciones climáticas actuales establecen una nueva realidad ecológica que puede complicar la efectividad de estas iniciativas.
- En este momento no hay una unificación de sistemas de monitoreo de manera ordenada que permita realizar un diagnóstico a escala real y a través del tiempo para apoyar la toma de decisiones en política pública, planes, proyectos y estrategias que faciliten a los especialistas realizar diagnósticos holísticos en las áreas de estudios.

¿Cuáles son las condiciones económicas?

- No se identifican oportunidades frecuentes y accesibles de fondos federales recurrentes o asignación de fondos federales en las agencias estatales para implantar los COA.
- Limitación de fondos estatales para el desarrollo de estudios de caracterización ambiental en ecosistemas críticos para el desarrollo de sistemas adecuados de monitoreo ambiental y para el monitoreo periódico de la situación poblacional de especies vulnerables y en peligro de extinción.
- Limitación en la adquisición y mantenimiento de equipos de monitoreo ambiental y de un personal que facilite el monitoreo de condiciones ambientales a través de las reservas y áreas protegidas.

¿Cómo afectan las regulaciones del gobierno?

- La burocracia en los procesos dilata la implantación.

¿Qué áreas permanecen vulnerables?

- El cambio climático modifica las condiciones ambientales a nivel del hábitat y los factores abióticos, generando escenarios de estrés ambiental, en especial, sobre aquellas especies que se encuentran amenazadas y en peligro de extinción.
- Los cambios en las temperaturas del ambiente fomentan la expansión de especies exóticas una vez son introducidas a la flora y fauna local, provocando alteraciones en las estructuras tróficas de los ecosistemas, reducciones en las especies nativas y hasta efectos sobre las cosechas que generan pérdidas económicas importantes.
- En Puerto Rico, el USFWS ha designado cerca de 87 especies de animales y plantas como especies amenazadas o en peligro de extinción. Bajo la ley ESA (*Endangered Species Act*) de 1973 se requiere que el secretario(a) del Interior o el de Comercio (según la especie) designe un hábitat crítico federal. En la actualidad, hay 18 especies de plantas y animales bajo ESA con hábitats críticos designados en Puerto Rico.

ORIGEN EXTERNO	Amenazas
	• A base de las categorías de mayor preocupación incluidas en las listas de especies en peligros, amenazadas o propuestas en peligro, tanto estatal como federal, los grupos de especies de animales que encabezan las mayores designaciones son las aves, seguidas por los reptiles y anfibios y, en menores números, los mamíferos. • Bajo la lista federal actualizada (agosto 2020) descrita en la sección 4.9 del Plan, el USFWS identifica 18 especies de animales y plantas con designación federal de hábitat crítico en Puerto Rico. • Especies exóticas. • Aumento de la temperatura. • Aumento del nivel del mar. • Merma del recurso agua. • Aumento en la frecuencia de huracanes y tormentas tropicales (caída de árboles) y cambio del hábitat crítico debido al cambio climático.

Tabla 42.

Matriz o análisis FODA del ***sector forestación***

ORIGEN INTERNO	Fortalezas
	¿Cuáles son las ventajas? • El análisis preliminar del Inventario Nacional Forestal más reciente (2019) identificó especies nativas que están mejor adaptadas a los huracanes (roble blanco y almácigo). • Los bosques tropicales como los de Puerto Rico son los ecosistemas con las tasas de productividad primaria más altas del mundo. • Todos los elementos necesarios para implantar un plan de reforestación para Puerto Rico están presentes en la isla, aunque en forma aislada y operando a niveles bajos de capacidad y extensión. Esto incluye el talento humano, organizaciones privadas, viveros con diversidad de ofrecimientos y capacidades y ejemplos de experiencias exitosas en distintos entornos ecológicos. • La tasa de forestación antes del huracán María era de un 60 %. **¿Qué se está haciendo bien?** • Puerto Rico, Vieques y Culebra tienen desde el 1980 una mejor referencia para estudiar los cambios en la cubierta forestal. • Se cuenta con el Fideicomiso de Conservación. • Se cuenta con el Bosque Modelo de las Tierras Adjuntas. • Implantación del plan de manejo de El Yunque.

ORIGEN INTERNO

Debilidades

¿Qué falta por integrar?

