

Promover la adaptación del sistema estuarino a los eventos meteorológicos extremos y la protección de las comunidades

[Nota: Página separadora con el título del plan de acción y una bonita imagen]

Índice

Promover la adaptación del sistema estuarino a los eventos meteorológicos extremos y la protección de las comunidades	1
Análisis de los riesgos y su vulnerabilidad.....	2
Trasfondo	2
Objetivos.....	4
Acciones	4
Referencias.....	8
Manejo de adaptación del sistema estuarino basado en la resiliencia	10
Trasfondo	10
Objetivos.....	11
Acciones.....	11
Referencias.....	15
Política pública para la preparación del sistema estuarino basada en la resiliencia.....	16
Trasfondo	16
Objetivos.....	17
Acciones.....	18
Referencias.....	20

23 **Análisis de riesgos y vulnerabilidad**

24 **Trasfondo**

25 El análisis de los riesgos y la vulnerabilidad en zonas costeras y estuarinas implica evaluar la susceptibilidad
26 del área de estudio ante los factores de estrés. En 2015, Estuario desarrolló un plan de adaptación a los
27 efectos previstos de seis factores de estrés ambiental: meses de verano más cálidos, temperaturas del agua
28 más altas, sequías más frecuentes, lluvias más intensas, aumento del nivel del mar y efectos del dióxido de
29 carbono, incluida la acidificación oceánica (Bauzá-Ortega, 2015). Estos factores de estrés afectan el manejo
30 de las aguas pluviales y residuales en las zonas urbanas; aumentan los contaminantes y los patógenos;
31 erosionan las riberas, los lechos de los ríos y las costas; incrementan las inundaciones; provocan fenómenos
32 meteorológicos extremos; y afectan a hábitats y especies críticas (Bauzá-Ortega, 2015).

33 **Figura1 . Espacio reservado para una figura que muestra la ubicación de los factores de estrés dentro de la** 34 **cuenca hidrográfica del SJBE**

35 El impacto del huracán María en 2017 ilustró de manera contundente la exposición de Puerto Rico a
36 eventos meteorológicos extremos, al producir la mayor precipitación registrada en más de seis décadas y
37 provocar inundaciones y deslizamientos generalizados en toda la isla (Keellings y Hernández Ayala, 2019).
38 Este fenómeno causó inmensos daños físicos y expuso las vulnerabilidades sociales arraigadas en las
39 poblaciones afectadas, como lo indican el exceso de mortalidad y el desplazamiento de la población
40 (Keellings y Hernández Ayala, 2019). Las observaciones indican que los huracanes recientes presentan una
41 mayor intensidad que los promedios climatológicos históricos. Para atender esto, se han desarrollado
42 escenarios adicionales de huracanes con intensidades elevadas, destacando el potencial de vientos de
43 categoría 4 y 5 dentro de un evento con una probabilidad anual del 1 % (Estuario, 2025). Estos riesgos se
44 agravan por las tendencias continuas en los fenómenos meteorológicos y los datos del nivel del mar, que
45 han casi quintuplicado la probabilidad de episodios de lluvia extrema en las regiones más afectadas de la
46 isla (Keellings y Hernández Ayala, 2019).

47 A medida que persisten los fenómenos meteorológicos extremos y los cambios en los nutrientes, la
48 temperatura del océano, el pH y otros factores, la comprensión y la predicción de las tendencias y los
49 eventos se complican más por otras situaciones. Un ejemplo es el aumento de los arribazones de sargazo,
50 que en grandes cantidades pueden asfixiar los arrecifes de coral y las praderas marinas, además de
51 intensificar la eutrofización del Estuario de la Bahía de San Juan (EBSJ). Todavía no existe consenso sobre
52 por qué el sargazo ha aumentado tan drásticamente, aunque un estudio reciente identificó posibles
53 contribuciones al mar Caribe provenientes del transporte de semillas de sargazo a larga distancia durante el
54 evento de la Oscilación del Atlántico Norte en 2009-2010, junto con la mezcla vertical en la capa superior de
55 la columna de agua que proporcionó nutrientes (Jouanno et al., 2025).

56 Los avances recientes en las evaluaciones de vulnerabilidad del EBSJ han sistematizado la selección de
57 parámetros clave que determinan el riesgo en los sectores social, ecológico y tecnológico. En este plan de
58 acción, se discutirán en detalle eventos específicos y se utilizarán términos generales para describir grupos
59 de eventos. El término «eventos meteorológicos extremos» se empleará para describir tormentas que
60 provocan lluvias más frecuentes e intensas, inundaciones y deslizamientos de tierra. El término «factores de

61 estrés ambiental» se usará para describir otros peligros, riesgos y factores ambientales que tengan efectos
62 constantes o secundarios, más allá de episodios aislados.

63 La inundación es uno de los principales peligros que enfrenta el estuario, así como la infraestructura crítica
64 y las comunidades aledañas. Las inundaciones ocurren por diversas causas, entre ellas, el desbordamiento
65 de ríos, los eventos de precipitación intensa de corta duración y las marejadas ciclónicas costeras. Las
66 características geográficas e hidrológicas del estuario lo hacen particularmente susceptible a inundaciones.
67 Estuario (2025) utilizó la capa de riesgo por inundación de la Agencia Federal para el Manejo de
68 Emergencias (FEMA, por sus siglas en inglés) y el programa Hazus para modelar los daños potenciales de
69 este tipo de inundaciones, destacando el riesgo sustancial que representan las inundaciones repentinas por
70 desbordes de ríos. La inundación costera está impulsada en gran medida por eventos de marejada ciclónica
71 asociados con ciclones tropicales, los cuales pueden causar inundaciones significativas aun cuando un
72 huracán no toque tierra directamente (Estuario, 2025). Además, las marejadas ciclónicas y el aumento del
73 nivel del mar tienen el potencial de exacerbar la erosión costera. Las costas y regiones estuarinas de
74 municipios como Loíza están experimentando tasas de erosión superiores a las normales (Díaz et al., 2022;
75 Estuario, 2025).

76 Los deslizamientos de tierra, a menudo provocados por lluvias extremas y actividad sísmica, agravan aún
77 más la vulnerabilidad del estuario. Las fuertes lluvias del huracán María y los terremotos posteriores de
78 2020 causaron deslizamientos de tierra generalizados que desestabilizaron taludes y amenazaron la
79 infraestructura y los hábitats dentro de la cuenca hidrográfica (Estuario, 2025). Estos deslizamientos afectan
80 los ecosistemas e interrumpen las carreteras, la infraestructura y la calidad del agua debido al aumento de
81 la sedimentación, alterando el funcionamiento estuarino.

82 La sequía impone un estrés episódico sobre el sistema estuarino. La sequía de 2015 llevó los niveles de los
83 embalses en todo Puerto Rico, incluyendo los que alimentan al EBSJ, a mínimos históricos, afectando la
84 disponibilidad de agua tanto para las necesidades ecológicas como humanas (Estuario, 2025). Los ciclos
85 regulares de sequía, que ocurren aproximadamente cada dos años, subrayan la necesidad de una gestión
86 adaptativa del agua para amortiguar la escasez hídrica a largo plazo (Estuario, 2025). Los eventos periódicos
87 de mortandad de peces en la laguna San José se deben a condiciones deficientes de calidad del agua,
88 causadas por aportaciones excesivas de nutrientes provenientes de descargas sanitarias y bajas tasas de
89 renovación del agua durante condiciones de sequía. El evento más reciente de mortandad significativa de
90 peces ocurrió en agosto de 2020 (Almodóvar Santana et al., 2023).

91 El aumento del nivel del mar representa una amenaza persistente y creciente, al contribuir al incremento de
92 las inundaciones y la erosión costera. Aunque algunos datos de FEMA sugieren que los procesos naturales
93 de erosión persisten, comunidades como las del municipio de Loíza plantean una preocupación adicional
94 debido a la aceleración de la erosión asociada al aumento del nivel del mar (Díaz et al., 2022). Represas
95 aguas arriba, como la del embalse Carraízo, al norte de Loíza, interrumpen el suministro de sedimentos
96 necesario para restaurar las costas. Las olas provenientes del norte inciden en la erosión costera en Loíza y
97 en otras áreas alrededor del EBSJ (Ramos, 2025). Además, se anticipa que el aumento del nivel del mar
98 afectará el agua subterránea y el drenaje del suelo, particularmente en suelos ricos en carbono, reduciendo
99 la capacidad de drenaje de los sistemas sépticos, los sistemas de aguas pluviales y las carreteras. Asimismo,
100 la interacción del nivel del mar con las marejadas ciclónicas y el aumento de las precipitaciones crea
101 escenarios de riesgo acumulativo que desafían aún más la capacidad de adaptación del estuario.

102 La complejidad del hidroclima de Puerto Rico, influenciada por tormentas tropicales, ondas del este y
 103 sistemas convectivos, introduce una variabilidad e incertidumbre significativas en las evaluaciones de riesgo
 104 (Keellings y Hernández Ayala, 2019). Esta variabilidad subraya la necesidad de análisis integrados de
 105 vulnerabilidad que incorporen datos físicos, ecológicos y sociales para capturar plenamente el perfil de
 106 riesgo del estuario (Díaz et al., 2022). Dichos análisis son fundamentales para identificar puntos críticos de
 107 vulnerabilidad e informar esfuerzos de adaptación específicos para la planificación y la infraestructura.

108 El sistema del EBSJ enfrenta riesgos multifacéticos y cada vez más intensos derivados de eventos
 109 meteorológicos extremos e influencias antropogénicas. Integrar evaluaciones detalladas de riesgo y
 110 vulnerabilidad que consideren los peligros hidrológicos, las sensibilidades del ecosistema y los factores
 111 socioeconómicos es esencial para orientar una adaptación efectiva y proteger las funciones ecológicas del
 112 estuario, su infraestructura y las comunidades circundantes.

113 **Objetivos**

- 114 • Determinar y monitorear el riesgo y las vulnerabilidades del sistema estuarino frente a eventos
 115 extremos.

116 **Acciones**

117 ***AA-01 Estimar o modelar la vulnerabilidad del EBSJ ante eventos meteorológicos extremos y el aumento del nivel del***
 118 ***mar, y presentar medidas de adaptación.***

119 **Actividades**

Actividad	Métricas	Hitos	Socios responsables y partes interesadas	Estado	Cronograma	Costos estimados	Posibles fuentes de financiamiento
1. Ampliar e implementar el monitoreo.	Medir la precipitación, erosión costera, temperatura del agua, niveles del agua y pH.	Dispositivos instalados y bases de datos creadas.	Líder: Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) Socios implementadores: Estuario, Departamento de Recursos Naturales y Ambientales (DRNA), Servicio de Pesca y Vida Silvestre de EE. UU. (USFWS), Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA), FEMA, Cuerpo de Ingenieros del Ejército de EE. UU. (USACE), municipios y academia	En curso	0-2 años	TBD	Agencia de Protección Ambiental de EE. UU. (USEPA), DRNA

Actividad	Métricas	Hitos	Socios responsables y partes interesadas	Estado	Cronograma	Costos estimados	Posibles fuentes de financiamiento
2. Evaluar escenarios de lluvia y aumento del nivel del mar para el EBSJ y la cuenca hidrográfica, y sus efectos en los sistemas sépticos, los sistemas de alcantarillado sanitario y los sistemas de alcantarillado combinado en función de la elevación, las inundaciones y la escorrentía en el EBSJ y la cuenca.	Identificar y evaluar los efectos en los sistemas sépticos, los sistemas de alcantarillado sanitario y los sistemas de alcantarillado combinado en función de la elevación, las inundaciones y la escorrentía en el EBSJ y la cuenca.	Cambios de escenarios identificados y evaluados en sistemas sépticos y sistemas de alcantarillado sanitario.	Líder: DRNA Socios implementadores: municipios y Estuario	Pendiente	3-5 años	TBD	DRNA, municipios
3. Evaluar los efectos de lluvias más intensas sobre las inundaciones en áreas urbanas, la infraestructura de control de inundaciones, las charcas de retención y las áreas costeras.	Desarrollar un modelo de cuenca hidrográfica para evaluar los efectos de lluvias más intensas sobre las inundaciones en áreas urbanas, la infraestructura de control de inundaciones, las charcas de retención y las áreas costeras en el EBSJ y la cuenca.	Modelo(s) desarrollado (s).	Líder: DRNA Socios implementadores: municipios y Estuario	Pendiente	3-5 años	TBD	DRNA, municipios
4. Evaluar el efecto del aumento del nivel del mar sobre la erosión y la pérdida de playas y humedales.	Desarrollar modelos costeros para los efectos del aumento del nivel del mar sobre la pérdida de playas y humedales.	Modelo(s) desarrollado (s).	Líder: Estuario Socios implementadores: DRNA y municipios	Pendiente	3-5 años	TBD	USEPA, DRNA

120

121 **Requisitos reglamentarios y de política pública**

122 Es posible que se requiera nueva legislación o la modificación de la existente, con base en los datos y los
 123 resultados de los modelos, para tomar en cuenta los eventos meteorológicos extremos y el aumento del
 124 nivel del mar en la planificación de proyectos a fin de apoyar medidas de adaptación y reducir la
 125 vulnerabilidad al riesgo frente a estos cambios.

