



Análisis de vulnerabilidad y riesgos climáticos para Isla Colón, Bocas del Toro, Panamá

Autor: IHCantabria
15 de septiembre de 2024

LISTADO DE SIGLAS Y ACRÓNIMOS

ACP	Autoridad del Canal de Panamá
AR5	Quinto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático
AR6	Sexto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático
ARAP	Autoridad de Recursos Acuáticos de Panamá
BID	Banco Interamericano para el Desarrollo
BLMM	Bosque Latifoliado Mixto Maduro
CFSR	Climate Forecast System Reanalysis
CTCN	Climate Technology Centre and Network
ECMWF	Centro Europeo de Predicción a Plazo Medio por sus siglas en inglés
EC-WSL	World Sea Levels from the European Commission
ESGF	Earth System Grid Federation
FVC	Fondo Verde para el Clima
GESLA3	Global Extreme Sea Level Analysis
GMC	Global Climate Model
ICES	Iniciativa de Ciudades Emergentes y Sostenibles
IDAAN	Instituto Nacional de Acueductos y Alcantarillados Nacionales
IGNTG	Instituto Geográfico Nacional "Tommy Guardia"
IMHPA	Instituto de Meteorología e Hidrología de Panamá
INEC	Instituto Nacional de Estadística y Censo
IPC	Índice de Precios al Consumo
IPCC	Panel Intergubernamental Cambio Climático por sus siglas en inglés
JAXA	Agencia de Exploración Aeroespacial de Japón por sus siglas en inglés
LULC	Usos y ocupación del suelo
MDT	Modelo Digital del Terreno
MiAMBIENTE	Ministerio de Ambiente de Panamá
MUSD \$	Millón de dólares americanos
NASA	Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio por sus siglas en inglés
NCAR	Centro Nacional de Investigación Atmosférica
NMM	Nivel medio del mar
NOAA	Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de los Estados Unidos por sus siglas en inglés
PAE	Pérdida anual esperada
PMP	Pérdidas máximas probables
PNUMA	Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP en sus siglas en inglés)
RCP	Trayectorias de concentración representativas en sus siglas en inglés
SbN	Soluciones basadas en la Naturaleza

SE	Servicio Ecosistémico
SSP	Trayectorias socioeconómicas compartidas en sus siglas en inglés
STRM	Shuttle Radar Topography Mission
TRMM	Tropical Rainfall Measuring Mission
USD \$	Dólar americano

ÍNDICE

1. RESUMEN EJECUTIVO	1
2. INTRODUCCIÓN	2
3. OBJETIVO	3
4. ÁREA DE ESTUDIO	4
5. METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DEL RIESGO	5
6. DATOS DE PARTIDA	7
6.1. Modelo digital del terreno	7
6.2. Batimetría.....	7
6.3. Cobertura y usos del suelo	8
6.4. Información climática y escenarios de cambio climático.....	9
6.5. Datos socioeconómicos e información urbanística	13
7. EVALUACIÓN DE LOS ECOSISTEMAS CLAVE PARA LA PROVISIÓN DE SERVICIOS A LA CIUDAD.....	14
7.1. Selección de los servicios ecosistémicos y de los ecosistemas que los proporcionan	14
7.2. Selección de los servicios ecosistémicos y de los ecosistemas que los proporcionan	15
7.2.1. Regulación hidrológica frente inundaciones	16
7.2.2. Regulación hidrológica frente sequía.....	16
7.2.3. Protección costera frente a inundaciones por eventos extremos	16
7.3. Evaluación de los ecosistemas seleccionados.....	16
7.3.1. Localización espacial de los ecosistemas definidos	16
7.3.2. Evaluación de los ecosistemas	20
7.4. Identificación de áreas clave con alto potencial para la implementación de SbN.....	29
7.4.1. Conceptualización y caracterización de la relación SE – SbN	29
7.4.2. Modelado e identificación de áreas proveedoras de SE.....	31
8. ESTUDIO DE RIESGO POR ESCASEZ DE RECURSOS HÍDRICOS	40
8.1. Metodología de obtención del riesgo por escasez de recursos hídricos	40
8.2. Caracterización de la amenaza	41
8.2.1. Modelo hidrológico	41
8.2.2. Modelo de gestión de usos del agua	56
8.3. Caracterización de la vulnerabilidad.....	60
8.3.1. Densidad de población.....	61
8.3.2. Población sensible	62
8.3.3. Mujeres	64
8.3.4. Necesidades básicas insatisfechas (NBI).....	65
8.4. Cálculo del riesgo	67
8.4.1. Metodología de obtención del riesgo estandarizado	67
8.4.2. Indicador de riesgo por escasez de recursos hídricos.....	68
9. ESTUDIO DE RIESGO POR INUNDACIÓN COSTERA.....	72
9.1. Marco conceptual	72
9.2. Caracterización de la amenaza	73

9.2.1. Marco metodológico	73
9.2.2. Modelado de la inundación	75
9.2.3. Resultados de la caracterización de la amenaza.....	76
9.3. Caracterización de la exposición.....	78
9.3.1. Exposición física.....	79
9.3.2. Exposición social.....	86
9.4. Caracterización de la vulnerabilidad.....	87
9.4.1. Vulnerabilidad física	87
9.5. Cálculo del riesgo	90
9.5.1. Evaluación de los daños económicos sobre las edificaciones por inundación costera.....	90
9.5.2. Evaluación de los daños sociales por inundación costera.....	93
9.5.3. Evaluación de los daños sobre las infraestructuras críticas	96
10. CONCLUSIONES	100
10.1. Evaluación de los ecosistemas clave para la provisión de servicios a la ciudad.....	100
10.2. Estudio de riesgo por escasez de recursos hídricos.....	100
10.3. Estudio de riesgo por inundación costera	101
11. RECOMENDACIONES	102
12. BIBLIOGRAFÍA	103

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Área de estudio definida para el análisis de vulnerabilidad y riesgo en Bocas del Toro. Fuente: IHCantabria, 2024.	4
Figura 2. Esquema conceptual del Quinto Informe de Evaluación - IE5 del IPCC. Fuente: IPPC, 2014.	5
Figura 3. Modelo Digital del Terreno (MDT) de Panamá facilitado por el IGNTG, y utilizado para el modelado de la inundación costera.	7
Figura 4. Datos batimétricos utilizados. (Izquierda) Base de datos Global de GEBCO (2021) y (derecha) batimetría regional procedente del proyecto de Evaluación de Ecorregiones marinas en Mesoamérica (TNC, 2008).	8
Figura 5. Mapa de cobertura y usos del suelo 2021 de MiAMBIENTE. Fuente: IHCantabria, 2024.....	8
Figura 6. Localización de las estaciones meteorológicas utilizadas en el estudio. Fuente: IHCantabria, 2024.	10
Figura 7. Variables topográficas (elevación/modelo digital del terreno, orientación de laderas, pendiente, distancia a la costa y distancia a cauces fluviales). Fuente: IHCantabria, 2024.	11
Figura 8. Mapa de usos y coberturas del suelo de bosque latifoliado mixto maduro y bosque de manglar para la cuenca drenante de Isla Colón, Bocas del Toro. Fuente: MiAMBIENTE, 2021.	17
Figura 9. Mapa de bosque de manglar para la ciudad de Bocas del Toro. Fuente: MiAMBIENTE, 2021.	18
Figura 10. Mapa de unidades funcionales (laderas de drenaje y llanuras de inundación) para la cuenca drenante de Isla Colón, Bocas del Toro. Fuente: IHCantabria, 2024.	19
Figura 11. Esquema resumen de algoritmo RF y proceso <i>bagging</i> . Fuente: (Espinosa-Zuñiga, 2020).	20
Figura 12. Mapa de idoneidad del bosque latifoliado mixto maduro para la situación actual para la cuenca drenante de Isla Colón, Bocas del Toro. Fuente: IHCantabria, 2024.	22
Figura 13. Mapa de idoneidad del bosque latifoliado mixto maduro para el escenario futuro SSP585 2050 para la cuenca drenante de Isla Colón, Bocas del Toro. Fuente: IHCantabria, 2024.	23
Figura 14. Mapa de idoneidad del bosque de manglar para la situación actual en la ciudad de Bocas del Toro. Fuente: IHCantabria, 2024.	24

Figura 15. Mapa de idoneidad del bosque de manglar para el escenario futuro SSP585 2050 para la ciudad de Bocas del Toro. Fuente: IHCantabria, 2024.....	25
Figura 16. EVI promedio en el año 2001 para la cuenca drenante de Isla Colón, Bocas del Toro. Fuente: IHCantabria, 2024.....	26
Figura 17. NDVI promedio en el año 2023 para la cuenca drenante de Isla Colón, Bocas del Toro. Fuente: IHCantabria, 2024.....	27
Figura 18. Árbol de decisiones para clasificación de las coberturas vegetales en: i) conservación pasiva (C1); ii) conservación activa (C2); iii) restauración activa (R1) y restauración intensiva (R2). Fuente: IHCantabria, 2024.....	28
Figura 19. Áreas de conservación (pasiva y activa) y restauración (activa e intensiva) para la cobertura bosque latifoliado mixto maduro en el escenario futuro SSP545 2050 en la cuenca drenante de Isla Colón, Bocas del Toro. Fuente: IHCantabria, 2024.....	28
Figura 20. Esquema metodológico para la categorización del bosque de mangle en SbN.....	29
Figura 21. Mapa de SbN propuestas con bosque latifoliado mixto maduro para el SE de regulación hidrológica frente inundaciones en llanuras de inundación para la cuenca drenante de Bocas de Toro en el escenario futuro SS585 2050. Fuente: IHCantabria, 2024.....	33
Figura 22. Laderas de drenaje con potencial de generar escorrentía según factores topográficos, de permeabilidad y de uso para la cuenca drenante de Isla Colón, Bocas del Toro. Fuente: IHCantabria, 2024.....	34
Figura 23. Mapa de SbN propuestas con bosque latifoliado mixto maduro para el SE de regulación hidrológica en laderas de drenaje para el control de escorrentía en la cuenca drenante de Colón en el escenario futuro SSP585 2050. Fuente: IHCantabria, 2024.....	35
Figura 24. Mapa de llanuras de inundación para la cuenca drenante de Isla Colón, Bocas del Toro. Fuente: IHCantabria, 2024.....	36
Figura 25. Laderas de drenaje con potencial de generar infiltración según factores topográficos, de permeabilidad y de uso para la cuenca drenante de Isla Colón, Bocas del Toro. Fuente: IHCantabria, 2024, 2024.....	37
Figura 26. Mapa de SbN propuestas con bosque latifoliado mixto maduro para el SE de regulación hidrológica en laderas de drenaje para el aumento de la infiltración en la cuenca drenante de Colón en el escenario futuro SSP585 2050. Fuente: IHCantabria, 2024.....	38
Figura 27. Mapa de propuesta de SbN basadas en medidas de conservación y recuperación del bosque de mangle para la ciudad de Bocas del Toro. Fuente: IHCantabria, 2024.....	39
Figura 28. Comparación de caudales diarios medidos y simulados en escala logarítmica (izquierda) y caudales medidos vs. simulados en escala semilogarítmica (derecha) en la estación Peluca. Fuente: IHCantabria, 2015.....	42
Figura 29. Cuencas hidrográficas oficiales existentes en el territorio de Panamá y su nomenclatura. Fuente: IHCantabria, 2024.....	42
Figura 30. Subcuencas consideradas en el territorio de Panamá. Fuente: IHCantabria, 2024.....	43
Figura 31. Cuenca de estudio, Big Creek. Fuente: IHCantabria, 2024.....	44
Figura 32. Usos del suelo de la cuenca de estudio, cuenca del Big Creek. Fuente: IHCantabria, 2024.....	45
Figura 33. Número de curva (CN-II) de la cuenca de estudio, cuenca del Big Creek. Fuente: IHCantabria, 2024.....	46
Figura 34. Precipitación media anual (mm/año) en la cuenca del Big Creek para la situación actual y para los escenarios de cambio climático SSP 585 2030 y 2050. Fuente: IHCantabria, 2024.....	47
Figura 35. ETP media anual (mm/año) en la cuenca del Big Creek para la situación actual y para los escenarios de cambio climático SSP 585 2030 y 2050. Fuente: IHCantabria, 2024.....	47
Figura 36. Estaciones hidrológicas consideradas. Fuente: IHCantabria, 2024.....	50
Figura 37. Regiones hidrológicamente homogéneas (en blanco aparecen las cuencas sin aforos). Fuente: Resumen técnico análisis regional de crecidas máximas de Panamá, periodo 1971-2006 (ETESA, 2008).....	51
Figura 38. Caudales medios específicos (izquierda) y totales (derecha) observados (eje X) y simulados (eje Y). Fuente: IHCantabria, 2024.....	52
Figura 39. Comparación de caudales Q2.33 observados, simulados, y los ajustes del régimen extremal disponibles por fachadas. Fuente: IHCantabria, 2024.....	53
Figura 40. Caudales Q2.33 específicos (izquierda) y totales (derecha) observados (eje X) y simulados (eje Y). Fuente: IHCantabria, 2024.....	54
Figura 41. Caudal medio (m ³ /s) en la cuenca del Big Creek para la situación actual y para los escenarios de cambio climático SSP 585 2030 y 2050. Fuente: IHCantabria, 2024.....	54

Figura 42. Serie mensual de precipitación (mm/mes) en la cuenca Big Creek para la situación actual. Fuente: IHCantabria, 2024.....	55
Figura 43. Serie mensual de caudales naturales (m ³ /s) en la cuenca Big Creek para la situación actual. Fuente: IHCantabria, 2024.....	56
Figura 44. Boxplot de precipitación (mm/mes) y caudales naturales (m ³ /s) en la cuenca Big Creek para la situación actual. Fuente: IHCantabria, 2024.....	56
Figura 45. Esquema de funcionamiento del modelo de gestión del agua. Fuente: IHCantabria, 2024.....	57
Figura 46. Localización de la planta potabilizadora de Bocas del Toro, toma de agua, red de tuberías y tipo de área servida. Fuente: IHCantabria, 2024.....	58
Figura 47. Serie mensual de caudales naturales y modificados (m ³ /s) en la cuenca Big Creek para la situación actual. Fuente: IHCantabria, 2024.....	59
Figura 48. Boxplot de caudales naturales y modificados (m ³ /s) en la cuenca del Big Creek, para la situación actual. Fuente: IHCantabria, 2024.....	59
Figura 49. Densidad de población en el área de estudio. Fuente: IHCantabria, 2024, con información del Censo de 2023.....	62
Figura 50. Porcentaje de población sensible en el área de estudio. Fuente: IHCantabria, 2024, con información del Censo de 2023.....	63
Figura 51. Porcentaje de mujeres en el área de estudio. Fuente: IHCantabria, 2024, con información del Censo de 2023.....	65
Figura 52. Índice agregado de NBI en el área de estudio. Fuente: IHCantabria, 2024, con información del Censo de 2023.....	67
Figura 53. Riesgo por escasez de recursos hídricos en el área de estudio para la situación actual. Fuente: IHCantabria, 2024.....	69
Figura 54. Riesgo por escasez de recursos hídricos en el área de estudio para el horizonte 2030 SSP585. Fuente: IHCantabria, 2024.....	70
Figura 55. Riesgo por escasez de recursos hídricos en el área de estudio para el horizonte 2050 SSP585. Fuente: IHCantabria, 2024.....	71
Figura 56. Representación esquemática del proceso de integración espacial de las componentes del riesgo para la obtención de los daños. Fuente: IHCantabria, 2024.....	72
Figura 57. Esquema de la metodología seguida para el desarrollo de la amenaza del riesgo por inundación costera. Fuente: IHCantabria, 2024.....	75
Figura 58. Mapa del impacto de inundación costera para un evento extremo de 100 años de periodo de retorno en el escenario histórico. Fuente: IHCantabria, 2024.....	77
Figura 59. Mapa del impacto de inundación costera para un evento extremo de 100 años de periodo de retorno (percentil del 95%) en el horizonte 2050 para el escenario de emisiones SSP5-8.5.....	78
Figura 60. Distribución de la superficie edificada y la población según categorías de calidad constructiva. Fuente: IHCantabria, 2024.....	81
Figura 61. Distribución geográfica de la calidad constructiva de las edificaciones residenciales. Fuente: IHCantabria, 2024.....	82
Figura 62. Distribución geográfica de la calidad constructiva de las edificaciones residenciales. Fuente: IHCantabria, 2024.....	84
Figura 63. Infraestructuras críticas del área de estudio por categoría. Fuente: IHCantabria, 2024.....	85
Figura 64. Distribución geográfica de la densidad de población en el área de estudio. Fuente: IHCantabria, 2024.....	87
Figura 65. Funciones de daño para calcular los riesgos de inundación. Fuente: IHCantabria, 2024.....	89
Figura 66. Funciones de daño para infraestructuras críticas de tipo I, II y III. Fuente: IHCantabria, 2024.....	90
Figura 67. Resumen gráfico de los resultados de daños económicos (millones de dólares, MUSD \$) por inundación costera en edificaciones. Fuente: IHCantabria, 2024.....	91
Figura 68. Mapa de los daños económicos sobre las edificaciones por inundación costera para un evento extremo de 100 años de periodo de retorno en el escenario histórico. Fuente: IHCantabria, 2024.....	92
Figura 69. Mapa de los daños económicos sobre las edificaciones por inundación costera para un evento extremo de 100 años de periodo de retorno (percentil del 95%) en el horizonte 2050 para el escenario de emisiones SSP5-8.5. Fuente: IHCantabria, 2024.....	93
Figura 70. Resumen gráfico de los resultados de daños sociales (número de personas) por inundación costera. Fuente: IHCantabria, 2024.....	94
Figura 71. Mapa de los daños sociales sobre la población por inundación costera para un evento extremo de 100 años de periodo de retorno en el escenario histórico. Fuente: IHCantabria, 2024.....	95

Figura 72. Mapa de los daños sociales sobre la población por inundación costera para un evento extremo de 100 años de periodo de retorno (percentil del 95%) en el horizonte 2050 para el escenario de emisiones SSP5-8.5. Fuente: IHCantabria, 2024.	96
Figura 73. Resumen gráfico de los resultados de daños económicos (millones de dólares, MUSD \$) por inundación costera en las infraestructuras. Fuente: IHCantabria, 2024.	97
Figura 74. Mapa de los daños económicos sobre las infraestructuras críticas por inundación costera para un evento extremo de 100 años de periodo de retorno en el escenario histórico. Fuente: IHCantabria, 2024.	98
Figura 75. Mapa de los daños económicos sobre las infraestructuras críticas por inundación costera para un evento extremo de 100 años de periodo de retorno (percentil del 95%) en el horizonte 2050 para el escenario de emisiones SSP5-8.5. Fuente: IHCantabria, 2024.	99

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Descripción de las combinaciones de trayectorias socioeconómicas compartidas (SSPs) y trayectorias de concentración representativas (RCPs). Fuente: IHCantabria, 2024, con información del IPPC, 2021.	9
Tabla 2. Características de los 6 mareógrafos disponibles en Panamá.	12
Tabla 3. Conceptualización de las medidas de adaptación basadas en Naturaleza para los servicios ecosistémicos considerados para la ciudad de Bocas del Toro. Fuente: IHCantabria, 2024.	30
Tabla 4. Características principales de la cuenca de estudio, cuenca del Big Creek. Fuente: IHCantabria, 2024.	44
Tabla 5. Número de curva asignado por uso del suelo. Fuente: IHCantabria, 2024.	46
Tabla 6. Ecuaciones para la obtención del Q _{máx} (promedio de las crecidas anuales equivalente al Q2.33) según región hidrológicamente homogénea. Fuente: Resumen técnico análisis regional de crecidas máximas periodo 1971-2006 (ETESA, 2008).	53
Tabla 7. Resultados del modelo en la cuenca del Big Creek para la situación actual y los escenarios SSP 585 2030 y 2050. Fuente: IHCantabria, 2024.	55
Tabla 8. Demandas de agua para consumo humano en la cuenca del Big Creek. Fuente: IHCantabria, 2024.	58
Tabla 9. Resultados del modelo de gestión en la cuenca del Big Creek para la situación actual y los escenarios SSP 585 2030 y 2050. Fuente: IHCantabria, 2024.	60
Tabla 10. Déficit hídrico para consumo humano en la planta potabilizadora de Bocas del Toro para la situación actual y los escenarios SSP 585 2030 y 2050. Fuente: IHCantabria, 2024.	60
Tabla 11. Variables y pesos que componen el índice agregado de NBI para los hogares del área de estudio. Fuente: IHCantabria, 2024, con información del Censo de 2023.	66
Tabla 12. Niveles de riesgo considerados. Fuente: IHCantabria, 2024.	68
Tabla 13. Indicadores de amenaza y vulnerabilidad frente a la escasez de recursos hídricos. Fuente: IHCantabria, 2024.	68
Tabla 14. Distribución de área y población según categoría de calidad constructiva de las edificaciones. Fuente: IHCantabria, 2024.	81
Tabla 15. Valores de reposición según calidad constructiva, y valor total en millones de dólares (MUSD \$), de las edificaciones residenciales inventariadas. Fuente: IHCantabria, 2024.	83
Tabla 16. Inventario de infraestructuras críticas del área de estudio. Fuente: IHCantabria, 2024.	84
Tabla 17. Valores de reposición según categoría, y valor total en millones de dólares (MUSD \$), para las infraestructuras críticas del área de estudio. Fuente: IHCantabria, 2024.	86
Tabla 18. Funciones de daño en función de la calidad constructiva de las edificaciones. Fuente: IHCantabria, 2024.	88
Tabla 19. Funciones de daño para las diferentes categorías de infraestructuras críticas. Fuente: IHCantabria, 2024.	89
Tabla 20. Resultados de daños económicos (millones de dólares, MUSD \$) por inundación costera en edificaciones. Fuente: IHCantabria, 2024.	91
Tabla 21. Resultados de daños sociales (número de personas) por inundación costera. Fuente: IHCantabria, 2024.	94
Tabla 22. Resultados de daños económicos (millones de dólares, MUSD \$) por inundación costera en las infraestructuras. Fuente: IHCantabria, 2024.	97

1. RESUMEN EJECUTIVO

El presente documento, elaborado en el marco del proyecto Nature4Cities (N4C) liderado por el Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), analiza la vulnerabilidad y el riesgo climático en Isla Colón, Bocas del Toro, Panamá. Este proyecto busca implementar Soluciones basadas en la Naturaleza (SbN) como herramientas para reducir riesgos asociados al cambio climático y fomentar la sostenibilidad en áreas urbanas. El enfoque está en integrar estas soluciones en la planificación territorial, fortaleciendo las capacidades locales y promoviendo la co-creación de conocimiento con actores clave. Isla Colón, la isla principal del archipiélago de Bocas del Toro, es un importante destino turístico reconocido por sus playas, arrecifes de coral y biodiversidad marina. Su capital, Bocas del Toro, combina actividades turísticas con pesca y comercio local. Los ecosistemas clave de la isla, como manglares, bosques costeros y arrecifes, desempeñan un papel esencial en la protección contra la erosión, la regulación hídrica y la conservación de la biodiversidad. Además, estos ecosistemas contribuyen al equilibrio ambiental y sustentan la economía local, especialmente en sectores como el ecoturismo y la pesca sostenible.

El análisis identifica las principales amenazas hidroclimáticas para Isla Colón: escasez de recursos hídricos e inundaciones costeras, evaluadas desde el presente hasta escenarios futuros con cambio climático. En cuanto al riesgo de escasez de recursos hídricos, la situación actual en Isla Colón muestra un riesgo bajo a medio, debido a la insuficiente capacidad de la planta de tratamiento para abastecer la alta demanda, especialmente en temporada turística. Aunque el recurso superficial del Big Creek es suficiente, la planta enfrenta limitaciones operativas, como la dependencia de diésel para los pozos que también la abastecen de agua, lo que afecta la continuidad del suministro. Para los horizontes 2030 y 2050, el riesgo de escasez aumentará debido a la disminución de precipitaciones y el incremento de temperaturas, afectando aún más la disponibilidad de agua en la región.

El análisis de riesgos por inundación costera en Bocas del Toro indica que las zonas más vulnerables incluyen el área del aeropuerto, Isla Carenero y la franja costera de Big Creek. En un evento de 100 años, los daños económicos actuales se estiman en 23 millones de dólares, afectando a unas 7747 personas. Para 2050, se espera un aumento significativo de estos daños debido al cambio climático, con pérdidas de 28 millones de dólares, para un evento de la misma probabilidad de ocurrencia.

Es fundamental implementar SbN que integren medidas estructurales y no estructurales para gestionar los riesgos climáticos. Estas soluciones no solo permiten abordar amenazas específicas, sino que también aportan beneficios múltiples, como la mejora de la calidad del agua, la regulación de la temperatura urbana y la creación de espacios verdes para la población. La evaluación de los ecosistemas clave en el área de Bocas del Toro resalta la importancia del bosque latifoliado mixto maduro y los manglares para la provisión de servicios ecosistémicos esenciales. El primero, fundamental para la regulación hidrológica, contribuye a la reducción de la escorrentía y la recarga de acuíferos, siendo necesario implementar medidas de conservación, restauración y reforestación para mejorar su efectividad en la mitigación de inundaciones y sequías. Además, más del 30% de este bosque controla la escorrentía y cerca del 50% contribuye al almacenamiento de agua, con una importante proporción destinado a conservación pasiva. Los manglares, por su parte, son cruciales para la protección costera, mitigando los efectos de eventos meteorológicos extremos y la erosión costera, lo que refuerza la necesidad de su conservación en un contexto de cambio climático.

2. INTRODUCCIÓN

Esta evaluación se realiza en el marco del proyecto Nature4Cities, implementado por el Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), financiado por el Fondo Verde para el Clima (FVC) y cofinanciado por el programa de la Unión Europea Euroclima+. Este proyecto regional, implementado en Bocas del Toro y en otras 12 ciudades de la región, tiene por objetivo reducir la vulnerabilidad al cambio climático de las áreas urbanas a través de Soluciones basadas en la Naturaleza (SbN).

Para lograr este propósito, es necesario un proceso participativo que permita la co-creación de conocimientos y así facilitar la incorporación de todos los actores y las actoras en el proceso de diagnóstico de los riesgos climáticos, exploración de soluciones y selección de las SbN a implementar. De esta manera se puede apoyar la toma de decisiones en las ciudades a través de la integración de la vulnerabilidad y riesgos en la planificación urbana para asegurar el escalonamiento de las SbN y sus múltiples co-beneficios vinculados al buen uso de los ecosistemas urbanos y periurbanos.

En este contexto, el objetivo de la evaluación es identificar, en función de las problemáticas urbanas, los principales riesgos e impactos climáticos para poder seleccionar puntos, áreas y grupos críticos para la acción. Así se podrá conocer la exposición y la sensibilidad de las personas y grupos sociales, de las infraestructuras y de los servicios de los ecosistemas. Esta evaluación debe ser realizada sobre la base de los datos e información existente en cada ciudad, tanto de los riesgos e impactos climáticos actuales como futuros y debe ser espacialmente explícita y sensible a la variable género. Además, debe cubrir las zonas urbanas, peri-urbanas, rurales y las cuencas de las ciudades para así poder identificar las causas de los peligros y las consecuencias de los impactos sociales, ambientales y económicos.

El principal objetivo que se busca con este tipo de evaluaciones es el de disponer de información útil para la exploración e identificación de las SbN, el conocimiento de las escalas y niveles de decisión implicados y como insumo para el intercambio y validación de la definición, implementación e integración de SbN en el contexto de la ciudad. No se trata de realizar nuevos diagnósticos, sino más bien poner a disposición de todas las personas e instituciones involucradas la información existente y aquella que es necesaria para la integración de la vulnerabilidad y los riesgos climáticos en el ordenamiento urbano y la toma de decisiones.

La evaluación está dirigida principalmente a personal técnico, asesores y consultores de los gobiernos locales y otros actores clave a nivel de la ciudad tanto del sector público, la sociedad civil y el sector privado. Al mismo tiempo, los métodos y hallazgos de la evaluación tratan de integrar y asegurar sinergias con otras iniciativas existentes en las ciudades. Además, a nivel local y nacional, los gobiernos e instituciones, se pueden beneficiar para mejorar y crear capacidad e integrar las metodologías y hallazgos para su replicación y escalamiento a otras ciudades.

3. OBJETIVO

Tomando como referencia los enfoques planteados por el Proyecto Nature4Cities, así como los lineamientos de la gestión de cambio climático en Panamá, y las necesidades y capacidades locales, se plantean los siguientes objetivos generales para el análisis de vulnerabilidad y riesgo climáticos, en el marco de un proceso de consulta con los actores del grupo de trabajo de esta iniciativa:

- Identificar información que aporte al conocimiento sobre la vulnerabilidad y el riesgo de cambio climático en Bocas del Toro, mediante una articulación nacional y local, y generar criterios para las capacidades institucionales y los procesos de planificación territorial.
- Identificar los puntos o áreas que destacan por su alto nivel de riesgo dada su exposición y su sensibilidad socioeconómica ante las amenazas hidroclimáticas que se manifiestan como eventos dañinos exacerbados por el efecto del cambio climático, señalando las áreas, los grupos de población e infraestructuras críticas que implican la necesidad de acciones de SbN.

Para la consecución de estos objetivos generales se establecen, a su vez, los siguientes objetivos específicos:

- Conocer las amenazas hidroclimáticas actuales y futuras que impactan en los sistemas de interés considerados por el proyecto (población, viviendas e infraestructuras críticas) como resultado del análisis del clima del pasado, actual y futuro (proyecciones de cambio climático).
- Identificar y evaluar cuándo y dónde ocurren los impactos de la variabilidad climática y el cambio climático.
- Identificar áreas, grupos sociales e infraestructuras vulnerables a los impactos climáticos y las causas de su vulnerabilidad.
- Conocer las principales medidas y acciones estructurales y no estructurales llevadas a cabo en la ciudad con el objetivo de adaptarse a los impactos climáticos.
- Conocer cuáles son los mecanismos generadores de riesgo a través de la visualización de la cadena de impactos para cada riesgo considerado.
- Obtener una cartografía de riesgos (mapas de amenaza, de vulnerabilidad y de riesgos) que permitan obtener una comprensión de la situación de riesgo climático actual y futuro de forma rápida y sencilla.
- Seleccionar y evaluar los ecosistemas y determinar el servicio ecosistémico que ayuda a la adaptación al cambio climático.
- Identificar áreas proveedoras de los servicios ecosistémicos clave con alto potencial para la implementación de SbN.

4. ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio para el análisis de vulnerabilidad y riesgos climáticos, situada en el distrito de Bocas del Toro, comprende los corregimientos de Bocas del Toro y Bocas del Drago ubicados en Isla Colón y Carenero (Figura 1). Este área tiene una extensión de 61 ha y una población, según el censo nacional de 2023, de 9,181 habitantes.



Figura 1. Área de estudio definida para el análisis de vulnerabilidad y riesgo en Bocas del Toro. Fuente: IHCantabria, 2024.

5. METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DEL RIESGO

Para recopilar los datos necesarios para la realización del análisis de vulnerabilidad, se ha usado un enfoque que combina tanto métodos cuantitativos, incluyendo modelos y escenarios climáticos, cartografía y sistemas de información geográfica, como enfoques socio-geográficos, complementados con consultas a la comunidad a través de los grupos de actores clave y de entrevistas al personal e instituciones del gobierno local.

La evaluación del riesgo frente al cambio climático se ha realizado con el enfoque propuesto por el Grupo Intergubernamental de Cambio Climático en su quinto informe de evaluación (IPCC, 2014), contemplando el riesgo como el resultado de la interacción de la amenaza, la exposición y la vulnerabilidad (Figura 7).

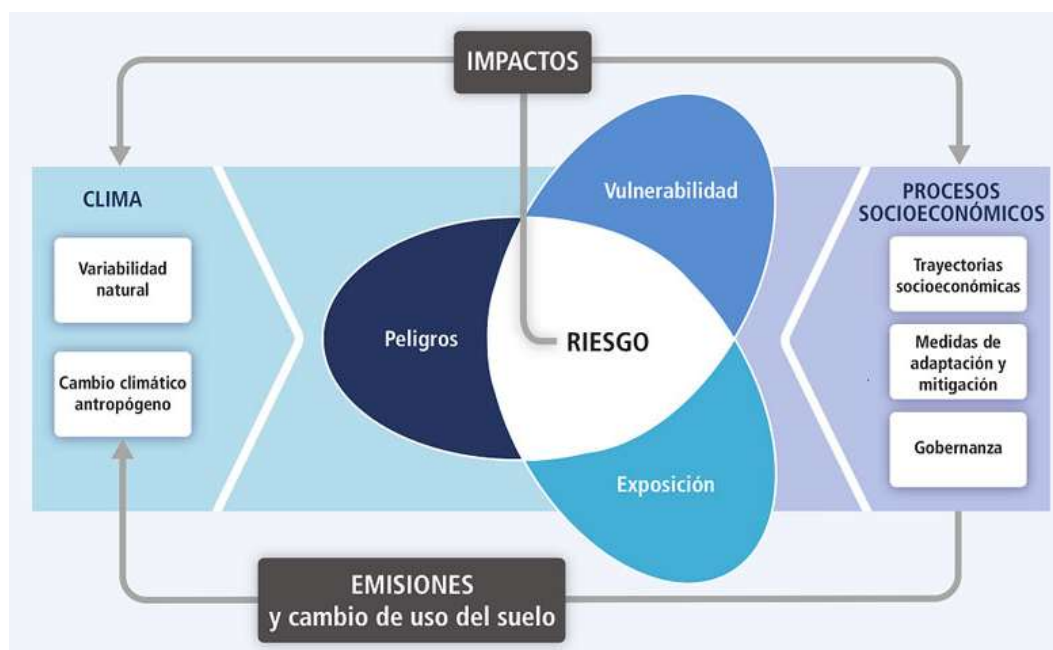


Figura 2. Esquema conceptual del Quinto Informe de Evaluación - IE5 del IPCC. Fuente: IPCC, 2014.

Este estudio aborda el concepto del riesgo desde una perspectiva integral, y lo concibe como la confluencia espacial y temporal de eventos peligrosos actuando sobre infraestructura y personas expuestas en condiciones de vulnerabilidad.

Ello implica que no basta solamente con la ocurrencia de un evento peligroso o dañino para hablar de riesgos, sino que debe incluir, además, el análisis de infraestructura y población expuesta y que la misma presente condiciones de vulnerabilidad.

Definición de Riesgo

El IPCC define el riesgo como el potencial de consecuencias adversas sobre la vida, la salud, los medios de subsistencia, los activos económicos, sociales y culturales, los servicios ambientales y los sistemas naturales debido a eventos peligrosos (incluidos aquellos relacionados con el clima) o tendencias de cambio. El riesgo se evalúa en función de tres componentes clave: peligro, exposición y vulnerabilidad.

Componentes del Riesgo

- Peligro/Amenaza: Se refiere a la posible ocurrencia de eventos físicos, como fenómenos meteorológicos extremos, incremento del nivel del mar, o cambios de temperatura y precipitación. Los peligros pueden ser naturales o inducidos por la actividad humana.
- Exposición: Involucra la presencia de personas, medios de vida, especies o ecosistemas, servicios ambientales, recursos, infraestructura o bienes económicos, sociales o culturales en lugares que podrían verse afectados negativamente por los peligros climáticos.
- Vulnerabilidad: Se refiere a la propensión o predisposición de los sistemas expuestos a sufrir daños. La vulnerabilidad depende de factores sociales, económicos, ambientales e institucionales, que pueden incrementar o disminuir la susceptibilidad al daño. A su vez, la vulnerabilidad tiene dos componentes, la sensibilidad (factores intrínsecos del sistema de interés que afectan la forma de enfrentar el impacto de una amenaza) y la capacidad de adaptación (habilidad de la sociedad).

Los cambios en el sistema climático (variabilidad natural y cambio climático antropogénico) y las trayectorias socioeconómicas, la adaptación y mitigación y la gobernanza, son impulsores de amenazas, exposición y vulnerabilidad.

El IPCC también enfatiza la importancia de abordar la equidad, la justicia social y la sostenibilidad en la evaluación y gestión del riesgo climático. Esto incluye reconocer las disparidades en la vulnerabilidad y la capacidad de adaptación entre diferentes regiones, comunidades y grupos socioeconómicos.

6. DATOS DE PARTIDA

6.1. Modelo digital del terreno

El Modelo Digital del Terreno (MDT) de Panamá utilizado en el modelado del impacto de inundación costera y la evaluación de los ecosistemas es el facilitado por el Instituto Geográfico Nacional Tommy Guardia (IGNTG) de Panamá. Tiene una resolución horizontal de 5 m, sin precisión decimal en los valores de elevación (valor Z). La referencia espacial utilizada es el Datum World Geodetic System de 1984 (WGS 84), utilizando la Proyección Universal Transversal de Mercator (UTM) y en Zona 17 Norte. (Figura 3).

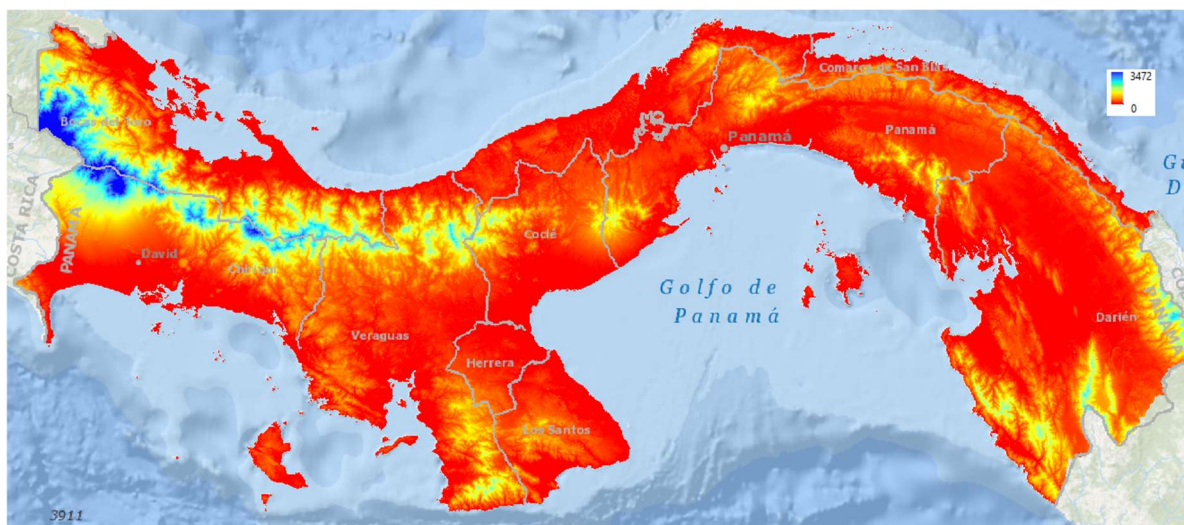


Figura 3. Modelo Digital del Terreno (MDT) de Panamá facilitado por el IGNTG, y utilizado para el modelado de la inundación costera.

6.2. Batimetría

Para modelar correctamente las variaciones en el nivel del mar, así como la evolución del oleaje en zonas costeras debido a los procesos de asomeramiento, refracción y rotura, es muy importante representar de forma fiable la batimetría de la zona de estudio.

Se ha integrado información batimétrica de diferentes fuentes, las cuales están referidas al nivel medio del mar (NMM). Estas fuentes son dos:

- Base de datos global GEBCO 2021 (Beker et al., 2009): Esta base de datos tiene una cobertura global y una resolución espacial de 15 arco-segundos (~460 m). Contiene información no sólo de la profundidad, sino también de la elevación sobre la tierra y sobre el hielo. Combina distintas fuentes de datos desde medidas directas, tales como datos de sondas monohaz y multihaz, sensores lidar, sensores ópticos, etc.; y medidas indirectas, como datos recogidos mediante vuelos aéreos, de satélite, de cartas náuticas, datos interpolados, etc.
- Información batimétrica procedente del proyecto de “Evaluación de Ecorregiones marinas en Mesoamérica” (TNC, 2008): esta base de datos contiene información batimétrica y de la línea de costa para ambas costas panameñas. Estas batimetrías proceden de la digitalización de cartas náuticas (1:25,000 a 1:300,000), combinado con el resto de información cartográfica disponible en la región.

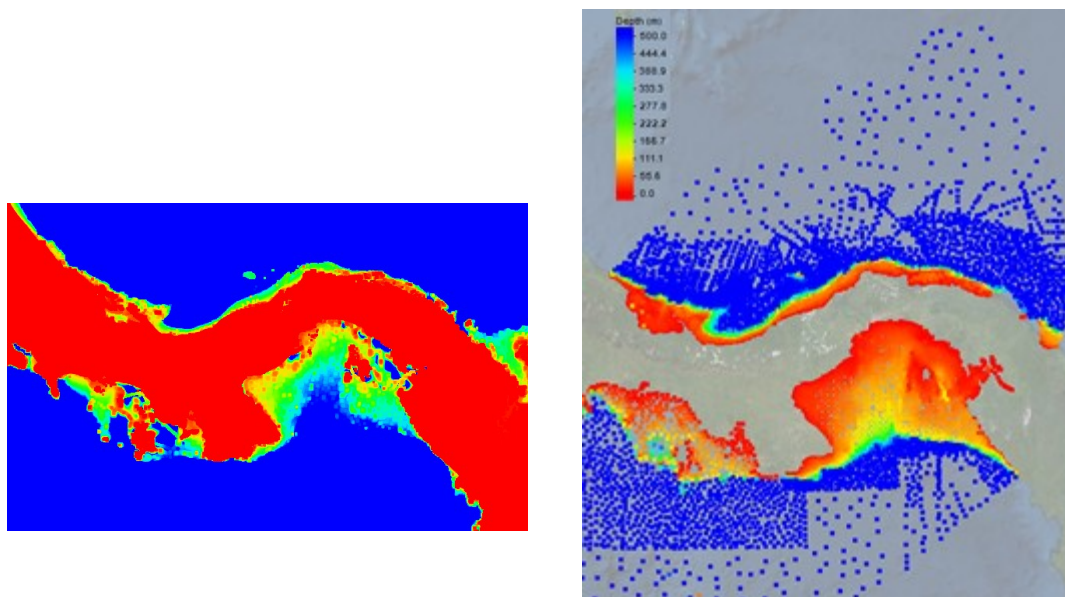


Figura 4. Datos batimétricos utilizados. (Izquierda) Base de datos Global de GEBCO (2021) y (derecha) batimetría regional procedente del proyecto de Evaluación de Ecorregiones marinas en Mesoamérica (TNC, 2008).

6.3. Cobertura y usos del suelo

Se dispone del mapa de cobertura y usos del suelo de la República de Panamá de 2021 del Ministerio de Ambiente. Este producto se utiliza con diferentes objetivos en los análisis de riesgos y evaluación de ecosistemas.

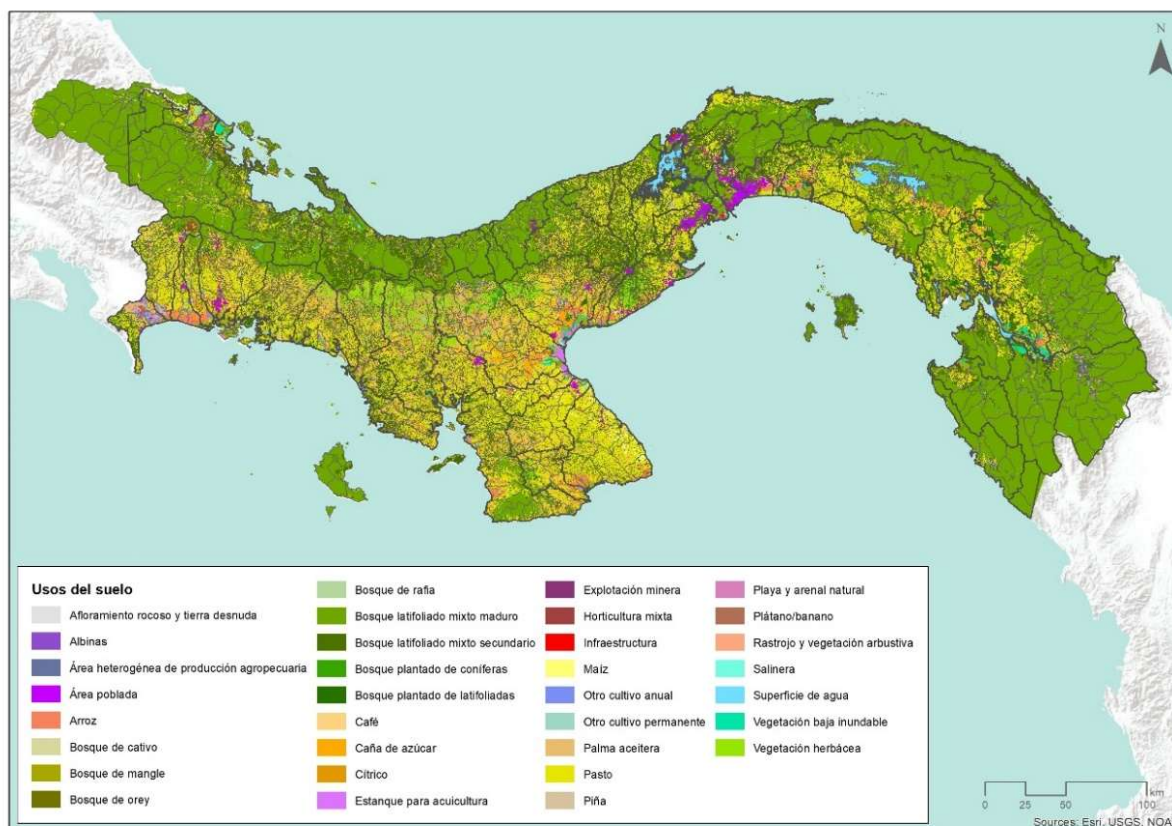


Figura 5. Mapa de cobertura y usos del suelo 2021 de MiAMBIENTE. Fuente: IHCantabria, 2024.

6.4. Información climática y escenarios de cambio climático

Ante la incertidumbre y la falta de capacidad para asignar probabilidades a los cambios que pueden producirse en el futuro, los escenarios de cambio climático permiten explorar futuros posibles. Para que este estudio se encuentre en consonancia con la información más avanzada en materia de cambio climático, se ha hecho uso de la última información publicada en el Sexto Informe del IPCC (AR6). En dicho informe, a diferencia de lo que sucedió en el AR5, los RCPs (trayectorias de concentración representativas) se integran con los SSPs (las trayectorias socioeconómicas compartidas) para combinar el desarrollo socioeconómico con las emisiones. La Tabla 1 recoge un resumen sobre las combinaciones más utilizadas, una descripción breve y una descripción general más detallada.