- Reconocer el valor que proveen los nuevos bosques secundarios como infraestructura para la sociedad. El creciente reconocimiento de los servicios ecosistémicos y su valor ambiental, social y económico debe facilitar esfuerzos de conservación de bosques, especialmente considerando el alto potencial que tienen como sumideros de carbono para mitigar el cambio climático.
- Diseñar un plan de reforestación que establezca bosques resilientes y sostenibles. Tal plan debe tomar en consideración la experiencia de la década del 1940 y los principios más avanzados de la ecología moderna.
- Decidir las proporciones de cobertura forestal, usos agrícolas y usos urbanos que queremos como meta.
- La experiencia con la reforestación utilizando especies nativas no fue la mejor en el siglo pasado (Marrero Torrado y Wadsworth 2015) Por lo tanto, en la actualidad no contamos con la identificación de las especies idóneas para el esfuerzo de reforestación.
- No tenemos suficiente capacidad de producción del material vegetativo requerido para la reforestación.
- No hemos documentado las lecciones aprendidas con los esfuerzos de reforestación durante este siglo.
- Poder determinar el mejor uso posible para los bosques secundarios y noveles, considerando la urgencia impuesta por el cambio climático para conservar y aumentar la capacidad de los sumideros de carbono naturales.
- Se están desaprovechando oportunidades económicas que pueden derivar de:
    - Maderas ornamentales que tienen valores que se multiplican por cien al trabajarse.
    - Restauración de la industria de los muebles.
    - El aserrín es un producto secundario utilizado en los establos de caballos.
    - Empleo para miles en los campos.
    - Reemplazo de importaciones de madera.
- Sustentabilidad en la producción y regeneración forestal.
- Incentivo para retener la cobertura forestal.
- Permanencia utilizando servidumbres de conservación.

¿Qué área necesita mejoras?

- Mejorar la educación sobre los múltiples beneficios de los bosques, entre estos, los servicios como absorbente de los GEI y, por tanto, mitigador del calentamiento global, entre otros.
- Prevención en la mitigación de los incendios forestales ya que son un problema reciente para la conservación de los bosques de Puerto Rico.
- Aumentar el número de viveros.

INTERNO

Debilidades

- El rol del Estado, tanto estatal como federal, se ha circunscrito principalmente al establecimiento de reservas forestales cuyo manejo pasivo se explica por sus usos mayormente recreativos, que cada vez tienen más baja prioridad para el otorgamiento de fondos gubernamentales.
- En el rol de asegurar la conservación de los bosques públicos se han excluido a sectores de la población que encuentran en el bosque vivienda o una fuente de recursos renovables para su sustento material. Como consecuencia la relevancia de los bosques en las personas ha disminuido.

ORIGEN EXTERNO

Oportunidades

¿Se identifican tendencias de beneficio?

- Dos estudios sobre el balance de carbono en el bosque urbano de San Juan coinciden en que el bosque tiene una alta capacidad de asimilar carbono de la atmósfera y almacenarlo en sedimentos y biomasa. Se encontró que la siembra de árboles en los sectores deforestados de la ciudad aumenta desproporcionalmente la remoción de carbono de la atmósfera. Reforestar la ciudad beneficia la mitigación del cambio climático y las islas de calor a la vez que beneficia el entorno urbano y la salud de los residentes.
- Las empresas internacionales están buscando la oportunidad de financiar la siembra y subsiguiente mantenimiento de árboles para mitigar sus emisiones. Se estima que a junio del 2023 (fuente Bloomberg) se invertían $160,000 millones por año y se proyecta que para el 2037 aumente a $1 billón (trillions) para esta iniciativa.
- Se pueden usar los fondos federales para la reconstrucción de Puerto Rico para la reforestación.

ORIGEN EXTERNO

Amenazas

¿Qué obstáculos se identificaron?

- La variedad de suelos, climas y sistemas ecológicos de Puerto Rico en combinación con eventos extremos como los huracanes, las sequías y las inundaciones representan los retos principales de cualquier plan de reforestación.

¿Cuáles son las condiciones económicas?

- No se cuenta con fondos locales para reforestar.

¿Cómo afectan las regulaciones del gobierno?

- La fragmentación del gobierno dificulta la implantación de iniciativas de forestación. El reforestar y mantener un área reforestada requiere múltiples acciones para lograr los objetivos. Por ejemplo, acceso a los terrenos, permisos de poda, corte y siembra, acceso a material vegetativo, permisos de bomberos (cuando se utiliza el fuego en el mantenimiento), etc. Tales acciones requieren acciones de varias agencias gubernamentales que no necesariamente coordinan sus decisiones para favorecer a la forestación.

ORIGEN EXTERNO

Amenazas

- Falta de implantación eficiente de acuerdo con las leyes y regulaciones existentes. Por ejemplo, la OGPe emite permisos de corte, poda y siembra de árboles a base de certificaciones de profesionales autorizados sin experiencia en la dasonomía. En algunos casos, el proceso resulta en la deforestación o la conversión de bosques maduros a bosques secundarios sin que medie análisis alguno de la situación forestal de los lugares como sugiere la Ley 133 de 1975 o Ley de Bosques de Puerto Rico.

¿Qué áreas permanecen vulnerables?