126

127 **NUEVO* AA-02 Desarrollar un índice de vulnerabilidad para evaluar la sensibilidad y la capacidad adaptativa de las*
 128 *especies y sus hábitats frente a los factores de estrés ambiental.*

129 **Actividades**

Actividad	Métricas	Hitos	Socios responsables y partes interesadas	Estado	Cronograma	Costos estimados	Posibles fuentes de financiamiento
1. Identificar la posible exposición y sensibilidad a los factores de estrés ambiental de las especies amenazadas y en peligro de extinción, así como de sus hábitats en el EBSJ.	Determinar la magnitud y la sensibilidad a los factores de estrés previstos para las especies amenazadas y en peligro de extinción, y para los hábitats críticos (es decir, nivel del mar, temperatura, lluvia, pH, salinidad y partículas en suspensión).	Resumir el valor relativo de la sensibilidad al cambio a lo largo del rango de valores esperados de los factores de estrés para las especies amenazadas y en peligro de extinción, y los hábitats críticos.	Líder: Estuario Socios implementadores: DRNA, USFWS, Servicio Nacional de Pesquerías Marinas (NMFS), NOAA, FEMA, USACE, municipios y academia	Pendiente	3-5 años	TBD	USEPA, DRNA, NOAA
2. Determinar la capacidad adaptativa para resistir los factores de estrés ambiental en las especies amenazadas y en peligro de extinción, y sus hábitats.	Determinar la capacidad adaptativa frente a los factores de estrés para las especies amenazadas y en peligro de extinción, y los hábitats críticos (es decir, dispersión y movimiento).	Evaluar la capacidad adaptativa para responder al cambio a lo largo del rango de valores esperados de los factores de estrés para las especies amenazadas y en peligro de extinción, y los hábitats críticos.	Líder: Estuario Socios implementadores: DRNA, USFWS, NMFS, NOAA, FEMA, USACE, municipios y academia	Pendiente	Más de 5 años	TBD	USEPA, DRNA, NOAA

130

131 **Requisitos reglamentarios y de política pública**

132 Ninguno. No se requiere reglamentar ni establecer nueva política pública para desarrollar el índice de
 133 vulnerabilidad. Los resultados de la evaluación del índice ayudarán a informar futuros requisitos
 134 reglamentarios y de política pública.

135

136 ***NUEVO* AA-03 Establecer modelos de riesgo basados en escenarios para simular los posibles efectos de eventos**
 137 **meteorológicos extremos en el EBSJ.**

138 **Actividades**

Actividad	Métricas	Hitos	Socios responsables y partes interesadas	Estado	Cronograma	Costos estimados	Posibles fuentes de financiamiento
1. Modelar inundaciones causadas por lluvias asociadas a eventos meteorológicos extremos.	Desarrollar modelos de inundaciones causadas por lluvias asociadas a diferentes eventos meteorológicos.	Modelos desarrollados.	Líder: municipios Socios implementadores: Estuario, Autoridad de Acueductos y Alcantarillados (AAA), NOAA y FEMA	Pendiente	3-5 años	TBD	DRNA, FEMA, NOAA, municipios
2. Modelar evaluaciones de daños y escombros causados por el viento en eventos meteorológicos extremos.	Desarrollar modelos de daños a la infraestructura eléctrica y edificios, y de escombros asociados a diferentes eventos meteorológicos.	Modelos desarrollados.	Líder: AAA Socios implementadores: Estuario, municipios, NOAA y FEMA	Pendiente	3-5 años	TBD	DRNA, FEMA, NOAA, municipios

139 **Requisitos reglamentarios y de política pública**

140 La creación y validación de modelos requerirá financiamiento para la recopilación de datos y modelaje,
 141 incluyendo una red sólida de recolección de datos que garantice que se obtengan mediciones precisas
 142 incluso durante el paso de huracanes. Los resultados de los modelos pueden proporcionar datos valiosos
 143 para orientar a planificadores e ingenieros sobre las necesidades de desarrollo crítico y de modernización,
 144 así como a los administradores de emergencias para emitir avisos y órdenes de evacuación.
 145

146

147 ***NUEVO* AA-04 Utilizar la información existente de las evaluaciones de riesgos y del plan de adaptación para orientar**
 148 **los planes de zonificación, uso del suelo y desarrollo de infraestructura.**

149 **Actividades**

Actividad	Métricas	Hitos	Socios responsables y partes interesadas	Estado	Cronograma	Costos estimados	Posibles fuentes de financiamiento
1. Integrar los hallazgos de la evaluación en los marcos regulatorios y de planificación mediante el desarrollo de directrices para infraestructura resiliente y prácticas de uso del suelo.	Incorporar los hallazgos de la evaluación en los marcos regulatorios existentes.	Colaboración establecida con las partes interesadas pertinentes.	Líder: Estuario Socios implementadores: municipios y DRNA	Pendiente	3-5 años	TBD	USEPA, DRNA
2. Incentivar el desarrollo de prácticas que apoyen la sostenibilidad.	Aumento en el número de desarrolladores y contratistas que participan en programas o iniciativas de incentivos.	Criterios desarrollados para prácticas de desarrollo sostenible.	Líder: Estuario Socios implementadores: municipios, DRNA, contratistas y desarrolladores	Pendiente	Más de 5 años	TBD	USEPA, DRNA, desarrolladores

150

151 **Requisitos reglamentarios y de política pública**

152 Los resultados de esta acción dependerán de la calidad y la validez de la evaluación de vulnerabilidad para
 153 fundamentar el posible desarrollo y adopción de instrumentos reglamentarios y de política pública.

154 **Referencias**

155 Almodóvar Santana, Y., Santos-Flores, C., y Martínez, G. (2023). Factores asociados con una floración de
 156 algas en una laguna estuarina tropical: el caso de la laguna San José en Puerto Rico. Universidad de Puerto
 157 Rico, Mayagüez.

158 Bauzá-Ortega, J. (2015). Plan de adaptación al cambio climático del Estuario de la Bahía de San Juan. San
 159 Juan, PR: Programa del Estuario de la Bahía de San Juan.

160 Díaz, E., Terando, A., Gould, W., Bowden, J., Chardón, P., Jury, M., Meléndez, M., y Morell, J. (2022). Grupo de
 161 Trabajo 1: Conocimiento científico geofísico y químico. En Informe del estado del clima. Consejo de Cambio
 162 Climático de Puerto Rico (Díaz, E., González, M., y Terando, A., eds.).

163 Estuario. (2025). Plan Multijurisdiccional de Mitigación de Riesgos. Evaluación de riesgos – eventos naturales.

164 Hughes, K. S., y Schulz, W. H. (2020). Resultados de análisis de razón de frecuencia de la clasificación de
 165 suelos y el uso del terreno relacionados con la ubicación de deslizamientos de tierra en Puerto Rico después
 166 del huracán María. Datos publicados por el U.S. Geological Survey.

- 167 Jouanno, J., Berthet, S., Muller-Karger, F., Aumont, O., y Sheinbaum, J. (2025). Un evento extremo de la
168 Oscilación del Atlántico Norte impulsó el punto de inflexión del sargazo pelágico. *Communications Earth &*
169 *Environment*, 6, 95.
- 170 Keellings, D., y Hernández Ayala, J. J. (2019). Lluvias extremas asociadas con el huracán María sobre Puerto
171 Rico y sus vínculos con la variabilidad y el cambio climático. *Geophysical Research Letters*, 46, 2964–2973.
- 172 Ramos, E. R. (2025). Erosión costera como función del aumento del nivel del mar y del desequilibrio de
173 sedimentos.
- 174

175 Manejo de adaptación del sistema estuarino basado en la resiliencia

176 Trasfondo

177 La adaptación a eventos meteorológicos extremos y factores de estrés ambiental exige un enfoque de
178 manejo integral centrado en la resiliencia. La resiliencia, definida como la capacidad del sistema para
179 absorber perturbaciones mientras mantiene sus funciones esenciales, es necesaria dada la compleja
180 interacción ecológica y social del estuario (Resetar et al., 2020). Las estrategias de adaptación efectivas
181 requieren adoptar la naturaleza dinámica y adaptativa de los sistemas socioecológicos, en los que los
182 procesos ecológicos y las actividades humanas están profundamente interconectados e influyen entre sí
183 (Resetar et al., 2020). El reciente Plan Multijurisdiccional de Mitigación de Riesgos caracteriza al EBSJ como
184 un sistema que enfrenta múltiples peligros y, por lo tanto, requiere estrategias de adaptación efectivas
185 (Estuario, 2025).

186 En 2015, Estuario desarrolló un plan de adaptación a los efectos previstos de seis factores de estrés
187 ambiental: meses de verano más cálidos, temperaturas del agua más altas, sequías más frecuentes, lluvias
188 más intensas, aumento del nivel del mar y efectos del dióxido de carbono, incluida la acidificación oceánica
189 (Bauzá-Ortega, 2015). Estos factores de estrés afectan el manejo de aguas pluviales y aguas residuales en
190 áreas urbanas; aumentan los contaminantes y patógenos; erosionan las riberas de los ríos, los cauces y las
191 costas; incrementan las inundaciones; provocan eventos meteorológicos más extremos; y alteran hábitats y
192 especies críticas (Bauzá-Ortega, 2015).

193 Para implementar eficazmente las estrategias de adaptación, el manejo adaptativo es fundamental. El
194 manejo adaptativo constituye el fundamento de la gestión estuarina orientada a la resiliencia e integra el
195 monitoreo continuo, la evaluación y la participación de las partes interesadas para optimizar las estrategias
196 de manejo ante las condiciones cambiantes y los nuevos conocimientos (Resetar et al., 2020). Ante las
197 incertidumbres asociadas a los eventos meteorológicos extremos, los factores de estrés ambiental y las
198 respuestas del ecosistema, el manejo adaptativo ofrece un marco flexible para abordar retroalimentaciones
199 complejas y dinámicas no lineales características de los sistemas estuarinos (Resetar et al., 2020).