SSP	DESCRIPCIÓN BREVE	DESCRIPCIÓN GENERAL
SSP1-1.9	Más optimista: 1.5°C en 2050	Escenario más optimista del IPCC. Las emisiones globales de CO ₂ se reducen a cero en torno a 2050. Las sociedades cambian a prácticas más sostenibles, pasando del crecimiento económico al bienestar general. Los fenómenos meteorológicos extremos son más frecuentes, pero el mundo ha esquivado los peores impactos del cambio climático. <u>Único que cumple con el objetivo del Acuerdo de París</u> de mantener el calentamiento global en torno a 1.5°C por encima de las temperaturas preindustriales. Se alcanza los 1.5°C pero que luego desciende y se estabiliza en torno a los 1.4°C a finales de siglo.
SSP1-2.6	Siguiente mejor: 1.8°C en 2100	En el siguiente mejor escenario, las emisiones globales de CO ₂ se reducen drásticamente, pero no tan rápidamente, alcanzando el cero emisiones después de 2050. Cambios socioeconómicos hacia la sostenibilidad equivalentes a SSP1-1.9. Las temperaturas se estabilizan en torno a 1.8°C por encima de las preindustriales a finales de siglo.
SSP2-4.5	Intermedio: 2.7°C en 2100	Escenario "intermedio". Las emisiones de CO ₂ rondan los <u>niveles actuales</u> antes de empezar a descender a mediados de siglo, pero no llegan a cero en 2100. Los factores socioeconómicos siguen sus tendencias históricas, sin cambios notables. El progreso hacia la sostenibilidad es lento, y el desarrollo y la renta crecen de forma desigual. En este escenario, las temperaturas aumentan 2.7°C a finales de siglo.
SSP3-7.0	Peligroso: 3.6°C en 2100	Las emisiones y las temperaturas aumentan constantemente y las emisiones de CO ₂ se duplican aproximadamente con respecto a los niveles actuales para el año 2100. Los países se vuelven más competitivos entre sí, orientándose hacia la seguridad nacional y asegurando su propio suministro de alimentos. A finales de siglo, la temperatura media habrá aumentado 3.6°C.
SSP5-8.5	A evitar a cualquier precio: 4.4°C en 2100	Es un futuro que hay que evitar a toda costa. Los niveles actuales de emisiones de CO ₂ se duplicarán aproximadamente en 2050. La economía mundial crece rápidamente, pero este crecimiento se alimenta de la explotación de los combustibles fósiles y de estilos de vida que consumen mucha energía. En 2100, la temperatura media del planeta es de 4.4°C más sobre los valores preindustriales

Tabla 1. Descripción de las combinaciones de trayectorias socioeconómicas compartidas (SSPs) y trayectorias de concentración representativas (RCPs). Fuente: IHCantabria, 2024, con información del IPCC, 2021.

De acuerdo con dicha tabla, solamente los SSP1-1.9 y SSP1-2.6 estarían cercanos a cumplir con el Acuerdo de París. Sin embargo, la coyuntura presente de la acción climática parece presagiar que ninguna de estos escenarios vaya a encontrarse entre los más probables. Por ello, en términos de gestión de riesgos, considerando la coyuntura política y socioeconómica y la gran inercia de algunos de los forzamientos climáticos como el aumento del nivel medio del mar, en esta evaluación se ha optado por seleccionar el escenario SSP5-8.5.

Este se correspondería con el utilizado en la mayor parte de los análisis de riesgo de cambio climático en el mundo. En la tabla, se describe cuáles son las circunstancias socioeconómicas globales esperables para dichos escenarios, así como el umbral de temperatura media global que se proyecta alcanzar bajo en dichos escenarios.

El modelado de las amenazas de escasez de recursos hídricos y evaluación de ecosistemas se realiza en el escenario climático actual, y los horizontes 2030 y 2050 en el escenario SSP5-8.5. Para ello se han utilizado los datos climáticos de registros instrumentales y reanálisis, recopilados y procesados, y el análisis de cambio climático realizado en el Estudio de Riesgo por Efectos del Cambio Climático y Generación del Atlas Interactivo de Visualización de los Resultados para la República de Panamá, desarrollada por IHCantabria para Banco Interamericano para el Desarrollo (IHCantabria, 2024). A continuación, se enumeran las principales fuentes de los datos empleados.

Para el análisis de la precipitación y la temperatura actuales se han utilizado los datos de 103 estaciones meteorológicas distribuidas sobre el país como se puede observar en la Figura 6.

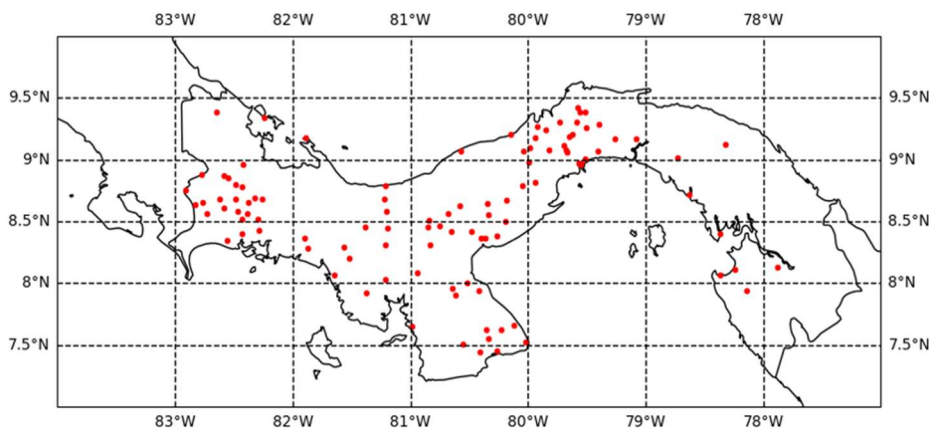


Figura 6. Localización de las estaciones meteorológicas utilizadas en el estudio. Fuente: IHCantabria, 2024.

Además de los datos que proporcionan las estaciones climáticas se obtienen variables geográficas como son la elevación del terreno, la pendiente, la orientación, la distancia a la costa o la distancia a cauces fluviales a partir del MDT oficial del IGN (5x5 m).

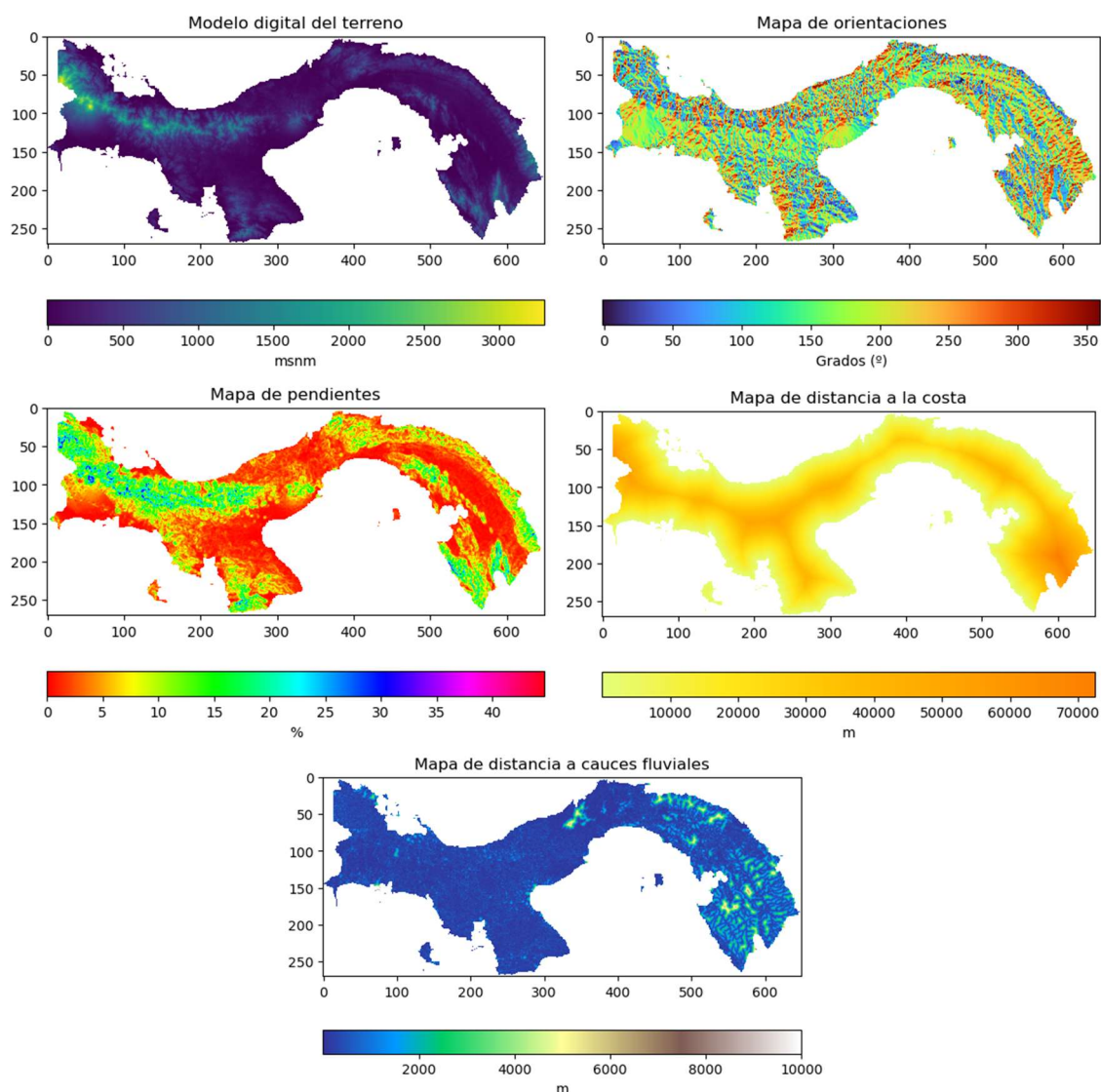


Figura 7. Variables topográficas (elevación/modelo digital del terreno, orientación de laderas, pendiente, distancia a la costa y distancia a cauces fluviales). Fuente: IHCantabria, 2024.

Si existiera relación de estas variables geográficas con los datos climáticos facilitaría el proceso de reconstrucción espacial dando lugar a resultados fidedignos.

Además de variables geográficas, para reconstruir las variables climáticas de forma espacial y temporal se recurren a bases de datos globales, en este caso se obtiene información de tres:

- Variables climáticas de CFSR (Climate Forecast System Reanalysis): es un reanálisis climático producido por el Centro Nacional de Investigación Atmosférica (NCAR) y la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA) de los Estados Unidos. El reanálisis CFSR utiliza un sistema de modelos numéricos y observaciones para reconstruir y analizar retrospectivamente las condiciones atmosféricas y oceánicas a lo largo de un período de tiempo.
- Variables climáticas de ERA-5: es un producto climático desarrollado por el Centro Europeo de Predicción a Plazo Medio (ECMWF, por sus siglas en inglés). Representa un esfuerzo para reconstruir y analizar retrospectivamente el estado del clima en todo el mundo utilizando un sistema de modelos numéricos y observaciones.

- Precipitación de TRMM: La precipitación de TRMM se refiere a la estimación de la precipitación obtenida a través del satélite Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM). La misión TRMM fue una colaboración entre la NASA y la Agencia de Exploración Aeroespacial de Japón (JAXA) que se llevó a cabo desde 1997 hasta 2015 con el objetivo de medir y monitorear la precipitación en las regiones tropicales y subtropicales de la Tierra.

Es importante tener en cuenta que el uso de estas bases de datos está sujeto a limitaciones y errores inherentes asociados con las observaciones y los modelos utilizados. Por lo tanto, es necesario evaluar adecuadamente la calidad y la confiabilidad de los datos.

Para la caracterización climática futura se han analizado modelos de clima globales, denominados GCM (*Global Climate Model*), que simulan numéricamente las interacciones de la atmósfera, los océanos, el relieve terrestre y el hielo. Son frecuentemente utilizados para el estudio de las dinámicas del sistema meteorológico y climático con el propósito de obtener proyecciones del clima futuro.

Los resultados de precipitación y temperatura para el clima futuro han sido obtenidos de las proyecciones climáticas que se enmarcan en la línea del Sexto Informe de Evaluación (AR6) del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC). Los modelos de cambio climático han sido obtenidos de la Earth System Grid Federation (ESGF) infraestructura global que facilita el acceso, la distribución y el intercambio de datos climáticos y resultados de modelos climáticos a nivel internacional.

Para más información sobre las fuentes de datos y metodología empleada para la obtención y análisis de las variables climáticas se puede consultar el entregable 3 del estudio citado.

Para el modelado de la peligrosidad e impacto del riesgo por inundación costera se han utilizado datos procedentes tanto de registros instrumentales como de reanálisis.

Las medidas instrumentales del oleaje y nivel del mar proporcionan una información valiosa del comportamiento de las variables de estudio. Estas medidas pueden haberse tomado in-situ o remotamente. Los registros in-situ permiten obtener información local, mientras que las medidas satelitales (principal fuente de medidas remotas) aportan información sobre áreas de la superficie marina donde no se dispone de ninguna otra fuente de observación.

Los datos instrumentales de nivel del mar utilizados para validar la base de datos generada proceden de seis mareógrafos disponibles en Panamá, cinco de ellos de GESLA3 (Global Extreme Sea Level Analysis) y uno de EC-WSL (World Sea Levels from the European Commission). GESLA3 proporciona datos horarios de nivel del mar, mientras que los datos del WSL son 3-minutales, por lo que se ha promediado a escala horaria. Las características de estos 6 mareógrafos se detallan en la Tabla 2.

Mareógrafo	Localización [Lon, Lat] (°)	Cobertura temporal
Bocas del Toro	[-82.26, 9.35]	2015- 2021
Cristóbal	[-79.9, 9.35]	1907- 2017
Porvenir	[-78.948, 9.558]	2012 - 2018
Balboa	[-79.573, 8.962]	1907 - 2018
Naos (I y II)	[-79.533, 8.917]	1961 – 1965; 1991- 1997
Puerto Armuelles (I y II)	[-82.86, 8.273]	1955- 1968; 1983- 2001

Tabla 2. Características de los 6 mareógrafos disponibles en Panamá.

Los datos de reanálisis utilizados provienen de ERA-5, la última base de datos de reanálisis global generada por el Centro Europeo de Predicciones Climáticas a Medio Plazo (ECMWF, Dee et al., 2011). Como cualquier base de datos de reanálisis, ERA-5 combina datos de observaciones con modelos acoplados de los subsistemas climáticos mediante el proceso de asimilación de datos. Las principales ventajas que presenta esta base de datos con respecto a su predecesor ERA-Interim son: mayor resolución temporal y espacial; mejor representación de la troposfera y de los ciclones tropicales; mejor balance global de precipitación y evaporación; y mayor consistencia entre la temperatura superficial del océano y el hielo marino. Los datos de ERA-5 están disponibles para descarga en la página web <https://cds.climate.copernicus.eu#!/home>.

Más información sobre estas fuentes se puede encontrar en el entregable 3.2, “Desarrollo de datos numéricos de las dinámicas marinas a alta resolución”, de la asistencia técnica en el “Desarrollo de una base de datos de dinámicas marinas en las costas panameñas para evaluar impactos y vulnerabilidad por ascenso del nivel del mar” desarrollada por IHCantabria para las Naciones Unidas, a través del Climate Technology Centre and Network (CTCN).

6.5. Datos socioeconómicos e información urbanística

Los riesgos resultan de la combinación de una amenaza y un receptor, cuyas características de vulnerabilidad determinan la generación de daños. Por ello, es importante caracterizar los principales atributos de los elementos expuestos a un determinado riesgo, para evaluar su vulnerabilidad. Existe una gran variedad de atributos que configuran la vulnerabilidad en sentido amplio, algunos de los cuales pueden cuantificarse, mientras que otros no (por ejemplo, los relacionados con aspectos psicológicos, sociales y culturales). Este análisis se centrará en un enfoque cuantitativo de los factores de vulnerabilidad. A continuación, se resumen las principales fuentes de información recopilada:

1. Capa de edificaciones del Instituto Nacional de Estadística y Censo (INEC), en la que se incluye la huella de cada edificio y su uso principal.
2. Infraestructuras públicas de INEC, Instituto Nacional de Acueductos y Alcantarillados Nacionales (IDAAN), Instituto Geográfico Nacional "Tommy Guardia" (IGN), Autoridad de Recursos Acuáticos de Panamá (ARAP) y Ministerio de Ambiente de Panamá.
3. XII Censo de Población y VIII de Vivienda de Panamá del año 2023 del INEC del que se obtienen variables de población, material de las paredes, techos y suelos de las viviendas, acceso a servicios básicos como agua potable, saneamiento y electricidad.

7. EVALUACIÓN DE LOS ECOSISTEMAS CLAVE PARA LA PROVISIÓN DE SERVICIOS A LA CIUDAD

7.1. Selección de los servicios ecosistémicos y de los ecosistemas que los proporcionan

Los servicios ecosistémicos (SE) son descritos como las ventajas o beneficios que recibe la sociedad de forma directa o indirecta de la naturaleza y de sus ecosistemas (Hein, et al., 2006). Además de ser esenciales para la vida en la Tierra (Daily, et al., 1997), son un indicador preciso de la salud de los ecosistemas, por lo que entender su respuesta ante las alteraciones del medio es necesario para evaluar y equilibrar las necesidades cortoplacistas con los objetivos de sostenibilidad a largo plazo (Sekercioglu, 2014). Ecosistemas tales como las tierras agrícolas, los bosques, los pastizales y los entornos acuáticos, son responsables del suministro de diversos SE, que se han clasificados en los siguientes tipos (De Groot, et al., 2002):

- Los servicios de regulación, que son aquellos que derivan de las funciones clave de los ecosistemas y que ayudan a reducir riesgos ambientales de muy diversa naturaleza (por ejemplo, la regulación del clima y del ciclo del agua, el control de la erosión del suelo, la polinización, etc.).
- Los servicios de aprovisionamiento son aquellos referidos a la cantidad de bienes o materias primas ofrecidas por un ecosistema (como la madera, agua, pasto para ganado, etc.) y otros productos tangibles obtenidos de la naturaleza
- Los servicios de soporte son los procesos necesarios para la producción de todos los otros servicios del ecosistema y sin ellos la provisión no sería posible. Algunos son la formación y evolución de los suelos, la actividad fotosintética, y la producción primaria neta.
- Los servicios culturales están relacionados con el tiempo libre, el ocio o aspectos más generales de la cultura o el valor intangible de los ecosistemas y sus componentes. Estos servicios incluyen actividades recreativas, turismo, espiritualidad y expresiones artísticas inspiradas por la naturaleza.

De forma general, la necesidad de cuantificar y exponer el valor del medio ambiente a la sociedad ha llevado a la práctica de cotejar los datos de la cubierta terrestre con los SE, haciendo que la representación sea un simple recurso mapa con un valor determinado por unidad de área. Sin embargo, este enfoque pasa por alto la complejidad de los SE y la visión del conjunto como un sistema socio-ecológico que resulta de la interacción dinámica de múltiples componentes ambientales y humanos (por ejemplo, un bosque y un río o una producción agrícola y la población). Bajo esta perspectiva, las dinámicas espaciotemporales de los SE son el resultado del intercambio de valores dentro de una red de agentes ecológicos y antropogénicos, y cualquier ejercicio de valoración debe tener en cuenta que el rendimiento depende de la demanda y de la existencia de grupos sociales en el extremo receptor, los que denominamos beneficiarios.

Para garantizar la continuidad y provisión de estos servicios, es fundamental incorporar conceptos de infraestructura verde y azul (BGIN por sus siglas en inglés) en la planificación urbana y territorial. Estas redes, basadas en espacios verdes y naturales interconectados con cuerpos de agua como ríos y lagos, juegan un papel fundamental en la conservación de la biodiversidad e incrementan la resiliencia de las ciudades ante el cambio climático (Ghofrani, et al., 2017). La integración efectiva de ambas

estrategias contribuye a promover sociedades más sostenibles y resilientes, donde la naturaleza y la infraestructura humana coexisten de manera armoniosa para el beneficio de las generaciones presentes y futuras. Una BGIN puede entenderse como un instrumento de planificación del paisaje cuyo objetivo es optimizar la disposición espacial de diferentes componentes de los ecosistemas y prácticas de gestión/explotaciones relacionadas en un territorio determinado para mejorar la conservación de la naturaleza y la biodiversidad y maximizar simultáneamente la provisión de SE. La implementación de las BGINs estará supeditada a las necesidades y potencialidades de cada territorio y su diseño dependerá de las condiciones iniciales y futuras relacionadas con el estado de la biodiversidad, los SE objetivo y las demandas de los diferentes grupos de interés (Pérez-Silos, et al., 2021).

Los componentes de una BGIN están fundamentados en las propiedades de los ecosistemas existentes en el territorio para responder a una gama variable de demandas sociales relacionadas con los bienes y servicios proporcionados por esos ecosistemas. Para ello, las BGINs se basan en la aplicación de intervenciones de diferente tipología (conservación y restauración), a diferentes escalas espaciales, sobre una gran variedad de elementos naturales del paisaje (bosques, pastizales, humedales, llanuras de inundación, etc.). Cada una de estas intervenciones sobre las que empleamos las propiedades de los ecosistemas para generar o conservar ciertos servicios son las Soluciones basadas en la Naturaleza (SbN por sus siglas en inglés) (Chausson, et al., 2020).

De esta forma, las medidas de SbN pueden ser tanto entidades físicas del territorio (diferentes tipos de hábitats y formaciones vegetales como bosques maduros de ladera, bosques de ribera, llanuras de inundación, etc.), como componentes relacionados con la manera en la que se gestiona y maneja estas entidades y otros elementos de la cubierta terrestre mediante prácticas y estrategias de manejo (por ejemplo, buenas prácticas de gestión agrícola-ganadera, delimitación de áreas para la renaturalización, gestión de zonas con combustible de vegetación de alto riesgo de incendio, etc.). Además, con independencia de su naturaleza, las SbN pueden estar vinculadas a:

- Elementos en buen estado de conservación que responden a funciones importantes dentro del territorio y sobre los que los esfuerzos deben dirigirse a seguir conservándolos de un modo adecuado (SbN de conservación).
- Elementos que actualmente no funcionan de manera óptima por la degradación de su estado pero que presentan un potencial importante para la generación de SE de interés en el territorio. En estos ecosistemas se aplicarían SbN destinadas a la recuperación de su funcionalidad, bien mediante la restauración o creación de hábitat, bien mediante la aplicación de ciertos criterios de manejo que permitan compatibilizar un uso actual más intensivo con la capacidad de generación de los SE requeridos (SbN de restauración).

7.2. Selección de los servicios ecosistémicos y de los ecosistemas que los proporcionan

En este contexto, los SE de regulación conforman el eje principal de análisis espacial sobre el que se vertebra la propuesta de BGIN para las cuencas vertientes a la ciudad de Bocas del Toro. La degradación en la provisión de estos SE conduce a perjuicios significativos en el bienestar humano, motivo por el que el análisis de las dinámicas espaciotemporales de estos SE toma gran importancia para apoyar la toma de decisiones en cuanto al desarrollo e implementación de políticas ambientales. Teniendo en cuenta estas indicaciones, el funcionamiento del ecosistema en la cuenca objeto de estudio, así como la información disponible, se han definido los siguientes SE para construir los componentes de la BGIN:

7.2.1. Regulación hidrológica frente inundaciones

El SE de regulación hidrológica se refiere a la capacidad de los ecosistemas terrestres de regular la proporción de las precipitaciones que pueden ser interceptadas e infiltradas en capas superficiales y subterráneas de las cubiertas naturales, reduciendo el flujo de agua que se generaría como escorrentía superficial en ausencia de tales coberturas. En este sentido, la capacidad de almacenamiento y atenuación de las llanuras de inundación y las coberturas vegetales naturales presentes en la cuenca hidrográfica son factores determinantes en la regulación frente inundaciones. Por un lado, el desbordamiento del río contribuye a disipar aguas abajo parte de la energía del caudal de avenida, moderando los caudales máximos y retardando el pico de caudal, y las masas forestales maduras presentes en las llanuras desempeña un papel determinante en este fenómeno ya que con un elevado número de estratos verticales, con horizontes superficiales más desarrollados y con una mayor capacidad de infiltración por raíces y la acción de macroinvertebrados, actúan como elementos de tapón del agua de lluvia, reduciendo la escorrentía.

7.2.2. Regulación hidrológica frente sequía

El SE de regulación de sequías está relacionado con la respuesta hidrológica de la cuenca, vinculado al potencial de almacenar agua y contribuir a su disponibilidad a lo largo del tiempo. En este sentido, cobra especial importancia la capacidad de almacenamiento de las llanuras de inundación y las coberturas vegetales presentes en la cuenca hidrográfica. Por un lado, las masas de bosque presentes en las áreas inundables aumentan la capacidad de almacenamiento de agua en las llanuras de inundación a través de sus raíces y la capa de materia orgánica que generan, lo que disminuye la velocidad de escorrentía superficial y permite que el agua se infiltre lentamente en el suelo, recargando los acuíferos subterráneos. Por su parte, el bosque maduro cobra especial importancia en relación al potencial de almacenamiento de agua subterránea, que se asocia con áreas del paisaje propensas a la infiltración con base a los factores abióticos relacionados principalmente con esta funcionalidad, es decir, la topografía, el tipo de suelo y la cubierta vegetal.

7.2.3. Protección costera frente a inundaciones por eventos extremos

El SE de protección costera se refiere a la capacidad de los ecosistemas costeros de regular la intensidad de la inundación costera producida por eventos meteorológicos extremos, reduciendo así la extensión y cota de la lámina de agua tierra adentro. En este sentido, los manglares son ecosistemas que actúan como barreras de protección para atenuar los efectos de los huracanes, las inundaciones, las marejadas y la erosión en la costa.

7.3. Evaluación de los ecosistemas seleccionados

7.3.1. Localización espacial de los ecosistemas definidos

Mapas de usos y ocupación del suelo (LULC)

Para el presente proyecto, se parte de la información oficial de LULC provista por el Ministerio de ambiente de Panamá (MiAMBIENTE) del año 2021 y que incluye las categorías de “Bosque latifoliado mixto maduro”, donde se recogen las áreas compuestas principalmente por árboles adultos con diámetros altos y copas grandes, con menor presencia de sotobosque y con una serie temporal en la zona mayor de 40 años, aunque se haya practicado tala selectiva y “Bosque mangle” que son formaciones de bosques en el cual el 60% de los árboles presentes pertenecen a una o varias especies de manglar (Figura 8 y Figura 9).

La elección de estas coberturas se debe a su importancia ecosistémica, siendo vitales para la conservación de la biodiversidad, regulación hídrica y protección del suelo. Los bosques, en especial el latifoliado mixto maduro, actúan como barreras naturales contra la escorrentía ya que sus copas amplias y densas interceptan la precipitación, reduciendo la velocidad del agua que llega al suelo y permitiendo una absorción más gradual. Esto es particularmente importante durante eventos de lluvia intensa, ya que minimiza el riesgo de inundaciones y erosión del suelo. En el caso de los bosques mangle son cruciales para la protección costera, actuando como barreras naturales frente a tormentas y marejadas, lo cual es vital en un contexto de cambio climático y aumento del nivel del mar como el actual.

En general, la funcionalidad ecológica de estas coberturas forestales es vital para la sostenibilidad de sus respectivas cuencas. Los bosques actúan como reguladores climáticos, moderando las temperaturas locales y creando microclimas que favorecen biodiversidades diversas. También proporcionan hábitats para una variedad de especies, lo que es esencial no solo para mantener la riqueza biológica, sino también para preservar las interacciones ecológicas entre especies que son fundamentales para la salud del ecosistema.

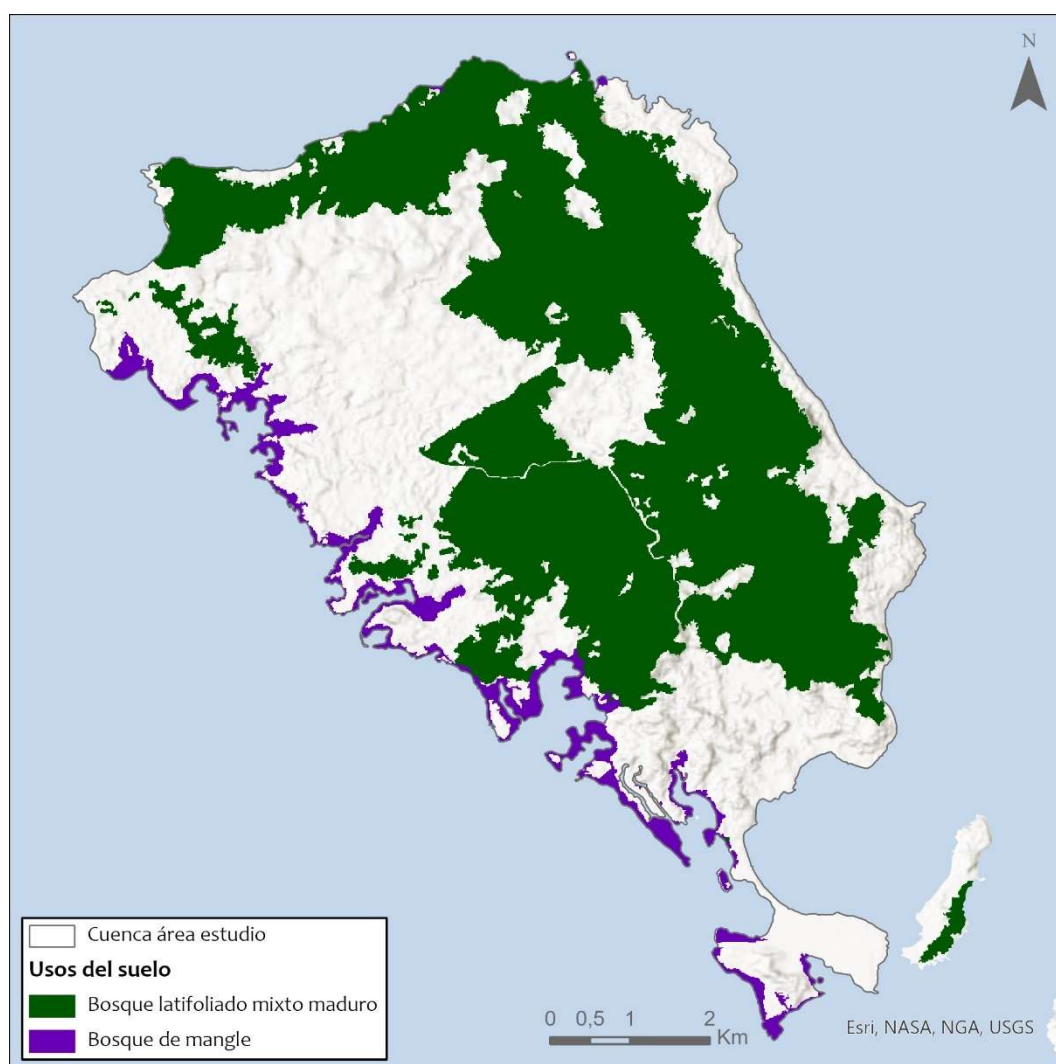


Figura 8. Mapa de usos y coberturas del suelo de bosque latifoliado mixto maduro y bosque de manglar para la cuenca drenante de Isla Colón, Bocas del Toro. Fuente: MiAMBIENTE, 2021.

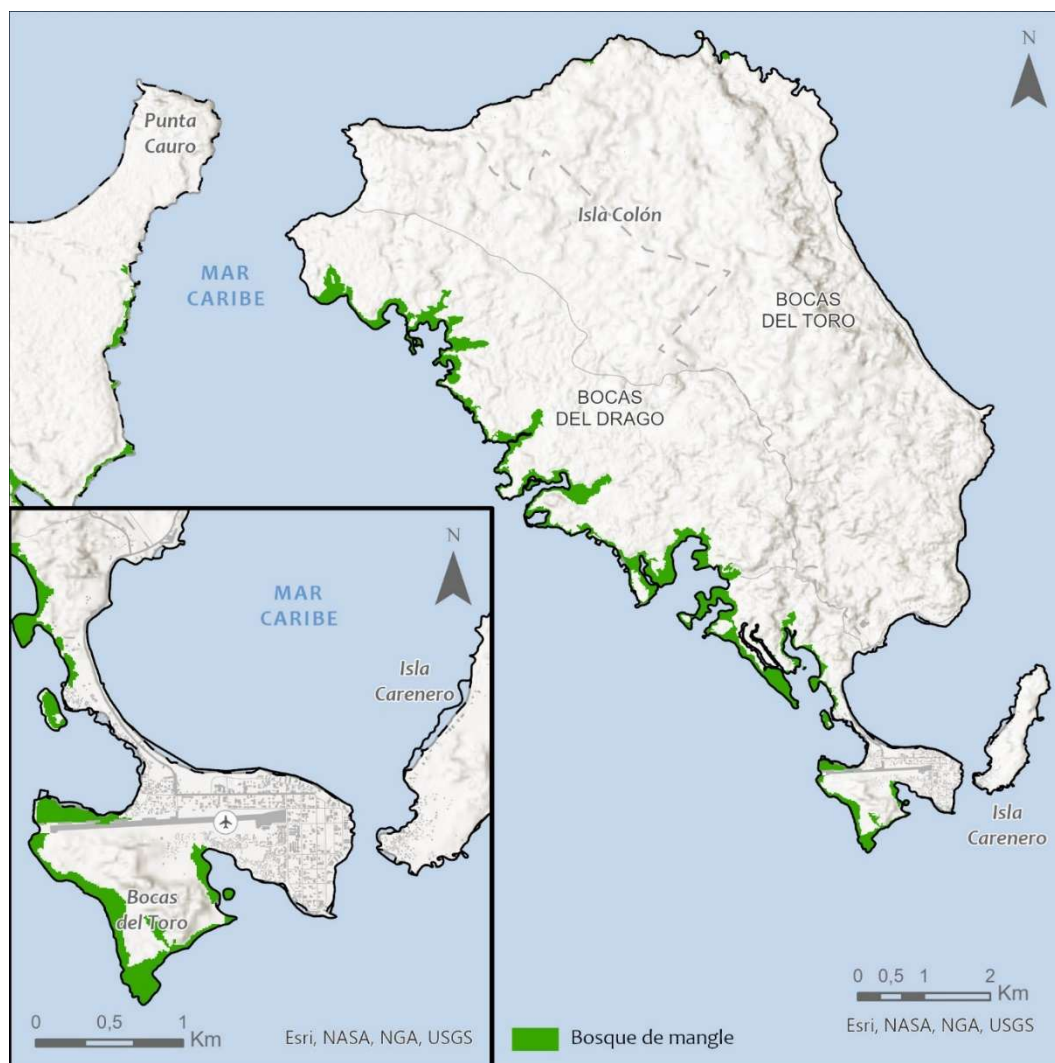


Figura 9. Mapa de bosque de manglar para la ciudad de Bocas del Toro. Fuente: MiAMBIENTE, 2021.

Unidades funcionales

Desde un punto de vista metodológico, los SE modelados a grandes escalas se presentan dentro de unidades de paisaje relacionadas con los procesos del ecosistema, como las cuencas hidrográficas, los hábitats específicos, o unidades funcionales (UF). En el marco del presente proyecto, los servicios de regulación hidrológica frente inundaciones y frente sequía se modelan a escala regional de la cuenca, mientras que el servicio de protección frente inundaciones por eventos extremos se hace a escala local de la ciudad.

Para el primer caso, el marco propuesto se considera cómo UF aquellos elementos morfoestructurales que dividen el medio físico de forma homogénea a nivel funcional. Las UF son dependientes del proceso que se esté analizando y deben cumplir una doble tarea: (i) relacionar el proceso funcional de análisis con unidades homogéneas en el territorio para una determinada función o proceso y (ii) permitir una identificación priorizada de las SbN a través de acciones de conservación o restauración. Según el marco propuesto, se definen las laderas de drenaje y las llanuras de inundación. Ambas constituyen formas de clasificar el territorio con capacidad para incorporar las interacciones biótico-abióticas a la escala funcional requerida, así como la conectividad necesaria entre los diferentes ecosistemas. Desde un enfoque conceptual, esta división espacial facilita la identificación del flujo de SE desde la función biológica, mientras que, en términos de modelización, las UF posibilitan la simulación de las

interrelaciones entre los diversos elementos biológicos y/o morfológicos del paisaje, permitiendo la incorporación de los procesos modelados a nivel de píxel en una unidad espacial con significado funcional completo.

- Laderas de drenaje: su cálculo se basa en la acumulación de flujo y se compone de todos los píxeles situados aguas arriba de cada segmento de canal definido. Se establecen con una superficie mínima de 5 hectáreas. De esta manera se establecen un total de 31 laderas de drenaje para toda el área de estudio.
- Llanura de inundación: las celdas del DEM se clasifican según la elevación sobre el segmento del canal más cercano. La diferencia de elevación entre cada celda del fondo del valle y la ubicación del canal asociado se normaliza por la profundidad de la orilla o por la elevación absoluta sobre el canal. Este procedimiento se repite para cada segmento de canal.

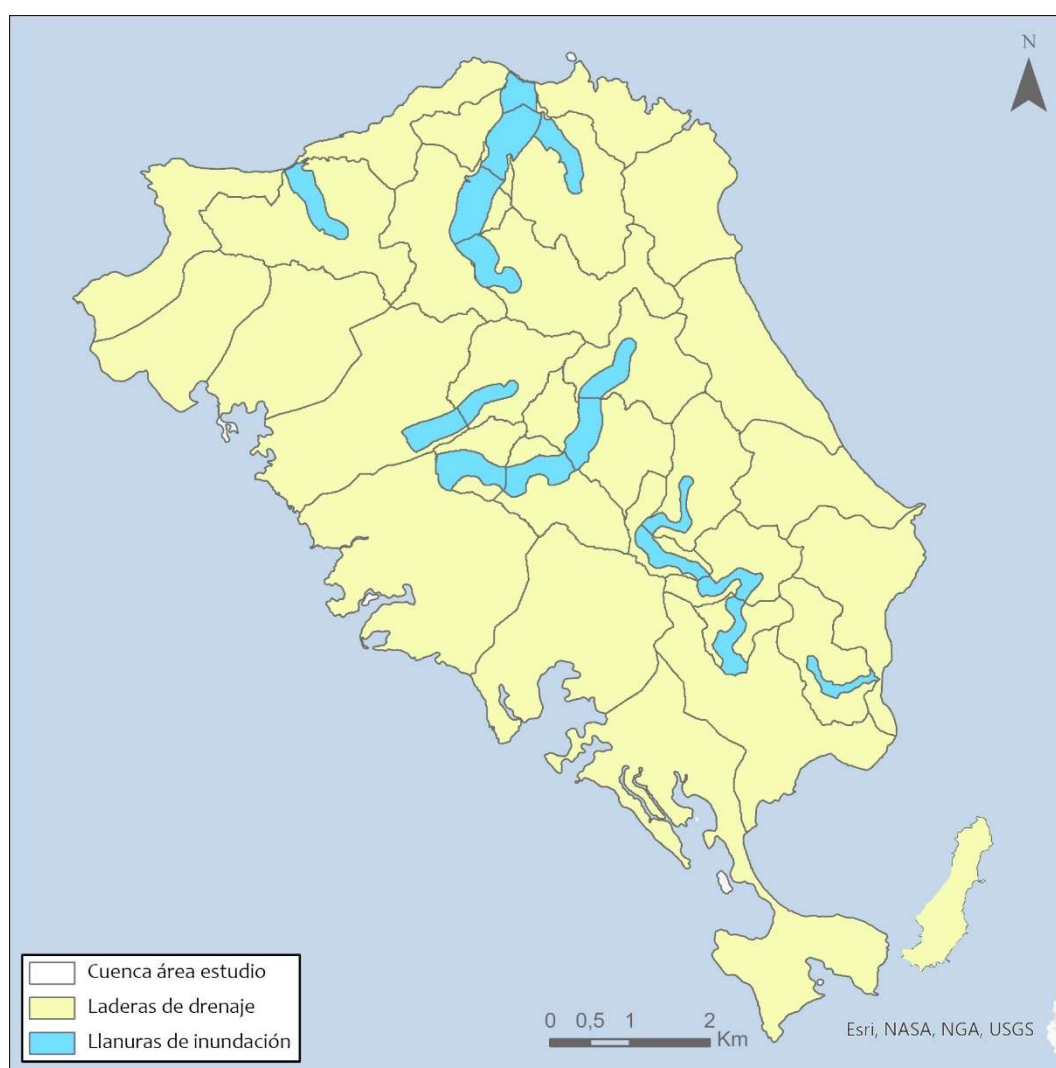


Figura 10. Mapa de unidades funcionales (laderas de drenaje y llanuras de inundación) para la cuenca drenante de Isla Colón, Bocas del Toro. Fuente: IHCantabria, 2024.

Para el segundo caso, se realiza el análisis específicamente en el ecosistema de bosque de manglar a escala local, enfocándose en la porción de tierra que ocupa, que incluye la franja costera y el área adyacente. En este contexto, la unidad funcional se limita a los manglares y sus inmediaciones, lo que requiere un enfoque detallado pixel a pixel. Este análisis permite identificar diferencias sutiles en la

distribución de los servicios ecosistémicos, como la protección contra la erosión costera y la regulación del ciclo hídrico, así como su capacidad para almacenar carbono.

7.3.2. Evaluación de los ecosistemas

Aptitud hidroclimática de los ecosistemas (variables hidroclimáticas y geomorfológicas)

El cálculo de la aptitud de los bosques latifoliados mixtos maduros y los bosques de manglar se hará mediante los dos procesos que se definen a continuación. La elección de estos sistemas para el análisis ecológico y territorial se fundamenta en su importancia ecosistémica, ya que ambos desempeñan un papel vital en la conservación de la biodiversidad, la regulación hídrica y la protección del suelo. Por tanto, su relevancia para la conservación del medio ambiente y en su influencia en los procesos naturales que impactan directamente en la cuenca y en el entorno urbano de Isla Colón, Bocas del Toro justifican su elección.

- Técnicas de Aprendizaje Automático para el modelado de la distribución de especies: algoritmo de bosque aleatorio.

Las técnicas de Aprendizaje Automático (ML por sus siglas en inglés) se incluyen en una rama del campo de la Inteligencia Artificial (AI por sus siglas en inglés) que a través de diferentes algoritmos permite a las máquinas realizar tareas específicas de forma autónoma, es decir, sin necesidad de programarlos para identificar patrones de datos masivos y elaborar predicciones (Cutler, et al., 2007). Existen tres categorías principales de algoritmos de ML: de aprendizaje supervisado, no supervisado y de refuerzo (Espinosa-Zuñiga, 2020).

Los algoritmos de Bosque Aleatorio (RF por sus siglas en inglés), son unas técnicas de ML del tipo supervisadas de uso generalizado debido a su método de partición recursivo, que permiten aumentar el rendimiento del modelo final con una mínima pérdida de interpretabilidad (Sinha, et al., 2019). Se trata de un conjunto o ensamble de Árboles de Decisión combinados mediante técnicas de bagging (Figura 11) en las que cada árbol se entrena con diferentes muestras de datos para la misma consulta, logrando así que ningún árbol de decisión vea todos los datos de entrenamiento, sino que cada uno ve una porción. Por último, las predicciones de cada árbol se combinan para obtener una predicción en conjunto, al combinar los resultados y promediarlo, unos errores compensan otro y se obtiene una predicción que generaliza con un rendimiento mejor (Guisan & Thuilleer, 2005).

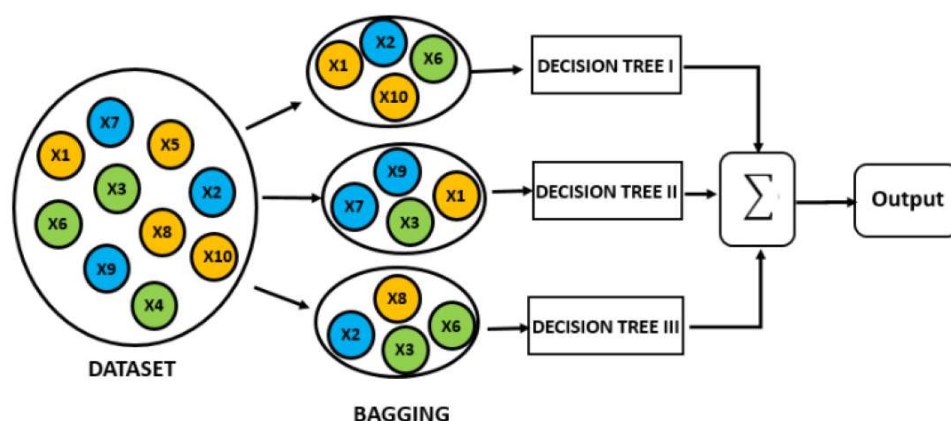


Figura 11. Esquema resumen de algoritmo RF y proceso *bagging*. Fuente: (Espinosa-Zuñiga, 2020).

Esta técnica es especialmente útil en el modelado de distribución de especies, donde se busca predecir la distribución geográfica en función de variables ambientales, principalmente abióticas, pero con notable relevancia también de las variables bióticas. De forma general, este modelo tiene las siguientes fases de desarrollo: i) recopilación de datos relevantes sobre el hábitat y los puntos de presencia de la especie a modelar, los cuales se preprocesarán para estar en un formato estándar y ser geográficamente coherentes, resolviendo problemas de multicolinealidad y autocorrelación espacial; ii) construcción del modelo, que puede incluir dos algoritmos diferentes (Árbol de Clasificación y Árbol de Regresión) dependiendo de la naturaleza de la predicción requerida; iii) prueba y validación del modelo utilizando parámetros de evaluación estandarizados con el fin de asegurar su fiabilidad y precisión; iv) creación de mapas predictivos que pueden utilizarse para estimar y comprender la distribución de las especies, lo que resulta de gran utilidad en la planificación de la conservación y el manejo de los ecosistemas.

- Ejecución del modelo

Para el presente proyecto, se plantea la ejecución de un modelo RF que utiliza como variables independientes la presencia / ausencia del ecosistema según la cobertura de usos de suelo actual y como variables dependientes las climáticas y geomorfológicas relevantes según bibliografía especializada (para más información consultar (Ward, et al., 2016), (Cavalli, et al., 2013), (Beleño, et al., 2022)). El algoritmo utilizado se compone de 300 árboles de decisión, con tantos nodos como determine el algoritmo de forma automática que son necesarios y que proporcionan 1 hoja de decisión (capa en formato ráster) para cada modelización (en situación actual y en escenario futuro SSP585).

El clima es uno de los factores más influyentes en los patrones biogeográficos de las especies en el ambiente. En la actualidad, el cambio climático representa una de las principales tensiones ambientales que podrían impactar a las especies naturales, de manera directa mediante efectos en la productividad o estrés hídrico, o de forma indirecta a través de interacciones con distintas perturbaciones como incendios o plagas (Arenas-Castro, et al., 2018). Siguiendo los estudios de (Ward, et al., 2016) y la información disponible, se han incluido en el modelado las variables de temperatura, precipitación y evapotranspiración potencial medias mensuales para la situación actual y los diferentes escenarios definidos. La información climática debe complementarse con datos relevantes de las características de los hábitats que determinarán la presencia y/o abundancia de las especies a modelizar. Así, la información topográfica aporta una serie de atributos fundamentales para las especies forestales ya que, como está bien documentado, la biomasa o la productividad (así como otras características y propiedades de las especies naturales) se ven fuertemente afectadas por la orientación del terreno, la radiación incidente, la pendiente o la elevación. En este punto, se incluye el Modelo Digital del Terreno (MDT) STRM 30x30 de la NASA y el ráster de pendientes derivada del mismo.