- El huracán María causó unos 100,000 derrumbes en la cordillera central y expuso suelos previamente forestados a la erosión a causa de las lluvias extremas.
- En la ciudad, el huracán causó estragos en la vegetación y a pesar de la resiliencia de los bosques urbanos, se perdió el 40 % de la producción de alimento.
- Estudios con modelos y experimentos sugieren que los bosques tendrían menos cantidad de biomasa si la frecuencia de los huracanes aumenta, pues la pronta recurrencia no permite tiempo para la recuperación del ecosistema. Una mayor frecuencia de huracanes provocaría cambios en la composición de especies, promoviendo la dominancia de especies comunes en la sucesión temprana que toleran ambientes con alta intensidad de luz.
- Los bosques en Puerto Rico con mayor vulnerabilidad a los cambios en precipitación y humedad atmosférica son los bosques nublados, que solo se encuentran en las cimas de las montañas de la Cordillera Central y la Sierra de Luquillo.
- En los bosques de Puerto Rico, los aumentos en la temperatura pueden reducir la productividad dominante de las especies de árboles por estrés térmico.
- Incremento de frecuencia de tormenta tropical y huracanes.
- Incremento de sequía y temperaturas extremas, lo que propicia fuegos forestales.
- El aumento del nivel del mar afecta los bosques costeros que necesitan agua dulce como el pterocarpus.
- El aumento de la frecuencia de lluvias intensas puede provocar derrumbes que destruyan árboles.

Tabla 43.

Matriz o análisis FODA del **sector turismo**

ORIGEN INTERNO	Fortalezas
	¿Cuáles son las ventajas? • Se cuenta con un Plan de Adaptación al Cambio Climático de la Compañía de Turismo de Puerto Rico (adscrita al DDEC) y con la Ley de Política Pública para el Desarrollo Sostenible del Turismo de Puerto Rico (Ley 254 -2006). • Existe un Plan de Uso Terrenos desde el 2015. • La escala territorial pequeña facilita la planificación y el manejo y la gestión del destino. • La zona rural y la montaña son atractivos turísticos a futuro. Allí se encuentra el Bosque Modelo y Reserva Puertorriqueña de la Biosfera. **¿Qué se está haciendo bien?** • El Plan de Adaptación al Cambio Climático de la Compañía de Turismo de Puerto Rico (2016) está bajo revisión. • Experiencia con alianzas público-privadas. Por ejemplo, en la infraestructura turística de aeropuerto y puertos. • Fuerte organización profesional del turismo. • Desarrollo local turístico (turismo interno). • Designaciones de la UNESCO y federales como lugares de interés histórico (historic landmark). • Existencia de unidad e identidad cultural. • Mercado abierto y directo con Estados Unidos. • Capacidad tecnológica del país.

INTERNO	Debilidades
	¿Qué falta por integrar? • Cambio en el modelo turístico que incorpore medidas de adaptación y resiliencia contra las manifestaciones del cambio climático. Integre en su planificación la adaptación y resiliencia de la infraestructura turística, tanto la infraestructura gris, como la infraestructura natural. • Desarrollar el turismo en la montaña para compensar una posible merma del turismo de sol y playa debido a temperaturas extremas y olas de calor. • Realizar un inventario de los recursos turísticos. • Definir una política pública clara y uniforme de planificación y gestión del territorio turístico que empodere a los municipios para implantarla.

ORIGEN INTERNO

Debilidades

¿Qué área necesita mejoras?

- Ante el aumento de días de calores extremos y olas de calor se debe planificar nuestros destinos del interior que ofrecerán mejor confort climático. Las zonas rurales, bosques y áreas naturales protegidas se convertirán en activos de alto valor en la búsqueda de los turistas por ese confort climático y esto requiere estrategias de conservación y preservación.
- Falta de formación de funcionarios públicos en temas relacionados con el cambio climático.
- Determinar la aportación o impacto que el sector turístico puertorriqueño tiene sobre el consumo de agua, energía o lo que produce en residuos sólidos o aguas residuales.
- El sector turístico de Puerto Rico no recopila ni analiza el impacto medioambiental de su actividad en el destino ni datos sobre la atención primaria de salud a los turistas.
- Emigración de talento a Estados Unidos.

Oportunidades

¿Se identifican tendencias de beneficio?

- Existe una serie de certificaciones sostenibles.
- Diversificación de destinos y desarrollo de nichos.
- Según se ha creado el nicho del turismo médico, se podría explorar la viabilidad de establecer el nicho de turismo científico dirigido a estudiar los efectos de las manifestaciones del cambio climático en el medioambiente tropical.

ORIGEN EXTERNO

Amenazas

¿Qué obstáculos se identificaron?