200 La restauración ecológica y la conservación son componentes críticos de la gestión integrada. Los esfuerzos
201 de restauración dirigidos a hábitats degradados en el estuario y sus áreas aledañas fortalecen las barreras
202 naturales contra las tormentas y el aumento del nivel del mar, apoyando la biodiversidad y los servicios
203 ecosistémicos (Carrubba et al., 2022; Comité de Expertos y Asesores sobre Cambio Climático [CEACC], 2024).
204 El Plan Multijurisdiccional de Mitigación de Riesgos documenta cómo los peligros costeros y de inundación
205 en la zona costera se combinan con otros riesgos prioritarios, como las inundaciones fluviales y repentinas,
206 el calor extremo, la sequía y tormentas de mayor intensidad. Esto refuerza la necesidad de diseñar
207 proyectos de restauración y barreras naturales que atiendan múltiples peligros de manera simultánea
208 (Estuario, 2025).

209 La participación comunitaria constituye un componente integral de la gestión basada en la resiliencia. La
210 participación mediante procesos colaborativos fomenta la custodia local, garantiza que las estrategias de
211 adaptación sean apropiadas al contexto y fortalece el capital social necesario para la acción colectiva
212 (Centeno-Torres et al., 2022). La planificación inclusiva considera áreas con vulnerabilidad socioeconómica,
213 que pueden variar desde comunidades de menores ingresos hasta comunidades con edificaciones más
214 antiguas y expuestas (Estuario, 2025). La planificación inclusiva empodera a las comunidades para
215 desarrollar capacidades adaptativas, fomentando la resiliencia frente a inundaciones, tormentas y el

216 aumento del nivel del mar (Centeno-Torres et al., 2022). La gestión estuarina integrada también requiere
 217 coordinación entre sectores y jurisdicciones para abordar amenazas interconectadas como la
 218 contaminación, la fragmentación del hábitat y el uso insostenible del suelo (Díaz et al., 2022; Resetar et al.,
 219 2020).

220 El aprovechamiento de tecnologías innovadoras, como la teledetección, el monitoreo de ADN ambiental y la
 221 modelación predictiva, proporciona información crítica para la gestión en tiempo real y la adaptación
 222 precautelar (Díaz et al., 2022). Estas herramientas apoyan la alerta temprana, la cartografía del riesgo y la
 223 evaluación de la efectividad de las medidas de manejo, contribuyendo a una gestión proactiva en lugar de
 224 reactiva. La cartografía operativa del riesgo para el EBSJ combina los mapas de inundación con probabilidad
 225 anual del 1 % de FEMA y las capas informativas de inundación del DRNA con modelos digitales de elevación
 226 de alta resolución para generar cuadrículas de profundidad de inundación y estimaciones de exposición y
 227 daños a edificaciones. Esta cartografía de riesgo produce capas de riesgo utilizables para la priorización y la
 228 alerta temprana (Estuario, 2025).

229 El manejo adaptativo integrado basado en la resiliencia para el sistema del EBSJ debe articular la
 230 restauración ecológica, la participación comunitaria, la innovación científica, el diseño y la modernización de
 231 la infraestructura, así como la colaboración intersectorial. Estos esfuerzos combinados fortalecerán la
 232 capacidad del sistema para resistir eventos meteorológicos extremos, recuperar eficazmente de
 233 perturbaciones y, en última instancia, prosperar en medio de presiones crecientes.

234 **Objetivos**

- 235 • Desarrollar prácticas de manejo integrado basadas en la resiliencia para la adaptación del sistema
- 236 estuarino.
- 237 • Apoyar la preparación y la recuperación de las comunidades ante eventos meteorológicos
- 238 extremos.
- 239 • Optimizar la infraestructura para gestionar eficazmente los eventos meteorológicos extremos.

240 **Acciones**

241 ****NUEVO* AA-05 Evaluar las vulnerabilidades e implementar prácticas de gestión de la adaptación para fomentar la***
 242 ***resiliencia.***

243 **Actividades**

Actividad	Métricas	Hitos	Socios responsables y partes interesadas	Estado	Cronograma	Costos estimados	Posibles fuentes de financiamiento
1. Evaluar los resultados de la evaluación regional de riesgos y preparar un análisis de vulnerabilidad para orientar las medidas de manejo del estuario ante los peligros identificados.	Evaluar las zonas vulnerables a los peligros identificados.	Evaluación de la vulnerabilidad completada y riesgos específicos de vulnerabilidad analizados.	Líder: Estuario Socios implementadores: municipios, DRNA, FEMA, NOAA y USACE	Pendiente	0-2 años	TBD	DRNA, FEMA, USACE

Actividad	Métricas	Hitos	Socios responsables y partes interesadas	Estado	Cronograma	Costos estimados	Posibles fuentes de financiamiento
2. Recomendar e implementar prácticas de manejo de adaptación para cada riesgo identificado en las áreas vulnerables.	Identificar e implementar medidas de adaptación, incluidas medidas de infraestructura, para los riesgos identificados en las áreas vulnerables.	Medidas de adaptación seleccionadas y aplicadas en las áreas vulnerables en riesgo.	Líder: municipios Socios implementadores: Estuario, DRNA, FEMA, NOAA y USACE	Pendiente	Más de 5 años	TBD	DRNA, FEMA, USACE

244

245 **Requisitos reglamentarios y de política pública**

246 Esta acción requerirá la cooperación de los municipios para proporcionar los datos de infraestructura y
 247 preparar modelos que protejan la infraestructura pública, así como la seguridad de los ciudadanos
 248 privados, los equipos de primera respuesta y otro personal de emergencia.

249

250 ***NUEVO* AA-06 Crear un grupo directivo de manejo adaptativo para que sea receptivo y con visión de futuro.**

251 **Actividades**

Actividad	Métricas	Hitos	Socios responsables y partes interesadas	Estado	Cronograma	Costos estimados	Posibles fuentes de financiamiento
1. Crear un grupo directivo de manejo adaptativo.	Revisar datos, informes y modelos de manera trimestral.	Informe anual publicado.	Líder: Estuario Socios implementadores: municipios, AAA, líderes comunitarios y academia	Pendiente	0-2 años	TBD	USEPA, FEMA
2. Proveer un repositorio de datos sobre el clima y el nivel del mar en el EBSJ.	Recopilar y gestionar datos estuarinos y datos de agencias municipales, estatales y federales; investigadores; y grupos de conservación.	Base de datos creada y comunicaciones o enlaces directos establecidos para que las partes interesadas actualicen sus datos.	Líder: Estuario Socios implementadores: DRNA, USFWS, NOAA, FEMA, USACE, municipios y academia	Pendiente	0-2 años	TBD	USEPA, DRNA

Actividad	Métricas	Hitos	Socios responsables y partes interesadas	Estado	Cronograma	Costos estimados	Posibles fuentes de financiamiento
3. Promover la integración de consideraciones sobre eventos meteorológicos extremos y estrategias de adaptación a factores de estrés ambiental en la planificación de nueva infraestructura y el desarrollo del uso del suelo en la cuenca hidrográfica del EBSJ.	Brindar educación y estrategias de manejo adaptativo a funcionarios locales, estatales y federales para incorporarlas en la planificación, las políticas, el diseño de infraestructura y las acciones reglamentarias.	Divulgación y educación facilitada a funcionarios sobre estrategias de manejo adaptativo frente a eventos meteorológicos extremos y factores de estrés ambiental en la cuenca hidrográfica del EBSJ.	Líder: Junta de Planificación Socios implementadores: Estuario, USACE, NMFS, USFWS, DRNA, municipios, Fideicomiso de Conservación de Puerto Rico y academia	Pendiente	3-5 años	TBD	USEPA, DRNA

252

253 **Requisitos reglamentarios y de política pública**

254 Es posible que se requiera nueva legislación o la modificación de la existente para cambiar el nivel de
255 servicio requerido y promover un manejo del agua más integrado.

256

257 ***NUEVO* AA-07 Apoyar sistemas de manejo del agua basados en la resiliencia para ayudar a reducir el estrés sobre el**
258 **EBSJ durante eventos meteorológicos extremos.**

259 **Actividades**

Actividad	Métricas	Hitos	Socios responsables y partes interesadas	Estado	Cronograma	Costos estimados	Posibles fuentes de financiamiento
1. Revisar las prácticas actuales en la cuenca hidrográfica del EBSJ para identificar áreas de mejora.	Identificar las deficiencias o puntos débiles de las prácticas actuales.	Recomendaciones elaboradas para mejorar las prácticas actuales.	Líder: Estuario Socios implementadores: DRNA, AAA, municipios y comunidad científica	Pendiente	0-2 años	TBD	USEPA, DRNA, AAA
2. Modelar y diseñar sistemas de retención y almacenamiento de aguas pluviales en las zonas aguas arriba para reducir las inundaciones aguas abajo.	Elaborar planos de diseño para una implementación adecuada.	Datos existentes sobre el área de estudio recopilados.	Líder: Estuario Socios implementadores: DRNA, AAA, municipios y comunidad científica	Pendiente	3-5 años	TBD	USEPA, DRNA, AAA

Actividad	Métricas	Hitos	Socios responsables y partes interesadas	Estado	Cronograma	Costos estimados	Posibles fuentes de financiamiento
3. Elaborar y promover directrices de gestión para ríos urbanos, quebradas y afluentes de agua dulce.	Desarrollar directrices y aumentar la participación en el diálogo sobre la adaptación de las estrategias de gestión.	Coordinación establecida con las partes interesadas para desarrollar las directrices.	Líder: Estuario Socios implementadores: DRNA, AAA, municipios, comunidad científica	Pendiente	Más de 5 años	TBD	USEPA, DRNA, AAA
4. Utilizar datos de campo para proyectos de reconstrucción y revitalización.	Aumentar la participación en el diálogo sobre la toma de decisiones basada en datos en los procesos de reconstrucción y revitalización.	Marco de seguimiento establecido para evaluar los efectos de las iniciativas promocionales.	Líder: Estuario Socios implementadores: DRNA, AAA, municipios, comunidad científica	Pendiente	Más de 5 años	TBD	USEPA, DRNA, AAA

260

261 **Requisitos reglamentarios y de política pública**

262 Es posible que se requiera nueva legislación o la modificación de la existente para cambiar el nivel de
 263 servicio requerido y promover una gestión del agua más integrada.

264

265 **AA-08 Crear un proyecto para revertir la canalización en concreto de un tramo de un río, quebrada o afluente de agua**
 266 **dulce dentro del EBSJ.**

267 **Actividades**

Actividad	Métricas	Hitos	Socios responsables y partes interesadas	Estado	Cronograma	Costos estimados	Posibles fuentes de financiamiento
1. Desarrollar un inventario de los ríos, quebradas y afluentes canalizados en el EBSJ y clasificarlos según sus necesidades.	Crear un inventario basado en la extensión y el tamaño del cuerpo de agua, incluyendo las características de canalización, tales como totalmente revestido en hormigón, solo márgenes de hormigón y riberas naturales, y determinar necesidades que incluyan conservación, mantenimiento, control de inundaciones, mitigación y otras intervenciones.	Ríos, quebradas y afluentes identificados, caracterizados, cartografiados y priorizados.	Líder: Estuario Socios implementadores: USACE, DRNA, municipios, Fideicomiso de Conservación de Puerto Rico y grupos conservacionistas privados	Pendiente	3-5 años	TBD	USEPA, DRNA

Actividad	Métricas	Hitos	Socios responsables y partes interesadas	Estado	Cronograma	Costos estimados	Posibles fuentes de financiamiento
2. Desarrollar un proyecto para revertir la canalización de la quebrada Juan Méndez.	Remover las partes sueltas de los muros de concreto del canal y sustituirlas mediante un uso innovador de la infraestructura natural de la cuenca hidrográfica.	Proyecto completado.	Líder: Estuario Socios implementadores: USACE, DRNA, Fideicomiso de Conservación de Puerto Rico, grupos conservacionistas privados	Pendiente	Más de 5 años	TBD	USEPA, DRNA

268

269 **Requisitos reglamentarios y de política pública**

270 No existen necesidades reglamentarias ni de política pública para el proyecto piloto. Sin embargo, es
 271 posible que se requiera modificar los códigos y ordenanzas de desarrollo local para fomentar cambios en
 272 otros cuerpos de agua canalizados.