Los modelos de distribución de especies requieren datos reales de ocurrencia de las especies (por ejemplo, coordenadas geográficas), bien para identificar y calibrar su relación con variables ambientales (modelos correlacionales) o validar los resultados de dichos modelos. Para obtener los puntos de presencia de los ecosistemas objeto de estudio se ha desarrollado un muestreo estratificado mediante el uso de software GIS partiendo de la información de LULC proporcionado por MGAP. En primer lugar, se establece un buffer de exclusión de 100 metros de distancia alrededor de cada cobertura para evitar tener puntos en zonas de transición entre coberturas de suelo y se cubre toda el área con un mallado cuadrangular de 1,000 metros, asignando un punto de forma aleatoria en cada centroide. De esta forma, y matizándolos con el apoyo de ortografía aérea de máxima actualidad, se logra que sean puntos representativos de áreas bien identificadas, homogéneas y representativas de

cada cobertura definida en la leyenda, evitando el ruido de escena. Se pone especial énfasis a su selección con la mayor variabilidad posible de ubicación, pendiente y orientación, y que eviten el efecto tipo frontera, siendo lo más puras posible y evitando la mezcla con otras categorías (Zhong, et al., 2019), evitando así el efecto de autocorrelación espacial y pseudoreplicación en imágenes de media resolución sobre espacios heterogéneos (Álvarez-Martínez, et al., 2018). De esta manera, se obtiene un total de 250 puntos de presencia para la categoría de bosque latifoliado mixto maduro y 117 de presencia para la de bosque de manglar. Una vez definidos los puntos de presencia para cada categoría se proceden a la ejecución del modelo RF en la que se permite que sea el propio algoritmo quien defina las ausencias de forma automática. En primer lugar, se lanzará el 60% de los puntos contra las variables predictoras ya definidas en la situación actual, obteniendo así las zonas de idoneidad para la presencia de cada cobertura según las variables actuales (Figura 12 y Figura 14). A continuación, se repite el modelo, incluyendo las variables en el escenario futuro SSP585, así, se obtienen las zonas de idoneidad según las variables futuras (Figura 13 y Figura 15). Estos resultados se proporcionan en formato ráster con valores normalizados de 0 a 1, siendo 0 las zonas de menor idoneidad y 1 las de mayor valor.

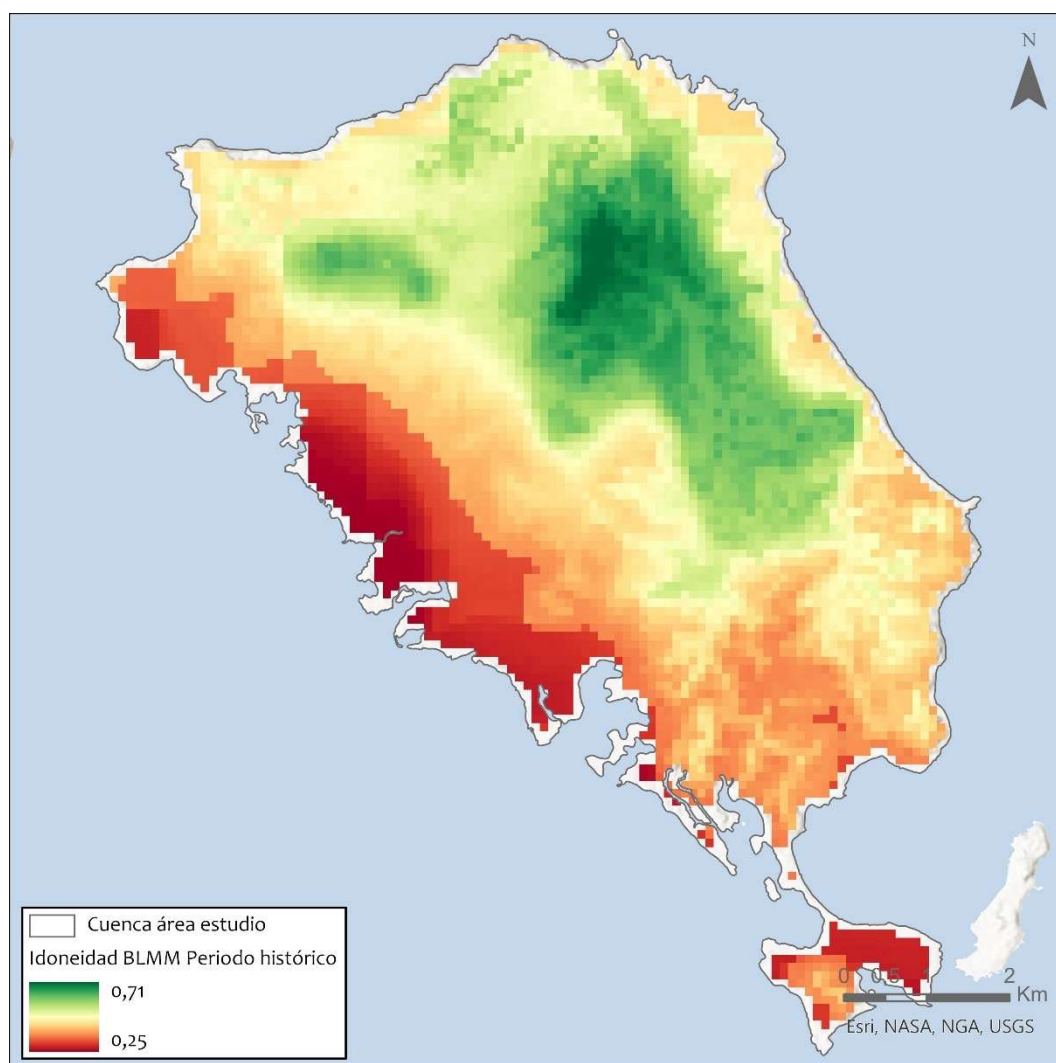


Figura 12. Mapa de idoneidad del bosque latifoliado mixto maduro para la situación actual para la cuenca drenante de Isla Colón, Bocas del Toro. Fuente: IHCantabria, 2024.

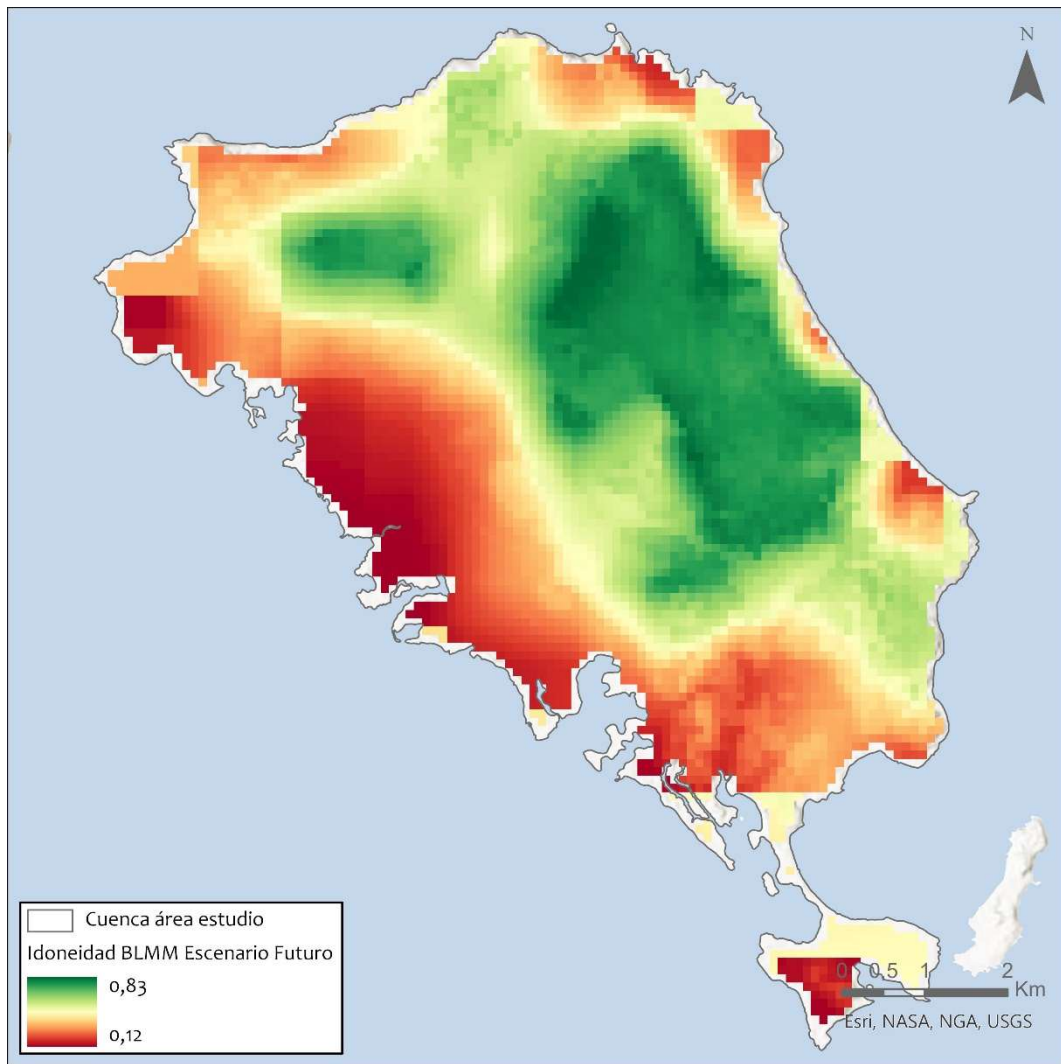


Figura 13. Mapa de idoneidad del bosque latifoliado mixto maduro para el escenario futuro SSP585 2050 para la cuenca drenante de Isla Colón, Bocas del Toro. Fuente: IHCantabria, 2024.

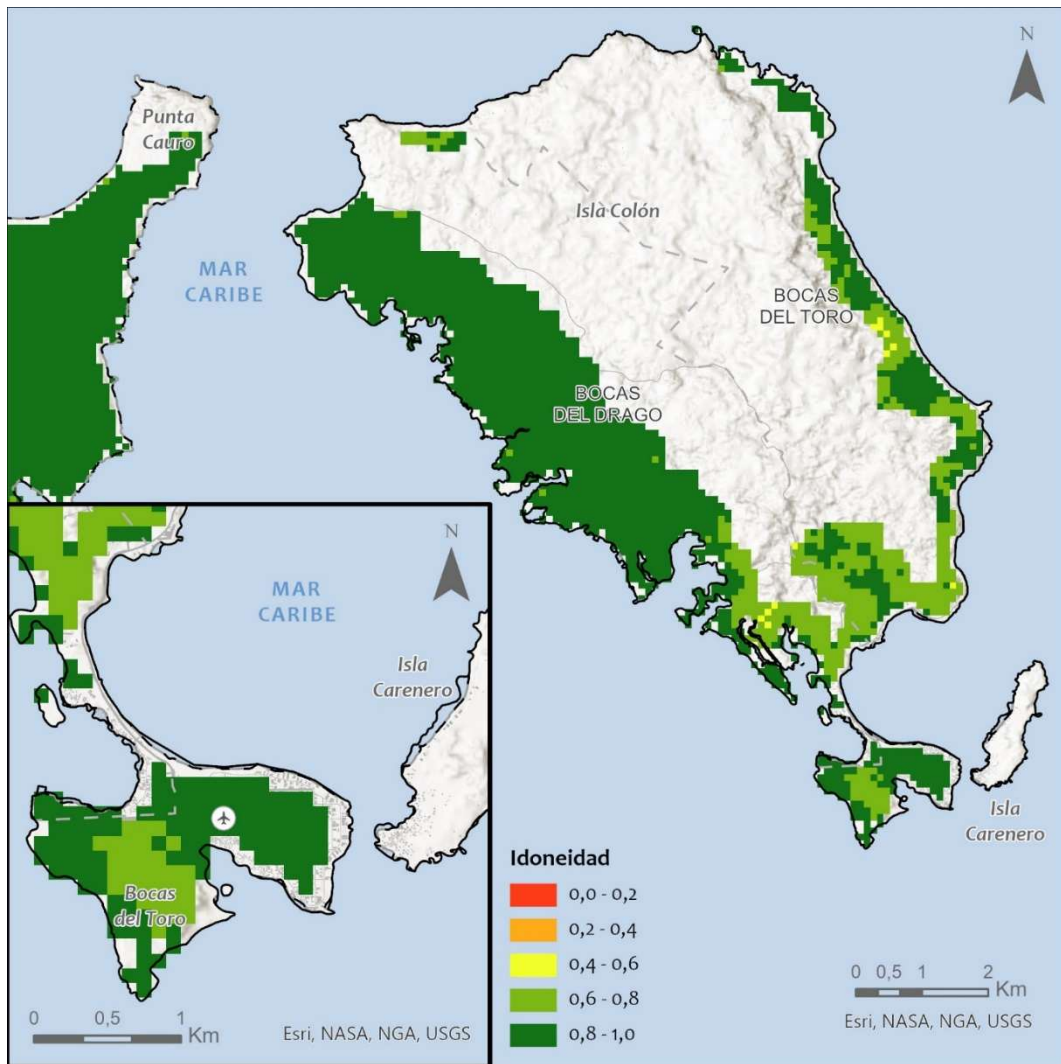


Figura 14. Mapa de idoneidad del bosque de manglar para la situación actual en la ciudad de Bocas del Toro.
Fuente: IHCantabria, 2024.

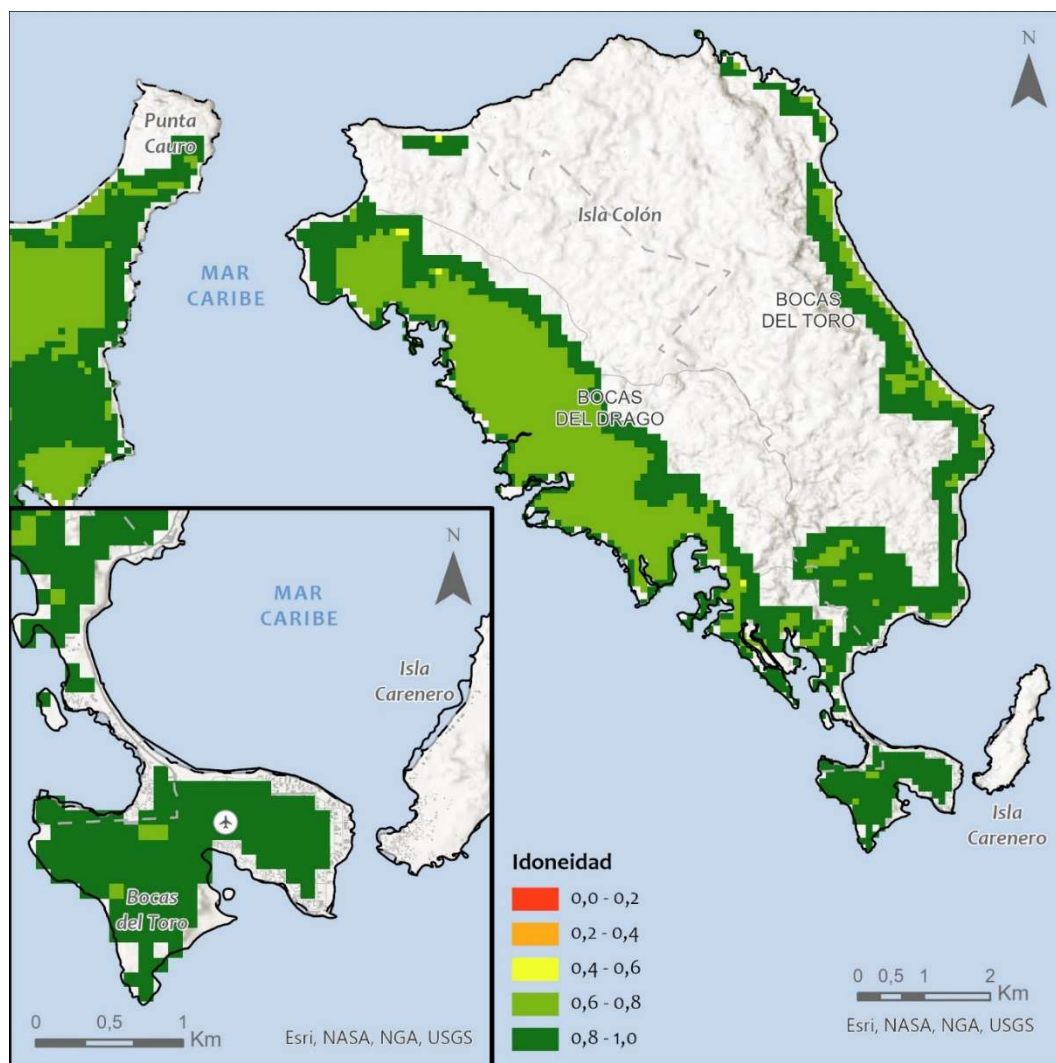


Figura 15. Mapa de idoneidad del bosque de manglar para el escenario futuro SSP585 2050 para la ciudad de Bocas del Toro. Fuente: IHCantabria, 2024.

- Datos bióticos y evaluación de tendencia.

El siguiente proceso de la metodología consiste en la obtención de una serie temporal de datos espectrales desde 1994 (coincidente con los datos climáticos disponibles) hasta la actualidad mediante diferentes índices espectrales, cómo el índice de vegetación mejorado (EVI por sus siglas en inglés) medio anual que nos permitirá evaluar la tendencia a futuro de los ecosistemas definidos en el marco de la información biótica (Guo, et al., 2020). Este índice, ampliamente usado en ciencia y aplicaciones de consultoría en todo el mundo, es el resultado de la combinación de las bandas rojas e infrarrojas y es un indicador lineal de la radiación fotosintética activa absorbida, proporcionando así una buena estimación de la fotosíntesis integrada a nivel de píxel (Parruelo, et al., 1997). Este tipo de análisis es fundamental para evaluar el estado de los ecosistemas ya que se trata de un índice sensible y confiable de la salud de la vegetación, ya que mide la cantidad y la calidad de la vegetación verde. En bosques, el EVI (y otros índices cómo el NDVI o el SAVI) puede ayudar a identificar áreas con vegetación vigorosa y saludable, así como áreas con estrés hídrico o daños ambientales (Hernández-Romero, et al., 2022), además, permiten detectar cambios en la cobertura vegetal a lo largo del tiempo (Gaitan, et al., 2021).

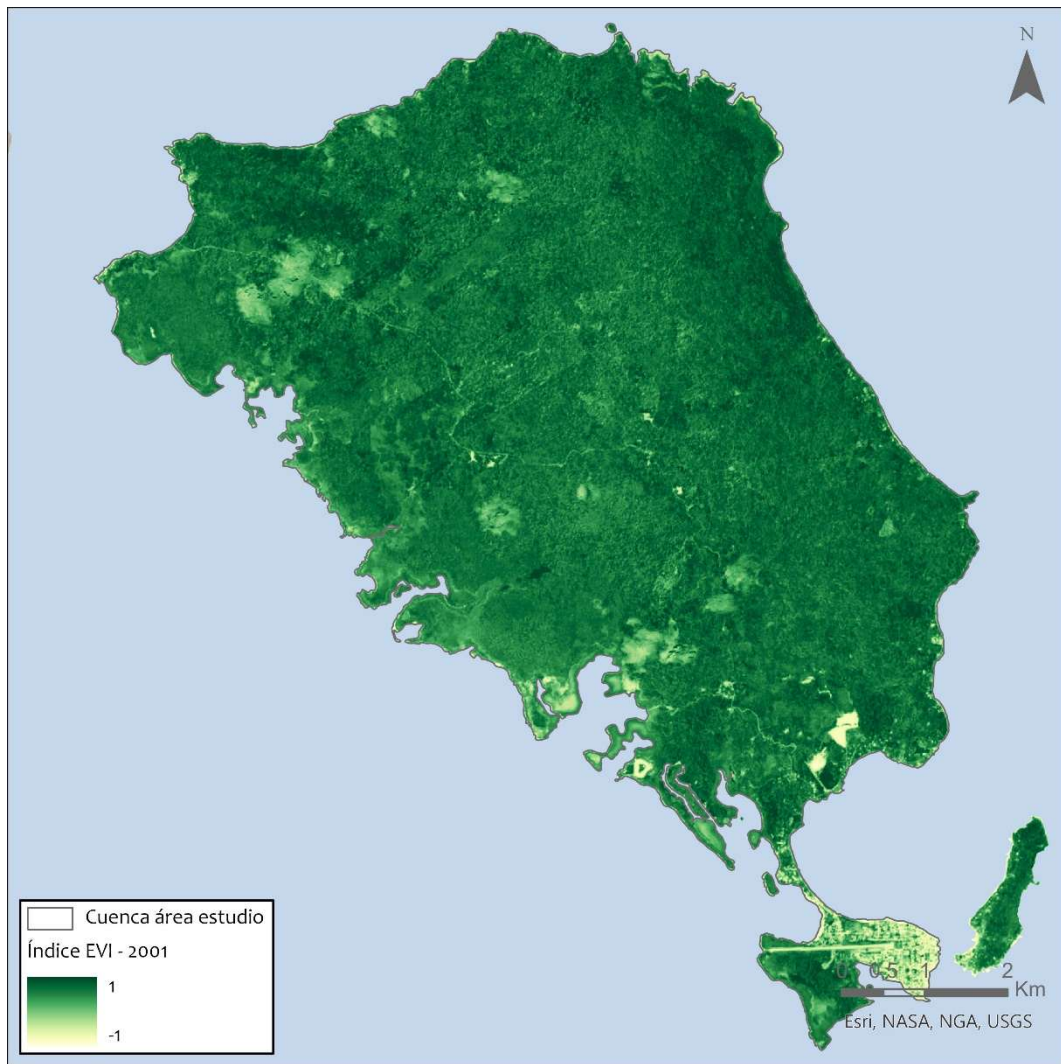


Figura 16. EVI promedio en el año 2001 para la cuenca drenante de Isla Colón, Bocas del Toro. Fuente: IHCantabria, 2024.

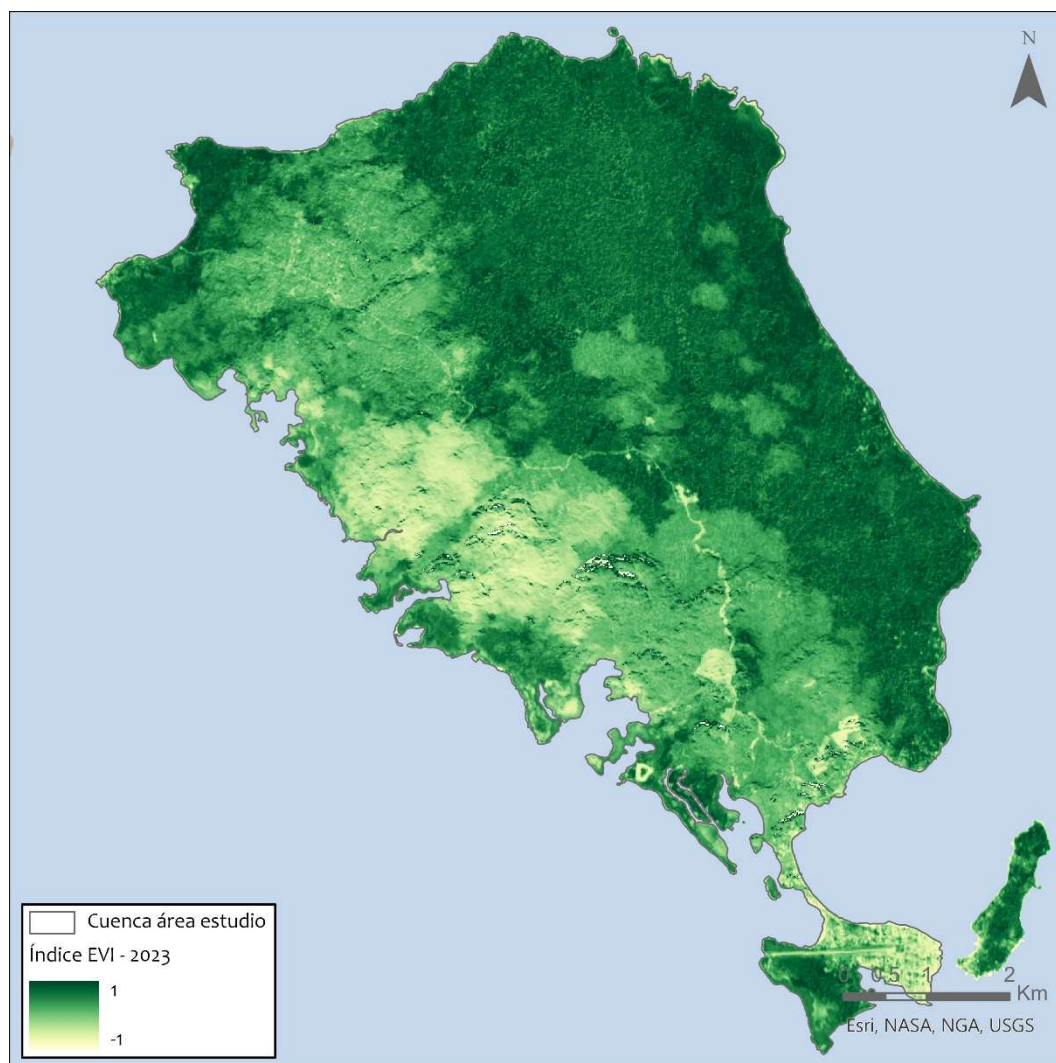


Figura 17. NDVI promedio en el año 2023 para la cuenca drenante de Isla Colón, Bocas del Toro. Fuente: IHCantabria, 2024.

- Árbol de decisiones. Áreas potenciales de conservación y de restauración.

Con toda la información anteriormente expuesta, se realiza el siguiente árbol de decisiones (Figura 18) que permite clasificar el BLMM por unidad funcional según su aptitud potencial de conservación o restauración (Figura 19) según las siguientes categorías:

- Áreas potenciales de conservación son aquellas con una idoneidad actual del ecosistema buena. En este punto se diferencia en función de si la idoneidad en escenario futuro es buena o mala entre áreas de conservación pasiva (C1) y áreas de conservación activas (C2) con medidas de mitigación de vectores climáticos.
- Áreas potenciales de restauración son aquellas zonas de presencia del ecosistema con idoneidad actual del ecosistema mala pero buena a escenario futuro y además con tendencia del factor biótico de crecimiento, clasificándolas como de restauración activa (R1). También se incluyen como zonas de restauración intensiva (R2) aquellas áreas de campo natural donde actualmente no existe el ecosistema, pero su aptitud hidroclimática a futuro es buena y el factor biótico es de crecimiento. La selección de este ecosistema se basa en que estos ecosistemas presentan condiciones favorables para su regeneración

en el área de estudio, lo que los hace más viables en comparación con los bosques nativos, que enfrentan retos mayores.

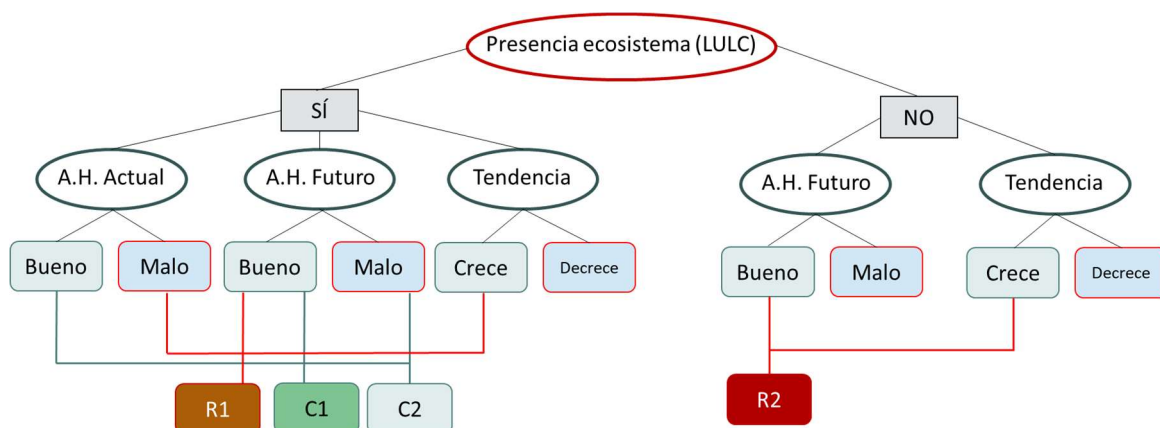


Figura 18. Árbol de decisiones para clasificación de las coberturas vegetales en: i) conservación pasiva (C1); ii) conservación activa (C2); iii) restauración activa (R1) y restauración intensiva (R2). Fuente: IHCantabria, 2024.

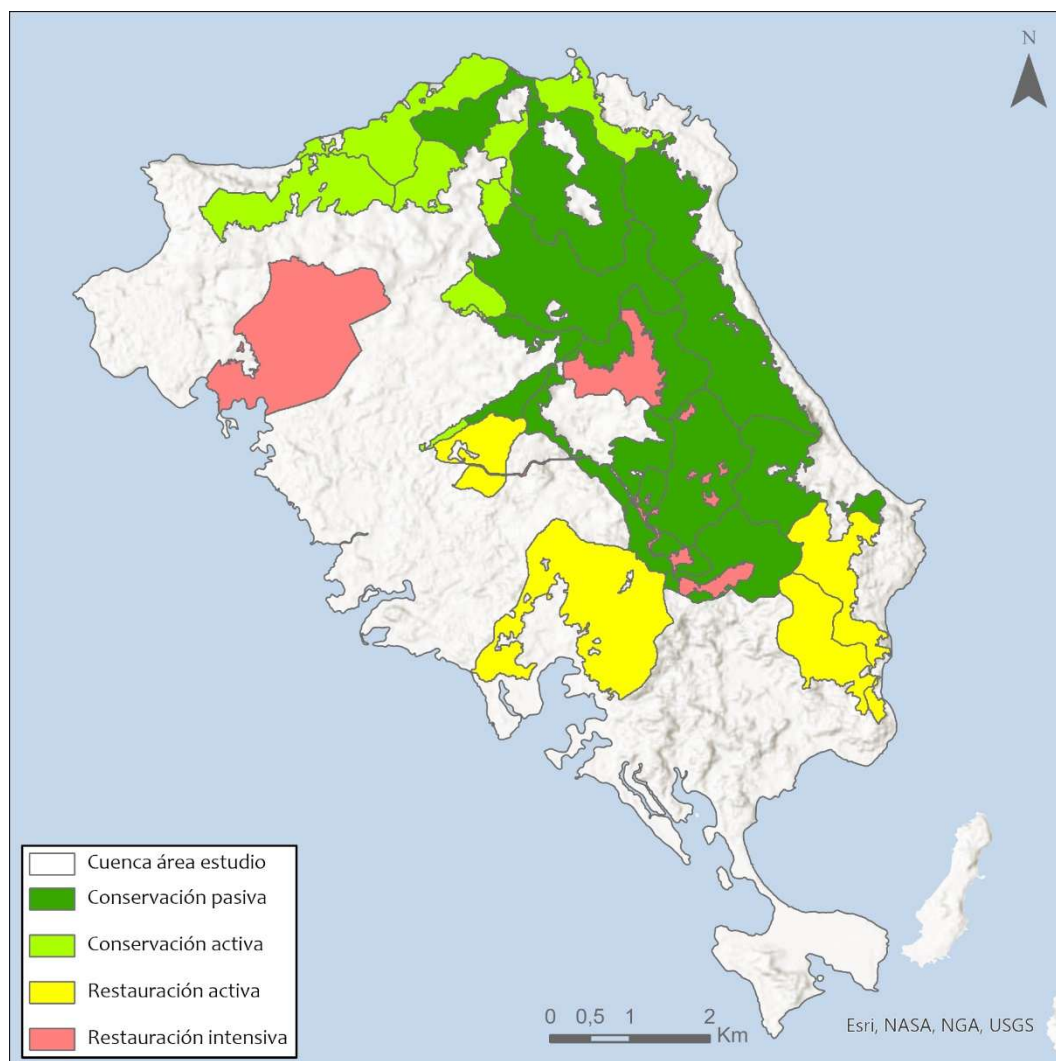


Figura 19. Áreas de conservación (pasiva y activa) y restauración (activa e intensiva) para la cobertura bosque latifoliado mixto maduro en el escenario futuro SSP545 2050 en la cuenca drenante de Isla Colón, Bocas del Toro. Fuente: IHCantabria, 2024.

Para la cobertura de bosque de manglar, se define el siguiente proceso de categorización en función de la idoneidad anteriormente obtenida. Aunque en este estudio se ha centrado el análisis en la categorización de las áreas de manglar existente, paralelamente la metodología desarrollada potencialmente permitiría categorizar áreas en las que, aunque actualmente no existe manglar, la idoneidad en la situación presente y en el escenario futuro las podrían convertir en áreas donde podrían desarrollarse SbN basadas en medidas de nuevo desarrollo o repoblación.

- Si un área de manglar presenta una mejor idoneidad en la situación presente que en el escenario futuro, se categoriza como un área donde deben desarrollarse SbN basadas en medidas de conservación del bosque de mangle.
- Si un área de manglar presenta una peor idoneidad en la situación presente que en el escenario futuro, se categoriza como un área donde deben desarrollarse SbN basadas en medidas de recuperación del bosque de mangle.

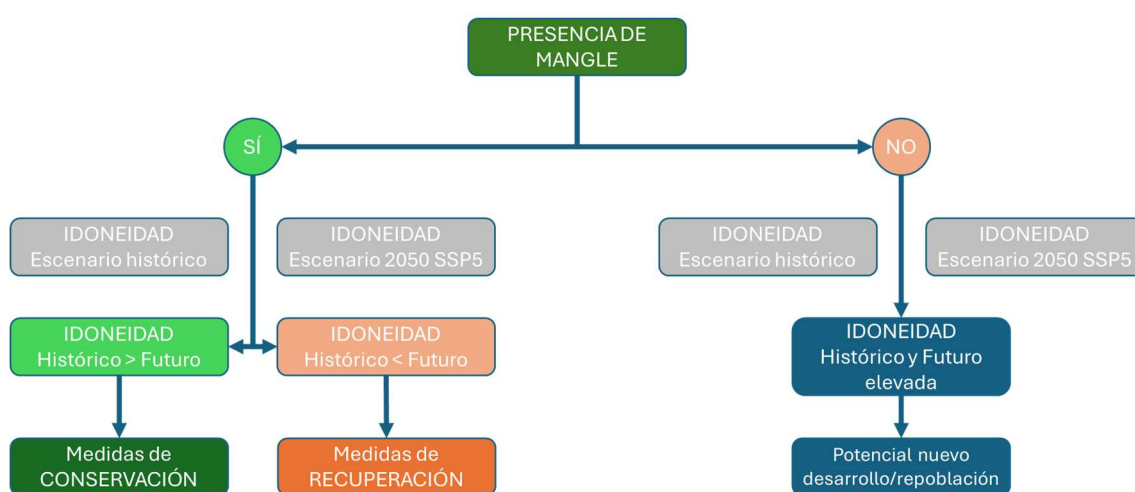


Figura 20. Esquema metodológico para la categorización del bosque de mangle en SbN.

La aplicación de esta propuesta metodológica permite obtener como resultado la identificación de aquellas áreas del actual bosque de mangle que pueden ser categorizadas como SbN, bien como medida de conservación del manglar existente, bien como medida de recuperación del mismo.

7.4. Identificación de áreas clave con alto potencial para la implementación de SbN

7.4.1. Conceptualización y caracterización de la relación SE – SbN

Como paso previo al modelado y cartografiado de SE, es necesario determinar la relación que existe entre los SE y las SbN que potencialmente pueden utilizarse para optimizar su provisión. Los SE considerados están fundamentalmente controlados por la interacción, a diversas escalas, de la vegetación terrestre con los factores físicos y procesos abióticos a escala de cuenca. Con el objetivo de identificar las SbN más adecuada para cada servicio, se identificó en primer lugar el proceso o componente biofísico que más pudiera beneficiarse de la aplicación de este tipo de solución a través de interacciones ampliamente contrastadas por la evidencia científica actual (Tabla 3). De la misma manera, se estableció la escala espacial de ecosistema / LULC a la que debería aplicarse la interacción para optimizar la provisión del SE.

Esta conceptualización permite establecer los métodos e información necesaria para conocer de forma espacialmente explícita cuales son las SbN (tanto de conservación como de restauración) de aplicación en el continuo territorial. Estas áreas, dada la naturaleza de los patrones y procesos del medio natural dominantes en la zona de estudio, con abundantes precipitaciones, topografía plana y un legado de ocupación del suelo dominado por procesos de usos agroganaderos, se encuentran principalmente relacionadas con la conservación y restauración de los bosques latifoliados mixtos maduros y bosques de manglar.

Amenaza	Servicio ecosistémico (SE)	Proceso / Comp. biofísico	Ecosistema/LULC (SbN)	Efecto
Inundación	Regulación hidrológica (frente inundaciones)	Conectividad lateral río - llanura de inundación	Llanura inundación y bosque latifoliado mixto maduro	Restauraciones de llanuras de inundación para aumentar el almacenamiento y la atenuación de inundaciones (Jacobsen et al., 2015). Moderación de caudales máximos al permitir el desbordamiento, ralentizando la ola de crecidas (Vis et al., 2001). La vegetación de ribera retarda ente 30-140 minutos el pico de caudal (Thomas y Nisbet, 2011).
		Generación de escorrentía	Bosque latifoliado mixto	El bosque latifoliado mixto maduro frena la escorrentía, interceptando hasta el 30% de la precipitación y promoviendo la infiltración del agua en el suelo, lo que puede aumentar la capacidad de almacenamiento hídrico en un 50% en comparación con áreas sin vegetación (Bruijnzeel, 2004). Reduce el riesgo de inundaciones en un 40% y mejora la estabilidad del ecosistema, lo que favorece la biodiversidad y la salud del suelo (Whelan et al., 2015).
Sequía	Regulación hidrológica (frente sequía)	Conectividad lateral río - llanura de inundación	Llanura inundación y bosque latifoliado mixto maduro	La vegetación de ribera aumenta entre un 15-71% la capacidad de almacenamiento de las llanuras (Thomas y Nisbet, 2011).
		Captura y almacén de agua	Bosque latifoliado mixto	El bosque latifoliado mixto maduro es fundamental en la captura y almacenamiento de agua, al aumentar la infiltración de lluvia en el suelo y mejorar la disponibilidad de agua en épocas de sequía. Este tipo de bosque puede incrementar la capacidad de retención de agua del suelo hasta un 50%, lo que permite almacenar grandes volúmenes de agua subterránea (Bruijnzeel, 2004). Además, su presencia puede reducir la escorrentía superficial en un 30%, favoreciendo la recarga de acuíferos y garantizando un suministro hídrico más estable durante períodos secos (Whelan et al., 2015).
Inundación	Protección costera	Inundaciones por eventos extremos	Bosque manglar de	Las áreas costeras protegidas por manglares son menos propensas a sufrir daños severos por ascenso de nivel del mar (USGS; 2018). Las zonas que cuentan con manglares tienden a recuperarse más rápidamente de desastres naturales (The Nature Conservancy, 2022). Los manglares protegen costas al mitigar huracanes, marejadas e inundaciones, regulando el impacto de inundaciones extremas. (The Nature Conservancy, 2021).

Tabla 3. Conceptualización de las medidas de adaptación basadas en Naturaleza para los servicios ecosistémicos considerados para la ciudad de Bocas del Toro. Fuente: IHCantabria, 2024.

7.4.2. Modelado e identificación de áreas proveedoras de SE

En los subapartados siguientes se describe la modelización realizada a nivel de provisión potencial de SE para cuantificar el efecto de las SbN. Como se ha señalado anteriormente, la modelización de SE está basada en la identificación de áreas prioritarias en las que está ocurriendo la provisión y demanda de los mismos. Los SE vienen determinados fundamentalmente por la interacción de la vegetación terrestre con factores topográficos, geomorfológicos y climáticos. Por ello, la selección e identificación de SbN en la matriz del paisaje se realizó en base a la identificación de áreas en las que se está produciendo una provisión deficiente del SE considerado debido a un estado de degradación de la vegetación, así como las áreas en las que la presencia de vegetal natural en un estado adecuado asegura la correcta provisión del SE. En el primer caso, deberán aplicarse soluciones de restauración mientras que en el segundo se aplicarán soluciones relacionadas con la conservación de la vegetación existente. En este contexto, la propuesta de SbN a integrar en la BGIN se basó en el establecimiento de umbrales estadísticos que prioricen aquellas áreas más interesantes por la intensidad y variedad (multifuncionalidad) de los SE potencialmente generados.

Regulación hidrológica frente inundaciones

- Volumen de almacenamiento de las llanuras de inundación

Una vez definidas las llanuras de inundación (ver apartado 7.3.1), la SbN lo constituiría el propio paisaje fluvial asumiendo su capacidad de almacenamiento de agua. Se identificaron aquellas llanuras de inundación con aptitud potencial del bosque de ribera como SbN de conservación y aquellas con aptitud

potencial de restauración del bosque como área de restauración (

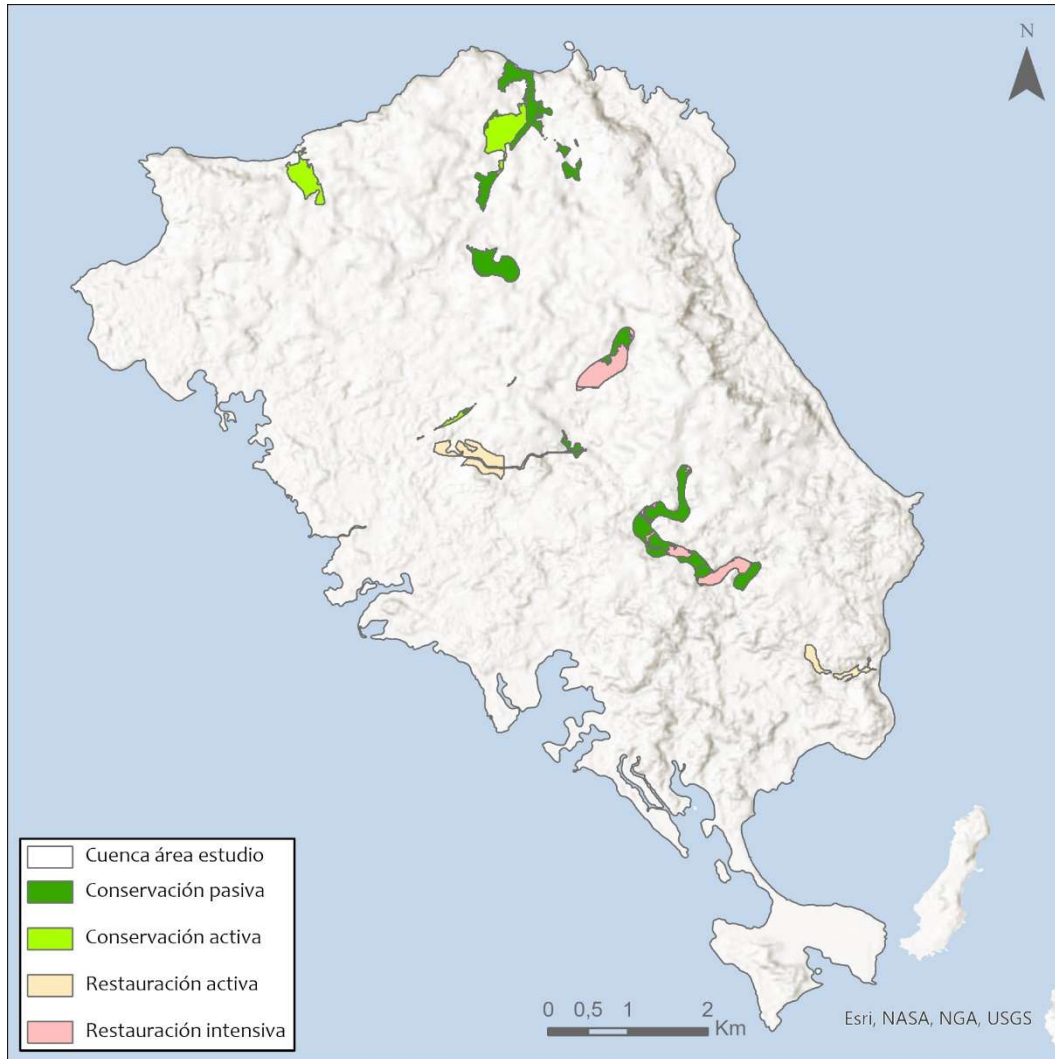


Figura 21).

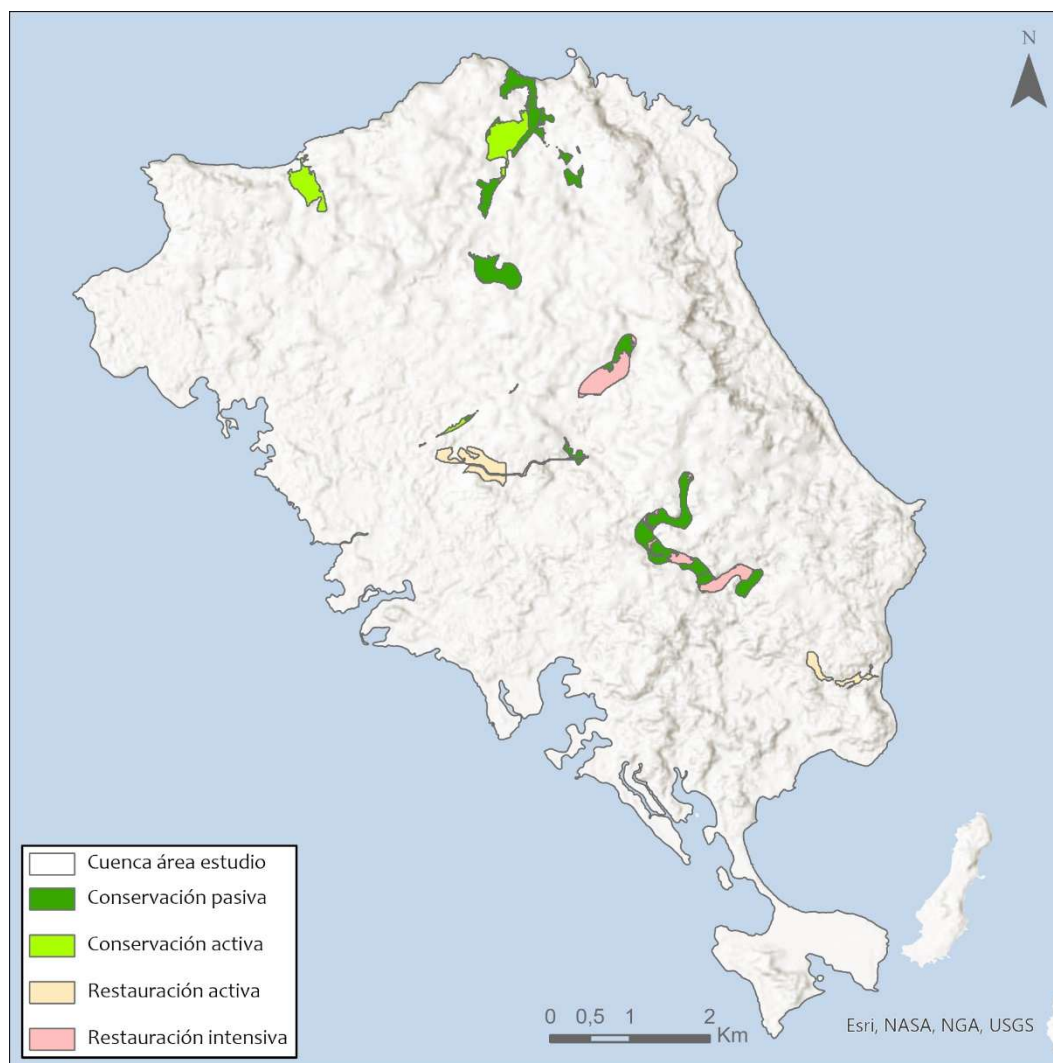


Figura 21. Mapa de SbN propuestas con bosque latifoliado mixto maduro para el SE de regulación hidrológica frente inundaciones en llanuras de inundación para la cuenca drenante de Bocas de Toro en el escenario futuro SS585 2050. Fuente: IHCantabria, 2024

- Control de escorrentía en las laderas

El potencial de una ladera para generar escorrentía (Figura 22) se consideró mediante los factores abióticos que controlan fundamentalmente la infiltración a escala de ladera (Dunne, et al., 1991), (Hopp & McDonnell, 2009): la pendiente y la permeabilidad del suelo. Además, según (Maetens, et al., 2012) las zonas con altas precipitaciones anuales suelen tener una distribución más uniforme de las precipitaciones a lo largo del año, lo que provoca una saturación estacional del suelo y una formación más rápida de escorrentía (Ponce & Hawkings, 1996) en las condiciones óptimas de permeabilidad y topografía. En este marco metodológico, se utiliza la pendiente y la permeabilidad del suelo para localizar aquellas laderas más susceptibles de generar escorrentía en cada cuenca considerando la precipitación como un indicador de magnitud de origen de la escorrentía. La permeabilidad del suelo se obtuvo de la información de geología procedente del IMHPHA/MiAMBIENTE y de la capa de geomorfología procedente del IGNTG, clasificando el área de estudio en zonas de permeabilidad baja, media y muy alta con base a bibliografía especializada y criterio de experto. Por su parte, la pendiente se derivó del MDT disponible y se promedió a escala de ladera de drenaje. Así, aquellas con una pendiente media de 5° a 45° que se encuentren en una zona de permeabilidad baja se consideran en el análisis como las laderas más importantes para la generación de escorrentía.