- Erosión en la identidad y prácticas culturales.
- Pérdida de expresiones culturales y tradicionales.
- Apertura del mercado Cuba.
- Aumento del nivel del mar.
- Aumento de frecuencia de altas temperaturas.
- Aumento de frecuencia e intensidad de sequías.
- Aumento de frecuencia e intensidad de huracanes y tormentas tropicales.
- Aumento de sargazo en las playas.
- Aumento de frecuencia de playas insalubres.
- Aumento de frecuencia de episodios de polvo del Sahara.

ORIGEN EXTERNO

Amenazas

¿Cuáles son las condiciones económicas?

- DMO se encuentra en una fase de promoción.

¿Cómo afectan las regulaciones del gobierno?

- Burocracia en los procesos.
- Multiplicidad de leyes y reglamentos. Por ejemplo, las rutas turísticas.
- Desarrollo de las políticas públicas desorganizado. Por ejemplo, las políticas públicas de regionalización Turística y segmentos o nichos turísticos (médicos, náuticos, cultural y gastronómicos) del 2005 al 2015.

¿Qué áreas permanecen vulnerables?

- Los cambios en las condiciones atmosféricas como las olas de calor, lo que afectará la demanda turística y las actividades en el destino.
- Los cambios climáticos extremos que modificarán el paisaje y sus atractivos, lo cual conllevará pérdida de competitividad.
- Algunas manifestaciones del cambio climático que pueden limitar actividades acuáticas y playeras son las olas de calor, la erosión costera, la pérdida de la superficie de playa, la infiltración salina y destrucción de infraestructura turística construida en la zona costera.
- Se evidencia un sinnúmero de infraestructura natural y construida en riesgo en zonas de interés turístico. Entre estas: hospederías e infraestructura de interés turístico, sistemas de transportación marítima, terrestre y aérea, instalaciones médicas, sistema de manejo de acueductos y alcantarillados, sistema eléctrico, reservas, ecosistemas naturales y playas. Por ejemplo, de las 154 hospederías endosadas por la CTPR, 122 (79 %) ubican en las zonas expuestas al aumento en el nivel del mar asociado al cambio climático.
- El consumo de productos culturales por los turistas en Puerto Rico asciende a un 52.4 % lo que implica que nuestra oferta y atractivos turísticos se nutren de los recursos culturales como los centros históricos, la artesanía, la música y la gastronomía.
- La ausencia de opciones de transporte colectivo para el sector turístico y la tendencia al alquiler de vehículos se convierten en una carga negativa para el destino y su sostenibilidad. En la actualidad, los turistas tienen como opciones de transporte solo la renta de vehículos, taxis y Uber.
- Aumento en la mortandad de los arrecifes de coral.
- Desaparición de playas por erosión.
- Destrucción del 79 % de la infraestructura hotelera.
- Exposición del aeropuerto internacional Luis Muñoz Marín y de aeropuertos regionales al aumento del nivel del mar.
- Pérdida de muelles de crucero.
- Playas afectadas por sargazo.

Tabla 44.

Matriz o análisis FODA del ***sector educación***

ORIGEN INTERNO	Fortalezas
	¿Cuáles son las ventajas? • La Ley de Política Pública Ambiental encomienda a las agencias de gobierno crear departamentos y divisiones dedicadas a la educación ambiental y brindar información a la comunidad. • Existen más de 46 organizaciones sin fines de lucro, fundaciones comunitarias y entidades dedicadas a proteger la naturaleza y adelantar la salud ambiental. Estas organizaciones representan una diversidad de generaciones y agrupan a más de 522,205 ciudadanos interesados en el bienestar ambiental y humano de Puerto Rico. • El país cuenta con profesores, científicos, líderes ambientales con vasta experiencia en la conservación de los recursos naturales y en temas de cambio climático que son parte esencial del proceso de enseñanza, investigación, desarrollo de proyectos, leyes y política pública. • La Ley 33-2019 establece medidas del sector sobre cambio climático. **¿Qué se está haciendo bien?** • Desde la década de 1980, la UPR - Río Piedras creó el Departamento de Ciencias • Ambientales con el propósito de fomentar las carreras interdisciplinarias a nivel ambiental y desarrollar a profesionales aptos para el campo laboral y promover la investigación y la educación en ciencias ambientales. • En el 2001, se creó el primer programa de televisión Geoambiente, dedicado a la conservación ambiental y a la discusión de los problemas ambientales del país. • En el 2002, la Universidad Metropolitana del Sistema Universitario Ana G. Méndez creó el Centro de Estudios para el Desarrollo Sostenible. • En el 2005, la UPR - Carolina, la Universidad Complutense de Madrid y *NASA Space Grant Consortium* presentaron el primer curso de verano titulado Gases de efecto invernadero y cambio climático. En este curso participaron científicos de diferentes países con el propósito de proveer recomendaciones para crear conciencia en el gobierno y en la población sobre los efectos del cambio climático. • Los términos “cambio climático”, “calentamiento global”, o “aumento del nivel del mar” se incorporaron como parte de la revisión y aprobación de los nuevos planes de mitigación contra peligros naturales de los 78 municipios, de los cuales 62 fueron aprobados por FEMA y por la Junta de Planificación. • En una revisión curricular para todas las materias se integró el tema transversal de Conciencia Ecológica para abordar temas de cambio climático en cada curso de k a 12.