273 **Referencias**

274 Bauzá-Ortega, J. (2015). Plan de adaptación al cambio climático del Estuario de la Bahía de San Juan. San
 275 Juan, PR: Programa del Estuario de la Bahía de San Juan.

276 Carrubba, L., Burgos Caraballo, S., Engman, A. C., Galindo Estronza, A. M., Gutiérrez-Fonseca, P. E., Llerandi-
 277 Román, I., Pérez Reyes, O., Wagner Vega, K. M., Silander, S., Colón, R., Soler-Figueroa, B. M., Grafals, R.,
 278 Torres-Pérez, J. L., García-Sais, J. R., Meléndez, M., Zayas-Santiago, C., Murry, B., Colón-Merced, R., Lilyestrom,
 279 C., y Antoun, H. (2022). Grupo de Trabajo 2: Ecología y Biodiversidad. En Informe del estado del clima.
 280 Consejo de Cambio Climático de Puerto Rico (Carrubba, L., Díaz, E., Marrero, V., Gonzalez, M., Leinberger, A.,
 281 y Rodríguez, J. L., eds.).

282 CEACC. (2024). Borrador del Plan de Mitigación, Adaptación y Resiliencia al Cambio Climático en Puerto Rico.
 283 Gobierno de Puerto Rico.

284 Centeno-Torres, D., Villerael, S. I., Cintrón, I., Ortiz Colón, A., Bauzá, J., Ramírez-Durand, L., Morales-Muñoz,
 285 B., y Gaztambide-Arandes, S. (2022). Grupo de Trabajo 4: Comunicaciones y Divulgación. En Informe del
 286 estado del clima. Consejo de Cambio Climático de Puerto Rico (Díaz, E., Marrero, V., González, M., Falcón, M.,
 287 eds.).

288 Díaz, E., Terando, A., Gould, W., Bowden, J., Chardón, P., Jury, M., Meléndez, M., y Morell, J. (2022). Grupo de
 289 Trabajo 1: Conocimiento científico geofísico y químico. En Informe del estado del clima. Consejo de Cambio
 290 Climático de Puerto Rico (Díaz, E., González, M., y Terando, A., eds.).

291 Estuario. (2025). Plan Multijurisdiccional de Mitigación de Riesgos. Evaluación de riesgos – eventos naturales.

292 Resetar, S. A., Tingstad, A., Mendelsohn, J., Marlier, M. E., Lachman, B. E., Anania, K., Garber, C. y Adamson, D.
 293 M. (2020). Homeland Security Operational Analysis Center (HSOAC). Planificación de la recuperación de los
 294 recursos naturales y parques en Puerto Rico. Informe del sector de recursos naturales y culturales,
 295 Volumen I.

296 **Política pública para la preparación del sistema estuarino basada en la resiliencia**

297 **Trasfondo**

298 Las secuelas del huracán María evidenciaron la necesidad urgente de integrar la preparación del sistema
299 estuarino orientada a la resiliencia en la planificación y la política pública en todos los niveles de gobierno
300 responsables del EBSJ. El huracán expuso vulnerabilidades críticas en la infraestructura, los sistemas de
301 respuesta a emergencias y el propio ecosistema estuarino, revelando lagunas significativas en la
302 preparación y la capacidad adaptativa. Está claro que, cuanto más resiliente sean el EBSJ, su infraestructura
303 y su capacidad de respuesta a emergencias, más rápida, eficiente y rentable será la recuperación de toda la
304 cuenca hidrográfica. El nuevo Plan Multijurisdiccional de Mitigación de Riesgos documenta vulnerabilidades
305 específicas del entorno construido y de la población incluyendo viviendas en mal estado y envejecidas
306 concentradas en zonas de alto peligro y destaca que estas vulnerabilidades sociales y de infraestructura
307 determinarán los tiempos de recuperación y las necesidades de recursos después de eventos de gran
308 magnitud (Estuario, 2025). Alcanzar esa resiliencia exige una formulación de políticas transparente y
309 honesta que priorice la sostenibilidad a largo plazo sobre la conveniencia a corto plazo.

310 La población costera de Puerto Rico supera los 400,000 residentes, muchos de los cuales viven en áreas
311 propensas a inundaciones y afectadas por el aumento del nivel del mar, lo que subraya la urgencia de
312 contar con marcos de política pública que prioricen la seguridad comunitaria y una infraestructura robusta
313 (Díaz et al., 2022). Las políticas efectivas integran datos meteorológicos, oceanográficos y, en particular,
314 relacionados con el aumento del nivel del mar en la planificación urbana, las leyes de uso del suelo y el
315 desarrollo de infraestructura con el fin de reducir vulnerabilidades y fortalecer la capacidad adaptativa
316 (Aponte-González et al., 2022; FEMA, 2018). Además, promover normas de construcción verde y un diseño
317 urbano sostenible no solo fortalece la resiliencia, sino que también aumenta la continuidad de los servicios
318 esenciales durante eventos meteorológicos extremos (Aponte-González et al., 2022).

319 Un esfuerzo legislativo trascendental para atender estos retos es la adopción de la Ley de Mitigación,
320 Adaptación y Resiliencia al Cambio Climático de Puerto Rico, Ley Núm. 33 de 2019. Esta ley establece un
321 marco integral para guiar la política pública de la isla en materia de mitigación, adaptación y resiliencia por
322 sectores, incluyendo la creación de un comité de expertos encargado de desarrollar planes de acción y
323 metas medibles (2019). La ley describe cursos de acción específicos que abarcan la transición energética, la
324 restauración de ecosistemas, las mejoras de infraestructura y la participación comunitaria, con metas como
325 aumentar el uso de energía renovable, reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y fortalecer las
326 protecciones costeras.

327 A pesar del alcance ambicioso y las estrategias detalladas establecidas por la Ley Núm. 33, la Asamblea
328 Legislativa de Puerto Rico no ha actuado aún de manera decisiva para implementar plenamente sus
329 disposiciones. La ausencia de seguimiento legislativo crea una brecha crítica de política pública que retrasa
330 la respuesta coordinada necesaria para fortalecer la resiliencia del EBSJ. Sin la plena implementación y
331 cumplimiento de la ley, la isla corre el riesgo de continuar enfrentando amenazas y de perder
332 oportunidades para proteger los sistemas ecológicos y sociales frente a futuros eventos meteorológicos
333 extremos, factores de estrés ambiental y presiones antropogénicas. La revisión del Plan de Estuario incluye
334 acciones consistentes con esta ley para aumentar la resiliencia del estuario.

335 Una política pública sólida debe institucionalizar prácticas de manejo del riesgo, exigiendo a las agencias
336 responsables de la infraestructura y los servicios críticos en el EBSJ que adopten herramientas de evaluación

337 de riesgos e integren estas consideraciones en sus marcos operacionales (Aponte-González et al., 2022).
338 Asimismo, es importante capacitar a los gerentes y al personal mediante educación y capacitación sobre
339 riesgos relacionados con el clima para fortalecer la preparación operacional y mantener la continuidad de
340 los servicios durante emergencias (Aponte-González et al., 2022).

341 La participación pública sigue siendo una piedra angular de la política efectiva. La Ley Núm. 33 enfatiza la
342 consulta y participación comunitaria, reconociendo que los procesos inclusivos de toma de decisiones que
343 involucran a las comunidades locales, científicos y organizaciones de la sociedad civil conducen a estrategias
344 de adaptación más efectivas, equitativas y sostenibles (Centeno-Torres et al., 2022; Díaz et al., 2022). La
345 comunicación transparente y la gobernanza inclusiva ayudan a construir confianza y legitimidad social para
346 las iniciativas de adaptación, lo cual es esencial para su éxito.

347 Dada la naturaleza multijurisdiccional del EBSJ, los marcos de política pública deben facilitar la coordinación
348 entre agencias municipales, regionales y federales, junto con aliados no gubernamentales y académicos
349 (CEACC, 2024). La colaboración intersectorial permite enfoques integrales y coherentes que atienden las
350 complejas vulnerabilidades ecológicas, tecnológicas y socioeconómicas del estuario.

351 Los mecanismos de financiamiento integrados en la política pública son esenciales para incentivar y
352 sostener los esfuerzos de fortalecimiento de la resiliencia. Deben desarrollarse y ampliarse estrategias
353 innovadoras de financiamiento como alianzas público-privadas, bonos de impacto ambiental y fondos
354 dedicados a la resiliencia para apoyar la restauración, la modernización de infraestructura y la preparación
355 comunitaria (Resetar et al., 2020). Un financiamiento estable y a largo plazo reduce la dependencia de
356 respuestas costosas y reactivas ante desastres y fomenta una resiliencia proactiva.

357 Finalmente, los modelos de gobernanza adaptativa son críticos para manejar riesgos cambiantes e inciertos
358 asociados con eventos meteorológicos extremos e influencias humanas. Las políticas deben apoyar marcos
359 flexibles e iterativos que incluyan monitoreo continuo, avances científicos y retroalimentación de las partes
360 interesadas para ajustar las estrategias de forma continua (Resetar et al., 2020). Esto asegura que la
361 gobernanza permanezca receptiva y efectiva ante condiciones cambiantes.

362 En síntesis, el legado del huracán María ofrece una lección poderosa: solo mediante una política pública
363 honesta, integrada y centrada en la resiliencia plenamente adoptada y promulgada por la Asamblea
364 Legislativa de Puerto Rico, el EBSJ y sus comunidades estarán preparados para enfrentar los crecientes
365 desafíos de los eventos meteorológicos extremos y las presiones antropogénicas. La política eficaz debe
366 institucionalizar el uso de fuentes de datos actualizadas y de alta resolución, así como modelos de riesgos
367 mejorados, para orientar la planificación del uso del suelo, el desarrollo de infraestructura y la preparación
368 ante emergencias. Al integrar registros de eventos recientes de inundación y escenarios de huracanes de
369 mayor intensidad, estas políticas aseguran la alineación con la evolución de los riesgos. Un enfoque basado
370 en datos protegerá vidas y medios de subsistencia, a la vez que asegurará el futuro ecológico y económico
371 de la cuenca.

372 **Objetivos**

- 373 ● Fortalecer la política pública que apoya las prácticas de preparación y el manejo integrado basado
374 en la resiliencia del sistema estuarino.