En este caso, se consideró el bosque latifoliado mixto maduro presente en las laderas como el elemento biótico que debería ser incluido como SbN. Aquellas laderas con riesgo alto de generación de escorrentía y con una potencialidad del bosque latifoliado mixto maduro de conservación se clasifican como SbN de conservación, en cambio, aquellas laderas también susceptibles de generar una alta escorrentía, pero con potencialidad de restauración de los bosques latifoliados mixtos maduros son determinadas como SbN de restauración (Figura 23).

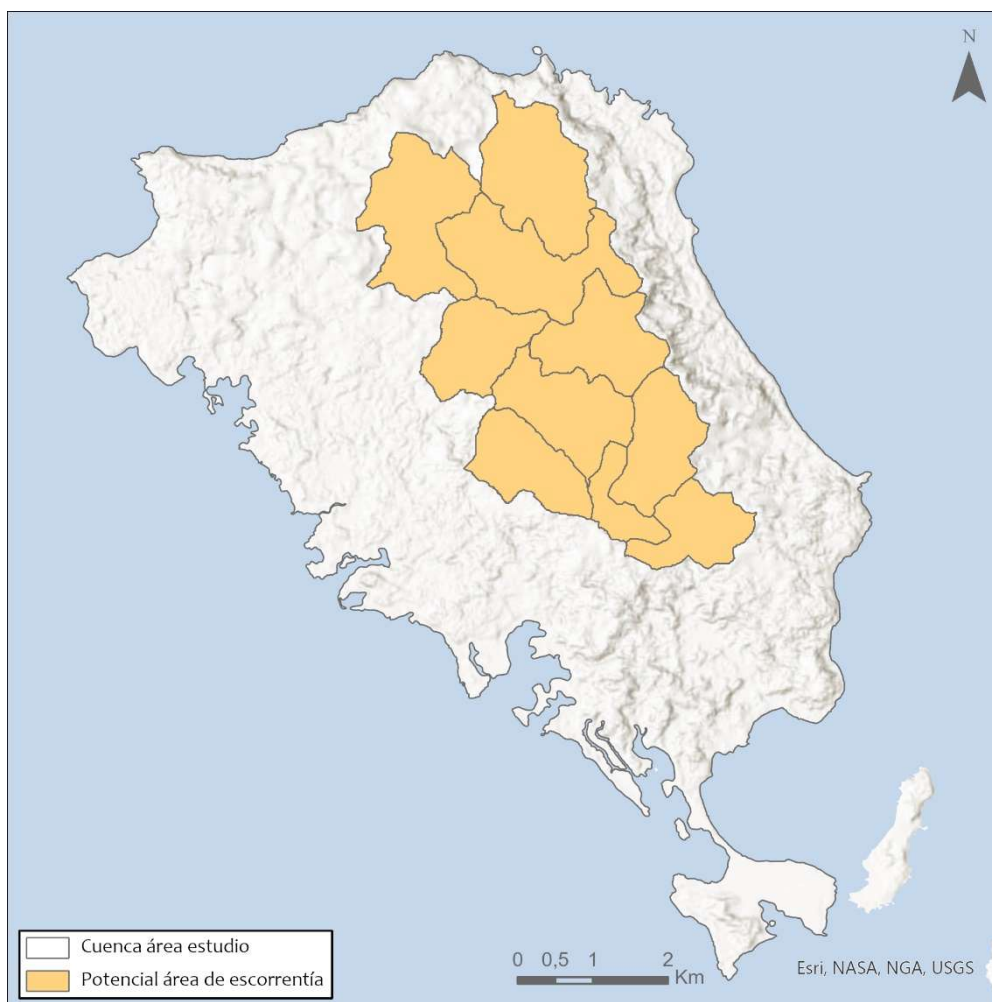


Figura 22. Laderas de drenaje con potencial de generar escorrentía según factores topográficos, de permeabilidad y de uso para la cuenca drenante de Isla Colón, Bocas del Toro. Fuente: IHCantabria, 2024

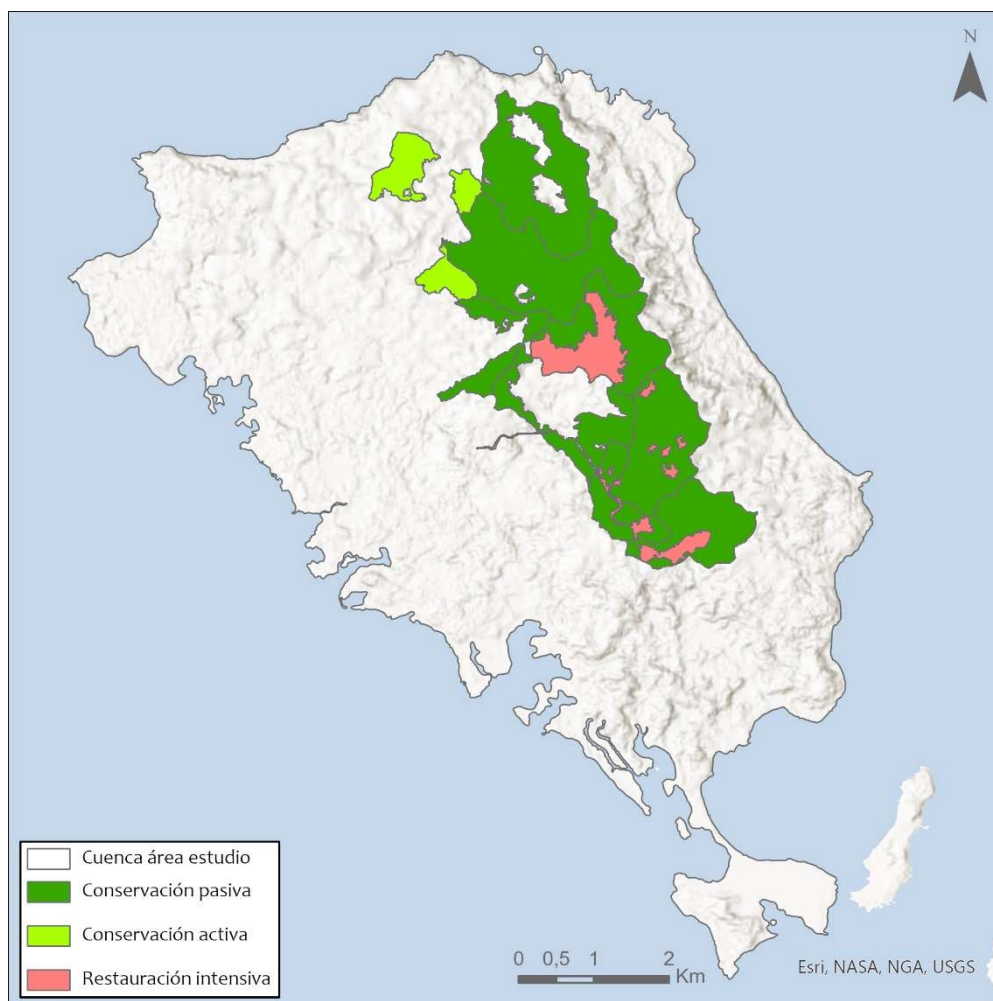


Figura 23. Mapa de SbN propuestas con bosque latifoliado mixto maduro para el SE de regulación hidrológica en laderas de drenaje para el control de escorrentía en la cuenca drenante de Colón en el escenario futuro SSP585 2050. Fuente: IHCantabria, 2024.

Regulación hidrológica frente sequía

- Volumen de almacenamiento de las llanuras de inundación

De forma análoga al anterior apartado, una vez definidas las llanuras de inundación (ver apartado 7.3.1), la SbN lo constituiría el propio paisaje fluvial asumiendo su capacidad de almacenamiento de agua. Se identificaron aquellas llanuras de inundación con aptitud potencial del bosque de ribera como SbN de conservación y aquellas con aptitud potencial de restauración del bosque como SbN de restauración (Figura 24).

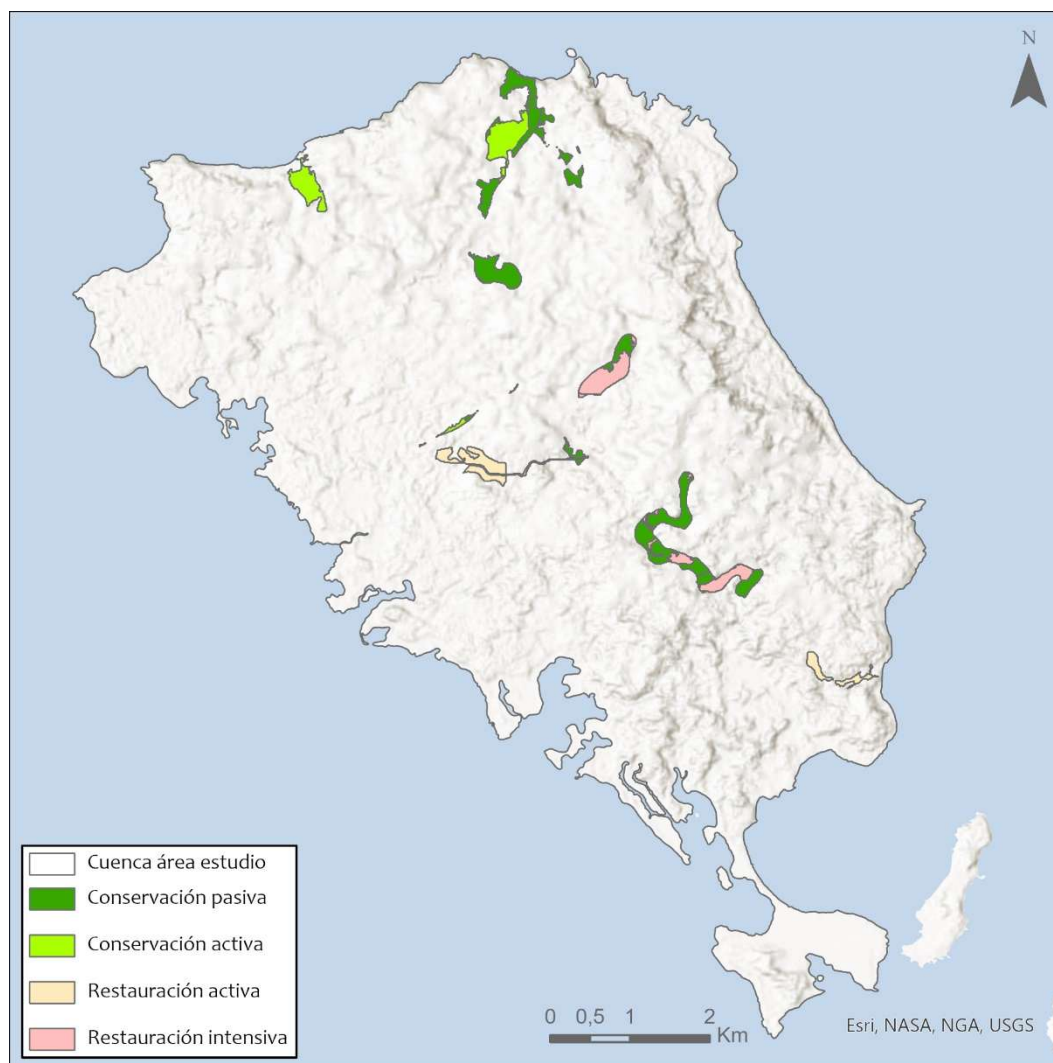


Figura 24. Mapa de llanuras de inundación para la cuenca drenante de Isla Colón, Bocas del Toro. Fuente: IHCantabria, 2024

- Captura y almacenamiento de agua

El potencial de una ladera para generar infiltración (Figura 25) se consideró mediante los factores abióticos que controlan fundamentalmente este fenómeno a escala de ladera (Dunne, et al., 1991), (Hopp & McDonnell, 2009): la pendiente y la permeabilidad del suelo. Además, según (Maetens, et al., 2012) las zonas con altas precipitaciones anuales y con una distribución uniforme de las precipitaciones a lo largo del año provoca una mayor capacidad de infiltración en condiciones óptimas de permeabilidad y topografía. En este marco metodológico, se utiliza la pendiente y la permeabilidad del suelo para localizar aquellas laderas más susceptibles de generar infiltración en la cuenca considerando la precipitación como un indicador de magnitud. La permeabilidad del suelo se obtuvo de la información de geología procedente del IMHPHA/MiAMBIENTE y de la capa de geomorfología procedente del IGNTG, clasificando el área de estudio en zonas de permeabilidad baja, media y muy alta con base a bibliografía especializada y criterio de experto. Por su parte, la pendiente se derivó del MDT disponible y se promedió a escala de ladera de drenaje. Así, aquellas con una pendiente media menor al 5° y que se encuentren en una zona de permeabilidad alta se consideran en el análisis como las laderas más importantes para la generación de infiltración de agua.

En este caso, se consideró el bosque latifoliado mixto maduro presente en las laderas como el elemento biótico que debería ser incluido como SbN. Aquellas laderas con una capacidad alta de infiltración y con una potencialidad del bosque latifoliado mixto maduro de conservación se clasifican como SbN de conservación, en cambio, aquellas laderas también con alta capacidad de infiltración, pero con potencialidad de restauración de los bosques latifoliados mixtos maduros son determinadas como SbN de restauración (Figura 26).

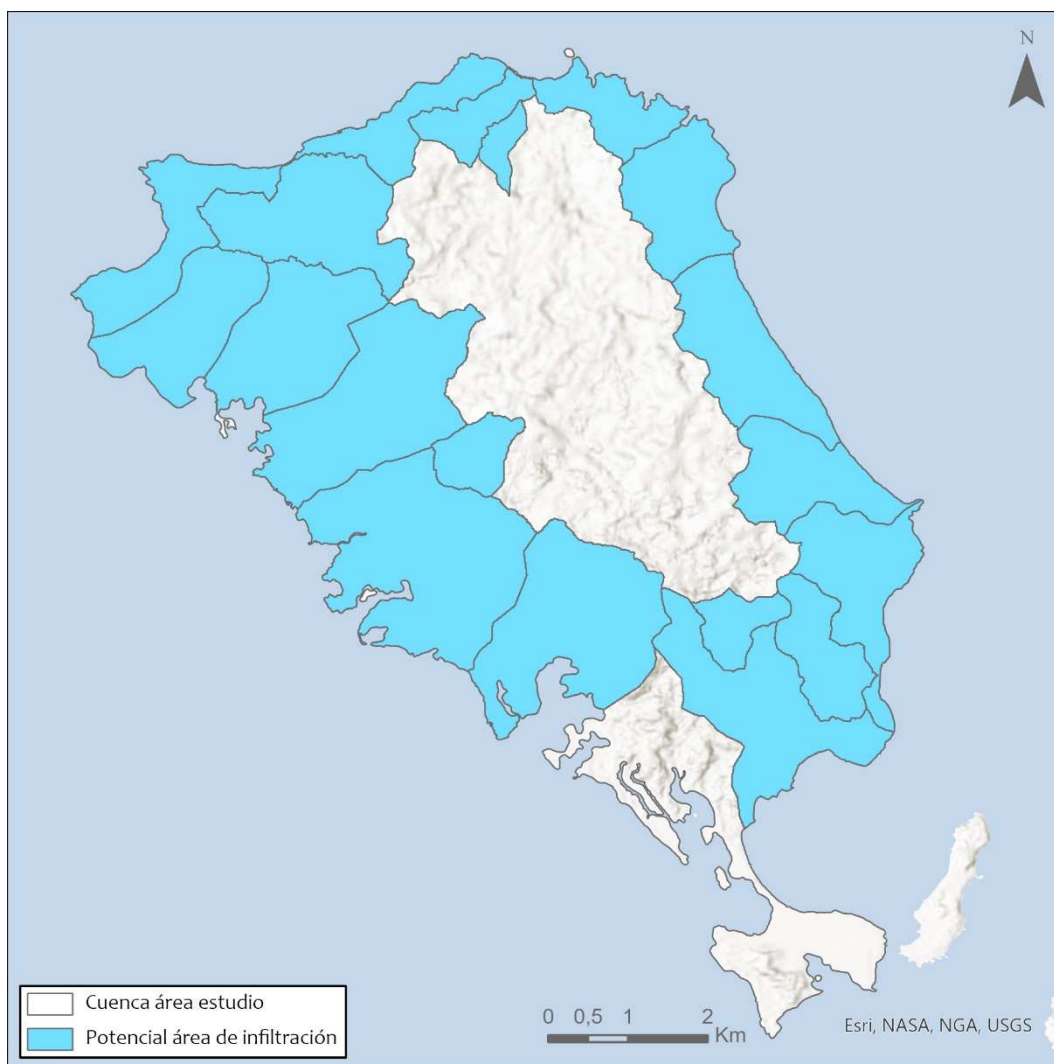


Figura 25. Laderas de drenaje con potencial de generar infiltración según factores topográficos, de permeabilidad y de uso para la cuenca drenante de Isla Colón, Bocas del Toro. Fuente: IHCantabria, 2024, 2024

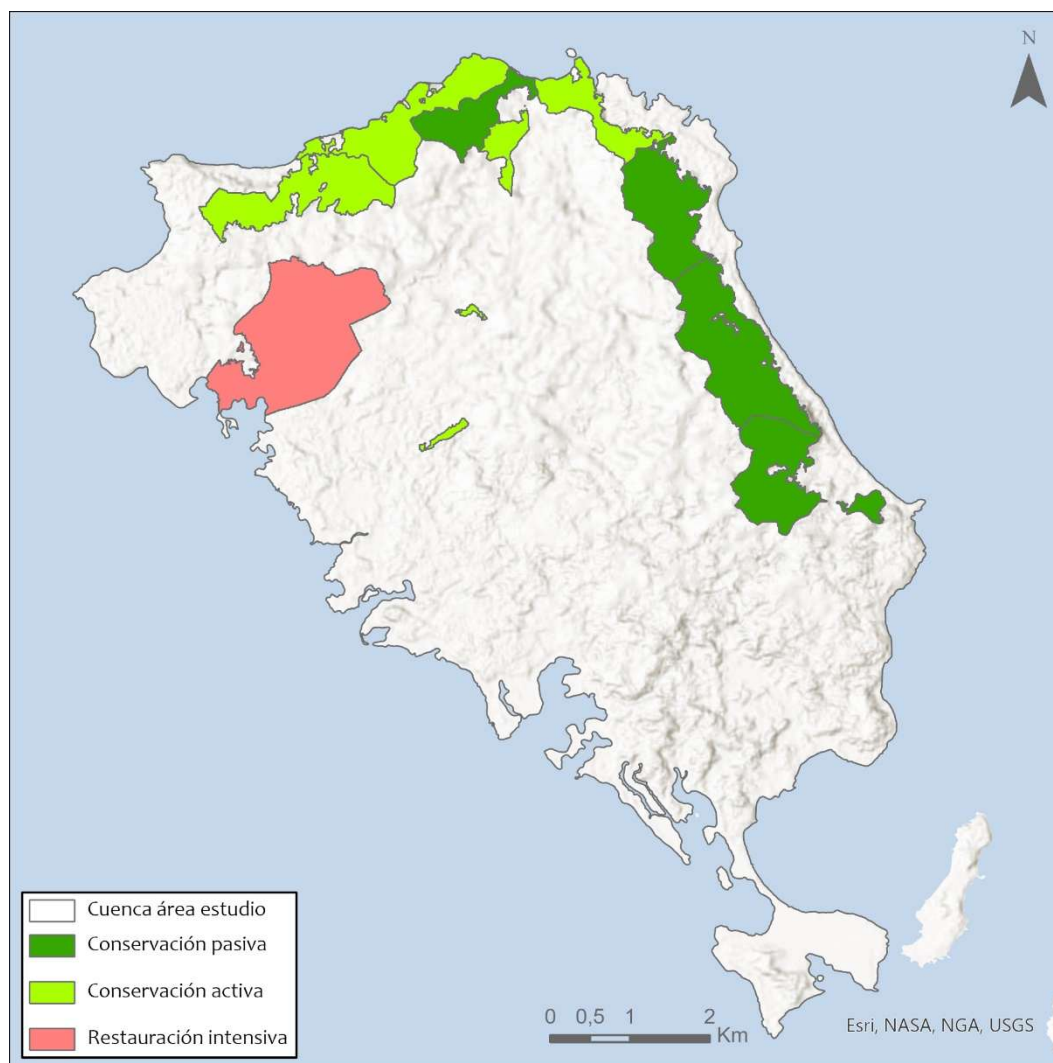


Figura 26. Mapa de SbN propuestas con bosque latifoliado mixto maduro para el SE de regulación hidrológica en laderas de drenaje para el aumento de la infiltración en la cuenca drenante de Colón en el escenario futuro SSP585 2050. Fuente: IHCantabria, 2024

Protección costera frente a inundaciones por eventos extremos

El servicio ecosistémico de protección costera, particularmente el que ofrece el bosque de manglar, es fundamental para mitigar el impacto de inundaciones causadas por eventos extremos en la costa de Isla Colón, Bocas del Toro. La capacidad de estos bosques para actuar como una barrera natural contra oleajes y tormentas se evalúa a través de los factores abióticos y bióticos que indican su aptitud hidroclimática y con ello su efectividad. En este sentido, se identifican los píxeles de manglar que presentan un estado de conservación óptimo, clasificándolas como 'Zonas de conservación', mientras que aquellas áreas que muestran signos de degradación o pérdida de cobertura se catalogan como 'Zonas de restauración'.

Este marco metodológico permite establecer prioridades de conservación y restauración, dado que la preservación y restauración de los bosques de manglar no solo potencia su capacidad de protección costera, sino que también contribuye a la biodiversidad y la estabilidad ecológica de la región. Por lo tanto, aquellas zonas de la costa de Bocas del Toro con una alta densidad de manglares y características adecuadas para su desarrollo se consideran críticas para la resistencia frente a

inundaciones y serán objeto de estrategias de manejo y conservación. En la Figura 27 se muestra esta categorización del manglar existente en el área de estudio.

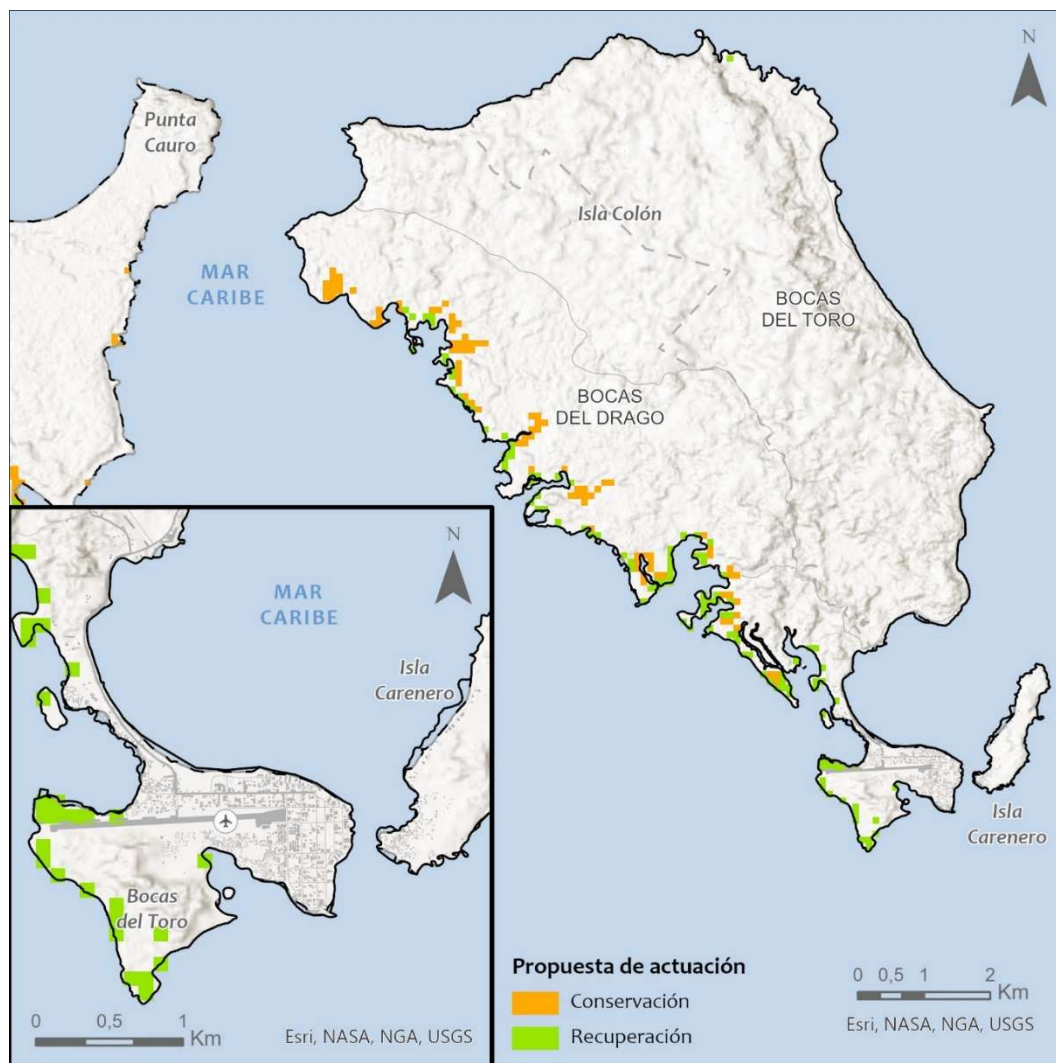


Figura 27. Mapa de propuesta de SbN basadas en medidas de conservación y recuperación del bosque de mangle para la ciudad de Bocas del Toro. Fuente: IHCantabria, 2024.

8. ESTUDIO DE RIESGO POR ESCASEZ DE RECURSOS HÍDRICOS

El objetivo principal del presente estudio es conocer cómo afecta la escasez del recurso hídrico a la población del área de estudio, de Isla Colón y Carenero. La escasez representa una situación permanente de déficit en relación con la demanda de agua en un sistema de recursos de ámbito local o regional, caracterizado, bien por un clima árido o bien por un rápido crecimiento de las demandas consuntivas.

El agua que se utiliza en el área de estudio proviene principalmente de la cuenca del Big Creek (o Quebrada Grande), uno de los principales cauces de Isla Colón. En la cuenca baja de esta quebrada se localiza un embalse, denominado Lago Big Creek, del que se toma el agua para la planta de tratamiento de agua potable y desde ahí, dar servicio al área poblada.

La planta de tratamiento también se abastece de 8 pozos situados en el interior de la isla que funcionan alternativamente en grupos de 4. Su uso depende de la disponibilidad de diésel para el funcionamiento de las bombas de extracción, ya que se localizan en un área en el que aún no hay servicio eléctrico, por lo que no están continuamente trabajando.

Este estudio se centra en el análisis de la escasez de recursos hídricos superficiales que abastecen al área de estudio, cuyo uso principal es el consumo humano.

8.1. Metodología de obtención del riesgo por escasez de recursos hídricos

Para obtener el riesgo de escasez de recursos hídricos se ha seguido una metodología que incluye los siguientes pasos, aplicados de forma secuencial:

- Obtención del régimen natural de caudales de la cuenca del Big Creek, empleando un modelo hidrológico semidistribuido.
- Obtención del régimen de caudales modificado, considerando los principales usos del agua y embalses en la cuenca. Se consideran caudales de mantenimiento como restricciones a los usos existentes, con una prioridad dada.
- Determinación de la garantía de satisfacción media de los diferentes usos, a partir del modelo anterior. Dicha garantía opera como un nivel de amenaza, dentro del marco conceptual de análisis de riesgos aplicado.
- Obtención de las principales variables de vulnerabilidad relevantes para determinar el riesgo de escasez de recursos hídricos.
- Cálculo del riesgo estandarizado, definido en una escala homogénea de 0 a 1, como combinación de la amenaza y la vulnerabilidad.

Cabe señalar que el procedimiento descrito se basa en procesar series climáticas de las variables relevantes (precipitación, temperaturas y evapotranspiración potencial) a escala diaria durante los periodos de análisis, tanto para el clima actual como para las proyecciones de cambio climático futuras (horizontes 2030 y 2050 para el escenario SSP5-8.5), por lo que el recurso analizado en este estudio es únicamente el superficial. Los resultados son también las series de satisfacción de las demandas a escala mensual, que posteriormente se postprocesan para obtener sus estadísticos (media, desviación

típica y percentiles). Por tanto, el análisis es totalmente probabilista en lo que respecta a la amenaza, si bien los factores de vulnerabilidad, y el riesgo resultante, se expresan de manera determinista.

8.2. Caracterización de la amenaza

Para la caracterización de la amenaza de escasez de recursos hídricos se realiza el balance hídrico a nivel de subcuenca. La obtención del balance hídrico a nivel de subcuenca es una tarea fundamental para conocer la disponibilidad real de agua a escala de cuenca hidrográfica. Su finalidad es determinar, con los caudales naturales obtenidos tras la aplicación de un modelo hidrológico y las demandas existentes en las diferentes subcuencas, esto es, el agua que se utiliza para cada uso, la garantía de suministro de cada demanda considerada y los caudales intervenidos fluyentes en cada tramo de río.

La metodología utilizada se basa en la realizada en el Estudio de Riesgo por Efectos del Cambio Climático y Generación del Atlas Interactivo de Visualización de los Resultados para la República de Panamá, desarrollada por IHCantabria para Banco Interamericano para el Desarrollo (BID), adaptada al área de estudio.

8.2.1. Modelo hidrológico

Uno de los fenómenos que pueden generar mayores impactos, como consecuencia del cambio climático, es la alteración del régimen de caudales en los ríos. El análisis de recursos hídricos tiene como objetivo cuantificar la variabilidad de los caudales fluyentes del Big Creek, tanto en situación actual como bajo distintas proyecciones de cambio climático. Cabe resaltar que el objetivo en este estudio es determinar no sólo los caudales medios, sino su variabilidad a lo largo del año, incluyendo años secos y húmedos.

La transformación del agua de lluvia en caudal fluvial es un proceso relativamente complejo que puede aproximarse mediante modelos hidrológicos. En su versión más simple (por ejemplo, las curvas de Budyko), se calcula únicamente un caudal medio, pero resulta más útil determinar las series completas de caudales a partir de las precipitaciones y la evapotranspiración, la cual está muy ligada a la temperatura y a la vegetación.

En 2015, IHCantabria desarrolló un estudio hidrológico de las cuencas vertientes al sistema del Canal de Panamá (sector Gatún y Alhajueta), cubriendo aproximadamente 3,300 km², lo que supone un 4.5% de la superficie de Panamá. En dicho estudio se comprobó que un modelo hidrológico basado en principios de equilibrio desarrollado en IHCantabria, en concreto el *Logistic Equilibrium Model* (LEM, por sus siglas en inglés), era capaz de reproducir de forma muy satisfactoria el comportamiento de estos ríos; en concreto, se alcanzaron niveles de ajuste de $NS = 0.87$ a escala diaria (6 años de datos) en las estaciones de Peluca y Candelaria, ambas tributarias del lago Alhajueta (ver Figura 28). Por otra parte, se pudo comprobar que la relativa homogeneidad de clima y suelos de la región permitía extrapolar con buena aproximación los parámetros del modelo obtenidos a cuencas no instrumentadas.

En la actualidad, se han desarrollado versiones mejoradas del modelo LEM (por ejemplo, se cuenta con una versión semiagregada y distribuida), al tiempo que se dispone de nuevos datos para su calibración. Se propone, por tanto, el uso de este modelo para simular la situación actual y los escenarios futuros en cuanto a recursos hídricos en Panamá. El modelo es libre y abierto, y se dispone de códigos y ejecutables en Python, R y Matlab, que podrían ser transferidos, con los talleres de formación/capacitación necesarios, a las instituciones que lo requieran.

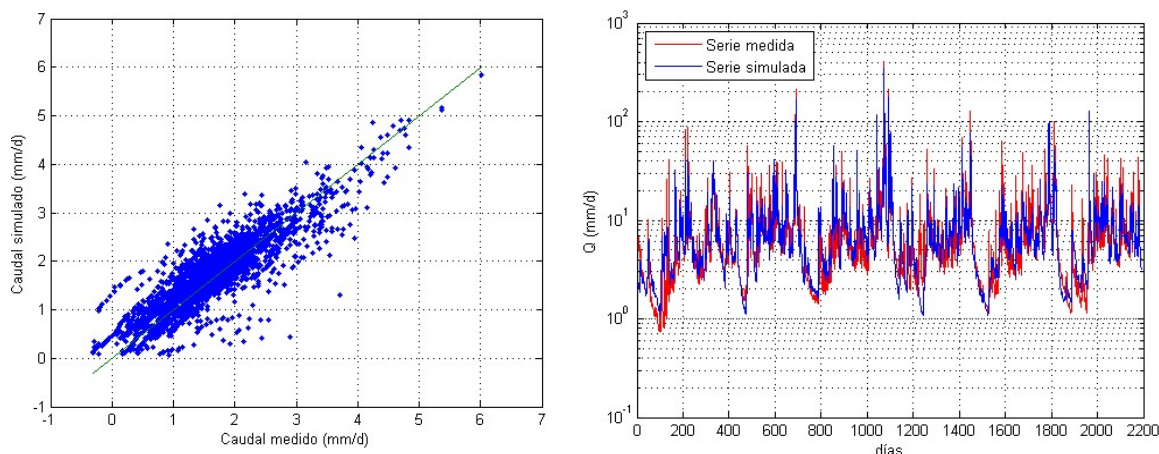


Figura 28. Comparación de caudales diarios medidos y simulados en escala logarítmica (izquierda) y caudales medidos vs. simulados en escala semilogarítmica (derecha) en la estación Peluca. Fuente: IHCantabria, 2015.

Definición de subcuencas de trabajo

La red hidrográfica básica de Panamá está dividida en 52 cuencas (ver Figura 29), de las cuales 18 corresponden a la vertiente del mar Caribe, representando el 30% del territorio nacional y denominándose con números impares comenzando desde el 87 hasta el 121 (según la convención aceptada tras el Proyecto Hidrometeorológico Centroamericano de 1972); las otras 34 cuencas hidrográficas pertenecen a la vertiente del océano Pacífico, representando el 70% restante del territorio nacional, denominándose con números pares desde el 100 hasta el 166. El tamaño medio de estas cuencas es de unos 1,500 km², siendo las más extensas la de Tuirá-Chucunaque (13,400 km²) y Bayano (5,291 km²).

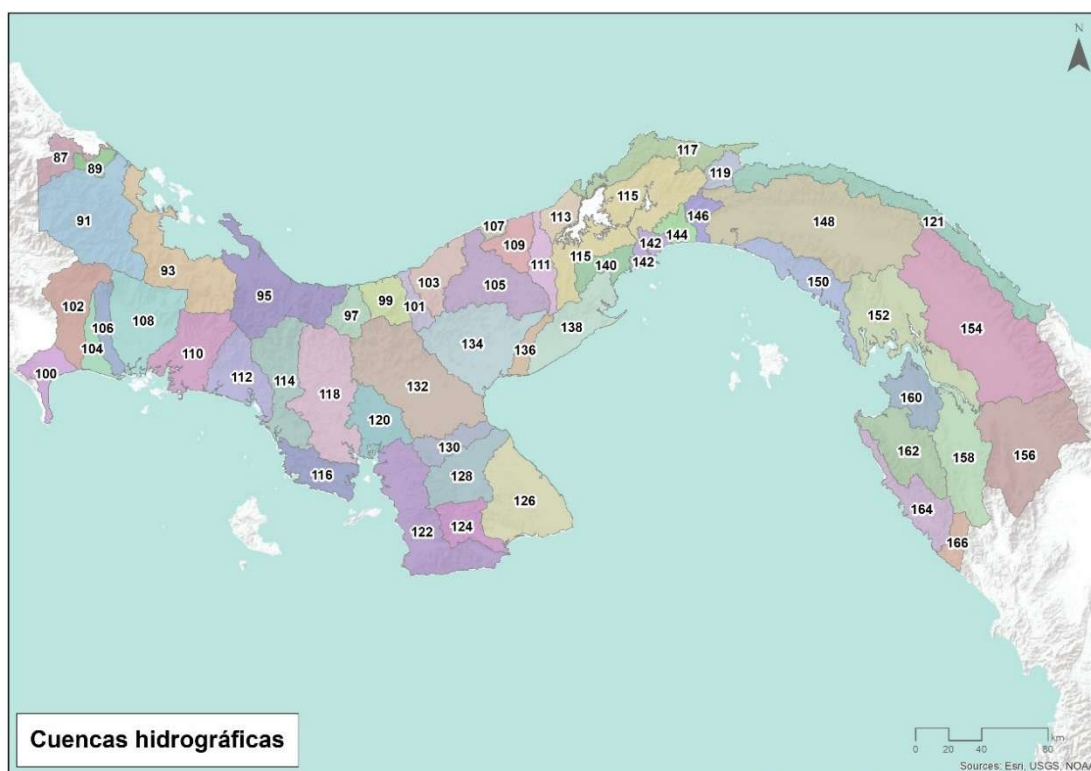


Figura 29. Cuencas hidrográficas oficiales existentes en el territorio de Panamá y su nomenclatura. Fuente: IHCantabria, 2024.

Para el Estudio de Riesgo por Efectos del Cambio Climático y Generación del Atlas Interactivo de Visualización de los Resultados para la República de Panamá, se ha llevado a cabo una subdivisión de las cuencas oficiales, respetando su nomenclatura oficial, hasta llegar a un total de 719 subcuencas con un tamaño mediano de 90 km² (incluyendo 15 subcuencas pertenecientes a Costa Rica que vierten a Panamá y que son necesarias para la caracterización de los caudales en la totalidad del territorio panameño).

El proceso de subdivisión de las cuencas oficiales se ha basado en las subcuencas que fueron proporcionadas por la Dirección de Seguridad Hídrica del Ministerio de Ambiente, si bien se han realizado algunas modificaciones con base en la hidrología, para favorecer un tamaño de subcuenca más homogéneo en todo el territorio.

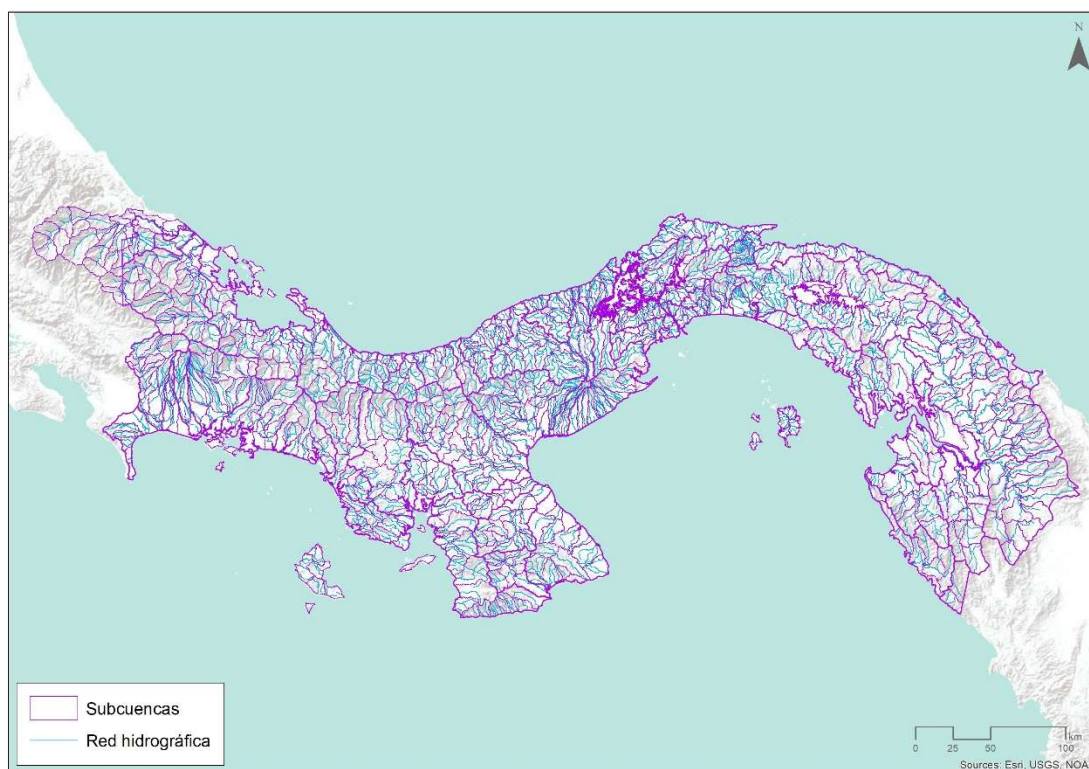


Figura 30. Subcuencas consideradas en el territorio de Panamá. Fuente: IHCantabria, 2024.

El recurso hídrico para consumo humano de Isla Colón y Carenero se obtiene de la cuenca del Big Creek (o Quebrada Grande). En la Figura 31 se presenta la cuenca de estudio y en la Tabla 4 sus principales características.

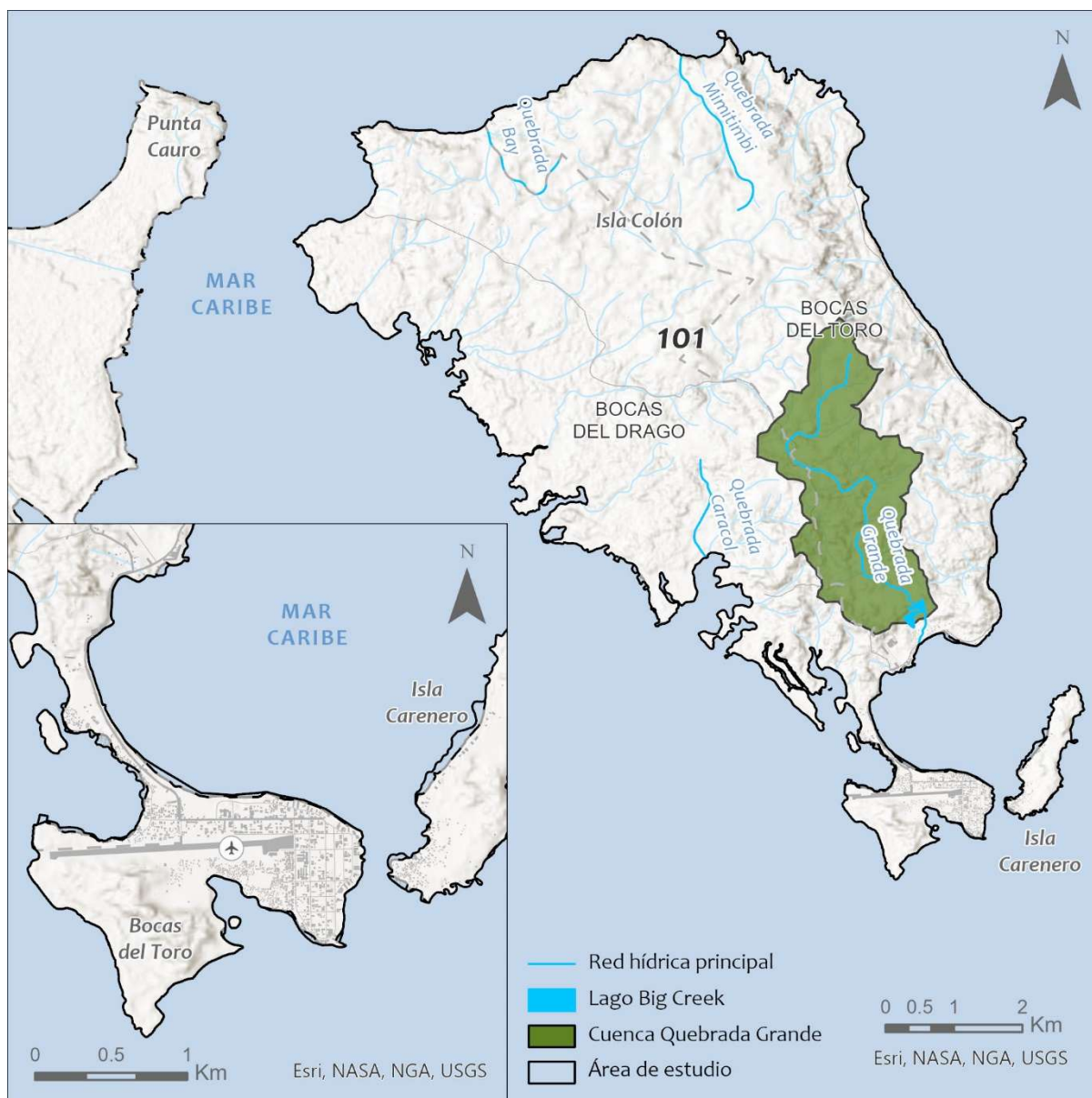


Figura 31. Cuenca de estudio, Big Creek. Fuente: IHCantabria, 2024.

Cuenca	Área (km ²)	Altura media (m)	Longitud del cauce (km)	Pendiente
Big Creek (Quebrada Grande)	6.10	24.86	6.19	0.0089

Tabla 4. Características principales de la cuenca de estudio, cuenca del Big Creek. Fuente: IHCantabria, 2024.