ORIGEN INTERNO

Debilidades

¿Qué falta por integrar?

- Los eventos atmosféricos deben ser parte de la educación ambiental con énfasis en salvar vida y propiedad.
- No se han incorporado temas relacionados con el cambio climático. A pesar de que se ha evaluado la vulnerabilidad socioecológica debido al cambio climático, la educación al respecto no es suficiente.
- El informe *Puerto Rico's Blueprint for Climate Change Mitigation and Adaptation* establece como un pilar y punto de referencia que es meritorio implementar un currículo escolar en temas de mitigación, adaptación y resiliencia al cambio climático.
- Incluir en el currículo un curso de educación ambiental y cambio climático en el programa de preparación de maestros de ciencias en las universidades.
- La inclusión de letreros en áreas públicas que orienten a las personas sobre la importancia del consumo responsable de agua, manejo de residuos sólidos y el ahorro de energía.
- Establecer acciones a corto y largo plazo que permitan atender experiencias educativas en la mitigación y adaptación al cambio climático alcance de información a los diversos sectores de Puerto Rico.

¿Qué área necesita mejoras?

- Se necesita educar a la población y a los líderes sobre la vulnerabilidad de las comunidades costeras al aumento del nivel del mar, los efectos del fenómeno isla de calor, los extremos de sequías y precipitación, y la erosión costera, entre muchos otros efectos del cambio climático.
- Según estudios, el 82.69 % de la población entiende que educar a la población sobre los efectos del cambio climático debe ser una prioridad del gobierno. Por ende, se debe mejorar la educación en estas consecuencias.
- Los hallazgos evidencian una problemática en cuanto al manejo de la información, divulgación y material educativo que en muchas ocasiones no se comparte entre las agencias para evitar duplicidad de trabajos y recursos.
- Los ciudadanos no saben cómo prepararse ante los posibles efectos del cambio climático y piensan que las acciones que se requieren para atender los problemas que puedan surgir están fuera de su control.
- La ciudadanía no percibe los riesgos y efectos del cambio climático de manera inmediata.
- La preparación de los maestros requiere mayor capacitación en el tema de cambio climático y proveerles material educativo que puedan utilizar en el salón de clase ya que no tienen libros dirigidos a estos temas.

ORIGEN EXTERNO

Oportunidades

¿Se identifican tendencias de beneficio?

- Un estudio titulado *Perceptions of Climate Change in Puerto Rico before and after Hurricane María* (2021) mostró que la cantidad de personas con conocimiento general sobre el cambio climático global aumentó de 43 % a 62 % luego del huracán María. El 81.62 % de los participantes manifestaron interés en participar en actividades para combatir el cambio climático. Esto es cónsono con que el gobierno y las organizaciones ambientales deben ser más activos en las campañas educativas.
- Un estudio en el área metropolitana de San Juan reveló que los medios de comunicación tradicionales y emergentes son los preferidos por la población para informarse sobre el cambio climático y los riesgos asociados: televisión (58.6 %) y redes sociales (45.5 %).
- En el 2020, el DRNA firmó una alianza con el DE para impulsar proyectos y actividades de mitigación ante el cambio climático, reforzando la educación ambiental en las escuelas públicas. Este acuerdo incluye proyectos y actividades de resiliencia relacionadas con el cambio climático. El proyecto será impulsado por los comités constituidos en cada una de las siete regiones educativas, grupos que incluyen a facilitadores docentes, un maestro de Estudios Sociales, representantes de alguna entidad externa al DE y algún miembro gerencial de la oficina regional educativa; en algunos casos, habrá representación estudiantil.
- Los planes de mitigación de los municipios incluyen el término de calentamiento global y cambio climático integrando actividades que los municipios deben considerar para realizar en las comunidades.

ORIGEN EXTERNO

Amenazas

¿Qué obstáculos se identificaron?

- Un estudio indicó que en Puerto Rico se ha realizado solo una publicación sobre la educación para la mitigación y adaptación al cambio climático, lo cual representa el 2.8 % en divulgación científica. Esto representa una carencia de investigaciones científicas que evidencia la dificultad de transmitir el conocimiento sobre el cambio climático.
- Mayor deserción escolar, lo cual puede resultar negativo para educar de forma continua a las nuevas generaciones con los currículos que se desarrollen por sus niveles correspondientes.