375 **Acciones**

376 ***NUEVO* AA-09 Desarrollar directrices de política para el manejo estuarino resiliente frente a eventos meteorológicos extremos.**

378 **Actividades**

Actividad	Métricas	Hitos	Socios responsables y partes interesadas	Estado	Cronograma	Costos estimados	Posibles fuentes de financiamiento
1. Identificar los cambios relacionados con eventos meteorológicos extremos en el estuario e identificar las brechas actuales en la política pública.	Identificar especies, hábitats y comunidades vulnerables dentro del EBSJ.	Cambios relacionados con eventos meteorológicos extremos identificados en el EBSJ y necesidades de política pública identificadas.	Líder: Estuario, DRNA Socios implementadores: municipios y comunidad científica	Pendiente	3-5 años	TBD	USEPA, DRNA
2. Desarrollar e implementar directrices de política pública que delinee estrategias para el manejo estuarino resiliente frente a eventos meteorológicos extremos.	Hacer que las directrices sean accesibles para las partes interesadas, incluidos los socios comunitarios, e identificar recursos para su implementación.	Directrices creadas que abarcan diversas estrategias para atender riesgos relacionados con eventos meteorológicos extremos.	Líder: Estuario, Junta de Planificación Socios implementadores: DRNA, municipios y comunidad científica	Pendiente	3-5 años	TBD	USEPA, DRNA

379 **Requisitos reglamentarios y de política pública**

380 Ninguno.

382 ***NUEVO* AA-10 Evaluar cómo las políticas propuestas y existentes afectan a las comunidades de EBSJ ante eventos meteorológicos extremos.**

384 **Actividades**

Actividad	Métricas	Hitos	Socios responsables y partes interesadas	Estado	Cronograma	Costos estimados	Posibles fuentes de financiamiento
1. Identificar las comunidades vulnerables en la cuenca hidrográfica del EBSJ.	Analizar los datos comunitarios para identificar las comunidades vulnerables.	Comunidades vulnerables identificadas.	Líder: Estuario Socios implementadores: municipios y DRNA	Pendiente	3-5 años	TBD	USEPA

Actividad	Métricas	Hitos	Socios responsables y partes interesadas	Estado	Cronograma	Costos estimados	Posibles fuentes de financiamiento
2. Involucrar a las partes interesadas de la comunidad para recopilar información sobre cómo se perciben y experimentan las políticas.	Aumentar la comunicación y el compromiso con las partes interesadas.	Comentarios recibidos de las partes interesadas de la comunidad.	Líder: Estuario Socios implementadores: municipios y DRNA	Pendiente	0-2 años	TBD	USEPA
3. Desarrollar recomendaciones para que los responsables de la política pública las integren en las normativas vigentes y propuestas.	Establecer directrices claras para la implementación de las recomendaciones.	Recomendaciones desarrolladas.	Líder: Estuario Socios implementadores: municipios y DRNA	Pendiente	3-5 años	TBD	USEPA

385

386 **Requisitos reglamentarios y de política pública**

387 Los resultados de esta evaluación informarán sobre las necesidades reglamentarias y de política pública
 388 para mejorar la resiliencia de las comunidades vulnerables en la cuenca hidrográfica.

389

390 ****NUEVO*** AA-11 Desarrollar una evaluación de riesgos para el área de estudio ampliada propuesta.*

391 **Actividades**

Actividad	Métricas	Hitos	Socios responsables y partes interesadas	Estado	Cronograma	Costos estimados	Posibles fuentes de financiamiento
1. Desarrollar e implementar un protocolo para la evaluación de riesgos en el área de estudio ampliada propuesta.	Mejorar la información sobre los riesgos en el área de estudio ampliada propuesta.	Protocolo para la evaluación de riesgos desarrollado.	Líder: Estuario Socios implementadores : Comunidad científica, academia, municipios del área ampliada propuesta y DRNA	Pendiente	3-5 años	TBD	USEPA, municipios del área ampliada propuesta, DRNA
2. Preparar un informe y mapas que destaquen los riesgos en el área de estudio ampliada propuesta.	Incorporar los hallazgos de la evaluación de riesgos en la toma de decisiones sobre el área de estudio ampliada propuesta.	Información sobre riesgos proporcionada para la toma de decisiones.	Líder: Estuario Socios implementadores : municipios del área ampliada propuesta y DRNA	Pendiente	3-5 años	TBD	USEPA, Municipios del área ampliada propuesta, DRNA

Actividad	Métricas	Hitos	Socios responsables y partes interesadas	Estado	Cronograma	Costos estimados	Posibles fuentes de financiamiento
3. Desarrollar directrices para mitigar los riesgos en el área de estudio ampliada propuesta.	Formular directrices.	Coordinación establecida con las partes interesadas para desarrollar las directrices.	Responsable: Estuario Socios implementadores : municipios del área ampliada propuesta y DRNA	Pendiente	Más de 5 años	TBD	Municipios del área ampliada propuesta, DRNA

392

393 **Requisitos reglamentarios y de política pública**

394 Los resultados de la evaluación de riesgos informarán en el futuro los requisitos reglamentarios y de
395 política pública.

396 **Referencias**

397 Aponte-González, F., Rodríguez-Rivera, L. E., Crespo Acevedo, W., Moyano Flores, R., Quiñones, H.,
398 Rodríguez, J. L., Leinberger, A., Santos-Corrada, M., Marrero, V., Rivera-Collazo, I., Ezcurra, P., Parés-Ramos, I.
399 K., Avilés, K. R., Gould, W., Álvarez-Berrios, N., Torres, M., y Rodríguez-Morales, H. K. (2022). Grupo de
400 Trabajo 3: Sociedad y Economía. En Informe del estado del clima. Consejo de Cambio Climático de Puerto
401 Rico (Aponte-González, F., Díaz, E., Rodríguez-Morales, H. K., Rodríguez, J. L., Marrero, V., Leinberger, A.,
402 Crespo Acevedo, W. I., y González, M., eds.).

403 CEACC. (2024). Borrador del Plan de Mitigación, Adaptación y Resiliencia al Cambio Climático en Puerto Rico.
404 Gobierno de Puerto Rico.

405 Centeno-Torres, D., Villerael, S. I., Cintrón, I., Ortiz Colón, A., Bauzá, J., Ramírez-Durand, L., Morales-Muñoz,
406 B., y Gaztambide-Arandes, S. (2022). Grupo de Trabajo 4: Comunicaciones y Divulgación. En Informe del
407 estado del clima. Consejo de Cambio Climático de Puerto Rico (Díaz, E., Marrero, V., González, M., Falcón, M.,
408 eds.).

409 Díaz, E., Terando, A., Gould, W., Bowden, J., Chardón, P., Jury, M., Meléndez, M., y Morell, J. (2022). Grupo de
410 Trabajo 1: Conocimiento científico geofísico y químico. En Informe del estado del clima. Consejo de Cambio
411 Climático de Puerto Rico (Díaz, E., Gonzalez, M., y Terando, A., eds.).

412 Estuario. (2025). Plan Multijurisdiccional de Mitigación de Riesgos. Evaluación de riesgos – eventos naturales.

413 FEMA. (2018). Informe del Equipo de Evaluación de Mitigación: huracanes Irma y María en Puerto Rico.
414 Desempeño de edificaciones, observaciones, recomendaciones y orientación técnica. Octubre de 2018.

415 Legislatura de Puerto Rico. (2019). Ley Núm. 33 del 22 de mayo de 2019: Ley de Mitigación, Adaptación y
416 Resiliencia al Cambio Climático de Puerto Rico. Gobierno de Puerto Rico.

417 Resetar, S. A., Tingstad, A., Mendelsohn, J., Marlier, M. E., Lachman, B. E., Anania, K., Garber, C., y Adamson,
418 D. M. (2020). Homeland Security Operational Analysis Center (HSOAC). Planificación de la recuperación de
419 recursos naturales y parques en Puerto Rico. Informe del sector de recursos naturales y culturales,
420 Volumen I.

421 Resetar, S. A., Tingstad, A., Mendelsohn, J., Marlier, M. E., Lachman, B. E., Anania, K., Garber, C., y Adamson,
422 D. M. (2020). Homeland Security Operational Analysis Center (HSOAC). Planificación de la recuperación de
423 recursos naturales y parques en Puerto Rico. Informe del sector de recursos naturales y culturales,
424 Volumen II.

425

ADVANCE THE ESTUARINE SYSTEM’S ADAPTATION TO EXTREME WEATHER EVENTS AND PROTECT COMMUNITIES

[Note: Divider page with action plan title and nice picture]

TABLE OF CONTENTS

Advance the Estuarine System’s Adaptation to Extreme Weather Events and Protect Communities..... 1

Risk and Its Vulnerability Analysis.....2

 Baseline..... 2

 Objectives.....4

 Actions..... 4

 References.....7

Resilience-Based Estuarine System Adaptation Management..... 8

 Baseline..... 8

 Objectives..... 9

 Actions..... 9

 References..... 12

Public Policy for Resilience-Based Estuarine System Readiness..... 14

 Baseline..... 14

 Objectives..... 15

 Actions..... 15

 References..... 17

RISK AND ITS VULNERABILITY ANALYSIS

BASELINE

Risk and its vulnerability analysis in coastal and estuary areas involves assessing the study area's susceptibility to stressors. In 2015, Estuario undertook an effort to develop a plan for adapting to the foreseen effects of changes in environmental stressors. This process identified six stressors: warmer summer months, warmer water temperatures, more frequent droughts, more intense rainfall, sea level rise, and carbon dioxide effects including ocean acidification (Bauzá-Ortega, 2015). These stressors affect stormwater and wastewater management in urban areas; increase pollutants and pathogens; erode riverbanks, streambeds, and coastlines; increase flooding; cause more extreme weather events; and impact critical habitats and species (Bauzá-Ortega, 2015).

Figure 1. Placeholder for a figure showing the locations of the stressors within the SJBE watershed

The landfall of hurricane Maria in 2017 starkly illustrated Puerto Rico's exposure to extreme weather events, producing the largest recorded rainfall in over six decades and triggering widespread flooding and landslides across the island (Keellings and Hernández Ayala, 2019). This event not only caused immense physical damage but also revealed the social vulnerabilities embedded within the affected populations, as indicated by excess mortality and population displacement (Keellings and Hernández Ayala, 2019). Observations indicate that recent hurricanes exhibit greater intensity than historical climatological averages. To address this, additional hurricane scenarios with elevated intensities have been developed, highlighting the potential for Category 4 and 5 wind speeds within a 1% annual chance event (Estuario, 2025). These risks are exacerbated by ongoing trends in weather events and sea level data, which have increased the probability of extreme rainfall events by nearly five times in the most affected regions on the island (Keellings and Hernández Ayala, 2019).

As extreme weather events and shifts in nutrients, ocean temperature, pH, and other factors persist, understanding and predicting trends and events are further compounded by additional events. One example is the increase in sargassum, which in large quantities can smother coral reefs and seagrass and further contribute to eutrophication of the San Juan Bay Estuary (SJBE). There remains no consensus on why the sargassum weed has increased so dramatically although a recent study identified potential contributions to the Caribbean Sea from long-distance transport of sargassum seed during the North Atlantic Oscillation event in 2009–2010 coupled with vertical mixing in the upper water column providing a nutrient supply (Jouanno et al, 2025).

Recent advancements in vulnerability assessments for the SJBE have formalized the selection of key parameters that drive risk across social, ecological, and technological sectors. For this action plan, specific events will be discussed in detail, and generalized terms will be used to describe groups of events. Extreme weather events will be used as a term to describe storms that result in more frequent and intense rainfall, flooding, and mud slides. Environmental stressors will be used to describe other hazards, risks, and environmental drivers that are not individual events, but lasting or secondary effects. Estuario developed a plan for adapting to the foreseen effects of changes due to six environmental stressors: warmer summer months, warmer water temperatures, more frequent droughts, more intense rainfall, sea level rise, and carbon dioxide effects including ocean acidification (Bauzá-Ortega, 2015).

Flooding is one of the primary hazards facing the estuary and the critical infrastructure and communities adjacent to the estuary. Floods arise from multiple sources including riverine overflow, flash floods, and

coastal storm surges. The estuary's geographic and hydrological characteristics make it particularly susceptible to flooding events. Estuario (2025) used the Federal Emergency Management Agency's (FEMA) Advisory Flood layer and Hazus program to model the potential damage from such flooding, highlighting the substantial risk posed by riverine and flash floods. Coastal flooding is driven largely by storm surge events associated with tropical cyclones which can cause significant flooding, even when a hurricane does not make direct landfall (Estuario, 2025). Additionally, coastal erosion exacerbated by storm surges and sea level rise changes estuarine shorelines, with municipalities like Loíza experiencing erosion beyond normal rates (Díaz et al., 2022; Estuario, 2025).