Para la cuenca de estudio, se han tenido en cuenta las variables tipo de suelo, uso del suelo y pendiente para asignar un valor del número de curva, que es uno de los parámetros hidrológicos fundamentales que utiliza el modelo LEM. Además, se han determinado las longitudes y pendientes medias de los cauces principales en cada subcuenca, con el fin de calcular el tiempo de respuesta hidrológica (similar al tiempo de concentración), otro parámetro principal empleado por el modelo.

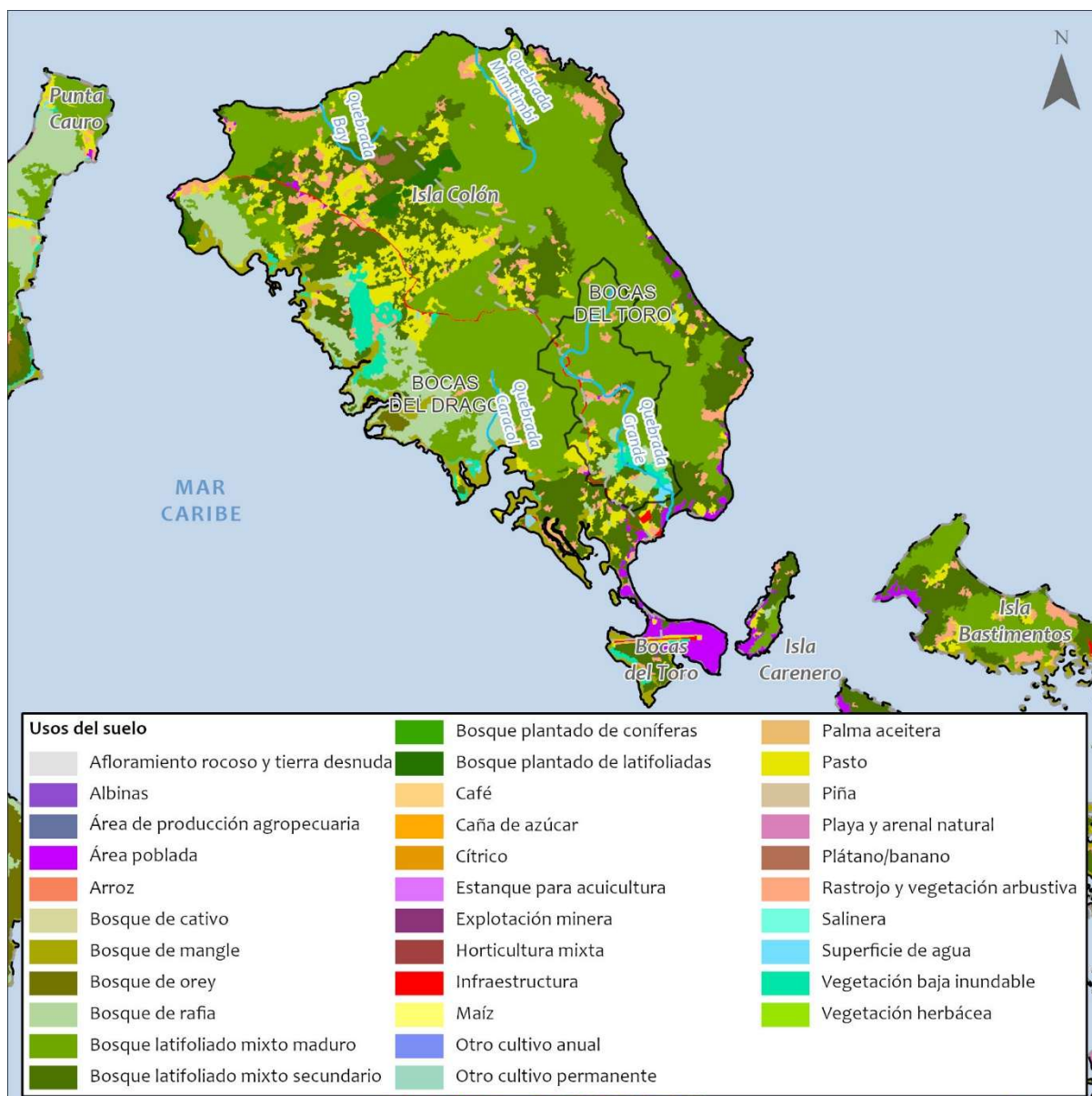


Figura 32. Usos del suelo de la cuenca de estudio, cuenca del Big Creek. Fuente: IHCantabria, 2024.

Tipo	CNII	Tipo	CNII
Afloramiento rocoso y tierra desnuda	71	Explotación minera	85
Albinas	67	Horticultura mixta	70
Área heterogénea de producción agropecuaria	76	Infraestructura	92
Área poblada	85	Maíz	67
Arroz	67	Otro cultivo anual	67
Bosque de cativo	58	Otro cultivo permanente	67
Bosque de mangle	96	Palma aceitera	66
Bosque de orey	58	Pasto	69
Bosque de rafia	58	Piña	60
Bosque latifoliado mixto maduro	58	Plátano/banano	60
Bosque latifoliado mixto secundario	58	Playa y arenal natural	25
Bosque plantado de coníferas	52	Rastrojo y vegetación arbustiva	58

Tipo	CNII	Tipo	CNII
Bosque plantado de latifoliadas	58	Salinera	25
Café	67	Superficie de agua	100
Caña de azúcar	67	Vegetación baja inundable	58
Cítrico	60	Vegetación herbácea	69
Estanque para acuicultura	100		

Tabla 5. Número de curva asignado por uso del suelo. Fuente: IHCantabria, 2024

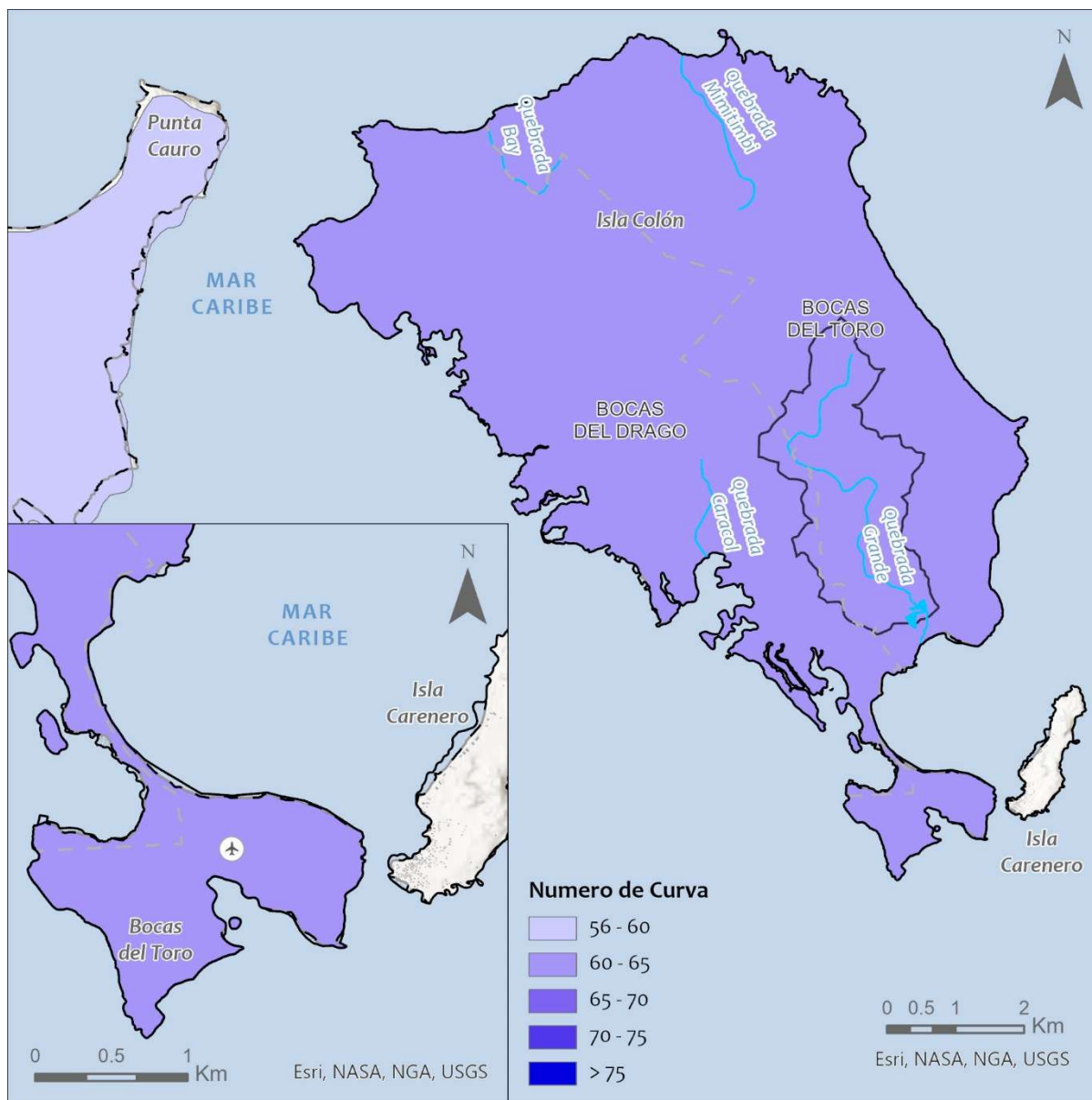


Figura 33. Número de curva (CN-II) de la cuenca de estudio, cuenca del Big Creek. Fuente: IHCantabria, 2024.

También se han extraído las series climáticas de precipitación y evapotranspiración potencial (ETP) diarias para cada una de las subcuencas tanto para la situación actual como para los escenarios de cambio climático SSP 585 2030 y 2050 (representados por la mediana de los 23 modelos cambio climático utilizados).

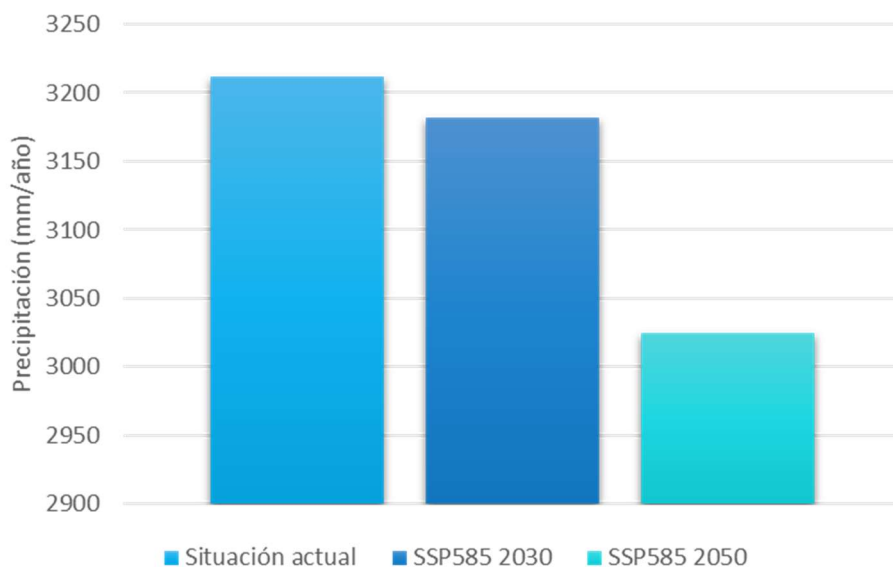


Figura 34. Precipitación media anual (mm/año) en la cuenca del Big Creek para la situación actual y para los escenarios de cambio climático SSP 585 2030 y 2050. Fuente: IHCantabria, 2024.

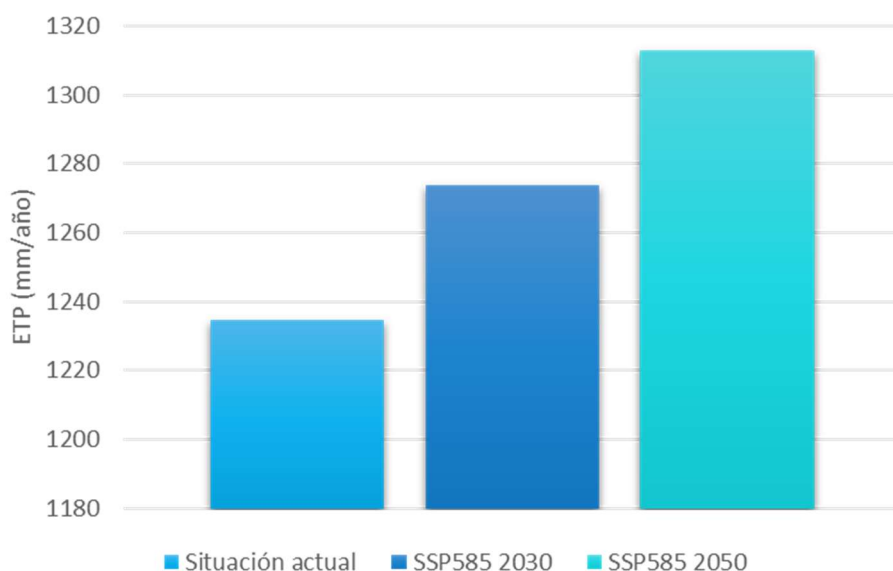


Figura 35. ETP media anual (mm/año) en la cuenca del Big Creek para la situación actual y para los escenarios de cambio climático SSP 585 2030 y 2050. Fuente: IHCantabria, 2024.

Descripción del modelo hidrológico LEM

El modelo hidrológico de equilibrio logístico fue desarrollado por IHCantabria para resolver de forma agregada los procesos de producción de escorrentía en cuencas naturales, teniendo en cuenta los siguientes requisitos:

- El modelo debe incorporar un número reducido de parámetros, no más de 3 o 4, incluyendo uno para el fenómeno de enrutamiento.

- Dichos parámetros deben guardar relación con otros parámetros previamente usados en hidrología aplicada: número de curva, capacidad de almacenamiento del suelo, parámetros de Budyko, tiempo de concentración, etc.
- Las ecuaciones del modelo deben poder resolverse con un esquema numérico simple e incondicionalmente estable, para cualquier paso de tiempo, y empleando tanto caudales medios (a lo largo del intervalo de tiempo) como instantáneos. En consecuencia, el modelo debe ser eficiente en términos computacionales, para facilitar la calibración o su aplicación en un marco probabilista.
- El modelo debe poder representarse en forma de espacio de estado (o *state-space*), para poder aplicar, en caso necesario, técnicas como los filtros de Kalman y sus variantes.
- El modelo debe representar de forma diferenciada el proceso de conversión de la lluvia en escorrentía, por un lado, y el de propagación de la escorrentía al punto de salida, por otro. Ambos subprocesos (que denominaremos escorrentía y enrutamiento) deben ser independientes y estar desacoplados.

La idea germinal para lograr estos objetivos fue abandonar el enfoque mecanicista de los modelos de depósitos, y tratar de representar el proceso hidrológico a partir de una serie de hipótesis empíricas basadas en lo que se ha venido en denominar hidrología adaptativa o darwiniana:

1. Las cuencas hidrográficas son sistemas complejos que persiguen continuamente un equilibrio dinámico, dado por una combinación del forzamiento climático (principalmente asociado a la precipitación y evapotranspiración potencial) y algunas características clave del terreno (topografía, vegetación, suelo, geología, etc.). La evolución de la escorrentía (R) hacia el equilibrio sigue una ley clásica de crecimiento limitado o ecuación logística:

$$\frac{dR(t)}{dt} = K \cdot R(t) \cdot \left(1 - \frac{R(t)}{R_{eq}}\right)$$

que incluye dos parámetros que varían en el tiempo: la capacidad de carga o la escorrentía de equilibrio (R_{eq}) y la tasa de crecimiento (K).

2. La escorrentía de equilibrio R_{eq} se puede expresar como un coeficiente de escorrentía de equilibrio (C_{eq}) multiplicado por la precipitación instantánea: $R_{eq} = P \cdot C_{eq}$. El coeficiente de escorrentía de equilibrio (C_{eq}) sigue una fórmula de tipo Budyko, en este caso gobernada por una relación de aridez dinámica que refleja las condiciones de humedad antecedente de la cuenca.
3. La tasa de crecimiento (K) de la ecuación logística es una función lineal de la precipitación: $K = \frac{P}{S_0}$, donde S_0 es una constante con unidades de longitud (mm) que representa un espesor característico del suelo (pero no se trata de su capacidad máxima de almacenamiento).
4. La ecuación logística representa la producción de agua sin considerar ningún tiempo de viaje o mecanismo de enrutamiento desde las zonas de producción de escorrentía hasta el punto final de medida del caudal, en la salida de la cuenca. Cuando el intervalo de tiempo de análisis es del mismo orden de magnitud que el tiempo de respuesta de una cuenca, se debe agregar

un método de propagación o factor de retraso para transformar la escorrentía (R) en caudal (Q), medido en la salida de la cuenca.

Si se adopta un modelo lineal para el submodelo de enrutamiento (cualquier otro método puede ser válido, incluido un desfase temporal constante) se llega al siguiente sistema de ecuaciones diferenciales, que constituye la versión estándar del LEM:

$$\frac{dR(t)}{dt} = \frac{P(t)}{S_0} \cdot R(t) \cdot \left[1 - \frac{R(t)}{R_{eq}(t)} \right]$$

$$\frac{d\hat{P}(t)}{dt} = P(t) - \frac{\hat{P}(t)}{\lambda}$$

$$\frac{d\hat{E}(t)}{dt} = E(t) - \frac{\hat{E}(t)}{\lambda}$$

$$R_{eq}(t) = P(t) \cdot C_{eq}(\psi); C_{eq}(\psi) = e^{-a \cdot \psi}, \psi = \frac{\hat{E}}{\hat{P}}$$

$$\frac{dQ(t)}{dt} = \frac{1}{\tau} \cdot [R(t) - Q(t)]$$

Donde R y Q representan la escorrentía total y la descarga medida en la salida de la cuenca, respectivamente. P y E son la precipitación y la evapotranspiración potencial en cada paso de tiempo, mientras que \hat{P} y \hat{E} son valores promediados de P y E durante un periodo de tiempo característico, respectivamente. La versión estándar del LEM tiene cuatro parámetros:

1. λ (días), que representa el tiempo característico de respuesta lenta o la "memoria" de la cuenca.
2. S_0 (mm), que representa un espesor medio de suelo o una capacidad de almacenamiento característica de la cuenca (pero no es su máxima capacidad de almacenamiento)
3. a (-): un parámetro adimensional que modifica la forma de la función de equilibrio (típicamente en el rango 0.5-1.5)
4. τ (horas), el parámetro de enrutamiento, que es similar a un tiempo al pico característico o un tiempo de respuesta rápido de la cuenca.

Cabe indicar que este sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias puede resolverse numéricamente de manera muy eficiente con un esquema explícito incondicionalmente estable, aprovechando el hecho de que todas las ecuaciones, y en especial la logística, tienen solución analítica.

Las ecuaciones anteriores pueden aplicarse de manera agregada para toda una cuenca, considerada como un ente único, o bien de manera semi-distribuida, considerando varias subcuencas, cada una de ellas con sus parámetros y forzamientos climáticos diferenciados. Si se emplea el modelo en un marco semi-distribuido, es preciso incluir, cuando el paso temporal de cálculo lo requiera, la traslación del flujo desde cada subcuenca al punto de salida.

Para calibrar el modelo basándose en datos de reanálisis, es necesario definir la función de error, que se trata de minimizar, como una distancia entre la curva de caudales acumulados simulada y medida (distancia de Kolmogorov, Jensen-Shannon o similar); la falta de simultaneidad entre las lluvias disponibles y los caudales medidos impide usar los criterios habituales basados en la similitud directa (día a día) de series temporales sincronizadas (coeficientes de Nash-Sutcliffe o Kling-Gupta).

Calibración del modelo hidrológico semidistribuido de Panamá

El modelo se ha calibrado a nivel país en el Estudio de Riesgo por Efectos del Cambio Climático y Generación del Atlas Interactivo de Visualización de los Resultados para la República de Panamá, desarrollada por IHCantabria para Banco Interamericano para el Desarrollo (BID) con el objetivo cumplir los siguientes requisitos:

- Representar adecuadamente el régimen de caudales mínimos, medios y máximos en toda la red fluvial.
- Reproducir adecuadamente los datos de aforo disponible en los puntos de medida.
- Permitir extrapolar razonablemente al resto del territorio el comportamiento observado en los puntos de medida.

Para la calibración del modelo, se dispone de información de caudales en 47 puntos de aforo (Figura 36), con calidad variable y desigualmente repartidos por todo el territorio (43 estaciones del Instituto Meteorológico Hidrológico de Panamá (IMHPA) y 4 de la Autoridad del Canal de Panamá (ACP)). Existen zonas con escasa o nula información (Figura 37), especialmente en el oriente (provincias de Darién, Guna Yala y Pacífico Este).

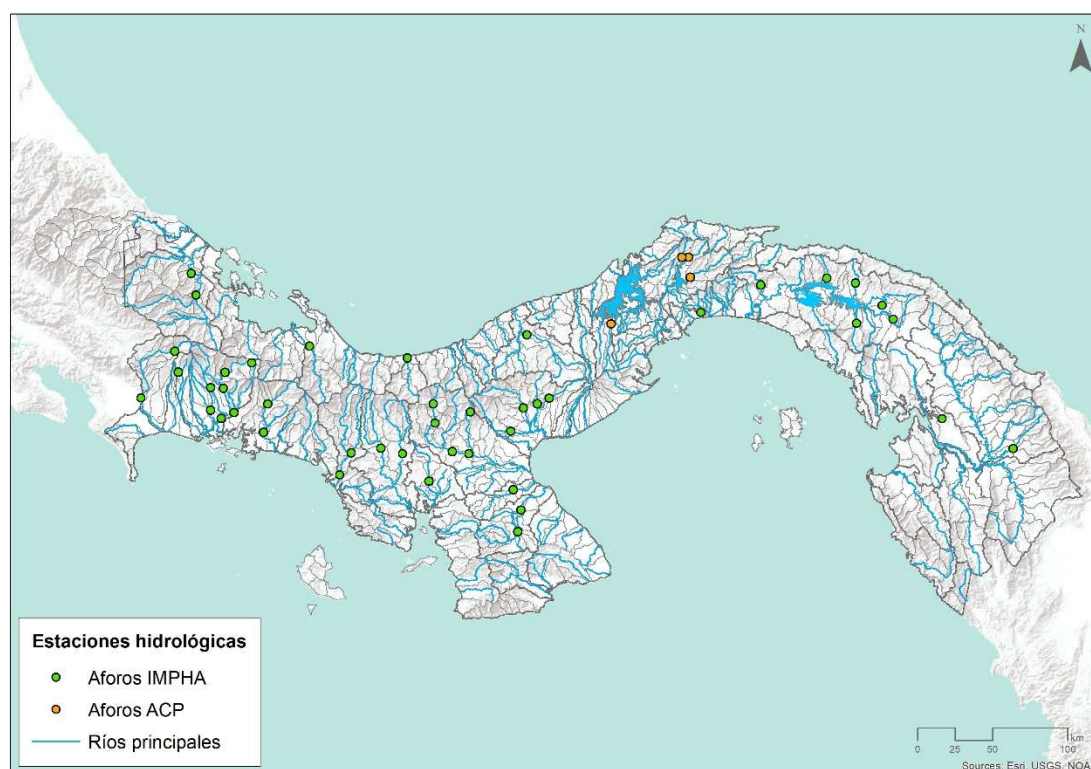


Figura 36. Estaciones hidrológicas consideradas. Fuente: IHCantabria, 2024.

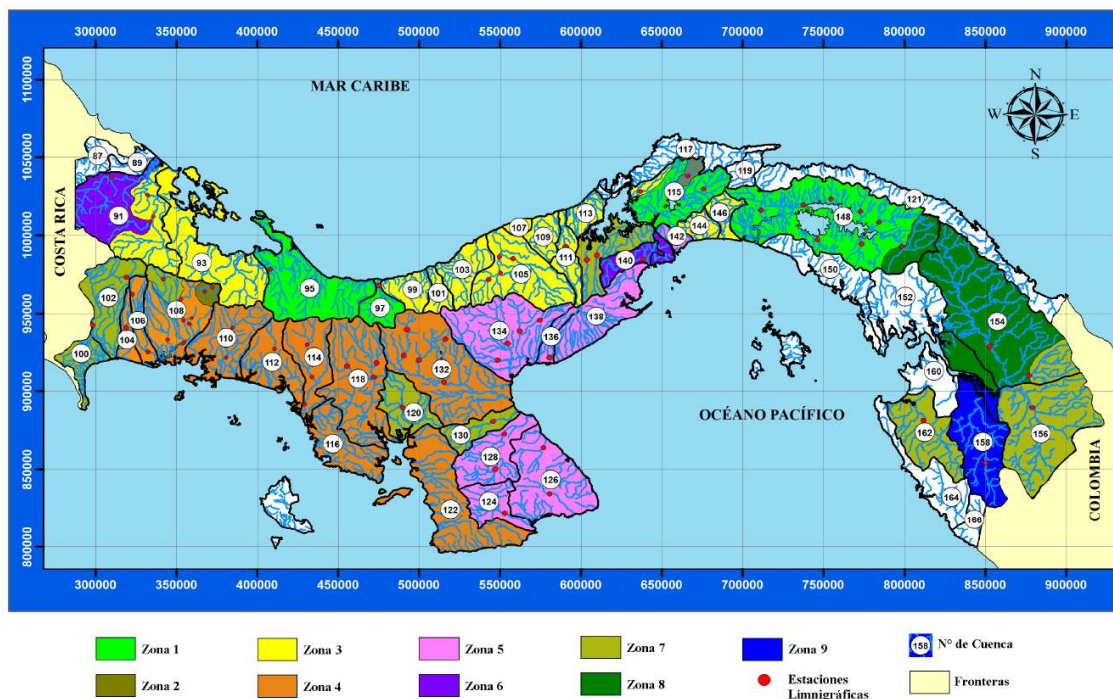


Figura 37. Regiones hidrológicamente homogéneas (en blanco aparecen las cuencas sin afloros). Fuente: Resumen técnico análisis regional de crecidas máximas de Panamá, periodo 1971-2006 (ETESA, 2008).

La metodología para la calibración del mismo, así como los ajustes obtenidos tanto para el régimen medio como para el régimen extremal se resumen a continuación.

Metodología:

Los pasos seguidos en la metodología aplicada se describen a continuación:

1. Se han corregido las series de reanálisis de ETP para reflejar el comportamiento observado y definido en otros estudios locales. En concreto, se ha aplicado un factor corrector de 0.79 a las series iniciales, para que se ajusten a las recomendaciones incluidas en el Atlas Nacional de Panamá de 2007 (MOP, 2007). Estas series de ETP ya no sufrirán más alteraciones en el resto del método.
2. Se han corregido los valores extremos de las series de precipitación disponibles mediante un método de corrección de cuantiles, sin alterar los valores medios de las mismas puesto que las lluvias de reanálisis tienen sus valores extremos muy suavizados y resultan, en general, muy bajas para generar los caudales extremos medidos de las cuencas.
3. Se ha adoptado como curva de Budyko la fórmula de Schreiber para todo el territorio de Panamá. Esta ecuación plantea una relación algebraica entre el índice de aridez y el coeficiente de escorrentía medio (CE) de una cuenca:

$$CE = \exp(-ETP/P)$$

El modelo permite imponer que todas las subcuencas cumplan esta relación.

4. Se han estimado las capacidades de almacenamiento medias del suelo (S_{max}) en todas las subcuencas a partir del método del número de curva. Posteriormente, se han reescalado de

forma homogénea los valores de S_{max} para conseguir reproducir los valores de Q20% y Q80% medidos.

5. Se ha determinado el valor del parámetro asociado al método de corrección por cuantiles de las precipitaciones extremas, para conseguir ajustar lo mejor posible los valores del caudal Q2.33, equivalentes a la media de las máximas crecidas anuales.

Tras estos pasos, se dispone de un modelo hidrológico calibrado para toda la República de Panamá, que cumple razonablemente con los datos instrumentales disponibles. El parámetro de enrutamiento, tau, se ha obtenido con la fórmula de Kirpich y no tiene apenas efecto en los resultados.

Ajuste del régimen medio:

En la Figura 38 se presentan los caudales medios observados vs simulados (absolutos y específicos) obtenidos como resultado de la calibración del modelo.

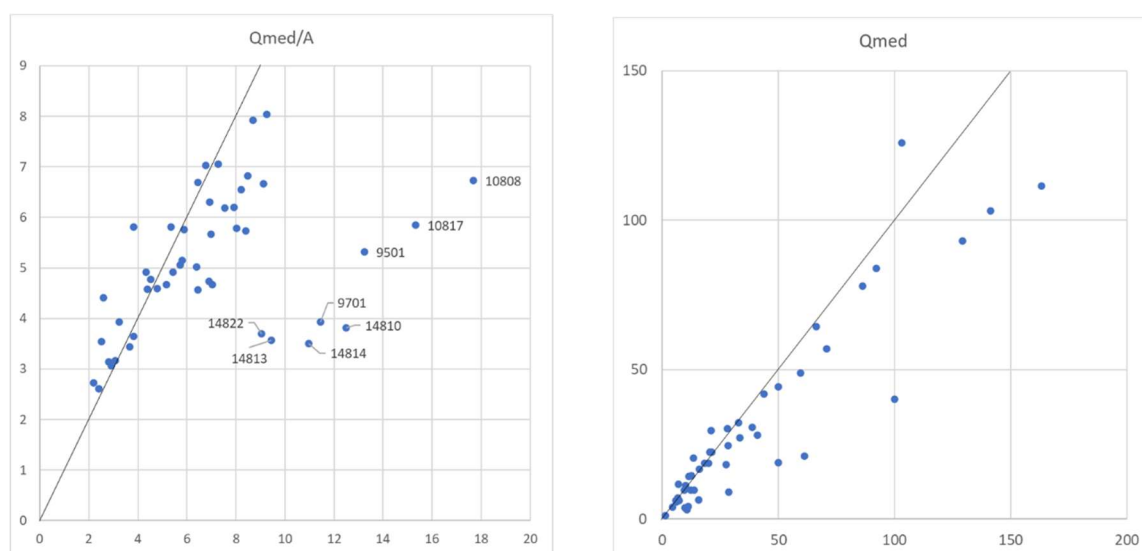


Figura 38. Caudales medios específicos (izquierda) y totales (derecha) observados (eje X) y simulados (eje Y). Fuente: IHCantabria, 2024.

Se observa que hay un grupo de cuencas donde no se consigue ajustar el caudal medio, debido a una discrepancia importante entre los datos de caudal disponibles y los datos de lluvia generados a partir de la interpolación de datos instrumentales combinados con datos de reanálisis de modelos. En esas cuencas caben tres posibilidades para explicar la discrepancia:

- Las lluvias disponibles están ampliamente infravaloradas (deberían ser aproximadamente el doble).
- Los caudales medidos están sobrevalorados (deberían ser entre un 30 y un 50% inferiores).
- Una combinación de las dos causas anteriores.

Ajuste del régimen extremal:

Para poder realizar el ajuste del régimen extremal se ha aplicado un factor de pico (fp) superior a la unidad, que depende del tamaño y velocidad de cada cuenca a los resultados del modelo, permitiendo convertir los caudales medios diarios que genera el modelo en máximos instantáneos.

En la Figura 39 se presentan la comparación de los caudales Q2.33 observados (caudales máximos instantáneos disponibles, Tabla 6), simulados con el modelo (con el fp ya aplicado) y los ajustes del régimen extremal disponibles por fachadas obtenidos a partir de las ecuaciones propuestas en el Resumen técnico análisis regional de crecidas máximas periodo 1971-2006 (ETESA, 2008) (Tabla 6) diferenciadas por regiones hidrológicamente homogéneas (ver Figura 37), observándose como los datos simulados presentan un buen ajuste.

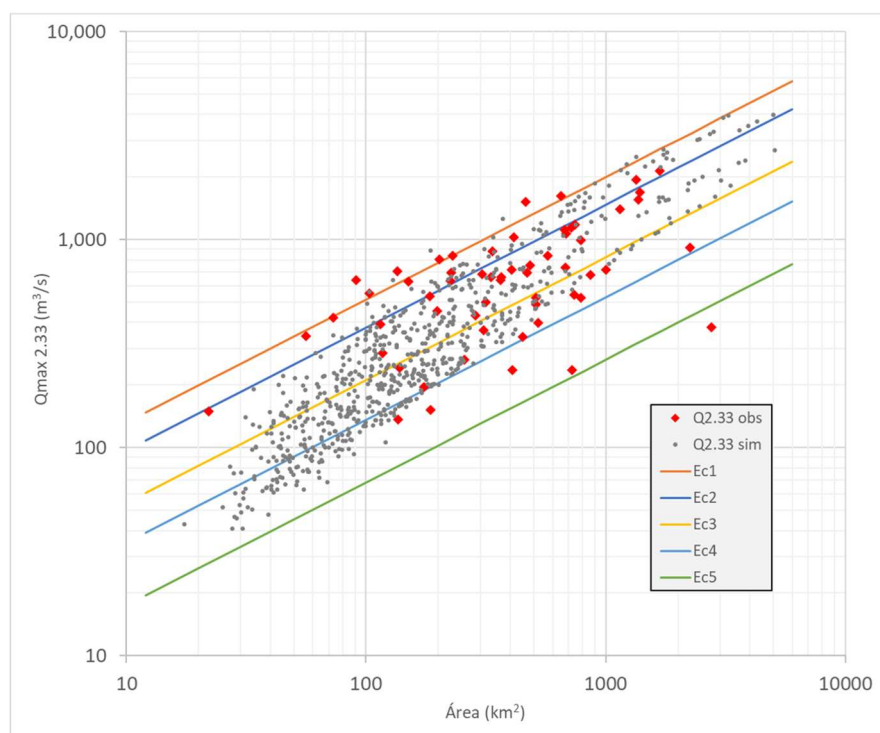


Figura 39. Comparación de caudales Q2.33 observados, simulados, y los ajustes del régimen extremal disponibles por fachadas. Fuente: IHCantabria, 2024.

Zona	Número de ecuación	Ecuación
1	1	$Q_{\text{máx}} = 34A^{0.59}$
2	1	$Q_{\text{máx}} = 34A^{0.59}$
3	2	$Q_{\text{máx}} = 25A^{0.59}$
4	2	$Q_{\text{máx}} = 25A^{0.59}$
5	3	$Q_{\text{máx}} = 14A^{0.59}$
6	3	$Q_{\text{máx}} = 14A^{0.59}$
7	4	$Q_{\text{máx}} = 9A^{0.59}$
8	5	$Q_{\text{máx}} = 4.5A^{0.59}$
9	2	$Q_{\text{máx}} = 25A^{0.59}$

Tabla 6. Ecuaciones para la obtención del $Q_{\text{máx}}$ (promedio de las crecidas anuales equivalente al Q2.33) según región hidrológicamente homogénea. Fuente: Resumen técnico análisis regional de crecidas máximas periodo 1971-2006 (ETESA, 2008).

Por último, en la Figura 40 se presentan los caudales 2.33 observados vs simulados en los diferentes puntos de aforo de manera análoga al régimen medio.

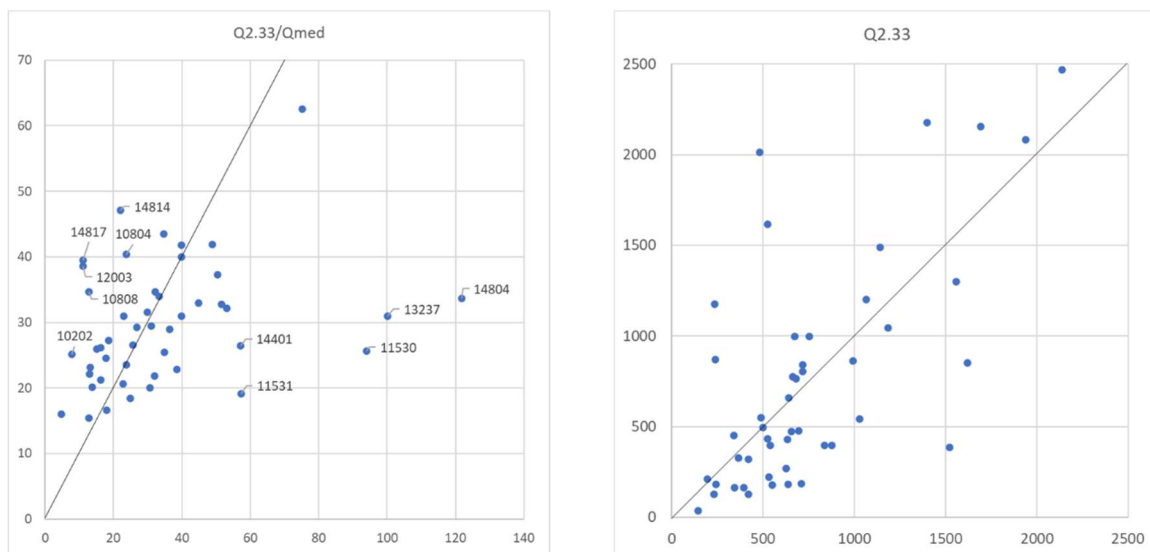


Figura 40. Caudales Q2.33 específicos (izquierda) y totales (derecha) observados (eje X) y simulados (eje Y). Fuente: IHCantabria, 2024.

Resultados del modelado hidrológico

El modelo se ha ejecutado con las series de lluvia de reanálisis tanto para la situación actual como para los 23 modelos de cambio climático analizados para los escenarios SSP 585 2030 y 2050 obteniendo como resultado el cuantil del 50 % (mediana) de los 23 modelos.

En la Figura 41 se presentan los caudales naturales medios anuales obtenidos en la cuenca del Big Creek, así como un resumen de los resultados principales para todos los escenarios climáticos analizados (Tabla 7).

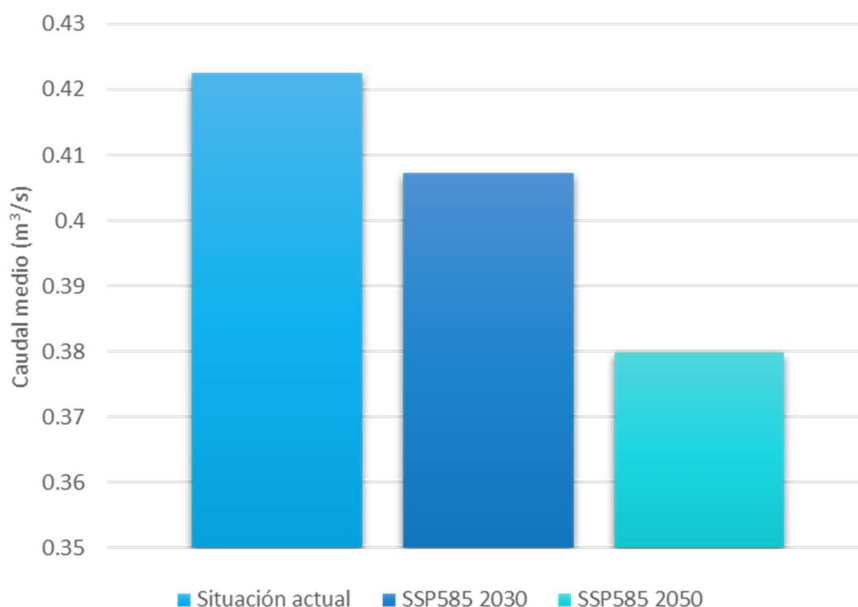


Figura 41. Caudal medio (m³/s) en la cuenca del Big Creek para la situación actual y para los escenarios de cambio climático SSP 585 2030 y 2050. Fuente: IHCantabria, 2024.

	Situación actual	SSP 585 2030	SSP 585 2050
Precipitación media (mm/año)	3211.15	3181.27	3024.86
ETP media (mm/año)	1234.56	1273.67	1312.72
Caudal medio (m³/s)	0.42	0.41	0.38
Caudal superado el 80% del tiempo (m³/s)	0.17	0.05	0.04
Caudal superado el 20% del tiempo (m³/s)	0.52	0.56	0.53

Tabla 7. Resultados del modelo en la cuenca del Big Creek para la situación actual y los escenarios SSP 585 2030 y 2050. Fuente: IHCantabria, 2024.

En cuanto a los resultados por meses en las Figuras 42, 43 y 44 se muestran las series mensuales y su distribución en diagramas de cajas en la cuenca para la situación actual.

En cada rectángulo vertical del diagrama de cajas, la marca central indica la mediana y los bordes inferior y superior del cuadro indican los percentiles 25 y 75, respectivamente. Los bigotes se extienden hasta los puntos de datos más extremos que no se consideran valores atípicos, y los valores atípicos se trazan individualmente utilizando el símbolo marcador '+'.

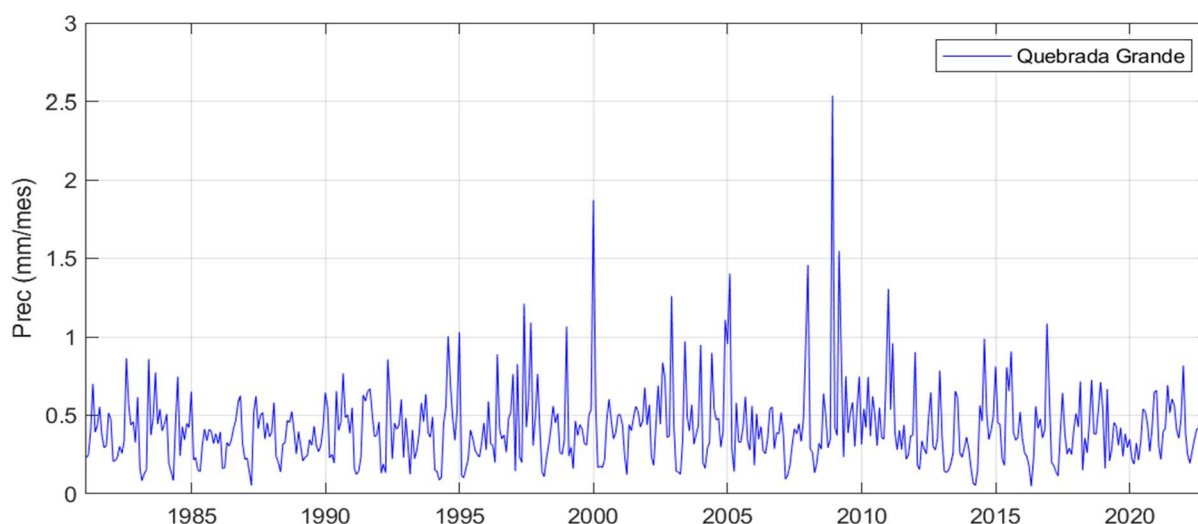


Figura 42. Serie mensual de precipitación (mm/mes) en la cuenca Big Creek para la situación actual. Fuente: IHCantabria, 2024.

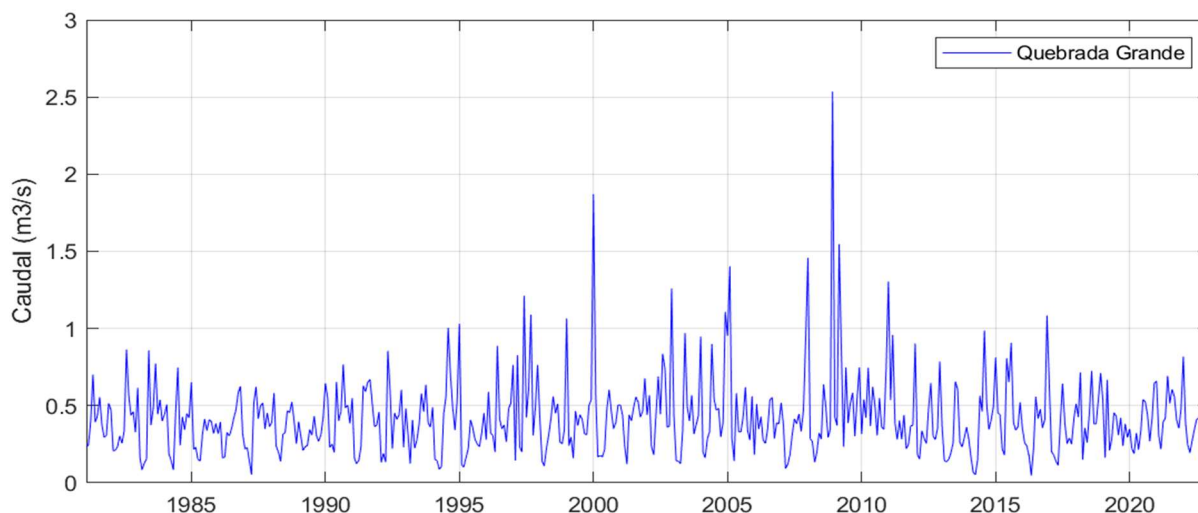


Figura 43. Serie mensual de caudales naturales (m^3/s) en la cuenca Big Creek para la situación actual. Fuente: IHCantabria, 2024.

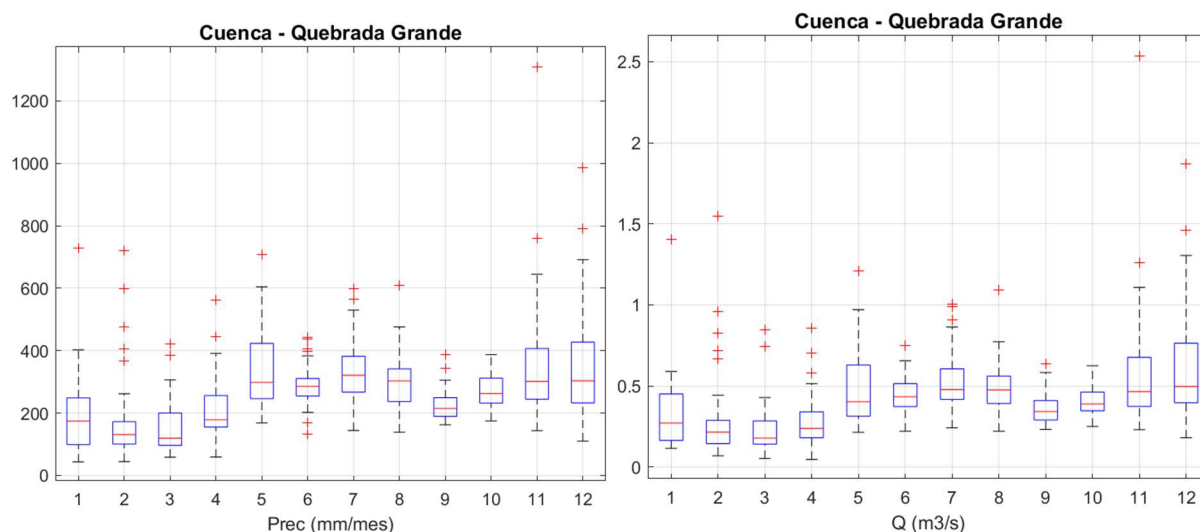


Figura 44. Boxplot de precipitación (mm/mes) y caudales naturales (m^3/s) en la cuenca Big Creek para la situación actual. Fuente: IHCantabria, 2024.