¿Cuáles son las condiciones económicas?

- Es importante unir esfuerzos para redirigir los fondos a la capacitación de los maestros, adquisición de materiales educativos, libros y el desarrollo de proyectos escolares que promuevan el aprendizaje en el tema de cambio climático y los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

¿Cómo afectan las regulaciones del gobierno?

- Poca comunicación entre las agencias, donde hay duplicidad de trabajo.

ORIGEN EXTERNO	Amenazas
	¿Qué áreas permanecen vulnerables? • Las medidas de educación, divulgación y acción a nivel comunitario deben proveerse prioritariamente en comunidades costeras y de mayor vulnerabilidad a la pérdida de la costa y a inundaciones. • Los resultados de un estudio presentan que solo el 39.2 % de los maestros utilizan siempre el material del DE para enseñar el tema de cambio climático. • Estudios afirman que todas las administraciones gubernamentales han ignorado estos análisis sobre el cambio climático, vitales para elaborar un plan de adaptación que permita construir un país más resiliente y sostenible. • Población no escolar ni universitaria que carece de una base educativa. • Consecuencias del cambio climático como la interrupción de las clases debido a huracanes, sequías e inundaciones. • Efectos del polvo del Sahara y de las temperaturas extremas en las actividades deportivas y otras actividades al aire libre.

Tabla 45.

Matriz o análisis FODA del ***sector justicia climática***

ORIGEN	Fortalezas
	¿Cuáles son las ventajas? • Hay entidades no gubernamentales promoviendo el concepto de justicia climática. **¿Qué se está haciendo bien?** • El CEACC ha incluido la atención al tema en el P-MARCC. • Existe un sistema de asistencia económica para nutrición. • Existe un sistema de refugios de emergencias a nivel municipal y estatal. • Fondos de FEMA disponibles para la reparación de daños.
INTERNO	**Debilidades**
	¿Qué falta por integrar? • Insertar la justicia climática en el marco legal y político en Puerto Rico para promover un desarrollo que respete siempre los derechos humanos. • Mejorar la atención de las comunidades desatendidas, desfavorecidas y desventajadas.

INTERNO

Debilidades

¿Qué área necesita mejoras?

- La asignación de recursos debe seguir la "aplicación diligente". Entidades del sector no gubernamental han argumentado que los residentes de Puerto Rico han soportado episodios en serie de mala gestión del gobierno y que aprovechar los fondos federales requiere competencia del gobierno estatal y local.
- Comunidades carecen de conocimiento para preparar propuestas de fondos federales y, a veces, de personalidad jurídica para poder recibir los fondos.

ORIGEN EXTERNO

Oportunidades

¿Se identifican tendencias de beneficio?

- Luego del huracán María se destinaron fondos para atender el desastre. Como una de las respuestas, muchas organizaciones sin fines de lucro, de base comunitaria, religiosa y la academia, entre otras, han realizado diversas iniciativas para conocer los derechos y exigir justicia climática a los entes gubernamentales, las empresas privadas y otros sectores como parte de los procesos de adjudicación de fondos.
- Existen fondos federales para la aclimatación de hogares por debajo del nivel de pobreza de los Estados Unidos.
- Hay fondos federales para la instalación de placas solares y baterías en hogares de personas o familias por debajo del nivel de pobreza de los Estados Unidos.
- El programa de WaterSense de la EPA permite utilizar menos agua sin afectar la calidad de vida.
- Aprovechamiento del agua de lluvia.

ORIGEN EXTERNO

Amenazas

¿Qué obstáculos se identificaron?

- En su IV Informe, publicado en septiembre del 2022, Ayuda Legal Puerto Rico señala como una amenaza principal a las familias sobrevivientes del huracán María "el desplazamiento por diseño". Plantea que el impacto en estas familias "es de múltiples niveles: la imposibilidad de obtener un techo seguro, el enfrentamiento con un mercado de vivienda predatorio y no regulado y las relocalizaciones carentes de participación o planificación efectiva". Según la entidad, sin acción inmediata, la falta de vivienda segura y asequible aumenta el riesgo de la población a la hora de enfrentar futuros desastres o el cambio climático con un nivel mayor de desigualdad.
- La tasa del incremento del nivel de mar ha aumentado, lo que acelerará los efectos adversos sobre comunidades costeras.
- Aumentará la frecuencia de días con temperaturas extremas.
- Aumentarán los días con episodios de polvo del Sahara.