Landslides, often triggered by extreme rainfall and seismic activity, further compound the estuary's vulnerability. The heavy rains from hurricane Maria and subsequent earthquakes in 2020 led to widespread landslides, destabilizing slopes and threatening infrastructure and habitats within the watershed (Estuario, 2025). These landslides not only affect ecosystems but also disrupt roads, infrastructure, and water quality through increased sedimentation, thereby altering estuarine function.

Drought imposes episodic stress on the estuarine system. The 2015 drought brought reservoir levels across Puerto Rico, including those feeding into the SJBE, to record lows, affecting water availability for both ecological and human needs (Estuario, 2025). Regular drought cycles, occurring approximately every other year, emphasize the need for adaptive water management to buffer against long-term water scarcity (Estuario, 2025). Periodic fish kill events in the San José Lagoon are due to poor water quality conditions due to excess nutrient inputs from sanitary discharges and low water turnover rates during drought conditions. The latest significant fish kill event occurred in August 2020 (Almodóvar Santana et al, 2023).

Sea level rise represents a pervasive and escalating threat, contributing to increased coastal flooding and erosion. While some FEMA data suggest natural erosion processes dominate, communities such as Loíza exhibit significant concern for accelerated erosion linked to rising sea levels, (Díaz et al., 2022). Dams upgradient, such as the Carraízo dam upstream from Loíza, tap the sediment supply to restore shorelines. Waves from the north impact the coastal erosion in Loíza and other areas around the SJBE (Ramos, 2025). Rising sea levels will affect groundwater and soil drainage, particularly in carbon-rich soils, reducing drainage capacity of septic systems, stormwater systems, and highways. The interaction of sea level with storm surges and increased precipitation creates compounded risk scenarios that further challenge the estuary's adaptation capacity.

The complexity of Puerto Rico's hydroclimate, influenced by tropical storms, easterly waves, and convective systems, introduces significant variability and uncertainty into risk assessments (Keellings and Hernández Ayala, 2019). This variability underscores the need for integrated vulnerability analyses that incorporate physical, ecological, and social data to fully capture the estuary's risk profile (Díaz et al., 2022). Such analyses are critical for identifying risk hotspots of vulnerability and informing targeted adaptation efforts for planning and infrastructure.

The SJBE system faces multifaceted and intensifying risks from extreme weather and anthropogenic influences. Integrating detailed risk and vulnerability assessments that consider hydrological hazards, ecosystem sensitivities, and socio-economic factors is essential to guide effective adaptation and protect the estuary's ecological functions, infrastructure, and surrounding communities.

OBJECTIVES

- Determine and monitor the risk to and vulnerabilities of the estuarine system against extreme events.

ACTIONS

AA-01 ESTIMATE OR MODEL THE SJBE'S VULNERABILITY TO EXTREME WEATHER EVENTS AND SEA LEVEL RISE, AND PRESENT ADAPTATION MEASURES.

ACTIVITIES

Activity	Performance Measures	Milestones	Responsible Stakeholder(s) and Partner(s)	Status	Timeframe	Estimated Costs	Potential Funding Sources
1. Expand and implement monitoring.	Measure rainfall, coastal erosion, water temperatures, water elevations, and pH.	Installed devices and created databases.	Lead: U.S. Geological Survey (USGS) Implementing partners: Estuario, Department of Natural and Environmental Resources (DNER), U.S. Fish and Wildlife Service (USFWS), National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), FEMA, U.S. Army Corps of Engineers (USACE), Estuario municipalities, academia	Ongoing	0-2 years	TBD	U.S. Environmental Protection Agency (USEPA), DNER
2. Evaluate rainfall and sea level rise scenarios for the SJBE and watershed and the effects on septic systems, sewer collection systems, treatment plants, and overflow of combined sewer systems.	Identify and evaluate affects to septic systems, sewage collection systems, and combined sewer systems based on the elevation, flooding and runoff in the SJBE and basin.	Identified and evaluated scenario changes on septic system and sewage collection systems.	Lead: DNER Implementing partners: Estuario municipalities, Estuario	Pending	3-5 years	TBD	DNER, Estuario municipalities
3. Evaluate the effects of more intense rainfall on flooding in urban areas, flood control facilities, retention ponds, and coastal areas.	Develop a watershed model to evaluate the effects of more intense rainfall on flooding in urban areas, flood control facilities, retention ponds, and coastal areas in the SJBE and basin.	Developed model(s).	Lead: DNER Implementing partners: Estuario municipalities, Estuario	Pending	3-5 years	TBD	DNER, Estuario municipalities

Activity	Performance Measures	Milestones	Responsible Stakeholder(s) and Partner(s)	Status	Timeframe	Estimated Costs	Potential Funding Sources
4. Evaluate the effect of sea level rise on erosion and loss of beaches and wetlands.	Develop coastal models for the effects of sea level rise on loss of beaches and wetlands.	Developed model(s).	Lead: Estuario Implementing partners: DNER, Estuario municipalities	Pending	3-5 years	TBD	USEPA, DNER

REGULATORY AND POLICY REQUIREMENTS

New or modified legislation may be needed, based on the data and modeling results, to account for extreme weather events and sea level rise in project planning to support adaptation measures and reduce risk vulnerability to these changes.

**NEW* AA-02 DEVELOP A VULNERABILITY INDEX TO RATE THE SENSITIVITY AND ADAPTIVE CAPACITY OF SPECIES AND THEIR HABITATS TO ENVIRONMENTAL STRESSORS.*

ACTIVITIES

Activity	Performance Measures	Milestones	Responsible Stakeholder(s) and Partner(s)	Status	Timeframe	Estimated Costs	Potential Funding Sources
1. Identify the potential exposure and sensitivity to environmental stressors for threatened and endangered species and habitat in the SJBE system.	Determine the magnitude of and sensitivity to predicted stressors for threatened and endangered and critical habitats (i.e., sea level, temperature, rainfall, pH, salinity, suspended particles).	Summarized relative value for sensitivity to change across the range of expected values to stressors for threatened and endangered species and critical habitats.	Lead: Estuario Implementing partners: DNER, USFWS, National Marine Fisheries Service (NMFS), NOAA, FEMA, USACE, Estuario municipalities, academia	Pending	3-5 years	TBD	USEPA, DNER, NOAA
2. Determine the adaptive capacity to withstand environmental stressors for threatened and endangered species and habitat.	Determine the adaptive capacity to stressors for threatened and endangered species and critical habitat (i.e., dispersal and movement).	Evaluated the adaptive capacity to change across the range of expected values to stressors for threatened and endangered species and critical habitats.	Lead: Estuario Implementing partners: DNER, USFWS, NMFS, NOAA, FEMA, USACE, Estuario municipalities, academia	Pending	5+ years	TBD	USEPA, DNER, NOAA

REGULATORY AND POLICY REQUIREMENTS

None to establish the vulnerability index. The results of the index assessment will help inform future regulatory and policy requirements.

**NEW* AA-03 ESTABLISH SCENARIO-BASED RISK MODELING TO SIMULATE POTENTIAL EXTREME WEATHER EVENT EFFECTS ON THE SJBE.*

ACTIVITIES

Activity	Performance Measures	Milestones	Responsible Stakeholder(s) and Partner(s)	Status	Timeframe	Estimated Costs	Potential Funding Sources
1. Model extreme weather event-based rainfall-driven floods.	Develop models for rainfall-driven floods for different storm events.	Developed models.	Lead: Estuario municipalities Implementing partners: Estuario, Puerto Rico Aqueduct and Sewer Authority (PRASA), NOAA, FEMA	Pending	3-5 years	TBD	DNER, FEMA, NOAA, Estuario municipalities
2. Model extreme weather event-based wind-driven damage and debris assessments.	Develop models for damage to power infrastructure, buildings, and debris for different storm events.	Developed models.	Lead: PRASA Implementing partners: Estuario, Estuario municipalities, NOAA, FEMA	Pending	3-5 years	TBD	DNER, FEMA, NOAA, Estuario municipalities

REGULATORY AND POLICY REQUIREMENTS

Model creation and validation will require funding for data collection and modeling, including a robust data collection network to ensure accurate measurements are collected even during hurricane events. Model outputs can provide valuable data to inform planners and engineers with needs for critical development and retrofits, and emergency managers on targeted warnings and evacuations.

**NEW* AA-04 USE EXISTING RISK ASSESSMENTS AND ADAPTATION PLAN INFORMATION TO INFORM ZONING, LAND USE, AND INFRASTRUCTURE DEVELOPMENT PLANS.*

ACTIVITIES

Activity	Performance Measures	Milestones	Responsible Stakeholder(s) and Partner(s)	Status	Timeframe	Estimated Costs	Potential Funding Sources
1. Integrate assessment findings into regulatory and planning frameworks by developing guidelines for resilient infrastructure and land use practices.	Incorporate assessment findings into existing frameworks.	Collaborated with applicable stakeholders.	Lead: Estuario Implementing partners: Estuario municipalities, DNER	Pending	3-5 years	TBD	USEPA, DNER

Activity	Performance Measures	Milestones	Responsible Stakeholder(s) and Partner(s)	Status	Timeframe	Estimated Costs	Potential Funding Sources
2. Incentivize the development of practices that support sustainability.	Increased number of developers and builders participating in incentive programs or initiatives.	Developed criteria for sustainable development practices.	Lead: Estuario Implementing partners: Estuario municipalities, DNER, builders and developers	Pending	5+ years	TBD	USEPA, DNER, developers

REGULATORY AND POLICY REQUIREMENTS

The outputs from this action will rely on the quality and validity of the vulnerability assessment to inform regulatory and policy requirements.

REFERENCES

Almodóvar Santana, Y., Santos-Flores, C., and Martínez, G. 2023. Factors Associated with an Algae Bloom In a Tropical Estuarine Lagoon: The Case of the San José Lagoon in Puerto Rico. University of Puerto Rico Mayagüez.

Bauzá-Ortega J. 2015. San Juan Bay Estuary Climate Change Adaptation Plan. San Juan, PR: San Juan Bay Estuary Program.

Díaz, E., Terando, A., Gould, W., Bowden, J., Chardón, P., Jury, M., Meléndez, M., and Morell, J. 2022. Working Group 1: Geophysical and Chemical Scientific Knowledge. State of the Climate Report. Puerto Rico Climate Change Council. Díaz, E., Gonzalez, M., and Terando, A. [Eds.]

Estuario. 2025. Multijurisdictional Risk Mitigation Plan. Risk Assessment – Natural Events.

Hughes, K.S., and Schulz, W.H., 2020, Results from frequency-ratio analyses of soil classification and land use related to landslide locations in Puerto Rico following Hurricane Maria: U.S. Geological Survey data release, <https://doi.org/10.5066/P9VK2FAL>.

Jouanno, J., Berthet, S., Muller-Karger, F., Aumont, O., and Sheinbaum, J. 2025. An extreme North Atlantic Oscillation event drove the pelagic Sargassum tipping point. *Commun Earth Environ* 6, 95 (2025). <https://doi.org/10.1038/s43247-025-02074-x>.

Keellings, D., and 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, 2964–2973. <https://doi.org/10.1029/2019GL082077>.

Ramos, Emmanuel Román.2025. Coastal Erosion as a Function of Sea Level Rise and Sediment Imbalance. <https://prcr.cobimet.org/server/api/core/bitstreams/a99a485d-d66b-47a2-a2c3-458856a1fbb7/content>.