8.2.2. Modelo de gestión de usos del agua

Descripción del modelo de gestión

El modelo de gestión obtiene los caudales modificados en cada tramo de río (un tramo configura una subcuenca) y los caudales captados por cada demanda. Para ello tiene en cuenta los caudales naturales obtenidos tras la aplicación del modelo hidrológico (en este caso las series de caudales ya obtenidas con el modelo LEM, *Logistic Equilibrium Model*), todos los puntos de demanda existentes en cada subcuenca con su información básica (caudal demandado, tipo de uso, prioridad de uso, subcuenca en la que se capta y subcuenca en la que se vierte) y los embalses existentes caracterizados por su volumen, área, caudal de salida máximo y curva de exportación).

Todas las demandas tienen un orden de prioridad asignado (1, 2, 3, ...). Estas se van satisfaciendo en orden de prioridad, de manera que una demanda con una prioridad mayor (p.e. 1) se satisfará antes que una con una prioridad menor (p.e. 3). En este sentido, nunca una demanda de prioridad menor podrá satisfacerse antes que una demanda de prioridad mayor, aunque esté situada aguas arriba.

Además, este modelo es capaz de tener en cuenta el caudal ecológico en cada tramo de río y la prioridad de uso del mismo. El caudal ecológico se trata como una demanda más, que se capta y devuelve en la misma subcuenca con una determinada prioridad.

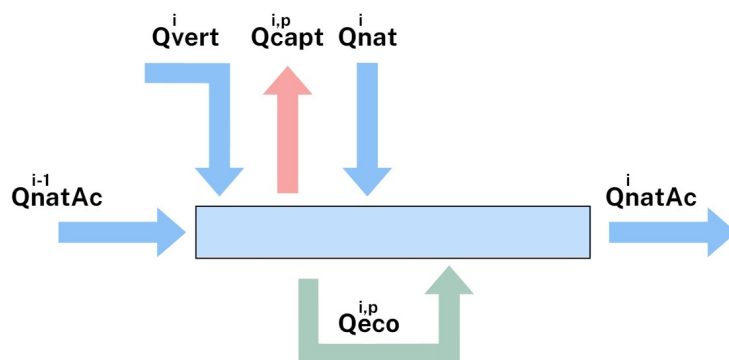


Figura 45. Esquema de funcionamiento del modelo de gestión del agua. Fuente: IHCantabria, 2024.

La principal ecuación que gobierna el módulo de gestión del agua es la siguiente, donde la 'i' representa cada subcuenca y la 'p' representa la prioridad de cada uso:

$$Q_{natAc}^i = \sum Q_{natAc}^{i-1} + Q_{nat}^i + \sum Q_{vert}^i - \sum Q_{capt}^{i,p} - Q_{eco}^{i,p} + Q_{eco}^{i,p}$$

Demandas de agua

El principal uso del agua en la cuenca de estudio (cuenca del Big Creek) es el uso para consumo humano. Concretamente se toma agua del lago Big Creek para la planta de tratamiento de agua potable y desde ahí, dar servicio al área poblada.

Las necesidades de agua de la población tienen prioridad sobre las demás demandas que pudieran existir, por lo que, en teoría, la administración del recurso hídrico siempre asegura la disponibilidad de agua para el abastecimiento para este propósito. En este sentido, se le ha dado una prioridad a este uso sobre mantenimiento del caudal ecológico teniendo en cuenta que no hay una legislación que establezca esta prioridad ni existen caudales ecológicos de obligado cumplimiento.

En la Figura 46 se presenta la localización de la planta potabilizadora de Bocas del Toro y su toma de agua y en la Tabla 8 la demanda de agua para consumo humano considerada para la misma. Esta información ha sido proporcionada por el IDAAN, entidad que se encarga de abastecer a poblaciones de más de 1500 habitantes en Panamá.

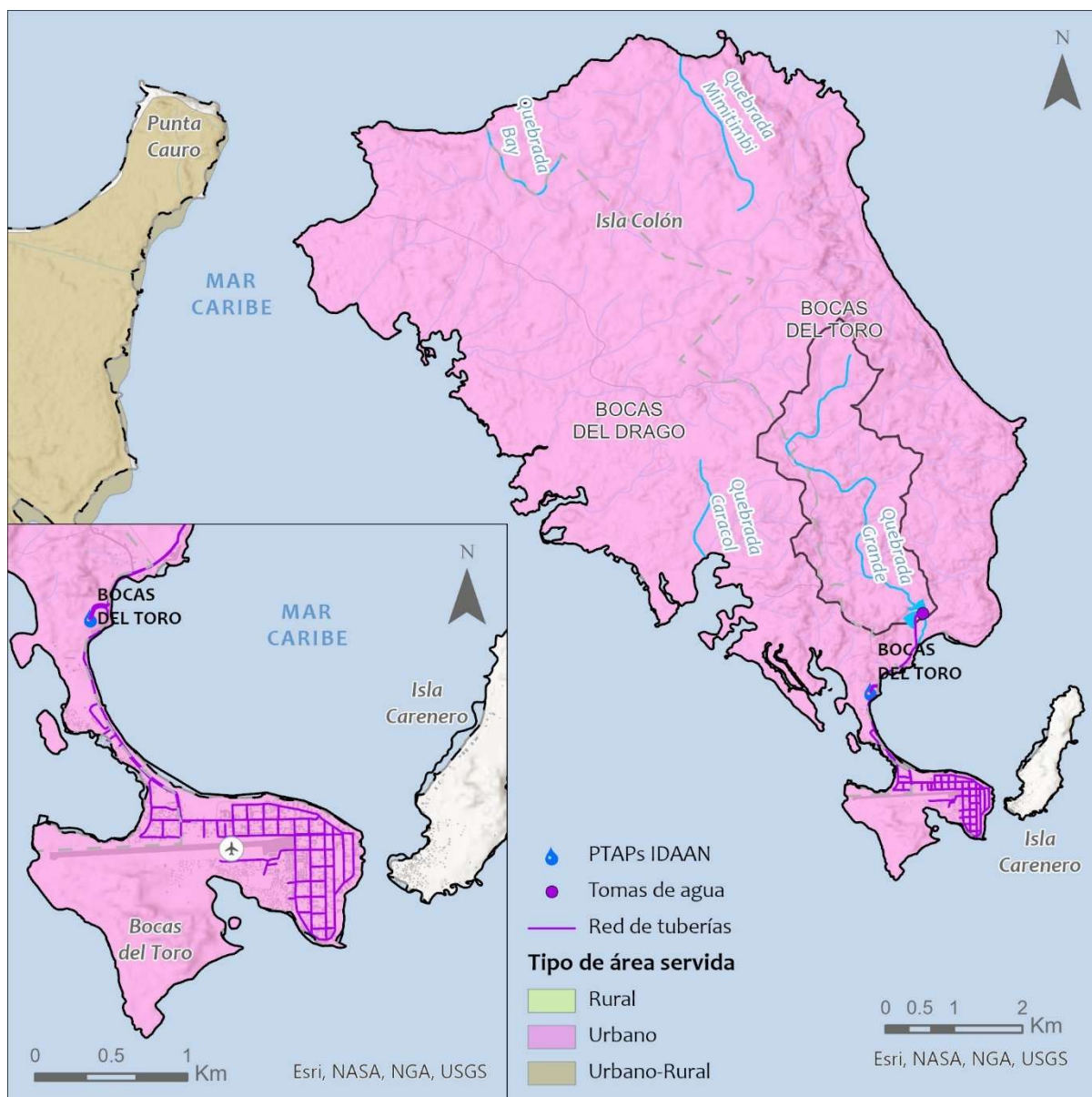


Figura 46. Localización de la planta potabilizadora de Bocas del Toro, toma de agua, red de tuberías y tipo de área servida. Fuente: IHCantabria, 2024.

Tipo	Descripción	Q época seca (m³/s)	Q época lluviosa (m³/s)	D total (Hm³/año)
Consumo humano	Demanda para consumo humano de las poblaciones de más de 1500 hab (conectadas a la red IDAAN)	0.045	0.045	1.42

Tabla 8. Demandas de agua para consumo humano en la cuenca del Big Creek. Fuente: IHCantabria, 2024.

Resultados

Como resultados principales obtenidos tras la realización del balance hídrico en la cuenca del Big Creek se encuentran:

- Los caudales captados o satisfechos de cada demanda

- Los caudales modificados en cada tramo de río
- Garantía volumétrica de satisfacción de cada demanda, es decir el porcentaje de la demanda que se satisface a lo largo de todo el periodo de estudio

En las Figuras 47 y 48 se muestran las series mensuales y su distribución en diagramas de cajas en la cuenca del Big Creek para la situación actual y en la Tabla 9 un resumen de los resultados principales para todos los escenarios climáticos analizados incluyendo la garantía de satisfacción de la demanda de la planta potabilizadora de Bocas del Toro. La garantía de satisfacción de la demanda de consumo humano en la cuenca es del 100% para la situación actual, disminuyendo para los dos escenarios cambio climático analizados.

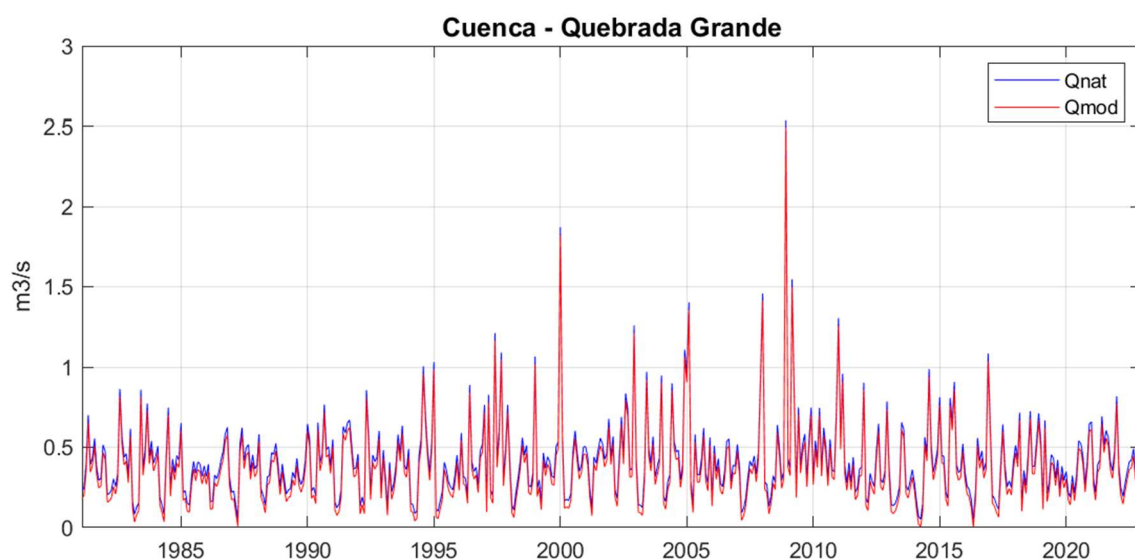


Figura 47. Serie mensual de caudales naturales y modificados (m^3/s) en la cuenca Big Creek para la situación actual. Fuente: IHCantabria, 2024.

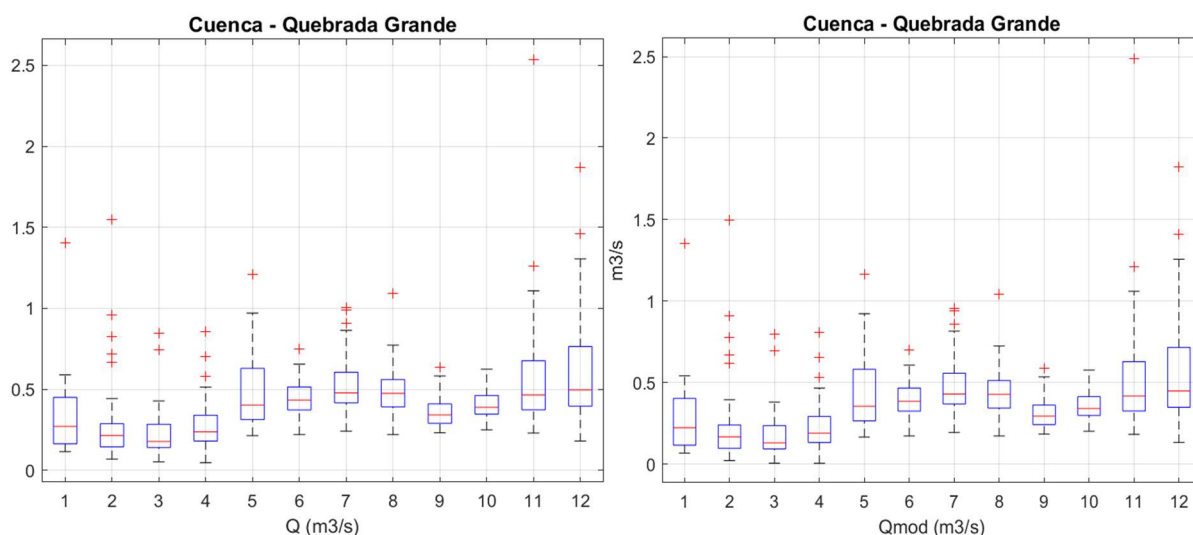


Figura 48. Boxplot de caudales naturales y modificados (m^3/s) en la cuenca del Big Creek, para la situación actual. Fuente: IHCantabria, 2024.

	Situación actual	SSP 585 2030	SSP 585 2050
Caudal natural medio (m³/s)	0.42	0.41	0.38
Caudal modificado medio (m³/s)	0.37	0.36	0.34
Garantía en volumen	100%	92%	89%
Garantía en tiempo	100%	81%	77%

Tabla 9. Resultados del modelo de gestión en la cuenca del Big Creek para la situación actual y los escenarios SSP 585 2030 y 2050. Fuente: IHCantabria, 2024.

El indicador de amenaza que se utiliza posteriormente para para el cálculo del riesgo por escasez de recursos hídricos a la población, en combinación con los indicadores de vulnerabilidad que se presentan a continuación, es el déficit hídrico para consumo humano (volumen de la garantía hídrica que no se satisface). En la Tabla 10 se recoge el valor del déficit de la planta potabilizadora que abastece al área de estudio en los escenarios climáticos analizados.

Escenario	Déficit hídrico
Situación actual	0%
Horizonte 2030 SSP585	8%
Horizonte 2050 SSP585	11%

Tabla 10. Déficit hídrico para consumo humano en la planta potabilizadora de Bocas del Toro para la situación actual y los escenarios SSP 585 2030 y 2050. Fuente: IHCantabria, 2024.

En el escenario climático analizado con datos históricos (situación actual), el recurso superficial que se genera en el Big Creek es suficiente para cubrir la demanda de agua de la planta de tratamiento, sin embargo, en los escenarios futuros el déficit hídrico se va incrementando progresivamente conforme lo hace con el horizonte temporal. La combinación del descenso de las precipitaciones y el ascenso de las temperaturas, reducen la producción de agua superficial en la cuenca disponible para consumo. Para el horizonte 2030, el 8% de la demanda de agua para consumo humano no va a satisfacerse, y para el horizonte se tendrá un 11% de déficit hídrico.

8.3. Caracterización de la vulnerabilidad

En este apartado se analizan las principales variables de vulnerabilidad relevantes para determinar el riesgo de escasez de recursos hídricos.

En cuanto a los indicadores de vulnerabilidad, se han considerado los siguientes:

- Densidad de población. Las zonas más densas suelen ser más vulnerables al fenómeno.
- Porcentaje de población sensible. La proporción de ancianos y niños es un factor de vulnerabilidad a la escasez de recursos hídricos bien documentado.
- Porcentaje de mujeres: Las mujeres son más vulnerables a la escasez de recursos hídricos por una combinación de factores sociales, económicos y de roles de género.
- Necesidades básicas insatisfechas (NBI). Identifican carencias críticas en una población y caracterizan la pobreza. En este caso, utiliza indicadores directamente relacionados con dos áreas de necesidades básicas de las personas (vivienda y servicios básico), disponibles en los censos de población y vivienda.

Todas estas variables se obtienen con datos del del XII Censo de Población y VIII de Vivienda de Panamá del año 2023 del INEC a nivel de barrio urbano o lugar poblado.

8.3.1. Densidad de población

Las zonas más densamente pobladas son más vulnerables frente a la escasez de recursos hídricos por varias razones:

- Alta demanda de agua: en áreas densamente pobladas, la demanda de agua es mucho mayor debido a la concentración de personas, industrias y servicios. Esta alta demanda puede sobrecargar las fuentes de agua disponibles, llevándolas a niveles insostenibles.
- Infraestructura sobrecargada: la infraestructura de distribución de agua, como tuberías, plantas de tratamiento y sistemas de alcantarillado, puede no estar diseñada para manejar grandes cantidades de población. Esto puede resultar en pérdidas significativas de agua debido a fugas, y en una distribución ineficiente que agrava la escasez.
- Contaminación: en áreas densamente pobladas, la contaminación del agua puede ser un problema grave debido a los desechos industriales, agrícolas y domésticos. La contaminación reduce la cantidad de agua potable disponible, lo que exacerba la escasez.
- Competencia por recursos: en zonas con alta densidad poblacional, existe una mayor competencia por los recursos hídricos entre diferentes sectores, como el doméstico, industrial y agrícola. Esta competencia puede generar conflictos y dificultar la gestión equitativa y sostenible del agua.
- Vulnerabilidad a crisis: las áreas densamente pobladas son más vulnerables a crisis de agua como sequías, cortes de suministro o fallos en la infraestructura. Cualquier interrupción en el suministro de agua puede tener un impacto significativo en la salud pública, la economía y la estabilidad social.
- Crecimiento urbano no planificado: el crecimiento rápido y no planificado de las ciudades puede llevar a la expansión de asentamientos informales sin acceso adecuado a agua y saneamiento. Esto aumenta la vulnerabilidad de las poblaciones en estas áreas frente a la escasez de agua.
- Dependencia de fuentes limitadas: Las zonas densamente pobladas a menudo dependen de una cantidad limitada de fuentes de agua, como ríos, embalses o acuíferos. Si estas fuentes se agotan o se contaminan, la escasez de agua puede volverse crítica.

En la Figura 49 se presenta la distribución espacial de la densidad de población a nivel de barrio urbano o lugar poblado en el área de estudio.

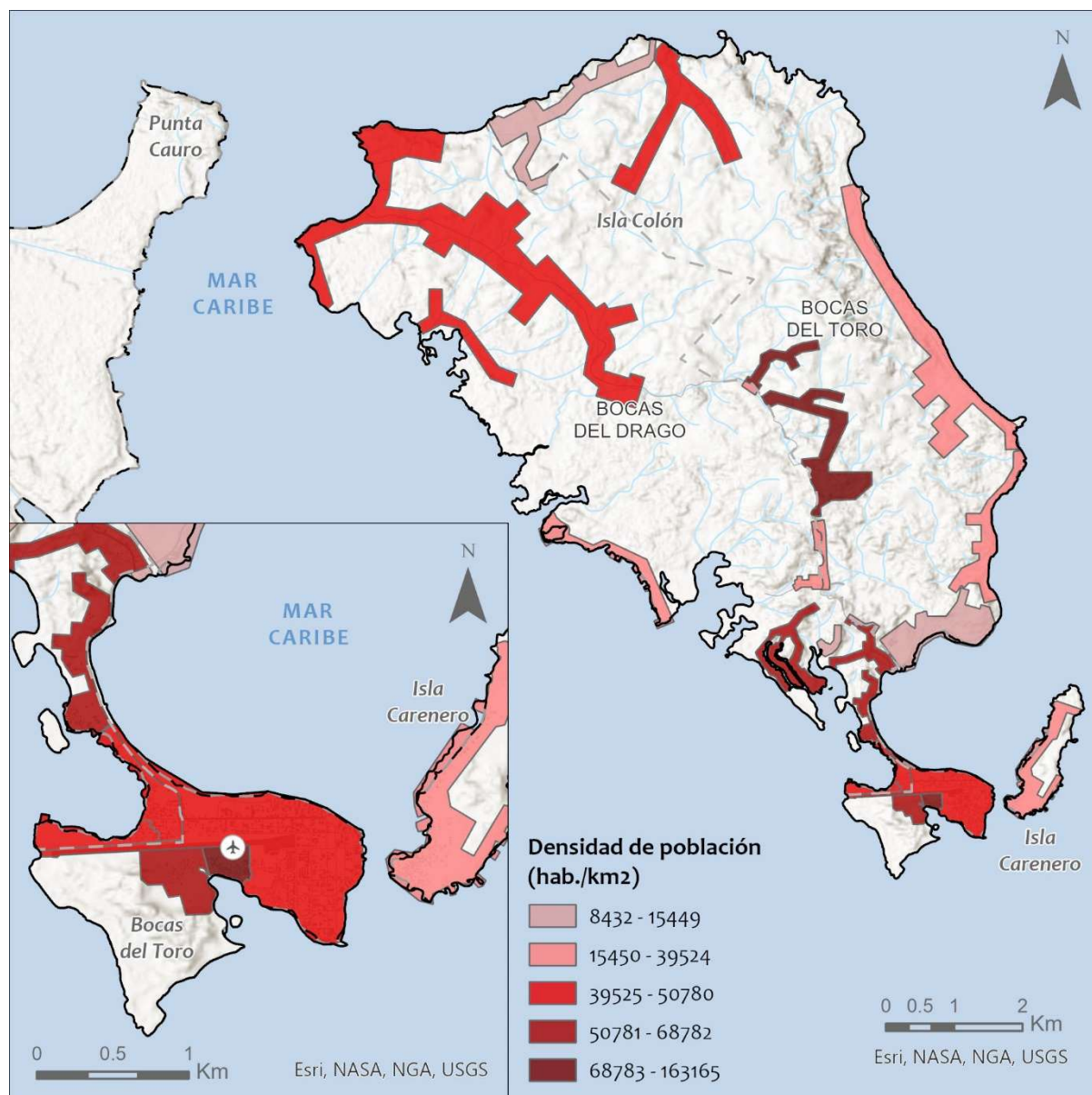


Figura 49. Densidad de población en el área de estudio. Fuente: IHCantabria, 2024, con información del Censo de 2023.

8.3.2. Población sensible

En la Figura 50 se presenta la distribución espacial de la población sensible, entendida como la población menor de 5 años y mayor de 65 años, a nivel de barrio urbano o lugar poblado en el área de estudio.

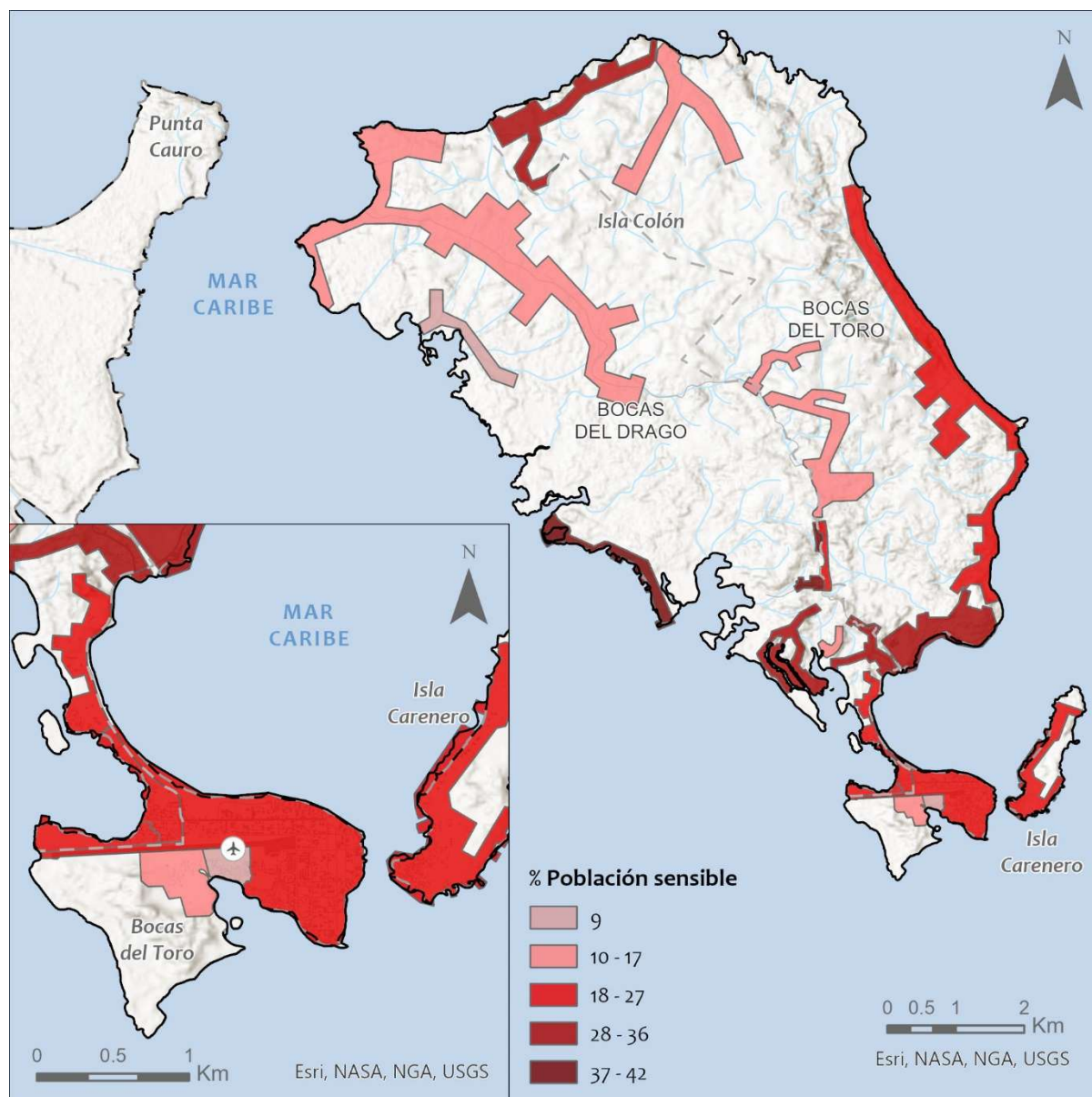


Figura 50. Porcentaje de población sensible en el área de estudio. Fuente: IHCantabria, 2024, con información del Censo de 2023.

Las zonas con una mayor población sensible, como niños y ancianos, son más vulnerables frente a la escasez de recursos hídricos por varias razones clave:

- Mayor vulnerabilidad a enfermedades: niños y ancianos son más susceptibles a enfermedades transmitidas por el agua, como la diarrea, que pueden ser mortales si no se tratan adecuadamente. La falta de acceso a agua limpia agrava el riesgo de estas enfermedades, especialmente en poblaciones con sistemas inmunológicos más débiles.
- Necesidades específicas de hidratación y nutrición: tanto los niños como los ancianos requieren una hidratación adecuada para mantener su salud. Los niños, debido a su crecimiento, y los ancianos, por la reducción de la eficiencia de sus riñones y una menor percepción de la sed, pueden deshidratarse más rápidamente, lo que puede ser particularmente peligroso en condiciones de escasez de agua.

- Dependencia de otros para acceder al agua: los ancianos y los niños a menudo dependen de otros para acceder a agua potable. Si el suministro de agua es escaso, esta dependencia puede convertirse en una barrera significativa, especialmente si los cuidadores también están enfrentando dificultades para obtener agua.
- Impacto en la nutrición: la escasez de agua puede afectar la preparación de alimentos y, por lo tanto, la nutrición. Los niños, que están en etapas críticas de desarrollo, y los ancianos, que pueden tener necesidades dietéticas especiales, son particularmente sensibles a cualquier deterioro en la calidad o cantidad de los alimentos disponibles.
- Mayor riesgo en situaciones de crisis: en situaciones de crisis por escasez de agua, como sequías prolongadas o interrupciones en el suministro, los niños y los ancianos son los primeros en verse afectados. Su menor capacidad para adaptarse rápidamente a condiciones adversas los pone en mayor riesgo de sufrir consecuencias graves.
- Acceso limitado a soluciones alternativas: las poblaciones sensibles, como los ancianos, pueden tener dificultades para acceder a soluciones alternativas, como la compra de agua embotellada o el transporte a lugares con mejor acceso a agua. Esto es especialmente relevante en zonas con infraestructura deficiente.

8.3.3. Mujeres

La vulnerabilidad de las mujeres frente a la escasez de recursos hídricos se debe a varios factores interrelacionados:

- Roles de género tradicionales: En muchas culturas, las mujeres son las principales responsables de la recolección de agua para el hogar, lo que las expone directamente a la escasez y a la calidad del agua.
- Salud y saneamiento: Las mujeres necesitan agua adicional para su higiene personal, especialmente durante la menstruación, el embarazo y la lactancia, lo que incrementa su dependencia de recursos hídricos adecuados.
- Acceso y tiempo: La recolección de agua puede requerir largas caminatas, lo que implica una carga física y de tiempo significativa. Esto limita las oportunidades de las mujeres para participar en actividades educativas, económicas y recreativas.
- Riesgos de seguridad: Viajar largas distancias para recoger agua puede exponer a las mujeres y niñas a riesgos de violencia y acoso.
- Participación en la toma de decisiones: Las mujeres a menudo tienen menos acceso a la toma de decisiones en temas de gestión de recursos hídricos, lo que significa que sus necesidades y perspectivas pueden ser subestimadas o ignoradas.
- Efectos económicos: La falta de acceso a agua segura puede afectar la capacidad de las mujeres para mantener sus medios de vida, especialmente en áreas agrícolas donde ellas juegan un papel clave en la producción de alimentos.

En la Figura 51 se presenta la distribución espacial del porcentaje de mujeres a nivel de barrio urbano o lugar poblado en el área de estudio.

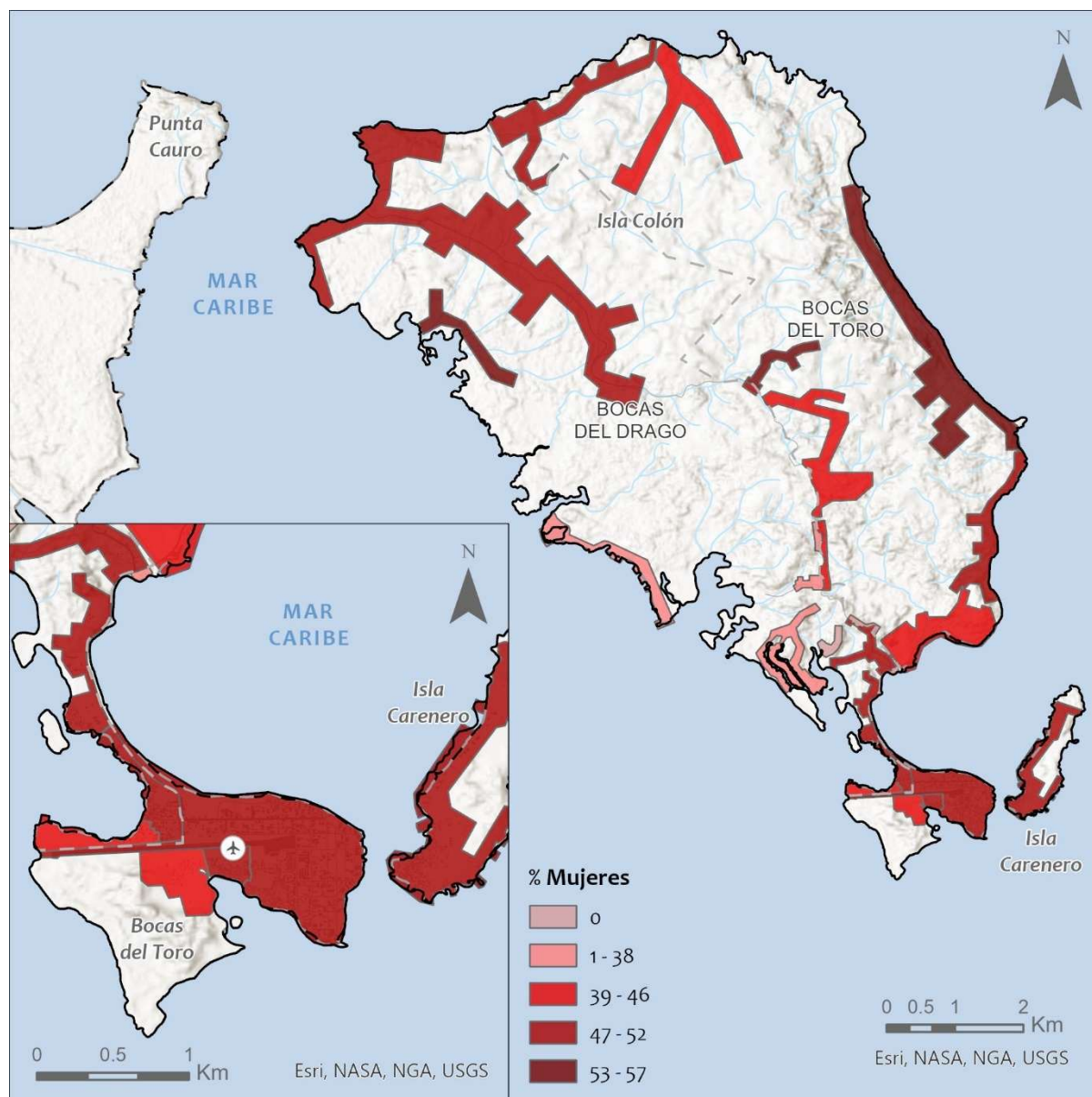


Figura 51. Porcentaje de mujeres en el área de estudio. Fuente: IHCantabria, 2024, con información del Censo de 2023.

8.3.4. Necesidades básicas insatisfechas (NBI)

Las zonas con Necesidades Básicas Insatisfechas (NBI) son más vulnerables frente a la escasez de recursos hídricos debido a una combinación de factores económicos, sociales y de infraestructura. A continuación, se detallan las principales razones:

- **Infraestructura deficiente:** En las zonas con NBI, la infraestructura de agua potable suele ser inadecuada o inexistente. Esto significa que las comunidades dependen de fuentes de agua no seguras o tienen acceso limitado al agua, lo que exacerba la vulnerabilidad frente a la escasez.
- **Baja capacidad económica:** Las personas en estas áreas generalmente tienen ingresos bajos, lo que les dificulta acceder a soluciones alternativas durante la escasez de agua, como comprar agua embotellada, instalar sistemas de almacenamiento o acceder a tecnologías de purificación.

- Falta de acceso a servicios básicos: Las zonas con NBI a menudo carecen de servicios esenciales como el saneamiento adecuado, lo que aumenta el riesgo de enfermedades transmitidas por el agua. La escasez de agua agrava este problema, ya que limita la disponibilidad de agua limpia para el consumo y la higiene.
- Desigualdad en la distribución de recursos: En contextos de escasez, las zonas con NBI pueden ser las últimas en recibir agua debido a la falta de representación política y a la desigualdad en la distribución de recursos. Esto puede resultar en un suministro de agua inconsistente o en cortes prolongados.
- Limitado acceso a educación y recursos para la gestión del agua: Las comunidades con NBI suelen tener menos acceso a la educación y a recursos que podrían ayudarles a gestionar mejor sus recursos hídricos, como la información sobre conservación de agua o la participación en proyectos de infraestructura.

Para el cálculo de este indicador de vulnerabilidad se ha calculado un índice agregado de NBI para los hogares del Censo de 2023 en función de las variables y pesos que se describen en la Tabla 11.

Indicador NBI	Peso	Descripción	VARIABLES del Censo de 2023
Precariedad de los materiales de la vivienda	15	Al menos una de las siguientes condiciones se cumple: Si en el área urbana la casa cuenta con paredes de madera, quincha adobe, metal, palma paja o penca caña o bambú o palos, otros materiales (cartón) o sin paredes. O si el material de los techos es de madera, palma, paja, pencas u otros materiales. O si el material de los pisos es de madera, tierra u otros materiales.	4.MATERIAL DE LAS PAREDES 5.MATERIAL DEL TECHO 6.MATERIAL DEL PISO
Personas por habitación o hacinamiento	15	Una habitación (excluyendo la cocina, servicio y el baño) es compartida por tres (3) o más personas.	7a. DORMITORIOS CANTIDAD DE PERSONAS
Carencia de electricidad	15	La fuente principal de alumbrado es querosín o diésel, gas, velas u otro.	14.TIPO DE ALUMBRADO
Carencia de saneamiento mejorado	20	El hogar cuenta con un servicio de hueco o letrina exclusivo de la vivienda o compartido, el servicio está conectado a alcantarillado o tanque séptico, pero es compartido con otras viviendas o si no cuenta con servicio sanitario.	11.SERVICIO SANITARIO
Carencia de fuentes de agua mejorada para beber	35	La principal fuente de agua para beber es: pozo brocal no protegido, o pozo superficial o carro cisterna o río, quebrada, lago, estanques, arroyo, agua de lluvia u otra fuente. En el caso de hogares cuya principal fuente de agua es un acueducto público del IDAAN, serán privados si reciben el agua menos de siete días a la semana o menos de 12 horas al día durante el verano o el invierno.	8.ABASTECIMIENTO DE AGUA 10.DÍAS A LA SEMANA EN ESTACIÓN SECA 10.HORAS AL DÍA EN ESTACIÓN SECA 10.DÍAS A LA SEMANA EN ESTACIÓN LLUVIOSA 10.HORAS AL DÍA EN ESTACIÓN LLUVIOSA

Tabla 11. Variables y pesos que componen el índice agregado de NBI para los hogares del área de estudio.
Fuente: IHCantabria, 2024, con información del Censo de 2023.

En la Figura 52 se presenta la distribución espacial del índice de NBI a nivel de barrio urbano o lugar poblado en el área de estudio.

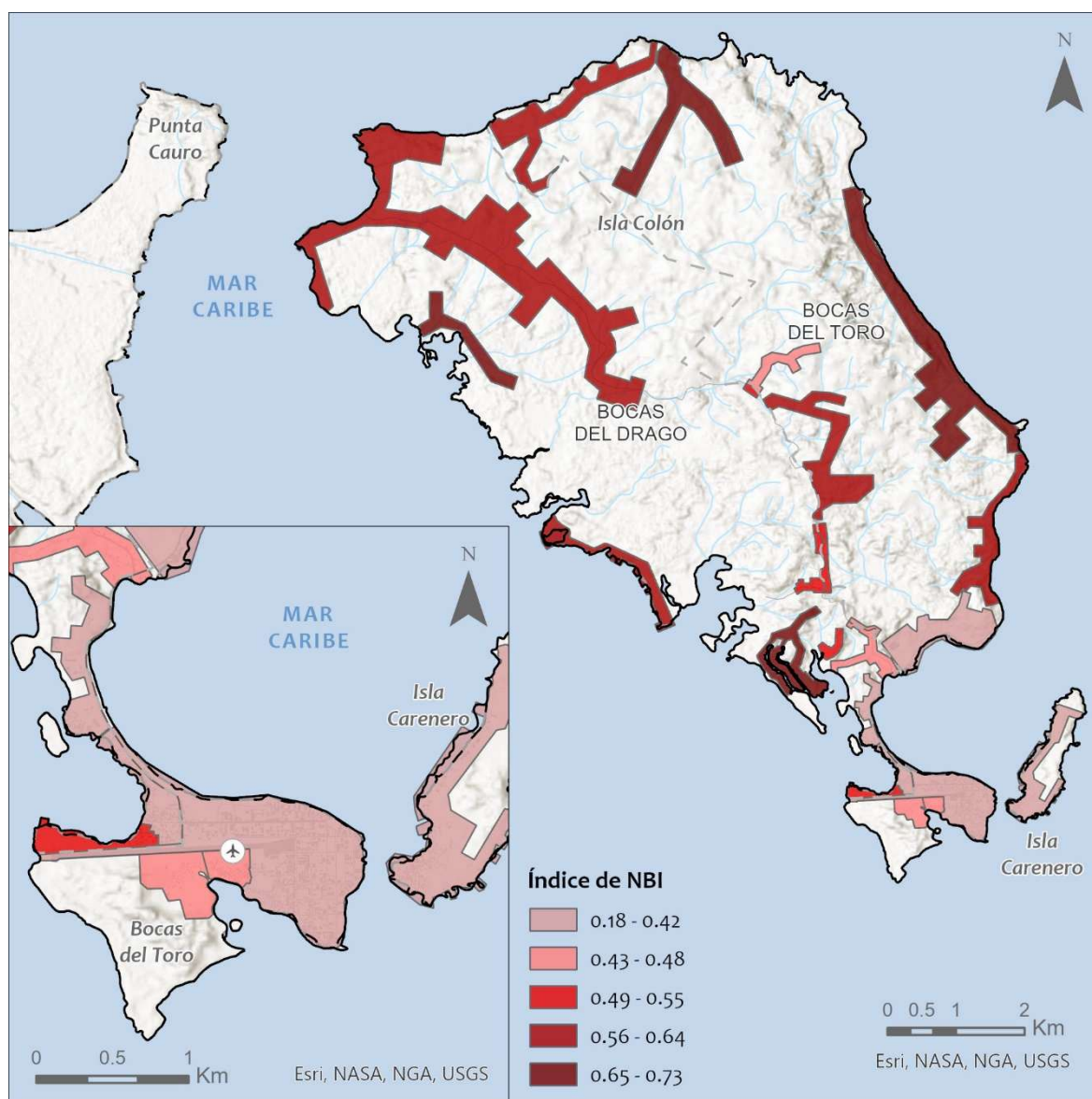


Figura 52. Índice agregado de NBI en el área de estudio. Fuente: IHCantabria, 2024, con información del Censo de 2023.

8.4. Cálculo del riesgo

8.4.1. Metodología de obtención del riesgo estandarizado

Para el cálculo del riesgo estandarizado, en primer lugar, se obtienen los indicadores de riesgo estándar, a partir de los indicadores de amenaza y vulnerabilidad elaborados previamente. Estos suelen estar expresados en unidades y escalas diferentes (de menos infinito a infinito, de 0 a infinito, de 0 a 1), por lo que, antes de combinarlos, deben homogeneizarse en una escala de 0 a 1 utilizando una función de transformación. Para elegir la función de transformación, se establecen los valores que definen los umbrales de riesgo en cada contexto.

Por ejemplo, el indicador que expresa el déficit hídrico (volumen de la garantía hídrica que no se satisface) de una cuenca es adimensional y va de 0 a infinito. El criterio experto indica que un valor

mayor de 5% comienza a tener cierto riesgo (umbral de riesgo bajo a medio) y que un valor mayor de 10% ya supone un riesgo alto. Con estos criterios, se define la función con la que se obtiene el riesgo estandarizado correspondiente, que otorga un valor de 0.33 al valor de 5% y de 0.66 al de 10%, interpolando o extrapolando para el resto de los valores.

NIVEL DE RIESGO	RANGOS DEL RIESGO ESTANDARIZADO (RE)
Muy bajo	$0 \leq RE < 0.2$
Bajo	$0.2 \leq RE < 0.4$
Medio	$0.4 \leq RE < 0.6$
Alto	$0.6 \leq RE < 0.8$
Muy alto	$0.8 \leq RE \leq 1$

Tabla 12. Niveles de riesgo considerados. Fuente: IHCantabria, 2024.

Una vez estandarizados los indicadores de amenaza y vulnerabilidad, a estos se les asigna un peso que determina la relevancia de éste dentro del proceso de generación del riesgo y se combinan para obtener el indicador de riesgo. Los pesos deben estar equilibrados entre los componentes del riesgo (amenaza y vulnerabilidad) para que el indicador de riesgo sea coherente. Los umbrales y pesos adoptados se basan en juicio de experto, teniendo en cuenta las características y particularidades del área de estudio. En la Tabla 13 se presentan cada uno de los indicadores empleados con sus umbrales y pesos asignados.

Indicador	Umbrales adoptados		Peso
	Riesgo bajo a medio	Riesgo medio a alto	
Déficit (amenaza)	5%	10%	5
Densidad de población hab./km ² (vulnerabilidad)	1000	3000	1
Porcentaje de población sensible (vulnerabilidad)	10%	25%	1
Porcentaje de mujeres (vulnerabilidad)	50%	53%	1
Índice agregado de NBI (vulnerabilidad)	20%	50%	2

Tabla 13. Indicadores de amenaza y vulnerabilidad frente a la escasez de recursos hídricos. Fuente: IHCantabria, 2024.

8.4.2. Indicador de riesgo por escasez de recursos hídricos

Como resultado final se obtienen mapas con la distribución de los niveles de riesgo, a nivel de barrio urbano o lugar poblado, para el área de estudio (Figura 53, Figura 54 y Figura 55).

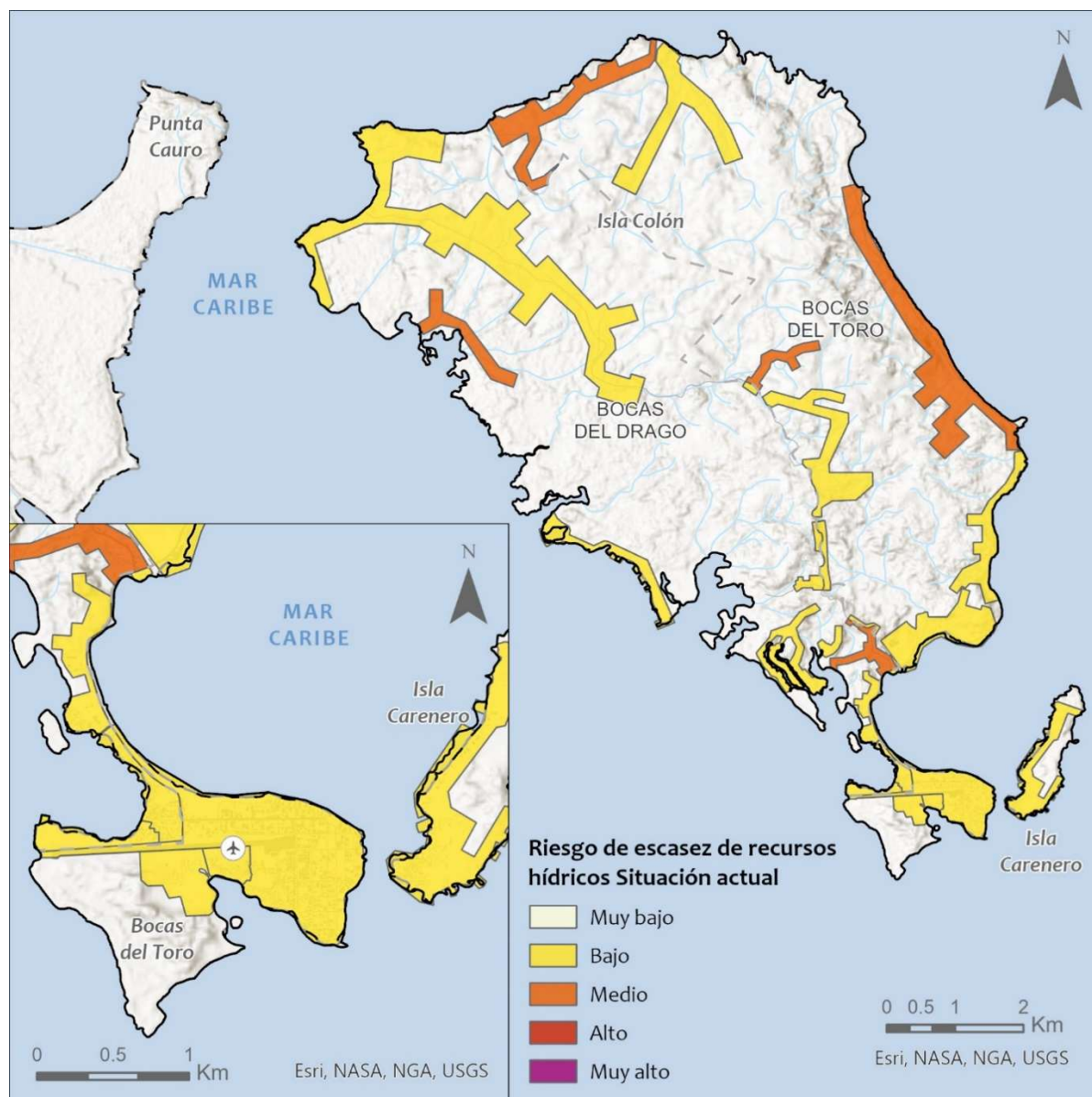


Figura 53. Riesgo por escasez de recursos hídricos en el área de estudio para la situación actual. Fuente: IHCantabria, 2024.