ORIGEN EXTERNO

Amenazas

- Aumentará la frecuencia e intensidad de los huracanes.
- Mermará la disponibilidad del agua, lo que afectará a las comunidades aisladas que obtienen agua de sus propios acueductos.
- El aumento de lluvias intensas incrementará las inundaciones en las comunidades.
- El aumento del nivel del mar provocará el desborde de los pozos sépticos en las comunidades ubicadas cerca del mar.
- Las lluvias intensas incrementarán el número de días en que las playas no sean aptas para el contacto humano (opción de recreación gratuita para comunidades de menos recursos económicos).

¿Cuáles son las condiciones económicas?

- Puerto Rico depende en gran medida de los combustibles fósiles. La electricidad de Puerto Rico cuesta más del triple del promedio nacional de los Estados Unidos y su generación basada en la quema de combustibles fósiles es peligrosa, pues empeora las enfermedades como el asma, de alta incidencia en la isla.
- Las comunidades vulnerables a los efectos de cambio climático y de bajos ingresos enfrentan retos económicos para la adaptación, mitigación y resiliencia ante el cambio climático.
- El estudio titulado Children, Climate Justice, and Lessons From Puerto Rico comenta que es probable que comunidades hayan recibido menos inversión en infraestructura de protección e identifica específicamente a las zonas rurales del oeste y sur de Puerto Rico y las islas municipios de Vieques y Culebra.
- Debido a la inflación y los problemas de la cadena de suministro, hoy en día una unidad de vivienda de interés social cuesta más de $200,000.

¿Cómo afectan las regulaciones del gobierno?

- Debido a las regulaciones de gobierno si no hay título de propiedad no hay incentivos de fondos de reparación para las familiares que han sido perjudicadas por desastres relacionados con el cambio climático como, por ejemplo, huracanes.
- Las personas que residen en una zona inundable reciben asistencia económica solo por un evento. La falta de propiedades asequibles dificulta cumplir con los criterios de cualificación.

¿Qué áreas permanecen vulnerables?

- El Índice de Riesgo Climático Global (IRC) de Germanwatch del 2021 considera a Puerto Rico entre los más afectados por eventos climáticos extremos entre el período del 2000 al 2019. Se atribuye a las secuelas del acontecimiento excepcional devastador que fue el huracán María en el 2017.

ORIGEN EXTERNO	Amenazas
	• Todavía en el 2023, las poblaciones empobrecidas vivían de cerca la devastación social y económica que dejó el huracán María. De 3.4 millones de personas en Puerto Rico en el 2017, los estimados de población para el 2021, según el censo de Estados Unidos, cerraron en 3,263 millones. Es importante destacar que a partir de la descripción del perfil demográfico gran parte de la población que se queda en la isla para este período luce ser más vulnerable. De un 18 % de la población con 65 años o más en el 2017, el promedio ascendió a 21.3 %. en el 2021. • El estudio Children, Climate Justice, and Lessons From Puerto Rico califica como una injusticia que los niños, especialmente los que viven en comunidades de menores recursos económicos, ya soportan la mayor parte de los daños causados por los huracanes, las sequías, los incendios forestales y las olas de calor que las emisiones de GEI agudizan, sin que puedan ejercer control sobre las fuentes de emisiones. El estudio afirma que la niñez necesita acceso a agua potable, aire limpio y alimentos nutritivos para mantenerse saludables. Señala que luego de los huracanes María (2017) y Fiona (2022), muchos perdieron esos accesos a la energía y al agua potable. • Añade que, después del huracán María, muchas familias se convirtieron en migrantes climáticos. Indica: “La migración separó a los niños de sus familias extendidas y transgredió una base de la cultura puertorriqueña. También, preparó el escenario para eventos adversos en la infancia, que pueden aumentar los riesgos de cargas de enfermedades importantes en la edad adulta”. • Además, la investigación cita datos de la EPA que señalan que en Puerto Rico hay 250 sitios bajo el programa Superfund activos. De estos, 19 están en la “lista de prioridades nacionales” de la agencia, que incluye sitios con mayor probabilidad de liberar compuestos tóxicos. Esto significa que cuando los huracanes impactan a Puerto Rico es más probable que liberen compuestos tóxicos hacia las comunidades vecinas.

Impactos y tensiones en los sectores.

A partir del análisis FODA se identificaron y delinearon 14 impactos[664] y 32 tensiones[665] principales que afectan a todos los sectores. Estos están asociados a los siguientes temas:

Impactos

1. Brotes de enfermedades.
2. Incendios forestales.
3. Aumento de ocurrencia y magnitud de sistemas ciclónicos tropicales.
4. Aumento de enfermedades crónicas (asma, diabetes y enfermedades respiratorias).
5. Olas de calor extremas.
6. Inundaciones ribereñas y costeras.
7. Infraestructuras afectadas por vientos e inundaciones.
8. Desforestación masiva luego de un sistema ciclónico tropical.
9. Sequía extrema.
10. Protestas y demandas por justicia climática.
11. Fallo en los sistemas de salud cuando ocurren huracanes o eventos climáticos.
12. Aumento de muertes de personas cuando ocurren huracanes o eventos climáticos.
13. Inflación.
14. Blanqueamiento de los arrecifes de coral.