RESILIENCE-BASED ESTUARINE SYSTEM ADAPTATION MANAGEMENT

BASELINE

Adaptation to extreme weather events and environmental stressors demands a comprehensive, integrated, and resilience-centered management approach. Resilience, defined as the system's capacity to absorb disturbances while maintaining essential functions, is necessary given the estuary's complex ecological and social interactions (Resetar et al., 2020). Effective adaptation strategies require embracing the dynamic and adaptive nature of social-ecological systems, where ecological processes and human activities are deeply interconnected and influence one another (Resetar et al., 2020). The recent Multijurisdictional Hazard Mitigation Plan characterizes the SJBE as facing multiple hazards, and thus needing effective adaptation strategies (Estuario, 2025).

In 2015, Estuario undertook an effort to develop a plan for adapting to the foreseen effects of changes in environmental stressors. This process identified six stressors: warmer summer months, warmer water temperatures, more frequent droughts, more intense rainfall, sea level rise, and carbon dioxide effects including ocean acidification (Bauzá-Ortega, 2015). These stressors affect stormwater and wastewater management in urban areas; increase pollutants and pathogens; erode riverbanks, streambeds, and coastlines; increase flooding; cause more extreme weather events; and alter critical habitats and species (Bauzá-Ortega, 2015).

To effectively implement adaptation strategies, adaptive management is key. Adaptive management forms the foundation of resilience-based estuarine management and integrates ongoing monitoring, assessment, and stakeholder participation to refine management strategies in response to changing conditions and emerging knowledge (Resetar et al., 2020). Given the uncertainties in extreme weather events, environmental stressors, and ecosystem responses, adaptive management offers a flexible framework to navigate complex feedback and nonlinear dynamics characteristic of estuarine systems (Resetar et al., 2020).

Ecological restoration and conservation are critical components of this integrated management. Restoration efforts targeting degraded habitats within the estuary and adjacent areas enhance natural buffers against storms and sea level rise, supporting biodiversity and ecosystem services (Carrubba et al., 2022; Committee of Experts and Advisors on Climate Change [CEACC], 2024). The Multijurisdictional Hazard Mitigation Plan documents how shoreline and coastal flood hazards combine with other prioritized hazards such as riverine and flash flooding, extreme heat, drought, and stronger storm events. This is reinforcing the need to design restoration projects and natural buffers that address multiple hazards simultaneously (Estuario, 2025).

Community engagement is integral to resilience-based management. Engagement through participatory processes fosters local stewardship, ensures that adaptation strategies are contextually appropriate, and builds social capital necessary for collective action (Centeno-Torres et al., 2022). Inclusive planning accounts for areas with socioeconomic vulnerability, which can vary from lower-income areas to communities with older, more exposed buildings (Estuario, 2025). Inclusive planning empowers communities to develop adaptive capacities, fostering resilience against floods, storms, and rising sea levels (Centeno-Torres et al., 2022). Integrated estuarine management also requires coordination across sectors and jurisdictions to address interconnected threats such as pollution, habitat fragmentation, and unsustainable land use (Díaz et al., 2022; Resetar et al., 2020).

Leveraging innovative technologies such as remote sensing, environmental DNA monitoring, and predictive modeling, provides critical insights for real-time management and anticipatory adaptation (Díaz et al., 2022). These tools support early warning, risk mapping, and evaluation of management effectiveness, contributing to proactive rather than reactive management strategies. Operational risk mapping for the SJBE combines FEMA’s 1%-annual-chance flood maps and DNER advisory flood layers with high-resolution digital elevation models to build flood depth grids and building-damage and exposure estimates. This risk mapping produces actionable risk layers for prioritization and early warning (Estuario, 2025).

Integrated, resilience-based adaptation management for the SJBE system must bring together ecological restoration, community participation, scientific innovation, infrastructure design and retrofitting, and cross-sector collaboration. These combined efforts will enhance the system’s capacity to withstand extreme weather events, recover effectively from disturbances, and ultimately thrive amid increasing pressures.

OBJECTIVES

- Develop integrated resilience-based management practices for estuarine system adaptation.
- Support community preparedness and recovery to extreme weather events.
- Optimize infrastructure to effectively manage extreme weather events.

ACTIONS

**NEW* AA-05 ASSESS VULNERABILITIES AND IMPLEMENT ADAPTATION MANAGEMENT PRACTICES TO BECOME RESILIENT.*

ACTIVITIES

Activity	Performance Measures	Milestones	Responsible Stakeholder(s) and Partner(s)	Status	Timeframe	Estimated Costs	Potential Funding Sources
1. Evaluate regional risk assessment results and prepare a vulnerability analysis to guide estuarine management actions for identified hazards.	Evaluate areas vulnerable to identified hazards.	Completed vulnerability assessment and evaluated specific vulnerability hazards.	Lead: Estuario Implementing partners: Estuario municipalities, DNER, FEMA, NOAA, USACE	Pending	0-2 years	TBD	DNER, FEMA, USACE
2. Recommend and implement adaptation management practices for each identified hazard in vulnerable areas.	Identify and implement adaptation action(s), including infrastructure, for identified hazards in vulnerable areas.	Selected and implemented adaptation actions for vulnerable areas at risk.	Lead: Estuario municipalities Implementing partners: Estuario, DNER, FEMA, NOAA, USACE	Pending	5+ years	TBD	DNER, FEMA, USACE

REGULATORY AND POLICY REQUIREMENTS

This action will require cooperation from municipalities to provide the infrastructure data and prepare models to protect public infrastructure and safety of private citizens and first responders and other emergency personnel.

**NEW* AA-06 CREATE AN ADAPTIVE MANAGEMENT STEERING GROUP TO BE RESPONSIVE AND FORWARD-LOOKING.*

ACTIVITIES

Activity	Performance Measures	Milestones	Responsible Stakeholder(s) and Partner(s)	Status	Timeframe	Estimated Costs	Potential Funding Sources
1. Create an Adaptive Management Steering Group.	Review data, reports, and models on a quarterly basis.	Published annual report.	Lead: Estuario Implementing partners: Estuario municipalities, PRASA, community leaders and academia.	Pending	0-2 years	TBD	USEPA, FEMA
2. Provide a repository for weather and sea level data in the SJBE.	Collect and manage estuarine data and data from municipal, state, and federal agencies; researchers; and conservation groups.	Created database and provided communication or direct links for stakeholders to update their data.	Lead: Estuario Implementing partners: DNER, USFWS, NOAA, FEMA, USACE, Estuario municipalities, academia	Pending	0-2 years	TBD	USEPA, DNER
3. Promote considerations for extreme weather events and environmental stressor adaptive strategies into planning for new infrastructure and land use development in the SJBE watershed.	Provide education and adaptive management strategies to local, state, and federal officials to incorporate into planning, policy, infrastructure design, and regulatory actions.	Continued outreach and education to officials on adaptive management strategies to extreme weather events and environmental stressors in the SJBE watershed.	Lead: Planning Board of Puerto Rico Implementing partners: Estuario, USACE, NMFS, USFWS, DNER, Estuario municipalities, Conservation Trust of Puerto Rico, academia	Pending	3-5 years	TBD	USEPA, DNER

REGULATORY AND POLICY REQUIREMENTS

New or modified legislation may be needed to change the required level of service to promote more integrated water management.

**NEW* AA-07 SUPPORT RESILIENCE-BASED WATER MANAGEMENT SYSTEMS TO HELP REDUCE STRESS ON THE SJBE DURING EXTREME WEATHER EVENTS.*

ACTIVITIES

Activity	Performance Measures	Milestones	Responsible Stakeholder(s) and Partner(s)	Status	Timeframe	Estimated Costs	Potential Funding Sources
1. Review current practices in the SJBE watershed to identify areas for improvement.	Identify gaps or weaknesses in current practices.	Developed recommendations for improving current practices.	Lead: Estuario Implementing partners: DNER, PRASA, Estuario municipalities, scientific community	Pending	0-2 years	TBD	USEPA, DNER, PRASA
2. Model and design stormwater retention/ detention in upstream areas to reduce downstream flooding.	Create design plans for proper implementation.	Compiled existing data in the study area.	Lead: Estuario Implementing partners: DNER, PRASA, Estuario municipalities, scientific community	Pending	3-5 years	TBD	USEPA, DNER, PRASA
3. Develop and promote management guidelines for urban rivers, creeks, and freshwater tributaries.	Formulate guidelines and increase participation in dialogue around adaptation of management solutions.	Coordinated with stakeholders to develop guidelines.	Lead: Estuario Implementing partners: DNER, PRASA, Estuario municipalities, scientific community	Pending	5+ years	TBD	USEPA, DNER, PRASA
4. Use field data for reconstruction and revitalization projects.	Increase participation in dialogue around data driven decision making in reconstruction and revitalization.	Established a monitoring framework to evaluate effects of promotional efforts.	Lead: Estuario Implementing partners: DNER, PRASA, Estuario municipalities, scientific community	Pending	5+ years	TBD	USEPA, DNER, PRASA

REGULATORY AND POLICY REQUIREMENTS

New or modified legislation may be needed to change the required level of service to promote more integrated water management.

AA-08 CREATE A PROJECT FOR REVERSING THE CHANNELIZATION BY CONCRETE OF A SEGMENT OF A RIVER, CREEK, OR FRESHWATER TRIBUTARY WITHIN THE SJBE.

ACTIVITIES

Activity	Performance Measures	Milestones	Responsible Stakeholder(s) and Partner(s)	Status	Timeframe	Estimated Costs	Potential Funding Sources
1. Develop an inventory of the channelized rivers, creeks, and tributaries in SJBE and rank based on needs.	Inventory created based on the extension and size of the waterbody including the channelizing characteristics such as completely cased in concrete, concrete banks only, and natural shorelines, and determine needs including conservation, maintenance, flood control, mitigation, and other intervention.	Identified, characterized, mapped, and prioritized rivers, creeks, and tributaries.	Lead: Estuario Implementing partners: USACE, DNER, Estuario municipalities, Conservation Trust, private conservation groups	Pending	3-5 years	TBD	USEPA, DNER
2. Develop a project to revert the channelization of the Juan Méndez Creek.	Remove loose parts of the concrete canal walls and replace with innovative use of the natural infrastructure of its watershed.	Completed the project.	Lead: Estuario Implementing partners: USACE, DNER, Conservation Trust, private conservation groups	Pending	5+ years	TBD	USEPA, DNER

REGULATORY AND POLICY NEEDS

There are no regulatory and policy needs for the pilot project. However, modifications may be needed to local development codes and ordinances to encourage changes for other channelized waterbodies.

REFERENCES

Bauzá-Ortega, J. 2015. San Juan Bay Estuary Climate Change Adaptation Plan. San Juan, PR: San Juan Bay Estuary Program.

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., Gonzalez, M., Leinberger, A., Rodríguez, J.L. [Eds.]

CEACC. 2024. Draft Climate Change Mitigation, Adaptation, and Resilience Plan for Puerto Rico. Government of Puerto Rico.

Centeno-Torres, D., Villerael, S.I., Cintrón, I., Ortiz Colón, A., Bauzá, J., Ramírez-Durand, L., Morales-Muñoz, B., and Gaztambide-Arandes, S. 2022. Working Group 4: Communications and Outreach. State of the Climate Report. Puerto Rico Climate Change Council. Díaz, E., Marrero, V., Gonzalez, M., Falcón, M. [Eds.]

Díaz, E., Terando, A., Gould, W., Bowden, J., Chardón, P., Jury, M., Meléndez, M., and Morell, J. 2022. Working Group 1: Geophysical and Chemical Scientific Knowledge. State of the Climate Report. Puerto Rico Climate Change Council. Díaz, E., Gonzalez, M., and Terando, A. [Eds.]