Como se observa en el mapa que refleja el riesgo de escasez de recursos hídricos en la situación actual, el área de estudio se encuentra entre los niveles bajo y medio de riesgo, resaltando como más afectadas las zonas de Isla Colón desprovistas por el momento de servicios básicos.

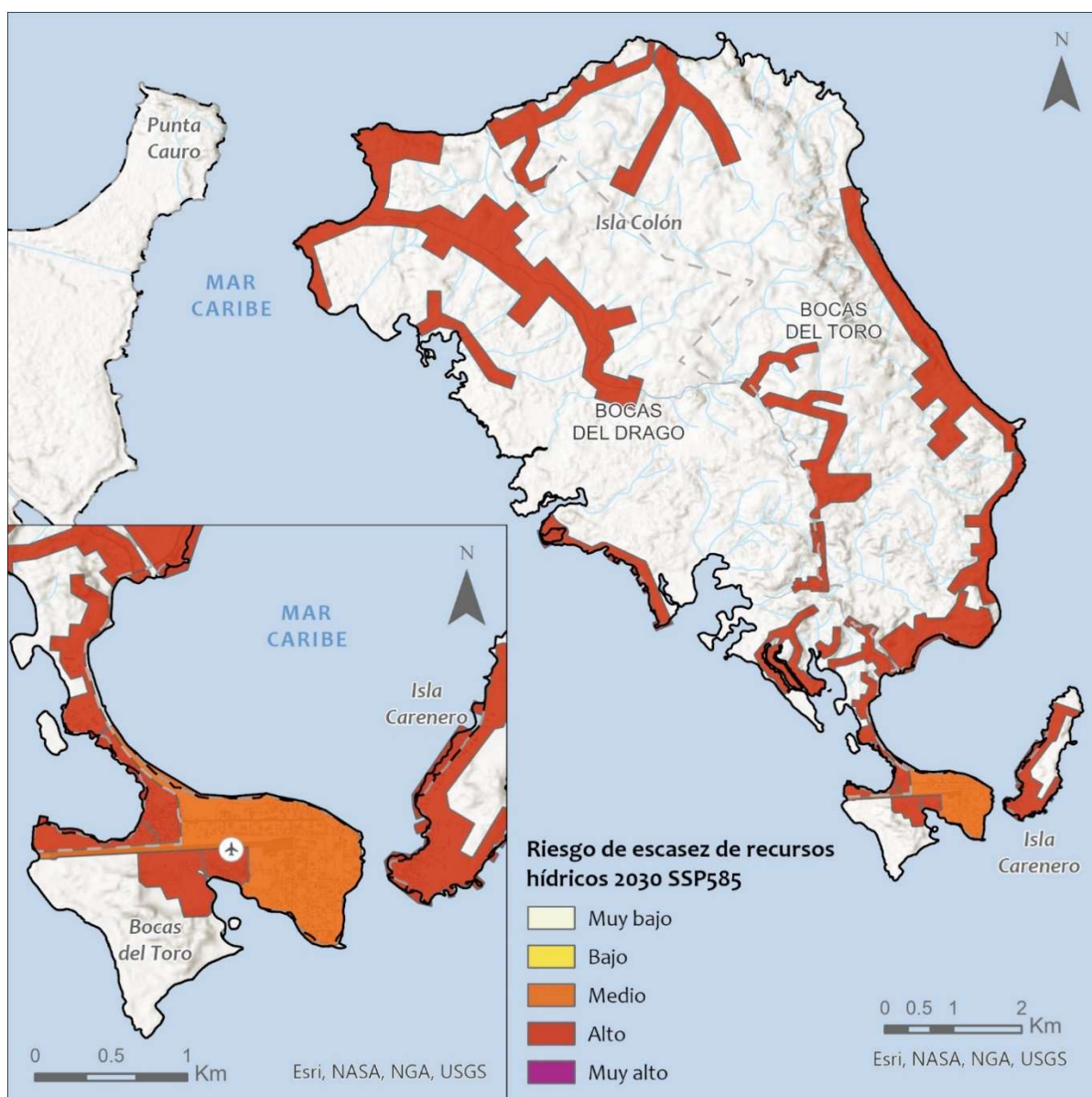
En el escenario climático analizado con datos históricos (situación actual), el recurso superficial que se genera en el Big Creek es suficiente para cubrir la demanda de agua de la planta de tratamiento, sin embargo, el problema actualmente es que esta capacidad de tratamiento no es suficiente para abastecer a la población presente en las islas de manera continua a lo largo del año, ya que la gran actividad turística que se genera durante largas temporadas incrementa de manera considerable la demanda de agua.

Según la información obtenida en los talleres de validación de resultados realizados en Isla Colón, la planta de tratamiento de agua produce 400,000 galones diarios, 200,000 galones por la mañana y 200,000 galones por la tarde, por lo que la mayoría de los negocios de hostelería, cuentan con tanques

de almacenamiento para tener agua corriente de forma continua. También está ampliamente extendida la cosecha de lluvia tanto en establecimientos turísticos, como en viviendas particulares.

En los escenarios futuros el riesgo se va incrementando progresivamente conforme lo hace el déficit hídrico con el horizonte temporal. La combinación del descenso de las precipitaciones y el ascenso de las temperaturas, reducen la producción de agua superficial en la cuenca disponible para consumo. Esto encaja con lo que se está comenzando a notar en los últimos años que, durante épocas de escasas precipitaciones, el Lago Big Creek baja sus niveles, disminuyendo así la capacidad de brindar el recurso hídrico.

Para el horizonte 2030, prácticamente todo el área de estudio se encuentra en riesgo alto, y para el horizonte 2050, ya la totalidad de los barrios y lugares poblados en las islas lo hacen.



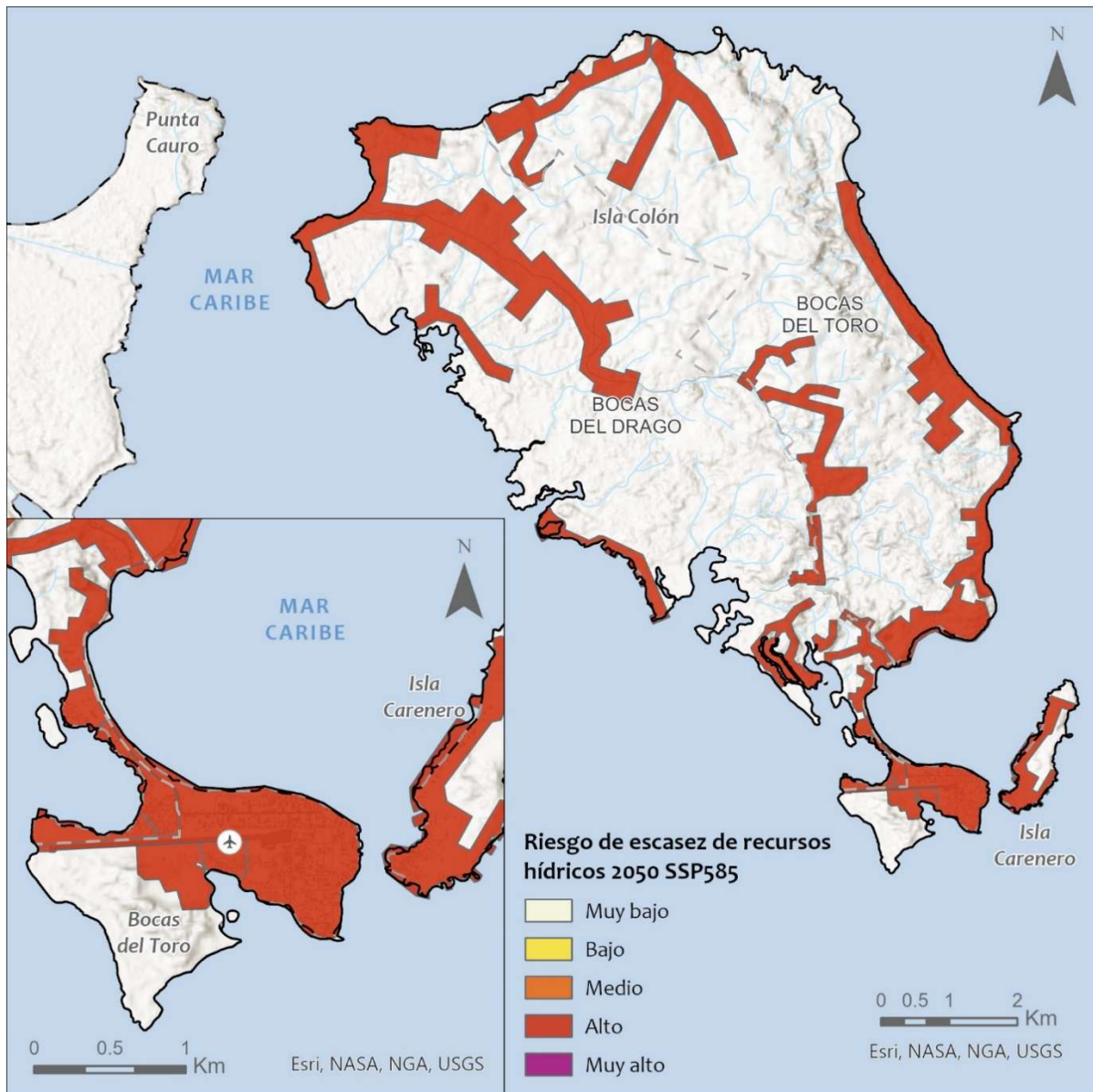


Figura 55. Riesgo por escasez de recursos hídricos en el área de estudio para el horizonte 2050 SSP585. Fuente: IHCantabria, 2024.

9. ESTUDIO DE RIESGO POR INUNDACIÓN COSTERA

9.1. Marco conceptual

El cálculo del riesgo en un análisis del riesgo nivel avanzado y cuantitativo implica determinar la distribución espacial y temporal de las consecuencias, cuya magnitud viene determinada por la distribución de la probabilidad de daño existente para las diferentes dimensiones de la exposición (física y social).

Tal y como se ha definido anteriormente, el riesgo resulta de la interacción de la vulnerabilidad, la exposición y la peligrosidad que se materializa a través de los impactos. De esta manera, una vez obtenidos los resultados del modelado de los impactos, estos se deben cruzar con la caracterización realizada de la exposición. Los valores de los impactos en cada una de las unidades espaciales de trabajo se introducen en las funciones de daño correspondientes, obteniéndose un factor de daño, que, combinado de nuevo con la exposición, da finalmente el resultado esperado de las consecuencias del riesgo.

Con el cruce de las capas con la distribución espacial de los impactos con las capas de exposición y la aplicación de la función de vulnerabilidad, se obtiene un conjunto de mapas espaciales de riesgo.

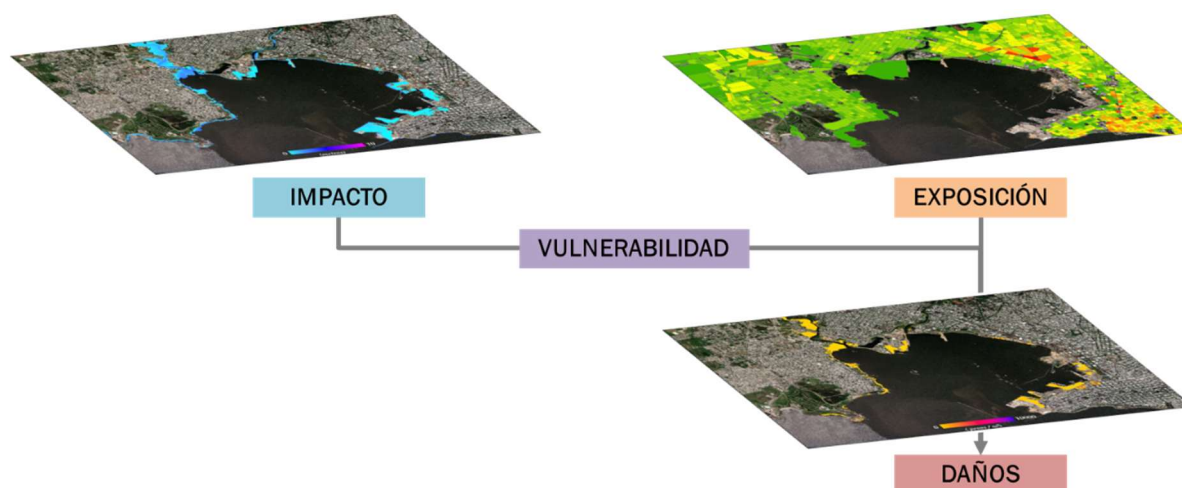


Figura 56. Representación esquemática del proceso de integración espacial de las componentes del riesgo para la obtención de los daños. Fuente: IHCantabria, 2024.

Estos mapas contienen, espacialmente, la cuantificación de los daños para cada uno de los distintos impactos modelados para los escenarios considerados. Los daños se asocian a cada uno de los polígonos o áreas utilizados como referencia, siendo las parcelas asociadas a las edificaciones las utilizadas en el presente estudio. Eso significa que, para cada una de estas parcelas, se dispone de la estimación de los daños para cada escenario considerado.

Este proceso de integración de los datos espaciales de exposición, vulnerabilidad e impacto se realiza mediante la programación de códigos específicos, que para el caso de este estudio se han desarrollado utilizando tecnologías basadas en librerías espaciales de Python, y validados con sistemas de información geográfica como ArcGis.

La obtención y cuantificación de estos valores espaciales a este nivel de detalle permite obtener complementariamente un conjunto de indicadores numéricos que sirven para analizar

estadísticamente los resultados espaciales obtenidos. Así se pueden computar estadísticas como número de personas afectadas o valor de los daños sobre edificaciones. Cada uno de estos valores que cuantifica el riesgo está asociado, por tanto, a un elemento expuesto, que viene asociado de su vulnerabilidad, y a un escenario (y eventualmente horizonte) del impacto considerado.

El análisis de los resultados de la cuantificación de riesgo asociados a los elementos expuestos puede ser, partiendo del nivel máximo utilizado (edificación construida), expresado para distintas escalas espaciales. En este estudio se ha utilizado información y se han obtenido resultados con muy alta resolución espacial (mapas de peligrosidad, impacto, vulnerabilidad y exposición de alta resolución), aunque posteriormente se ha agregado la información y para el conjunto del área de estudio de Isla Colón y Carenero para facilitar la comprensión de los resultados.

9.2. Caracterización de la amenaza

La amenaza del riesgo por inundación costera viene definida por aquellas variables meteoceánicas de origen marino que pueden ocasionar un impacto en las zonas expuestas del área de estudio.

Para este estudio del riesgo, la amenaza y el impacto provienen de la asistencia técnica en el “Desarrollo de una base de datos de dinámicas marinas en las costas panameñas para evaluar impactos y vulnerabilidad por ascenso del nivel del mar” desarrollada por IHCantabria para las Naciones Unidas, a través del Climate Technology Centre and Network (CTCN).

9.2.1. Marco metodológico

La generación de las bases de datos de dinámicas marinas que definen la amenaza del riesgo por inundación costera se lleva a cabo mediante simulación numérica. Los modelos numéricos son una herramienta eficaz en el estudio hidrodinámico del oleaje y nivel del mar, ya que permiten resolver las ecuaciones que gobiernan, en el caso del oleaje, las teorías de generación, propagación y transformación del oleaje a medida que se aproxima a costa, y, en el caso del nivel, las principales características de circulación de las masas de agua. Estos modelos presentan algunas ventajas sobre las observaciones, ya que permiten obtener series temporales largas y homogéneas, así como una alta resolución espacial. Además, permiten analizar los posibles cambios hidrodinámicos asociados a intervenciones antrópicas o a distintos escenarios de cambio climático.

El modelado numérico de las dinámicas marinas de oleaje y nivel del mar está estructurado matemáticamente con técnicas y esquemas de mallado y espaciado espacio-temporal. Por ello, el primer paso antes de llevar a cabo este modelado consiste en definir el dominio de cálculo y generar las mallas numéricas. Para esto se necesita disponer de la información batimétrica y de la línea de costa. A continuación, se definen los forzamientos del modelo, así como las condiciones iniciales y/o de contorno del mismo. En el caso del modelo hidrodinámico de nivel del mar, los forzamientos son los campos de viento en superficie y la presión atmosférica a nivel del mar, mientras que como condiciones de contorno se introducen la marea astronómica y las anomalías en el nivel medio del mar. En el caso del modelo de oleaje, los forzamientos son los campos de viento en superficie y como condiciones de contorno se utilizan los espectros de oleaje.

El siguiente paso consiste en configurar y calibrar el modelo numérico. Éste utiliza una serie de parametrizaciones o formulaciones para representar distintos procesos físicos (por ejemplo, la fricción por fondo). Además, todo modelo numérico requiere de un tiempo de calentamiento para que se estabilice. Por tanto, es necesario decidir, entre otros aspectos, qué formulaciones o valores de los coeficientes usar o el periodo de calentamiento. Éste último ha de ser lo suficientemente largo como

para asegurar que el resultado converja, pero incrementando lo menos posible el tiempo de computación.

Una vez configurado y calibrado el modelo y con todos los datos de partida preparados, se realizan las simulaciones numéricas. La existencia de dos mallas (una para la costa Caribe y otra para la Pacífico) y de dos dinámicas a simular (oleaje y nivel del mar), el elevado número de nodos de las mallas y la extensión del periodo a simular (desde 1993 a 2021, 29 años), hacen inviable realizar las simulaciones en un único computador. Por ello, se recurre al cluster de supercomputación de IHCantabria para lanzar las simulaciones en paralelo y agilizar este proceso.

Cuando finalizan las simulaciones, se analiza la calidad de los datos generados y se validan con los datos instrumentales disponibles. A continuación, se lleva a cabo el postprocesado de los datos para generar los productos finales que se van a entregar al cliente. Se distinguen 3 tipos de productos, que se describen con mayor detalle en un entregable posterior de este proyecto. A modo resumen estos productos son:

- (1) ficheros con los datos brutos que consisten en series temporales horarias de las variables que se obtienen del modelo en todos los nodos de la malla. Además, se generan ficheros con los datos procesados de las proyecciones de cambio climático del nivel medio del mar en Panamá.
- (2) El segundo producto consiste en una serie de puntos localizados a lo largo de todo el litoral panameño con una resolución aproximada de 2 km. En cada uno de ellos se calculan distintas climatologías (como los valores medios, percentil del 99% y valores máximos), así como la cota de inundación, que se describe más adelante.
- (3) Por último, se generan una serie de mapas que abarcan la región oceánica de Panamá. En estos mapas se representan también una serie de climatologías, que permiten visualizar los patrones espaciales en las condiciones de oleaje y nivel en la zona de estudio.

Por otro lado, en la siguiente actividad del proyecto se va a analizar la evolución de la línea de costa, para lo que se necesita información de la denominada cota de inundación (o nivel del mar total, TWL). Ésta se obtiene a partir de los datos generados de las dinámicas y, más concretamente, se calcula con la siguiente fórmula:

$$TWL (m) = MA + MM + run-up$$

Donde MA es la marea astronómica y MM, la marea meteorológica. El run-up del oleaje es la máxima cota de agua alcanzada en una playa o estructura por encima del nivel del mar. Este fenómeno se produce después de que la ola rompa sobre la playa, produciéndose el movimiento hacia delante de la masa de agua hasta que la energía de la ola que no ha sido disipada en el proceso de rotura se invierte en subir por el talud. El cálculo del run-up se ha hecho a partir de los parámetros de estado de mar del oleaje, utilizando la formulación de (Stockdon, et al., 2006):

$$R_{2\%} = 1.1 \cdot \left(0.35\beta_f(H_0L_0)^{1/2} + \frac{[H_0L_0(0.563\beta_f^2 + 0.004)]^{1/2}}{2} \right)$$

Donde H_0 es la altura de ola significativa, L_0 la longitud de onda asociada al periodo de pico (T_p) y β_f es la pendiente de la zona intermareal. L_0 se ha calculado en base a:

$$L_0 = \frac{g \cdot T_p^2}{2\pi}$$

Donde g es la aceleración de la gravedad.

Además, también se van a analizar los cambios en la cota de inundación debido al aumento del nivel del mar como consecuencia del cambio climático. Para ello, se calcula la cota de inundación tanto en el periodo analizado 1993-2021, como en distintos horizontes futuros y bajo varios escenarios de cambio climático.

La Figura 57 muestra un diagrama con el resumen de la metodología aplicada en la generación de las bases de datos a alta resolución de las dinámicas marinas en Panamá.

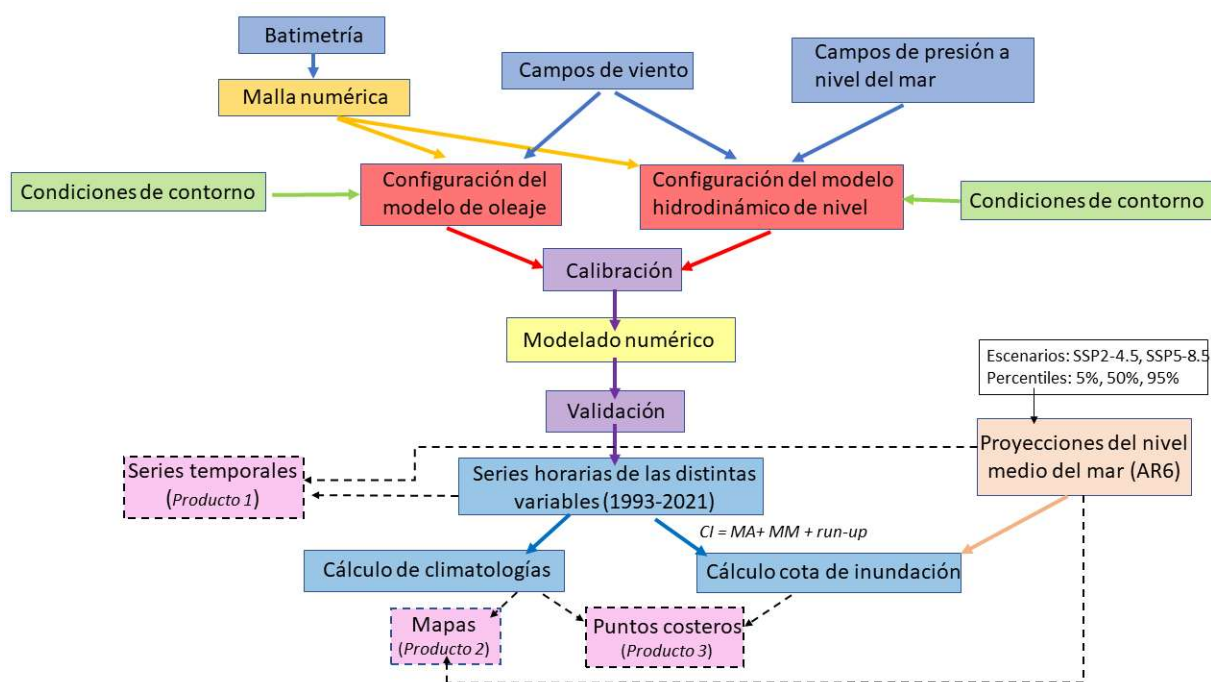


Figura 57. Esquema de la metodología seguida para el desarrollo de la amenaza del riesgo por inundación costera. Fuente: IHCantabria, 2024.

9.2.2. Modelado de la inundación

Uno de los principales impactos para los sistemas costeros y las zonas bajas de todo el mundo es el aumento de la inundación costera debido al ANMM y al aumento de la frecuencia de eventos extremos producidos por el cambio climático.

Muchas veces nos referimos a la inundación costera como la superación de un determinado nivel del mar al que usualmente llegan las aguas de manera que se generan daños sobre los sistemas social, económico y natural. Esto ocurre como respuesta a eventos extremos de oleaje y nivel del mar, que tienen su origen en la interacción de diversos factores y tras los cuales el nivel de las aguas vuelve a su situación media. Sin embargo, el ANMM debido al cambio climático implica también la inundación permanente de terrenos y zonas bajas, perdiéndose su uso y disfrute.

Para este estudio del riesgo, la amenaza y el impacto provienen de la asistencia técnica en el “Desarrollo de una base de datos de dinámicas marinas en las costas panameñas para evaluar

impactos y vulnerabilidad por ascenso del nivel del mar” desarrollada por IHCantabria para las Naciones Unidas, a través del Climate Technology Centre and Network (CTCN).

Existe una gama amplia de modelos que resuelven el fenómeno de inundación en tierra con diferente grado de aproximación y, por tanto, de esfuerzo computacional. La inundación costera comúnmente se estudia mediante técnicas espaciales basadas en Sistemas de Información Geográfica (GIS), entre los que destaca el modelo “bathtub”, BTM (o método bañera). Éste es un modelo sencillo y muy eficiente desde el punto de vista computacional. En este modelo, la inundación se obtiene mediante la intersección de la cota que alcanza el nivel del mar (originado por diferentes dinámicas) con el MDT. Con este método, el volumen de agua que entra en el dominio es infinito y todo el terreno por debajo de un determinado nivel, físicamente conectado entre sí y con el mar, queda inundado. Por tanto, como datos de entrada, este modelo sólo requiere información sobre (1) el MDT y sobre (2) el nivel del agua total cerca de costa a lo largo de todo el litoral.

Como resultados de este modelo, se obtienen la altura de la lámina de agua (o el calado), y la extensión de la zona inundada. Además, se puede extraer la línea de costa a partir de la envolvente poligonal que representa el máximo alcance de la inundación.

Es importante mencionar que este modelo no tiene en cuenta la rugosidad de la superficie o la pendiente de la playa o del frente costero.

Para este estudio, se ha aplicado el BTM para diferentes casos de NAT que se consideran susceptibles de inundar el frente costero. De cada una de estas simulaciones, se ha obtenido la extensión de la inundación (con su calado) y el polígono que delimita la línea de costa resultante.

9.2.3. Resultados de la caracterización de la amenaza

Como resultados de la caracterización de la amenaza se han obtenidos distintos datos. Por un lado, datos de nivel de mar, que incluyen, en primer lugar, un hindcast para el periodo histórico entre 1993-2021 (29 años), con una resolución temporal horaria, y una resolución espacial variable, aunque menor a 2 km en la zona costera. Estos datos de nivel de mar incluyen también los datos sobre las proyecciones de cambio climático del nivel medio del mar publicados en el AR6 (IPCC, 2023) para Panamá. Se ha trabajado con el escenario de cambio climático SSP5-8.5, el horizonte 2050 y los percentiles del 5%, 50% y 95% del aumento en el nivel medio del mar con un nivel de confianza medio.

Por otro lado, se ha obtenido una base de datos de oleaje mediante modelado numérico para la zona de estudio. Esta base de datos cubre el periodo entre 1993-2021 (29 años) a resolución temporal horaria. La resolución espacial es variable, aunque es inferior a 2 km en la zona costera.

Todas las variables obtenidas, que se han utilizado como datos de entrada para la posterior caracterización del impacto, pueden ser consultadas y obtenidas como parte de los trabajos realizados en la asistencia técnica en el “Desarrollo de una base de datos de dinámicas marinas en las costas panameñas para evaluar impactos y vulnerabilidad por ascenso del nivel del mar” desarrollada por IHCantabria para las Naciones Unidas, a través del Climate Technology Centre and Network (CTCN).

Como resultado del modelado y de las simulaciones realizadas, se ha analizado la inundación provocada por eventos extremos (de 10, 50 y 100 años de periodo de retorno, cada uno de ellos con tres percentiles de confianza del 5%, 50% y 95%) en las dinámicas marinas de oleaje y nivel del mar obtenidas en la caracterización de la amenaza. Se ha analizado igualmente la inundación en el escenario histórico y en el horizonte 2050 para un escenario de emisiones SSP5-8.5.

Las siguientes figuras muestran un ejemplo de los resultados obtenidos para un evento extremo de inundación costera de periodo de retorno de 100 años, tanto para el escenario histórico como para las proyecciones de cambio climático.

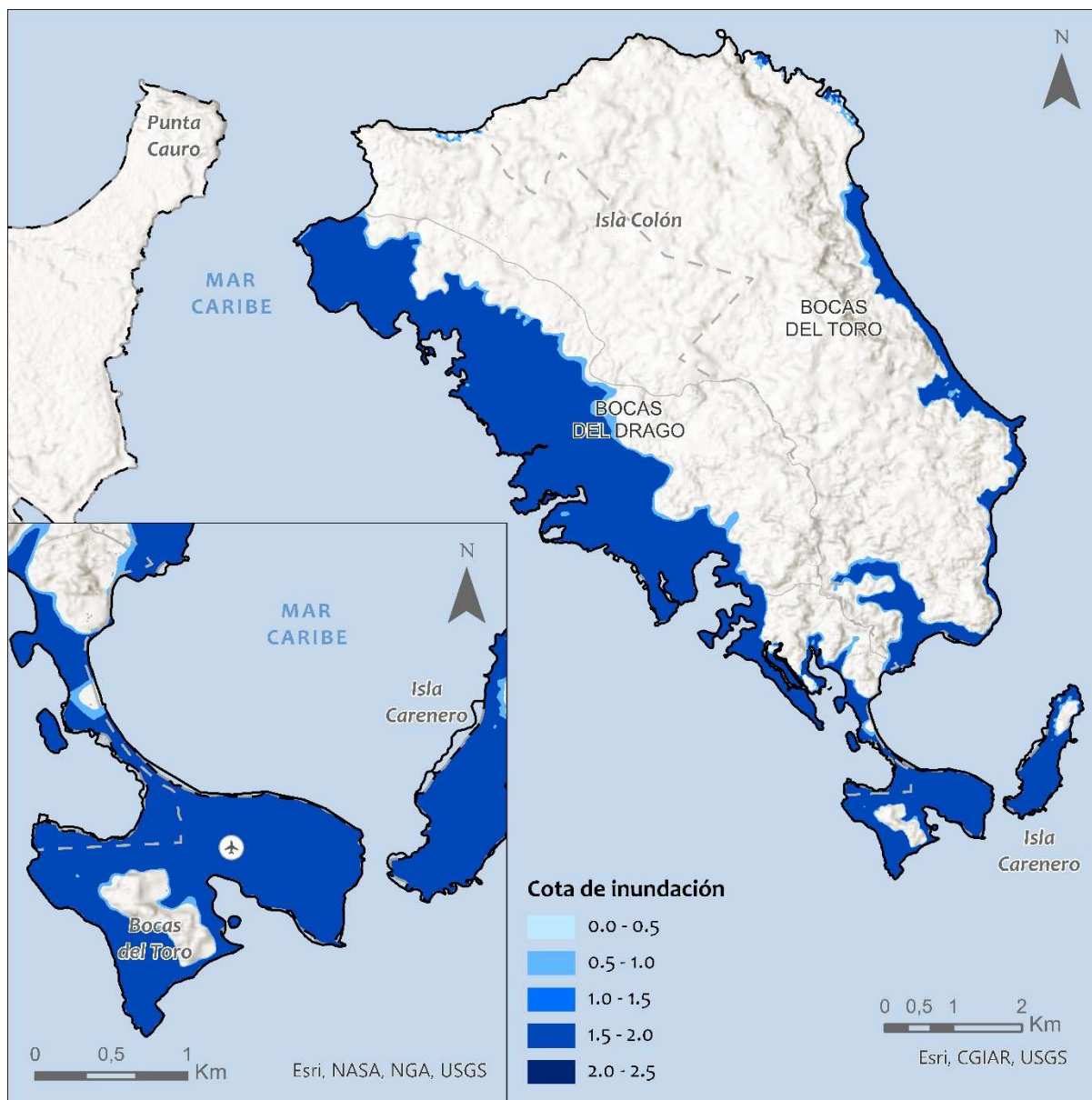


Figura 58. Mapa del impacto de inundación costera para un evento extremo de 100 años de periodo de retorno en el escenario histórico. Fuente: IHCantabria, 2024.

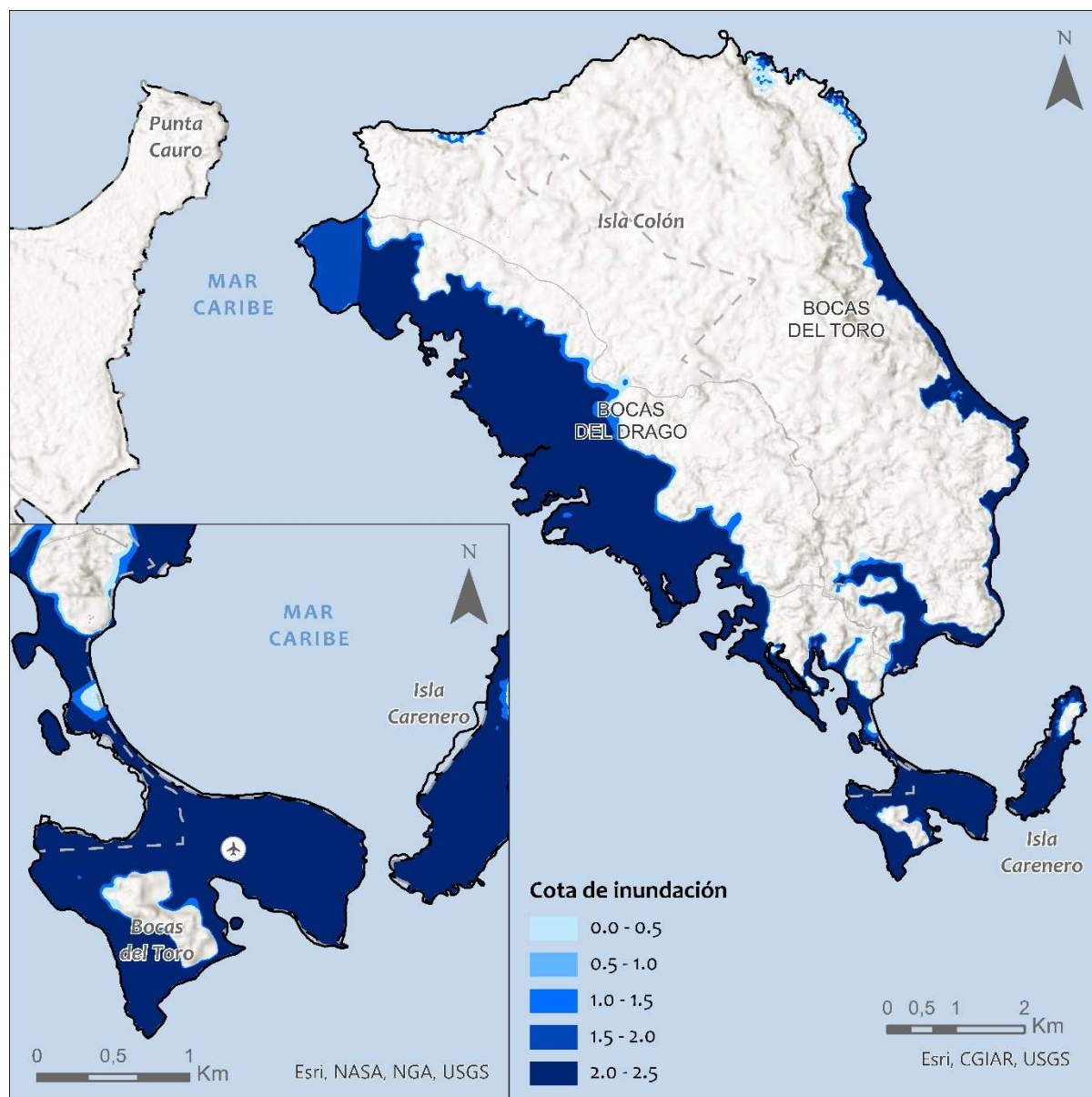


Figura 59. Mapa del impacto de inundación costera para un evento extremo de 100 años de periodo de retorno (percentil del 95%) en el horizonte 2050 para el escenario de emisiones SSP5-8.5.

9.3. Caracterización de la exposición

La evaluación de la exposición engloba la identificación y caracterización de los elementos expuestos. Para ello, se desarrollará un inventario de activos expuestos donde se recopilen todos los activos físicos (edificaciones e infraestructuras críticas¹) y los activos sociales (población).

Para llevar a cabo el análisis de la exposición a inundaciones se establece un umbral mínimo de profundidad de agua a partir del cual se considera que puede existir algún tipo de afectación. Este análisis se realiza en dos dimensiones, física y social, orientadas a la posterior evaluación de impactos/daños económicos y sociales respectivamente:

¹ Infraestructuras públicas cuya afectación supone un trastorno para el funcionamiento del sistema urbano (edificios destinados a ofrecer atención y asistencia médica, centros comerciales, escuelas y universidades, infraestructuras destinadas a la producción de energía, infraestructuras industriales, edificios ocupados por los servicios de policía, los bomberos y el ejército, centros de transporte y las principales vías de comunicación, etc.).

- Dimensión física: se analizan los elementos físicos urbanos (edificaciones e infraestructuras críticas) sobre los que se determinarán los impactos económicos.
- Dimensión social: referida a la población, sobre la que se evaluarán los impactos sociales relacionados con la pérdida y afectación de vidas humanas.

Para ello, se ha desarrollado un inventario de activos (elementos existentes en el área de estudio) que incluye todos los activos físicos (edificaciones e infraestructuras críticas) y los activos sociales (población) que forman parte del área urbana de Isla Colón y Carenero caracterizándolos a través de sus condiciones físicas, sus sectores de uso y su valor económico de forma que permita determinar su vulnerabilidad frente al peligro estudiado. Esta información sobre exposición constituye, por tanto, una parte fundamental de los modelos de riesgo.

A continuación, se desarrollan en sendos subcapítulos la exposición física y la exposición social.

9.3.1. Exposición física

Los activos físicos pueden clasificarse en términos generales en edificaciones e infraestructuras públicas (potencialmente críticas). La exposición es una variable binaria a escala local (sí / no) que se puede agregar a una escala mayor para proporcionar una estimación o representación rápida de los riesgos (económicos y sociales) que se evaluarán más adelante (combinando la amenaza y los datos de vulnerabilidad). La exposición proporciona índices rápidos y claros sobre cuánto y dónde se puede esperar el riesgo, y su reducción (cuando sea posible) es uno de los medios más efectivos para reducir el riesgo.

Inventario de edificaciones residenciales

Los impactos de las amenazas afectan a las edificaciones destinadas al uso habitacional o residencial agravando las consecuencias de los impactos en la población debido a la protección que ofrece la vivienda a sus ocupantes. Para conocer de forma precisa los impactos negativos que las inundaciones tienen, se hace necesario contar con un inventario de edificaciones en formato digital con atributos que caractericen cada edificio, sin embargo, no siempre se dispone de este nivel de detalle en la información, siendo más habitual contar con manzanas o parcelas del área en estudio.

Las edificaciones del área de estudio se dividen en diferentes calidades constructivas basadas, en primer lugar, y siempre que se cuente con información, en los materiales de construcción de aquellas, en el acceso a los servicios básicos, y en cualquier tipo de información que nos permita obtener la clasificación requerida; en segundo lugar, se basa en la relación del nivel socioeconómico de los habitantes de las edificaciones con la calidad constructiva de las mismas que ocupan.

Para el caso que nos ocupa se han utilizado los siguientes insumos:

1. Capa de edificaciones del Instituto Nacional de Estadística y Censo (INEC), en la que se incluye la huella de cada edificio y su uso principal, permitiendo en este caso seleccionar las edificaciones de tipo vivienda.
2. Variables del Censo de 2023 que indican a nivel de barrio urbano, o en su defecto, a nivel de lugar poblado, material de las paredes, techos y suelos de las viviendas; acceso a servicios básicos como agua potable, saneamiento y electricidad; e ingresos de los habitantes que los

ocupan, lo que permite realizar una clasificación en diferentes categorías de calidad constructiva.

3. Servicios de ortofotos para los barrios urbanos o lugares poblados de un tamaño considerable en los que se pueda localizar dentro de ellos zonas con diferentes categorías constructivas a partir de imágenes satelitales.

Las cuatro categorías de calidad constructiva definidas en el análisis se describen de la siguiente forma:

- Categoría A (alta calidad constructiva)
 - Asociada a clase socioeconómica alta.
 - Cuentan con todos los servicios de infraestructura básica: energía eléctrica, agua potable y saneamiento.
 - Edificaciones con piso, techo y paredes de materiales resistentes y de gran calidad. Presentan estructuras con diseño que siguen normas o estándares constructivos.
 - Dentro de esta categoría se pueden encontrar tipologías edificatorias unifamiliares y multifamiliares que varían en número de altura.
- Categoría B (media calidad constructiva)
 - Asociada a clase socioeconómica media.
 - Cuentan con los siguientes servicios de infraestructura básica: energía eléctrica y agua potable.
 - Corresponde a esta categoría la vivienda edificada con materiales permanentes, resistentes y acabados de buena calidad.
- Categoría C (limitada calidad constructiva, tipo popular)
 - Asociada a clase socioeconómica de menores recursos.
 - Cuentan con los siguientes servicios de infraestructura básica: energía eléctrica y agua potable.
 - Edificaciones realizadas con materiales de construcción básicos que se traducen en diseños sencillos y de escasa calidad. Se construyen con materiales resistentes en paredes (normalmente bloque), no así en techos y/o cubiertas donde la lámina de zinc es el material comúnmente utilizado.
 - Suele corresponderse con tipologías edificatorias de una o dos alturas. Se encuadran aquí las áreas de uso mixto (residencial mezclado con locales comerciales) de calidad baja.

- Categoría D (muy baja a precaria calidad constructiva)
 - Asociada a clase socioeconómica de escasos recursos y en hábitat precario.
 - Carecen de vías pavimentadas y servicios de infraestructura básica en su mayoría, sobre todo en el caso de asentamientos informales e invasiones.
 - Se caracteriza por presentar materiales frágiles y de desecho en muros y/o techos y piso de tierra. Siempre producto de la autoconstrucción.

Como arrojan los datos del siguiente gráfico, la calidad constructiva que más superficie ocupa en el área de estudio es la de tipo popular (C), concentrando en torno al 55% de la población del área edificada dedicada a uso residencial. Le sigue la calidad constructiva precaria (D) con casi un 38% de la población del área de estudio. La categoría alta (A) y media (B) son las menos abundantes en lo que respecta al área que ocupan dentro del ámbito de estudio concentrando un 1.3 y un 5.7% de la población y un 1.6 y un 11.8% del área residencial edificada respectivamente.

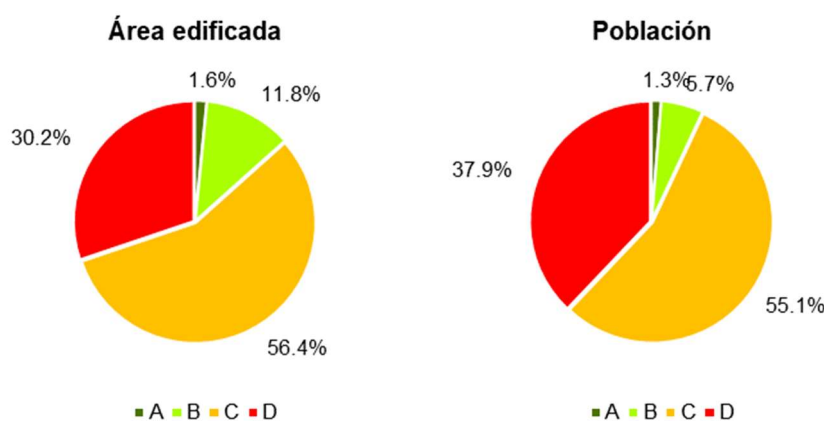


Figura 60. Distribución de la superficie edificada y la población según categorías de calidad constructiva. Fuente: IHCantabria, 2024.

Calidad constructiva	Área (ha)	%	Población	%
A	0.31	1.6	118	1.3
B	2.33	11.8	520	5.7
C	11.15	56.4	5,062	55.1
D	5.96	30.2	3,482	37.9
Total	20	100	9,181	100

Tabla 14. Distribución de área y población según categoría de calidad constructiva de las edificaciones. Fuente: IHCantabria, 2024.

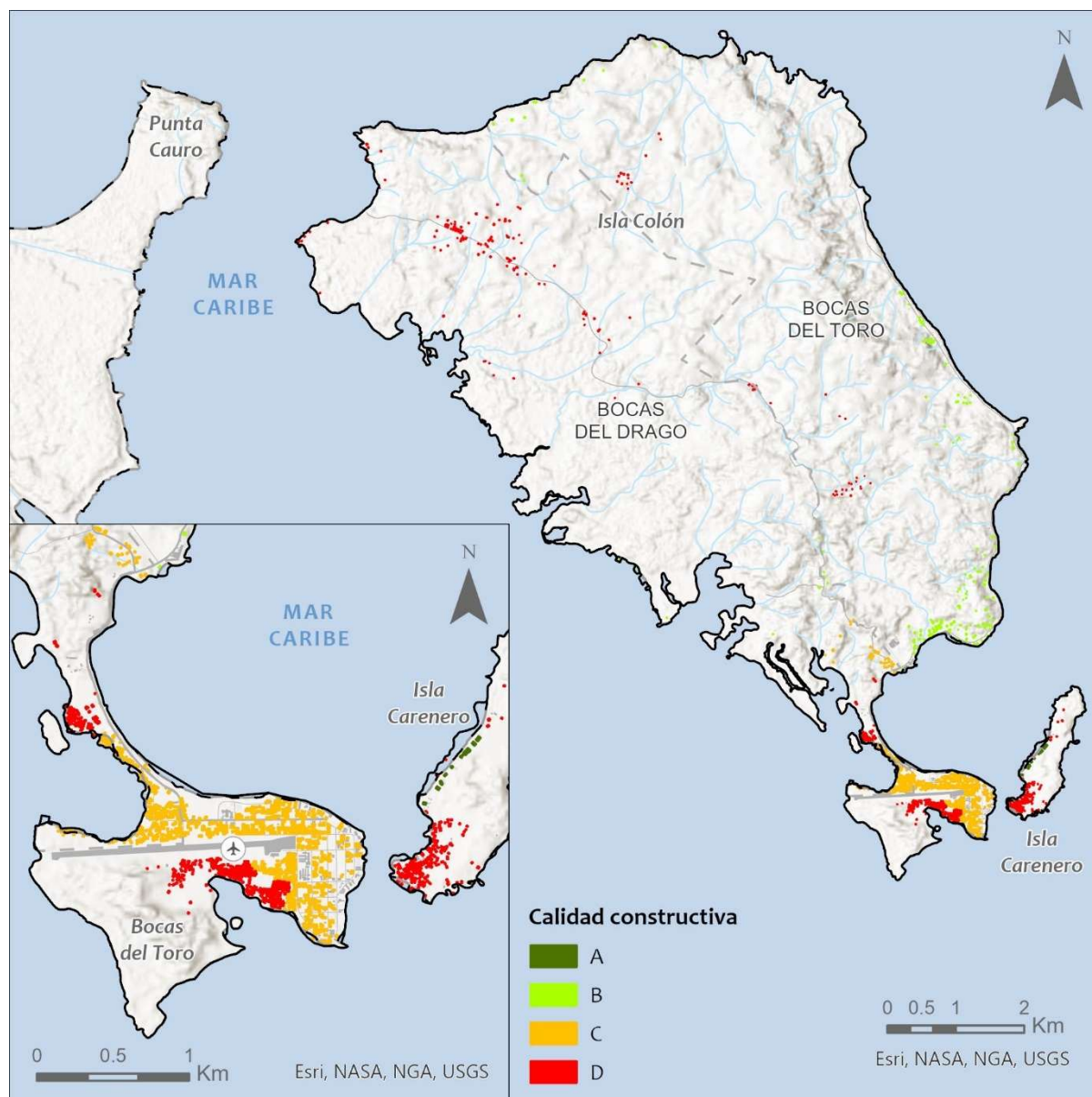


Figura 61. Distribución geográfica de la calidad constructiva de las edificaciones residenciales. Fuente: IHCantabria, 2024.