[664] En el P-MARCC se consideran como impactos los desastres que ocurren una sola vez o repentinamente. Pueden ser naturales (incendios, huracanes, inundaciones por crecida de ríos y precipitaciones excesivas, fallo en la infraestructura hídrica, tormentas con vientos fuertes, deslizamientos de tierra y brotes de enfermedad o virus, entre otros) o sociales (protesta civil, entre otros).

[665] En el P-MARCC se consideran como tensiones factores que generan presión a una comunidad, ciudad o país periódicamente y debilitan la estructura de una comunidad, ciudad o país diariamente o de forma cíclica, como la escasez de alimentos, las sequías, un sistema de transporte deficiente, infraestructura, la violencia endémica, pobreza marcada y desigualdad social, gestión integral deficiente de los residuos, localización de familias en zonas inundables, falta de viviendas asequibles, alta tasa de desempleo, infraestructura de servicios deficiente e inflación, entre otros.

Tensiones

1. Necesidad de aumentar el empoderamiento a las comunidades para atender las necesidades básicas ante cualquier desastre asociado al cambio climático.
2. Manejo de residuos sólidos. La generación de residuos sobrepasa las 5 libras por persona por día, lo cual sobrepasa la tasa de generación de residuos en los países industrializados de Europa.
3. Deficiencia en la infraestructura del servicio de energía y alumbrado público.
4. Localización de familias en zonas inundables y zonas de deslizamientos.
5. En estos momentos no existen fondos suficientes disponibles para implantar cursos de acción para proteger vida y propiedad ante el cambio climático ni personal municipal o estatal con la capacidad técnica y financiera para hacer frente a los daños y las pérdidas asociadas al cambio climático.
6. Deficiencia en la infraestructura y vulnerabilidad a los eventos extremos de los sistemas: vial, marítimo y aéreo (el Aeropuerto Internacional Luis Muñoz Marín y otros aeropuertos son vulnerables al aumento del nivel del mar y la marejada ciclónica).
7. Polvo del Sahara.
8. Alcance de la marejada ciclónica y aumento de marejadas.
9. Sequía.
10. Falta de reubicación planificada de comunidades vulnerables a los efectos del cambio climático y escasos recursos para vivienda digna.
11. El 45 % de la población de Puerto Rico vive bajo el nivel de pobreza establecido a nivel federal.
12. Deterioro progresivo de los sistemas costeros y zonas marinas por mala planificación y desparrame urbano.
13. Pérdida del 60 % del agua (no contabilizada), sedimentación de los embalses y acuíferos en estado crítico.
14. El 60 % del agua para riego agrícola se pierde en los canales de riego de la AEE.
15. Falta de agilidad en los procesos en las entidades responsables.
16. Deterioro progresivo de los sistemas costeros y las zonas marinas por mala planificación y desparrame urbano.
17. Crisis económica.

18. Proliferación de sargazo en ciertas temporadas del año.
19. Falta de vigilancia y comunicación entre sectores.
20. Poca redundancia en la infraestructura de agua potable y alcantarillado.
21. Falta de capacidad de generación de electricidad.
22. Servicio poco confiable de electricidad para suplir la demanda adicional relacionada con los eventos de temperaturas extremas.
23. Servicio poco confiable de suministro de agua. Puerto Rico es la segunda jurisdicción en América Latina con menos disponibilidad de agua dulce por persona, según el Banco Mundial.
24. Todas las plantas de generación de electricidad son vulnerables al aumento del nivel del mar y la marejada ciclónica.
25. 200,000 viviendas de Puerto Rico están ubicadas en zonas inundables.
26. En Puerto Rico prolifera la construcción informal.
27. Puerto Rico depende desmedidamente del automóvil para la transportación.
28. Puerto Rico emite tres veces más GEI per cápita que el promedio de América Latina y el Caribe.
29. Puerto Rico protege ecológicamente solo el 17 % de su territorio.
30. El 70 % de la capacidad de tratamiento del agua usada de la AAA está en áreas vulnerables al aumento del nivel del mar y a las marejadas ciclónicas.
31. El 79 % de la infraestructura de Puerto Rico están localizadas en áreas vulnerables al aumento del nivel del mar y a las marejadas ciclónicas.
32. Falta capacidad para solicitar los fondos disponibles relacionados con el cambio climático.
33. Contaminación de las playas.

Autorizado por la Oficina del Contralor Electoral OCE-SA-2024-06151