Estuario. 2025. Multijurisdictional Risk Mitigation Plan. Risk Assessment – Natural Events.

Resetar, S.A., Tingstad, A., Mendelsohn, J., Marlier, M.E., Lachman, B.E., Anania, K., Garber, C., Adamson, D.M. 2020. Homeland Security Operational Analysis Center (HSOAC). Recovery Planning for Natural Resources and Parks in Puerto Rico. Natural and Cultural Resources Sector Report, Volume I.

PUBLIC POLICY FOR RESILIENCE-BASED ESTUARINE SYSTEM READINESS

BASELINE

The aftermath of hurricane Maria revealed the urgent need to embed resilience-based estuarine readiness into planning and policy across all levels of government responsible for the SJBE. The hurricane exposed critical vulnerabilities in infrastructure, emergency response systems, and the estuarine ecosystem itself, uncovering significant gaps in preparedness and adaptive capacity. It is clear that the more resilient the SJBE, its infrastructure, and emergency response capabilities are, the faster, more efficient, and cost-effective the recovery will be for the entire watershed. The recent Multijurisdictional Hazard Mitigation Plan documents specific built-environment and population vulnerabilities (including poor and aging building stock concentrated in high-hazard zones) and stresses that these social and infrastructure vulnerabilities will shape recovery times and resource needs after major events (Estuario, 2025). Achieving such resilience demands transparent, honest policy-making that prioritizes long-term sustainability over short-term convenience.

Puerto Rico's coastal population exceeds 400,000 residents, many living in areas that are flood-prone and affected by sea level rise, underscoring the imperative for policy frameworks that emphasize community safety and robust infrastructure (Díaz et al., 2022). Effective policies integrate weather and sea level data into urban planning, land use laws, and infrastructure development to reduce vulnerabilities and enhance adaptive capacity (Aponte-González et al., 2022; FEMA, 2018). Moreover, promoting green building standards and sustainable urban design not only strengthens resilience but also increases the continuity of essential services during extreme weather events (Aponte-González et al., 2022).

A landmark legislative effort addressing these challenges is Puerto Rico's Climate Change Mitigation, Adaptation, and Resilience Act—Law No. 33 of 2019. This law establishes a comprehensive framework to guide the island's public policy on mitigation, adaptation, and resilience by sectors, including the creation of a Committee of Experts tasked with developing actionable plans and measurable goals (2019). The law outlines specific courses of action spanning energy transition, ecosystem restoration, infrastructure improvements, and community engagement, with targets such as increasing renewable energy use, reducing greenhouse gas emissions, and enhancing coastal protections.

Despite the ambitious scope and detailed strategies established by Law No. 33, the Puerto Rican legislature has yet to act decisively to implement its provisions fully. The absence of legislative follow-through creates a critical policy gap, delaying the coordinated response necessary to strengthen the SJBE's resilience. Without the law's full activation and enforcement, the island risks continuing vulnerabilities and missed opportunities to safeguard ecological and social systems against future extreme weather events, environmental stressors, and anthropogenic pressures. This Estuario Plan revision includes actions consistent with this law to increase the resilience of the estuary.

Robust public policy must institutionalize risk management practices by requiring agencies responsible for critical infrastructure and services within the SJBE to adopt risk assessment tools and embed these considerations into their operational frameworks (Aponte-González et al., 2022). Equally important is equipping management and staff with education and training on weather-related risks to strengthen operational readiness and maintain service continuity during emergencies (Aponte-González et al., 2022).

Public engagement remains a cornerstone of effective policy. Law No. 33 emphasizes community consultation and participation, recognizing that inclusive decision-making processes involving local

communities, scientists, and civil society organizations lead to more effective, equitable, and sustainable adaptation strategies (Centeno-Torres et al., 2022; Díaz et al., 2022). Transparent communication and inclusive governance help build trust and social license for adaptation initiatives, which are essential for their success.

Given the multijurisdictional nature of the SJBE, policy frameworks must facilitate coordination among municipal, regional, and federal agencies, alongside non-governmental and academic partners (CEACC, 2024). Cross-sector collaboration allows for comprehensive, coherent approaches that address the estuary's complex ecological, technological, and socio-economic vulnerabilities.

Financing mechanisms embedded within policy are vital to incentivize and sustain resilience-building efforts. Innovative funding strategies—such as public-private partnerships, environmental impact bonds, and dedicated resilience funds—must be developed and expanded to support restoration, infrastructure modernization, and community preparedness (Resetar et al., 2020). Stable, long-term financing reduces reliance on costly reactive disaster responses and fosters proactive resilience.

Finally, adaptive governance models are critical for managing evolving and uncertain risks associated with extreme weather events and human influences. Policies must support flexible, iterative frameworks that incorporate continuous monitoring, scientific advancements, and stakeholder feedback to adjust strategies over time (Resetar et al., 2020). This ensures governance remains responsive and effective amid changing conditions.

In sum, hurricane Maria's legacy offers a powerful lesson: only through honest, integrated, and resilience-focused public policy—fully embraced and enacted by Puerto Rico's legislature—can the SJBE and its communities be prepared to meet the mounting challenges of extreme weather events and anthropogenic pressures. Effective policy must institutionalize the use of updated, high-resolution data sources and enhanced hazard models to guide land use planning, infrastructure development, and emergency preparedness. By incorporating records of recent flood events and intensified hurricane scenarios, such policies ensure alignment with evolving risk realities. A data-driven approach will not only protect lives and livelihoods but also secure the ecological and economic future of the basin.

OBJECTIVES

- Strengthen public policy that supports readiness practices and integrated and resilience-based management of the estuarine system.

ACTIONS

**NEW* AA-09 DEVELOP POLICY GUIDELINES FOR EXTREME WEATHER RESILIENT ESTUARINE MANAGEMENT.*

ACTIVITIES

Activity	Performance Measures	Milestones	Responsible Stakeholder(s) and Partner(s)	Status	Timeframe	Estimated Costs	Potential Funding Sources
1. Identify extreme weather-related changes in the estuary and identify current policy gaps.	Identify vulnerable species, habitats, and communities within the SJBE.	Identified extreme weather-related changes within the SJBE and policy needs.	Leads: Estuario, DNER Implementing partners: Estuario municipalities, scientific community	Pending	3-5 years	TBD	USEPA, DNER
2. Develop and implement policy guidelines that outline strategies for extreme weather-resilient estuarine management.	Make guidelines accessible to stakeholders, including community partners and identify resources for implementation.	Created guidelines that encompass diverse strategies to extreme weather-related risks.	Leads: Estuario, Planning Board of Puerto Rico Implementing partners: DNER, Estuario municipalities, scientific community	Pending	3-5 years	TBD	USEPA, DNER

REGULATORY AND POLICY REQUIREMENTS

None.

**NEW* AA-10 EVALUATE HOW PROPOSED AND EXISTING POLICIES AFFECT COMMUNITIES IN THE SJBE VULNERABLE EXTREME WEATHER EVENTS.*

ACTIVITIES

Activity	Performance Measures	Milestones	Responsible Stakeholder(s) and Partner(s)	Status	Timeframe	Estimated Costs	Potential Funding Sources
1. Identify vulnerable communities in the SJBE watershed.	Analyze community data to identify vulnerable communities.	Determined vulnerable communities.	Lead: Estuario Implementing partners: Estuario municipalities, DNER	Pending	3-5 years	TBD	USEPA
2. Engage with community stakeholders to gather insight into how policies are perceived and experienced.	Increase communication and engagement with stakeholders.	Collected feedback from community stakeholders.	Lead: Estuario Implementing partners: Estuario municipalities, DNER	Pending	0-2 years	TBD	USEPA
3. Develop recommendations for policymakers to implement regarding existing and proposed policies.	Establish clear guidelines for implementing recommendations.	Developed recommendations.	Lead: Estuario Implementing partners: Estuario municipalities, DNER	Pending	3-5 years	TBD	USEPA

REGULATORY AND POLICY REQUIREMENTS

The results of this evaluation will inform the regulatory and policy requirements needed to provide increased resilience for vulnerable communities in the watershed.

**NEW* AA-11 PREPARE A RISK ASSESSMENT FOR THE PROPOSED EXPANDED STUDY AREA.*

ACTIVITIES

Activity	Performance Measures	Milestones	Responsible Stakeholder(s) and Partner(s)	Status	Timeframe	Estimated Costs	Potential Funding Sources
1. Develop and implement a protocol for conducting a risk assessment for the proposed expanded study area.	Improve information on risks in the proposed expanded study area.	Developed a protocol for the risk assessment.	Lead: Estuario Implementing partners: Scientific community, academia, municipalities in the proposed expanded area, DNER	Pending	3-5 years	TBD	USEPA, municipalities in the proposed expanded area, DNER
2. Prepare a report and/or maps highlighting risks in the proposed expanded study area.	Incorporate risk assessment findings into decision-making for the proposed expanded study area.	Provided information on risks for decision-making.	Lead: Estuario Implementing partners: Municipalities in the proposed expanded area, DNER	Pending	3-5 years	TBD	USEPA, municipalities in the proposed expanded area, DNER
3. Develop guidelines for mitigating risks in the proposed expanded study area.	Formulated guidelines.	Coordinated with stakeholders to develop guidelines.	Lead: Estuario Implementing partners: Municipalities in the proposed expanded study area, DNER	Pending	5+ years	TBD	Municipalities in the proposed expanded area, DNER

REGULATORY AND POLICY REQUIREMENTS

The results of the risk assessment will inform regulatory and policy requirements in the future.

REFERENCES

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 Gonzalez, M. [Eds.]

CEACC. 2024. Draft Climate Change Mitigation, Adaptation, and Resilience Plan for Puerto Rico. Government of Puerto Rico.

Centeno-Torres, D., Villerrael, S.I., Cintrón, I., Ortiz Colón, A., Bauzá, J., Ramírez-Durand, L., Morales-Muñoz, B., and Gaztambide-Arandes, S. 2022. Working Group 4: Communications and Outreach. State of the Climate Report. Puerto Rico Climate Change Council. Díaz, E., Marrero, V., Gonzalez, M., Falcón, M. [Eds.]

Díaz, E., Terando, A., Gould, W., Bowden, J., Chardón, P., Jury, M., Meléndez, M., and Morell, J. 2022. Working Group 1: Geophysical and Chemical Scientific Knowledge. State of the Climate Report. Puerto Rico Climate Change Council. Díaz, E., Gonzalez, M., and Terando, A. [Eds.]

Estuario. 2025. Multijurisdictional Risk Mitigation Plan. Risk Assessment – Natural Events.

FEMA. 2018. Mitigation Assessment Team Report: Hurricanes Irma and Maria in Puerto Rico. Building Performance, Observations, Recommendations, and Technical Guidance. October 2018.

Puerto Rico Legislature. 2019. *Law No. 33 of May 22, 2019: Puerto Rico Climate Change Mitigation, Adaptation and Resilience Act*. Government of Puerto Rico.

Resetar, S.A., Tingstad, A., Mendelsohn, J., Marlier, M.E., Lachman, B.E., Anania, K., Garber, C., Adamson, D.M. 2020. Homeland Security Operational Analysis Center (HSOAC). Recovery Planning for Natural Resources and Parks in Puerto Rico. Natural and Cultural Resources Sector Report, Volume I.

Resetar, S.A., Tingstad, A., Mendelsohn, J., Marlier, M.E., Lachman, B.E., Anania, K., Garber, C., Adamson, D.M. 2020. Homeland Security Operational Analysis Center (HSOAC). Recovery Planning for Natural Resources and Parks in Puerto Rico. Natural and Cultural Resources Sector Report, Volume II.