Valor económico de las edificaciones

El valor económico de reposición (o valor en riesgo) de las edificaciones residenciales considerado representa el conjunto de activos susceptibles de deteriorarse por efecto de una inundación. Este conjunto de activos incluye: su continente (elementos estructurales e instalaciones) y contenido (equipamiento).

La estimación de este valor económico de reposición para cada categoría de calidad constructiva se ha realizado con base en los considerados en los Estudios de desarrollo urbano y cambio climático para el Área Metropolitana de Panamá Pacífico (IDOM-IHCantabria, 2016) de la Iniciativa de Ciudades Emergentes y Sostenibles (ICES) y en las tablas tributarias de la Alcaldía de Panamá de 2017. Los valores ahí recogidos para diferentes tipologías constructivas se han actualizado al año 2024 aplicando el Índice de Precios al Consumo (IPC) obtenido del INEC.

En la Tabla 15 se presentan los valores de reposición para cada una de las categorías de calidades constructivas en los que se ha basado, tanto la estimación del valor económico de reposición del total de las edificaciones residenciales inventariadas, como el cálculo de su valor expuesto.

Calidad constructiva	Valor de reposición (USD \$/m ²)	Valor total (MUSD \$)	%
A	2,000.00	6.20	5.7
B	960.00	22.38	20.5
C	700.00	78.04	71.6
D	39.00	2.32	2.1
Total		108.95	100

Tabla 15. Valores de reposición según calidad constructiva, y valor total en millones de dólares (MUSD \$), de las edificaciones residenciales inventariadas. Fuente: IHCantabria, 2024.

Inventario de infraestructuras críticas

En lo referente a las infraestructuras críticas afectadas por inundaciones, es preciso realizar un análisis de los valores económicos expuestos derivados del daño o destrucción de estas. Los daños económicos en estas infraestructuras pueden ser directos, cuando lo que se evalúa es el valor económico de la infraestructura dañada, o indirectos, cuando lo que se tiene en cuenta es la capacidad afectada, la pérdida de servicio y el tiempo de recuperación de la infraestructura debido a la afectación por inundación, en este estudio solo se evalúan los daños directos derivados de los eventos de inundación. Así pues, con vistas a valorar lo mencionado previamente, se debe realizar el inventario de las infraestructuras críticas (IC), que son aquellas infraestructuras cuya afectación suponga un trastorno para el funcionamiento del sistema urbano. Este inventario se ha realizado, del mismo modo que para las edificaciones residenciales, con base en información oficial de infraestructuras públicas y la fotointerpretación de imágenes de satélite. Con base en esta información para el presente, las infraestructuras urbanas del área de estudio han sido identificadas, localizadas y clasificadas en categorías según el tipo de uso que se hace de ellos o el subsistema infraestructural al que pertenecen. Así, se ha elaborado una base de datos de infraestructuras críticas que cuenta con los siguientes elementos distribuidos según las categorías mostradas a continuación:

- Agua y saneamiento: esta categoría incluye plantas de tratamiento de agua, estaciones de bombeo y otros elementos del sistema de abastecimiento de agua.
- Asistencia médica: en esta categoría se incluyen todos los edificios e infraestructuras destinadas a ofrecer atención y asistencia médica.
- Comercial: dentro de esta categoría encontramos mercados y grandes superficies comerciales y, en este caso, por ser uno de los principales medios de vida del área de estudio, los establecimientos hoteleros.
- Educación: en esta categoría se incluyen las infraestructuras destinadas a la educación de jóvenes de diferentes edades, desde los niveles más básicos de enseñanza, hasta centros de estudios superiores como pueden ser las universidades.
- Energía: En esta categoría se incluyen las infraestructuras destinadas a la producción de energía.

- Industrial: en esta categoría se incluyen las infraestructuras de mayor relevancia destinadas a la práctica de las actividades del sector privado industrial. Incluyen almacenes, plantas de procesamiento de alimentos y bebidas, actividades asociadas al transporte terrestre, astilleros, etc.
- Servicios urbanos: en esta categoría se hace referencia a los elementos cuya función es ofrecer un servicio de atención y protección a los ciudadanos de manera gratuita. En este sentido, se han tenido en cuenta los edificios ocupados por los servicios de policía, los bomberos y el ejército.
- Transporte: esta categoría incluye puertos y terminales de transporte de pasajeros, aeropuertos y las principales vías de comunicación.

Categoría IC	Número de elementos	%
Agua y saneamiento	9	4.35
Asistencia Médica	3	1.45
Comercial	146	70.53
Educación	15	7.25
Industrial	2	0.97
Energía	18	8.70
Servicios Urbanos	6	2.90
Transporte	8	3.86
Total	207	100.00

Tabla 16. Inventario de infraestructuras críticas del área de estudio. Fuente: IHCantabria, 2024.

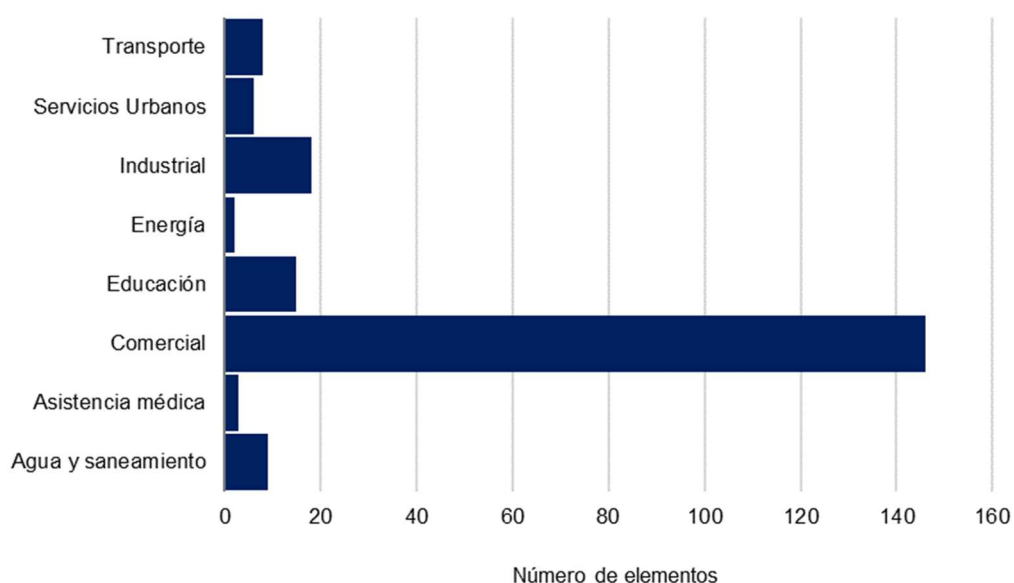


Figura 62. Distribución geográfica de la calidad constructiva de las edificaciones residenciales. Fuente: IHCantabria, 2024.

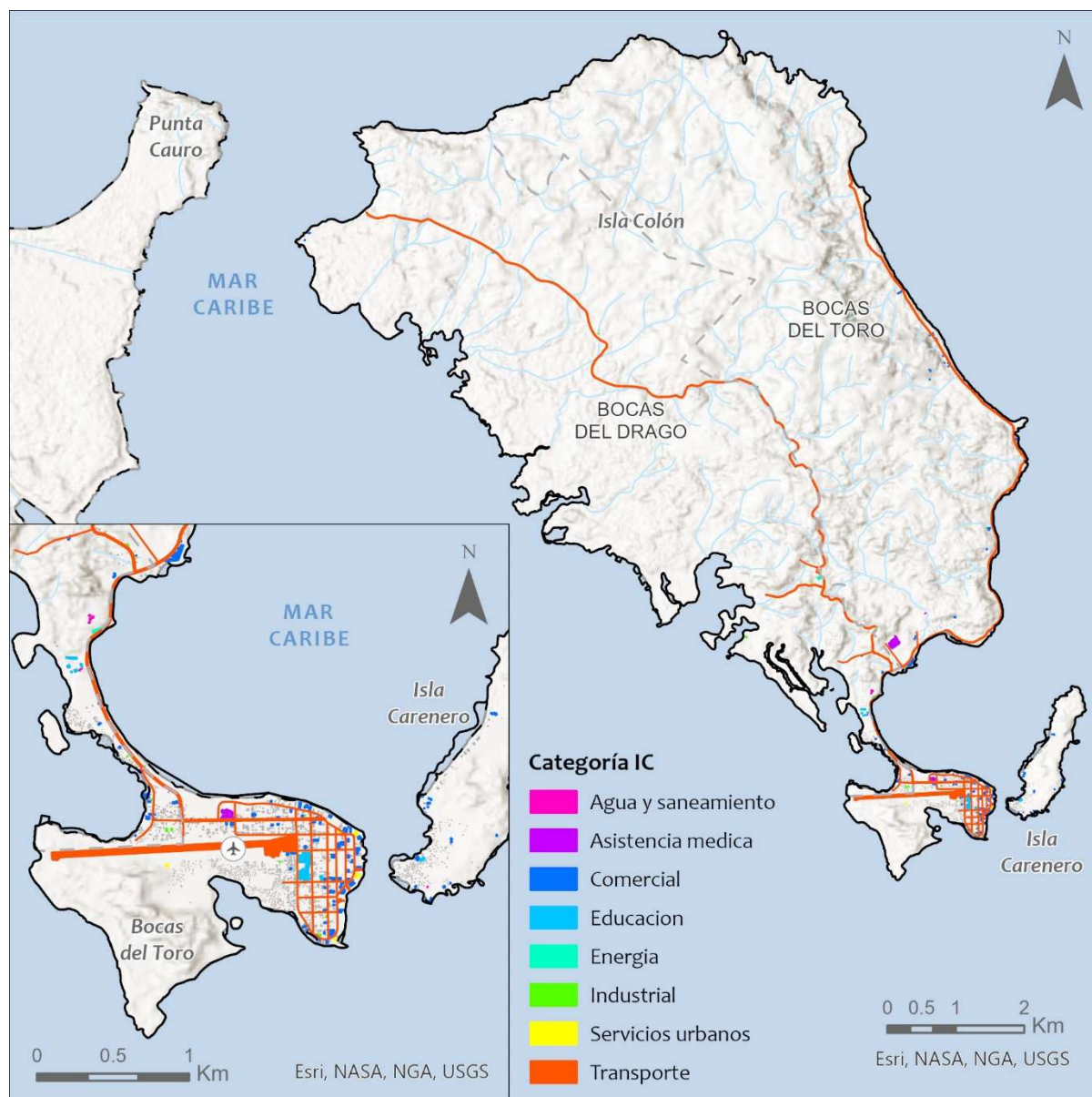


Figura 63. Infraestructuras críticas del área de estudio por categoría. Fuente: IHCantabria, 2024.

Valor económico de las infraestructuras críticas

El valor económico de reposición de las infraestructuras críticas considera, al igual que para las edificaciones residenciales, el conjunto de activos susceptibles de deteriorarse por efecto de la inundación.

En este caso, se han considerado valores unitarios específicos (USD \$/m²) para cada categoría de IC teniendo en cuenta que, cada una de ellas tiene unos costes estructurales y de instalaciones diferentes. Estos valores se basan en valores unitarios de este tipo de infraestructuras en los Estudios de desarrollo urbano y cambio climático para el Área Metropolitana de Panamá Pacífico (IDOM-IHCantabria, 2016) de la Iniciativa de Ciudades Emergentes y Sostenibles (ICES) actualizados al año 2024 con el IPC.

En la Tabla 17 se presentan los valores de reposición para cada una de las categorías consideradas de IC, así como el valor económico de reposición del total.

Categoría IC	Valor de reposición (USD \$/m2)	Valor total (MUSD \$)
Agua y saneamiento	0.90	0.00
Asistencia Médica	120.00	1.97
Comercial	100.00	4.07
Educación	45.00	0.51
Energía	14.00	0.03
Industrial	1.60	0.00
Servicios Urbanos	45.00	0.08
Transporte	0.60	0.29
Total		6.95

Tabla 17. Valores de reposición según categoría, y valor total en millones de dólares (MUSD \$), para las infraestructuras críticas del área de estudio. Fuente: IHCantabria, 2024.

9.3.2. Exposición social

La exposición social se refiere inicialmente a la cantidad de personas afectadas por un peligro en particular. Se asume la población estática como punto de inicio típico y simplificado para estimar la exposición social.

Inventario de población

Se ha considerado una población de 9181 habitantes en el área de estudio. Esta población ha sido obtenida de a partir de XII Censo de Población y VIII de Vivienda de Panamá del año 2023 del INEC a nivel de barrio urbano o lugar poblado, y traslada a la capa de edificaciones residenciales dentro del área urbana de Isla Colón y Carenero.

En la Figura 64 se presenta la distribución geográfica de la densidad de población en el área de estudio.

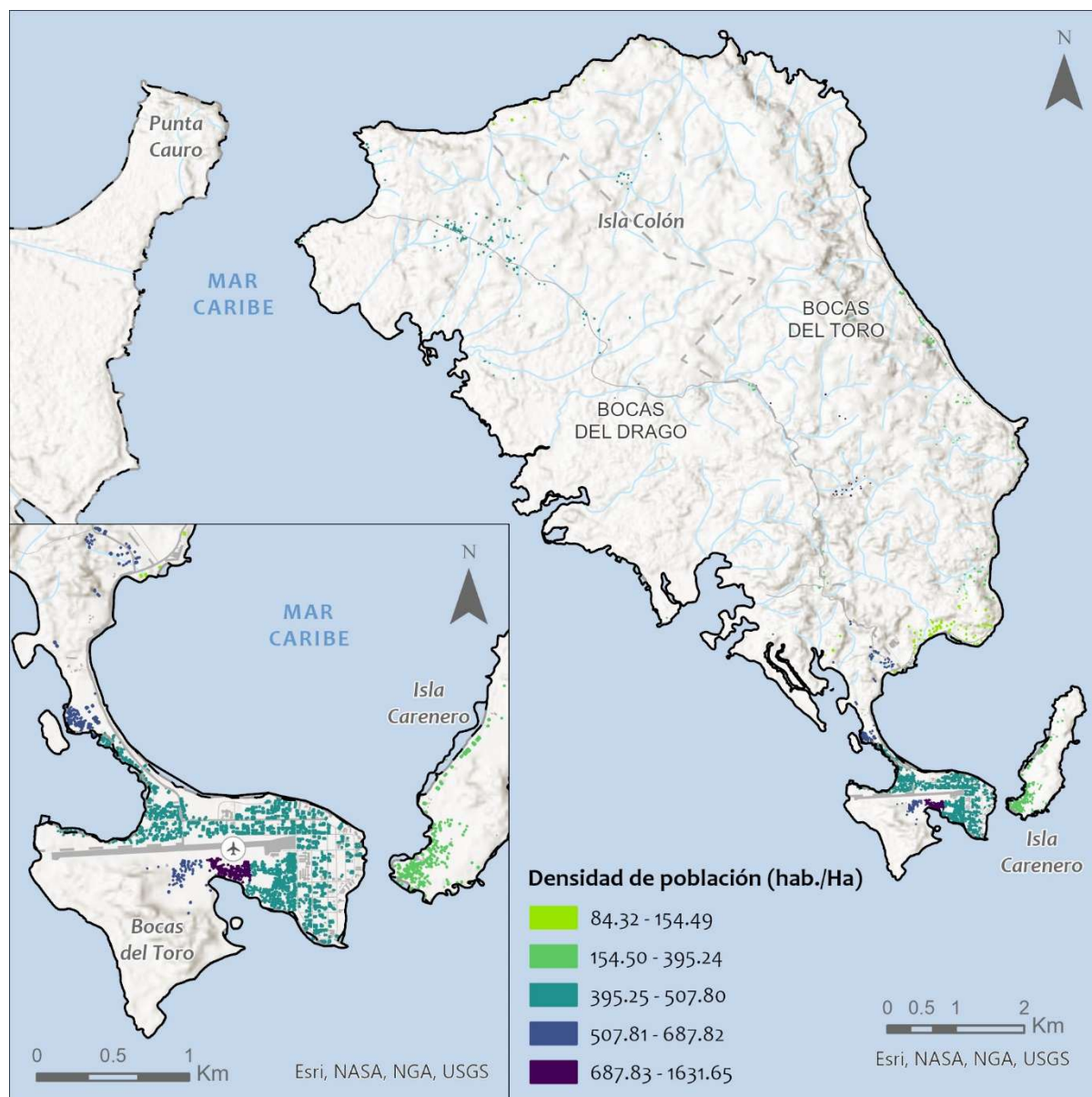


Figura 64. Distribución geográfica de la densidad de población en el área de estudio. Fuente: IHCantabria, 2024.

9.4. Caracterización de la vulnerabilidad

El análisis de la vulnerabilidad de los elementos expuestos consiste en el estudio del grado de afectación que puede generar el peligro en los elementos expuestos, siendo una cualidad intrínseca al sistema y función de las características naturales de esos elementos y del umbral a partir del cual se produce el impacto objeto de estudio, se trata de evaluar las características intrínsecas de los elementos expuestos que les hacen más susceptibles de sufrir los impactos negativos de un peligro.

9.4.1. Vulnerabilidad física

La vulnerabilidad física se representa mediante curvas de vulnerabilidad o funciones de daño que relacionan la profundidad de la lámina de agua con el daño potencial sobre el elemento analizado, que dependerá de las características intrínsecas de este.

Las funciones de vulnerabilidad física para inundaciones se han establecido considerando las definidas por la herramienta ERN-Vulnerabilidad (CAPRA, www.capra.org), adaptándolas al contexto del

presente estudio según la caracterización física de las construcciones. Se emplean las mismas funciones de daño para los diferentes periodos de retorno y los diferentes escenarios analizados.

A continuación, se presenta el análisis de la vulnerabilidad y las funciones de daño establecidas para las edificaciones y las infraestructuras críticas.

Funciones de daño para edificaciones

La asignación de funciones de daño por inundación en edificaciones viene definida para cada tipo constructivo, descritos en el módulo de exposición. A efectos de inundaciones, se consideran cuatro funciones de daño, dos para viviendas de un solo piso (planta baja) y otras dos para viviendas de dos o más pisos. Se han adoptado las siguientes funciones de daño dependientes de la profundidad del agua, tomadas de la base de datos de CAPRA (Tabla 18).

Categoría	Función CAPRA	Función de daño (h=profundidad de agua)
A	M2 (2 pisos)	si $h < 2.8$: Daño = $0.5 \cdot (1 - \text{EXP}(-0.155 \cdot h^3))$
		si $h \geq 2.8$: Daño = $0.5 + 0.5 \cdot (1 - \text{EXP}(-0.155 \cdot (h - 2.8)^3))$
B	W2 (2 pisos)	si $h < 2.8$: Daño = $0.5 \cdot (1 - \text{EXP}(-0.33 \cdot h^3))$
		si $h \geq 2.8$: Daño = $0.5 + 0.5 \cdot (1 - \text{EXP}(-0.33 \cdot (h - 2.8)^3))$
C	M1 (1 piso)	Daño = $1 - \text{EXP}(-0.33 \cdot h^3)$
D	W1 (1 piso)	Daño = $1 - \text{EXP}(-0.86 \cdot h^3)$

Tabla 18. Funciones de daño en función de la calidad constructiva de las edificaciones. Fuente: IHCantabria, 2024.

Para la asignación de estas funciones, se ha aplicado el juicio de experto para seleccionar las funciones CAPRA que mejor se relacionan con las cuatro categorías empleadas (A, B, C y D), que finalmente se han ajustado con funciones analíticas para facilitar la implementación. Nótese que, aunque en las denominaciones de las funciones CAPRA se hace referencia a los materiales constructivos (W: madera; M: Mampostería; etc.), que a su vez guardan relación con las categorías empleadas, esta información no se ha considerado la más relevante a la hora de elegir las, ni afecta de forma significativa a la vulnerabilidad frente al peligro de inundación lenta. La hipótesis de trabajo es que este tipo de inundaciones dañan las instalaciones y los equipamientos de cualquier vivienda, sea de madera o de ladrillo, pero no alteran en general su estructura.

En términos generales, la proporción de daños viene dada por la existencia de un o más niveles funcionales en las viviendas. En las viviendas más frágiles, se asume que el segundo piso es inexistente, o es la propia cubierta del inmueble, por lo que no tiene capacidad portante; en cambio, en las viviendas de fragilidad media o de mejor calidad, se considera que la existencia de pisos superiores permite poner a salvo una mayor proporción de los activos en riesgo. En la Figura 65 se muestran de forma gráfica las funciones de daño por inundaciones adoptadas.

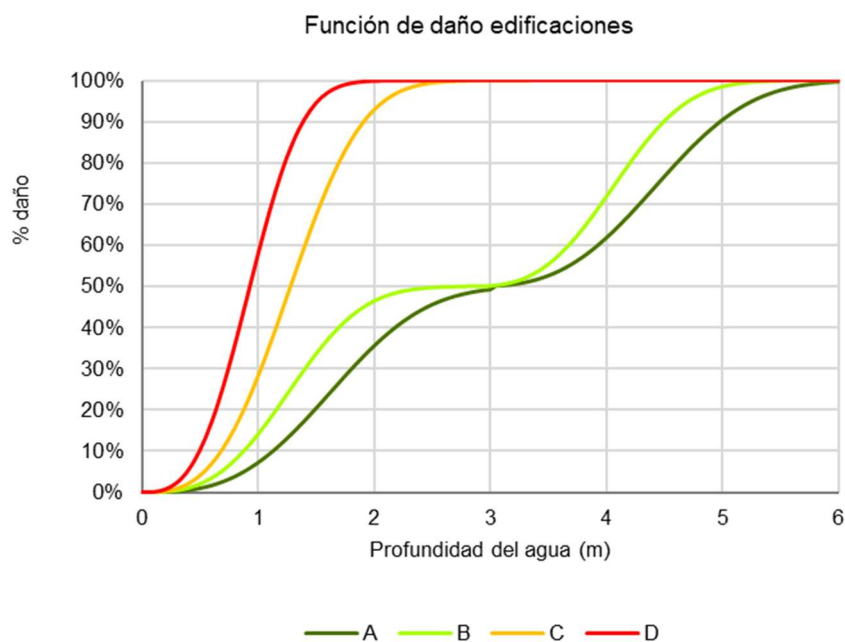


Figura 65. Funciones de daño para calcular los riesgos de inundación. Fuente: IHCantabria, 2024.

Funciones de daño para infraestructuras críticas

En el caso de las infraestructuras críticas, se asigna una curva de vulnerabilidad o función de daño a cada categoría de infraestructura crítica, agrupadas por su tipología y tipo de servicios que provén (Tabla 19).

Categoría	Función de daño
Comercial	Tipo I
Educación	
Asistencia médica	
Servicios urbanos	
Energía	Tipo II
Industria	
Agua y saneamiento	
Transporte	Tipo III

Tabla 19. Funciones de daño para las diferentes categorías de infraestructuras críticas. Fuente: IHCantabria, 2024.

Para cada tipo de función de daño, se asignan funciones que permiten valorar los daños directos, asociados a la afección de la propia infraestructura crítica. A partir de estas funciones, es posible cuantificar los costes de la infraestructura crítica.

Estas funciones de daño en infraestructuras críticas no están disponibles de forma genérica en la literatura técnica, y por tanto se han elaborado a partir de la experiencia adquirida en numerosas ciudades de Latinoamérica y el Caribe, tratando de minimizar el número de parámetros necesarios y con un enfoque práctico. Las funciones de daño empleadas son rectas que representan la relación entre el incremento de profundidad y el daño producido mediante tres tramos: un primer tramo sin daños que se extiende hasta una profundidad de inicio de daños; a continuación, un tramo en que el daño aumenta proporcionalmente con la profundidad (en las funciones CAPRA esta expresión suele

tener forma sigmoïdal en lugar de lineal, pero con mayor dificultad de manejo); por último, a partir de un cierta profundidad de agua, se define un porcentaje de pérdidas constante. Nótese que estas funciones en tres tramos, basadas en tres parámetros con un significado físico intuitivo, deben permitir representar tanto daños físicos como pérdida de funcionalidad en infraestructuras tan diversas como un colegio, una planta depuradora, una estación de transformación de la red eléctrica o una carretera. Dado el alcance y la información disponible, se considera que este enfoque para el análisis de los daños indirectos y sistémicos tiene el grado de parsimonia adecuado y refleja de forma clara las hipótesis de fondo.

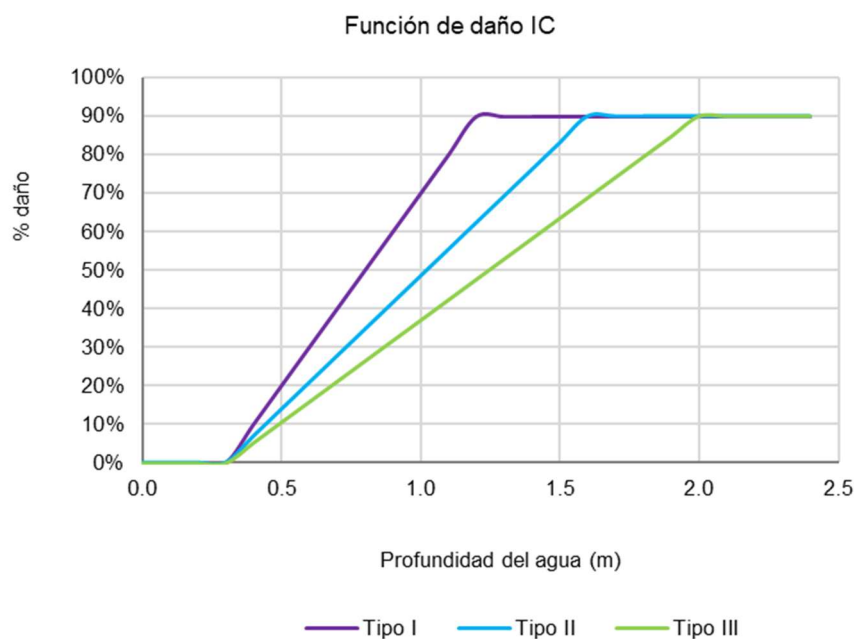


Figura 66. Funciones de daño para infraestructuras críticas de tipo I, II y III. Fuente: IHCantabria, 2024.

9.5. Cálculo del riesgo

La integración de las distintas componentes anteriores (peligrosidad, impacto, exposición y vulnerabilidad) permite la obtención del riesgo. Esta evaluación se realiza para los distintos elementos expuestos considerados de manera independiente, obteniéndose por lo tanto una evaluación de los daños para las edificaciones, población e infraestructuras críticas, cuyos resultados se detallan a continuación.

9.5.1. Evaluación de los daños económicos sobre las edificaciones por inundación costera

Los resultados del cálculo del riesgo por inundación costera sobre las edificaciones, medidos a través de los daños económicos se muestran en la Figura 67, y se detallan en la Tabla 20.

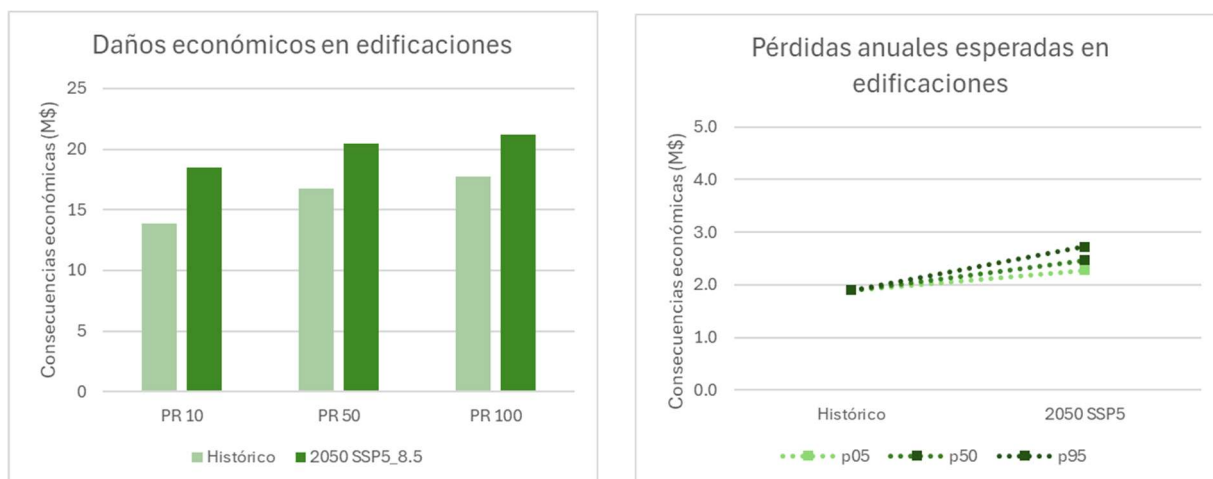


Figura 67. Resumen gráfico de los resultados de daños económicos (millones de dólares, MUSD \$) por inundación costera en edificaciones. Fuente: IHCantabria, 2024.

Indicador de riesgo de inundación	T10	T50	T100	PAE
PERIODO HISTÓRICO				
Daños económicos en las edificaciones	13.87	16.73	17.72	1.90
HORIZONTE 2050 SSP5-8.5				
Daños económicos en las edificaciones (percentil 5%)	16.91	19.20	20.09	2.28
Daños económicos en las edificaciones (percentil 50%)	18.48	20.46	21.20	2.47
Daños económicos en las edificaciones (percentil 95%)	20.52	22.01	22.52	2.72

Tabla 20. Resultados de daños económicos (millones de dólares, MUSD \$) por inundación costera en edificaciones. Fuente: IHCantabria, 2024.

En el área de estudio, para el escenario histórico los daños económicos oscilan entre los 13.87 millones de dólares para un evento extremo de periodo de retorno de 10 años, y los 17.72 millones de dólares para un evento extremo de periodo de retorno de 100 años. Esto se traduce en una estimación de pérdidas anuales esperadas de 1.90 millones de dólares.

Para el horizonte 2050, escenario climático SSP5-8.5, se prevé que todas estas estimaciones se incrementen. Las pérdidas anuales esperadas aumentarán hasta un valor entre los 2.28 y los 2.72 millones de dólares, lo que implica un aumento de entre el 19.86% y el 43.13% en función del percentil considerado.

Especialmente estos daños tendrán lugar, principalmente, en las edificaciones situadas en el entorno del aeropuerto, así como en la isla Carenero. Las figuras siguientes muestran la distribución espacial de los daños económicos sobre las edificaciones por inundación costera para un evento extremo de 100 años de periodo de retorno en el escenario histórico y en el horizonte 2050 para el escenario de emisiones SSP5-8.5.

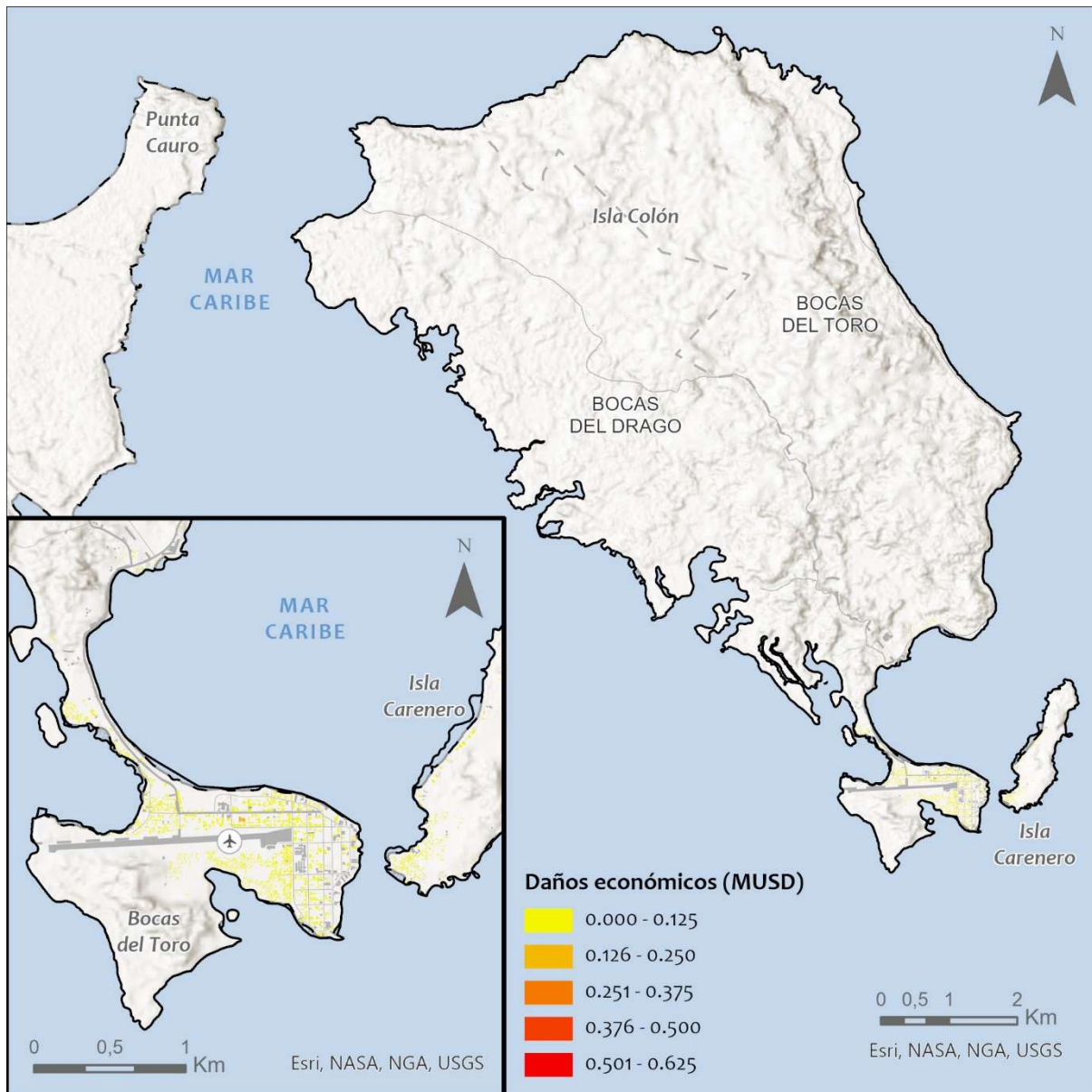


Figura 68. Mapa de los daños económicos sobre las edificaciones por inundación costera para un evento extremo de 100 años de periodo de retorno en el escenario histórico. Fuente: IHCantabria, 2024.

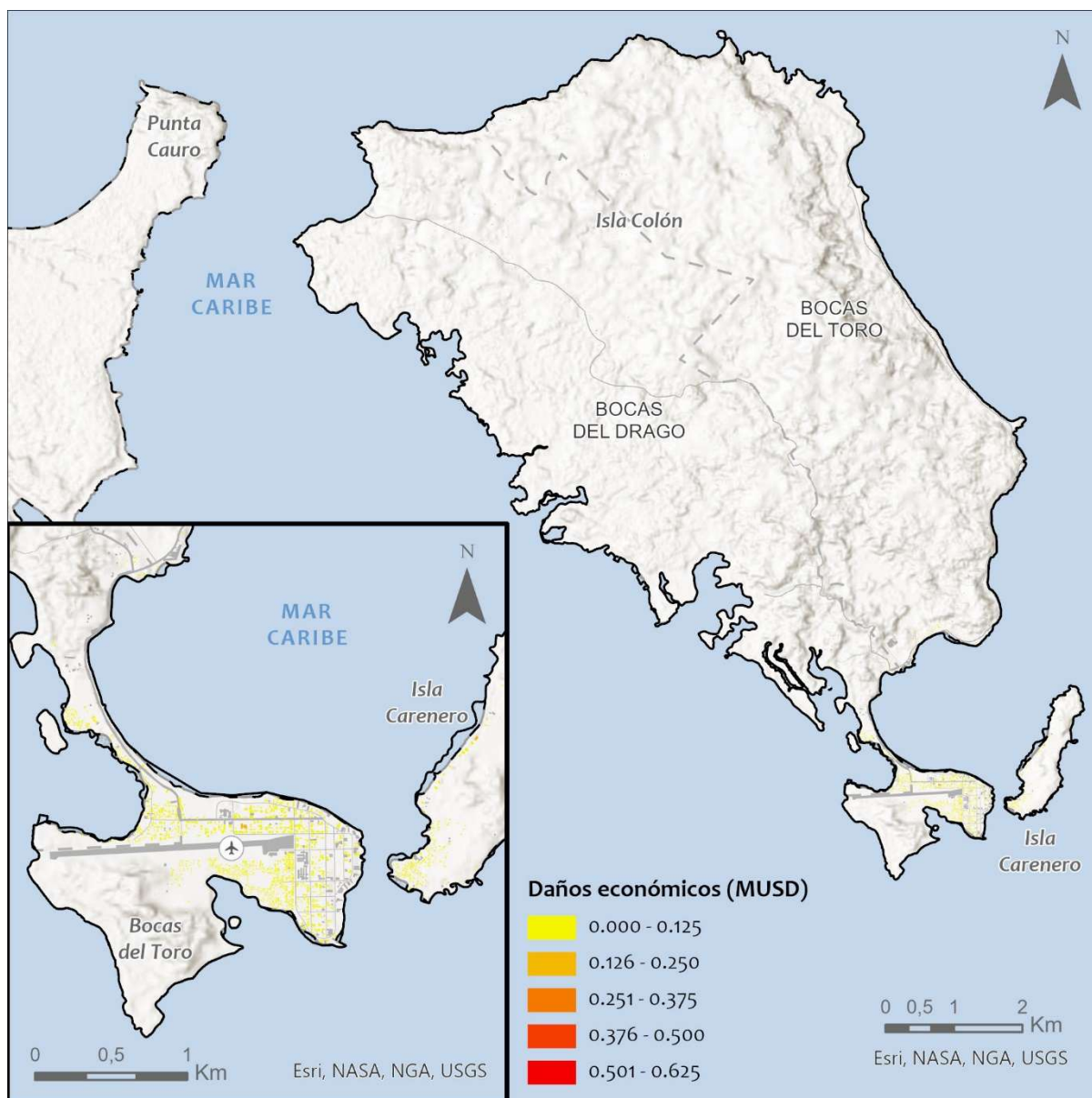


Figura 69. Mapa de los daños económicos sobre las edificaciones por inundación costera para un evento extremo de 100 años de periodo de retorno (percentil del 95%) en el horizonte 2050 para el escenario de emisiones SSP5-8.5. Fuente: IHCantabria, 2024.

9.5.2. Evaluación de los daños sociales por inundación costera

Los resultados del cálculo del riesgo por inundación costera sobre la población, medidos a través de los daños sociales se muestran en la Figura 67, y se detallan en la Tabla 21.

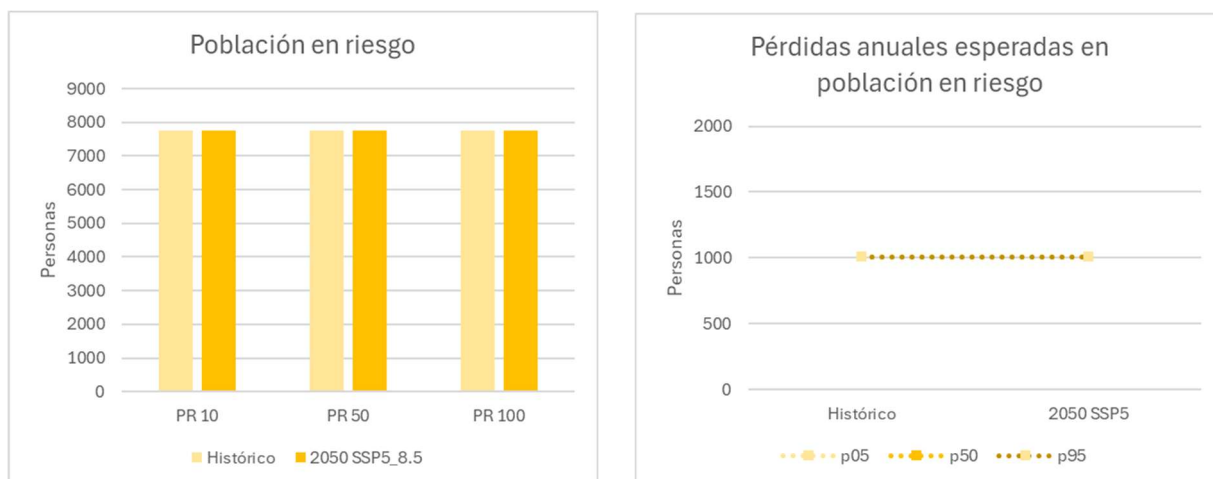


Figura 70. Resumen gráfico de los resultados de daños sociales (número de personas) por inundación costera. Fuente: IHCantabria, 2024.

Indicador de riesgo de inundación	T10	T50	T100	PAE
PERIODO HISTÓRICO				
Daños sociales sobre la población	7747	7747	7747	1007
HORIZONTE 2050 SSP5-8.5				
Daños sociales sobre la población (percentil 5%)	7747	7747	7747	1007
Daños sociales sobre la población (percentil 50%)	7747	7747	7747	1007
Daños sociales sobre la población (percentil 95%)	7747	7747	7747	1007

Tabla 21. Resultados de daños sociales (número de personas) por inundación costera. Fuente: IHCantabria, 2024.

En el área de estudio, el riesgo por inundación costera sobre la población es constante, tanto para los distintos periodos de retorno considerados como para los horizontes temporales y el escenario de cambio climático. Se estima que 7747 personas se verán afectadas por eventos de periodo de retorno superior a 10 años. Esto se traduce en una estimación de pérdidas anuales esperadas (PAE) de 1007 personas.

Espacialmente, y al igual que sucedía para el caso de las edificaciones, estos daños tendrán lugar, principalmente, en algunos enclaves poblacionales situados en el entorno del aeropuerto, así como en la isla Carenero. Las figuras siguientes muestran la distribución espacial de los daños sociales sobre la población por inundación costera para un evento extremo de 100 años de periodo de retorno en el escenario histórico y en el horizonte 2050 para el escenario de emisiones SSP5-8.5.

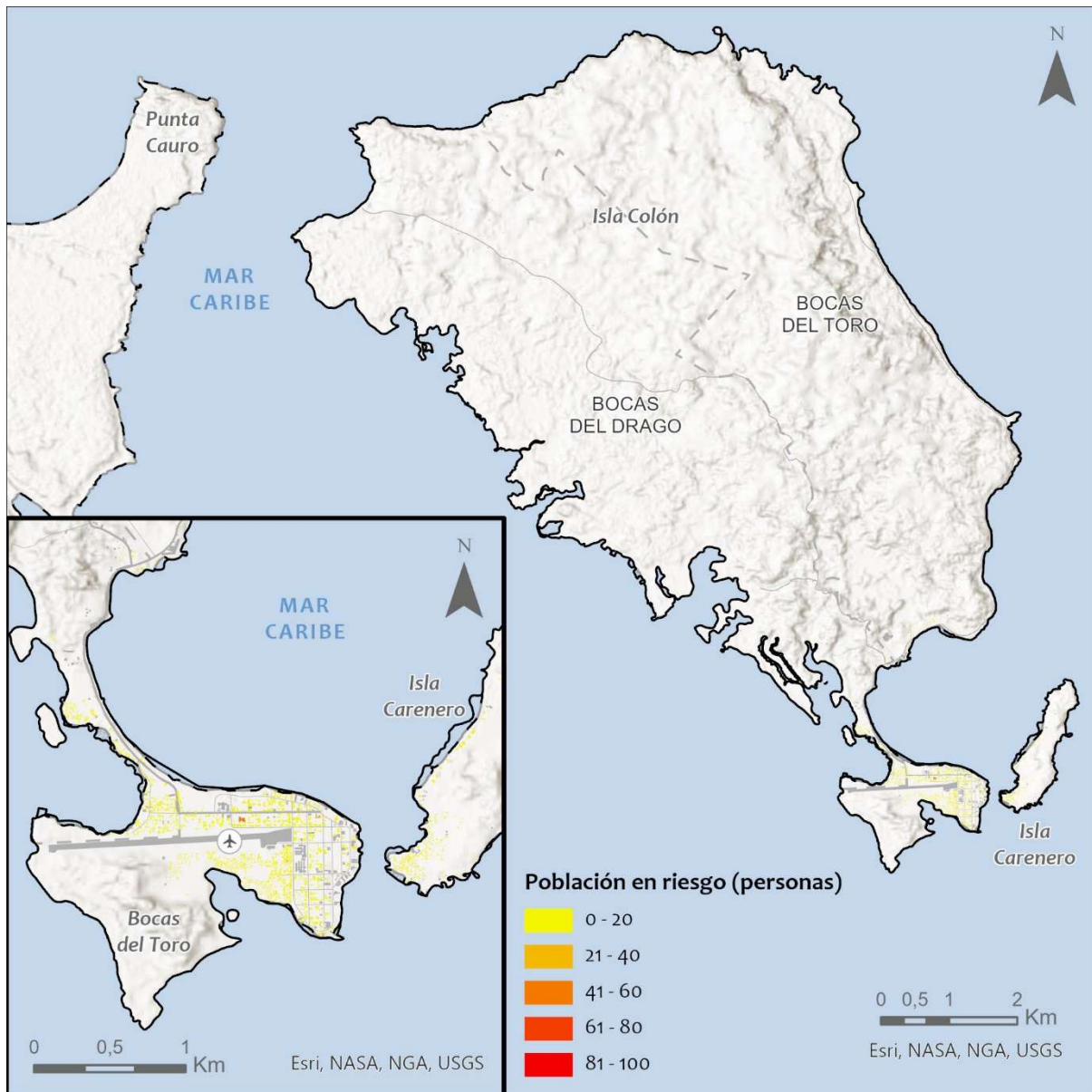


Figura 71. Mapa de los daños sociales sobre la población por inundación costera para un evento extremo de 100 años de periodo de retorno en el escenario histórico. Fuente: IHCantabria, 2024.

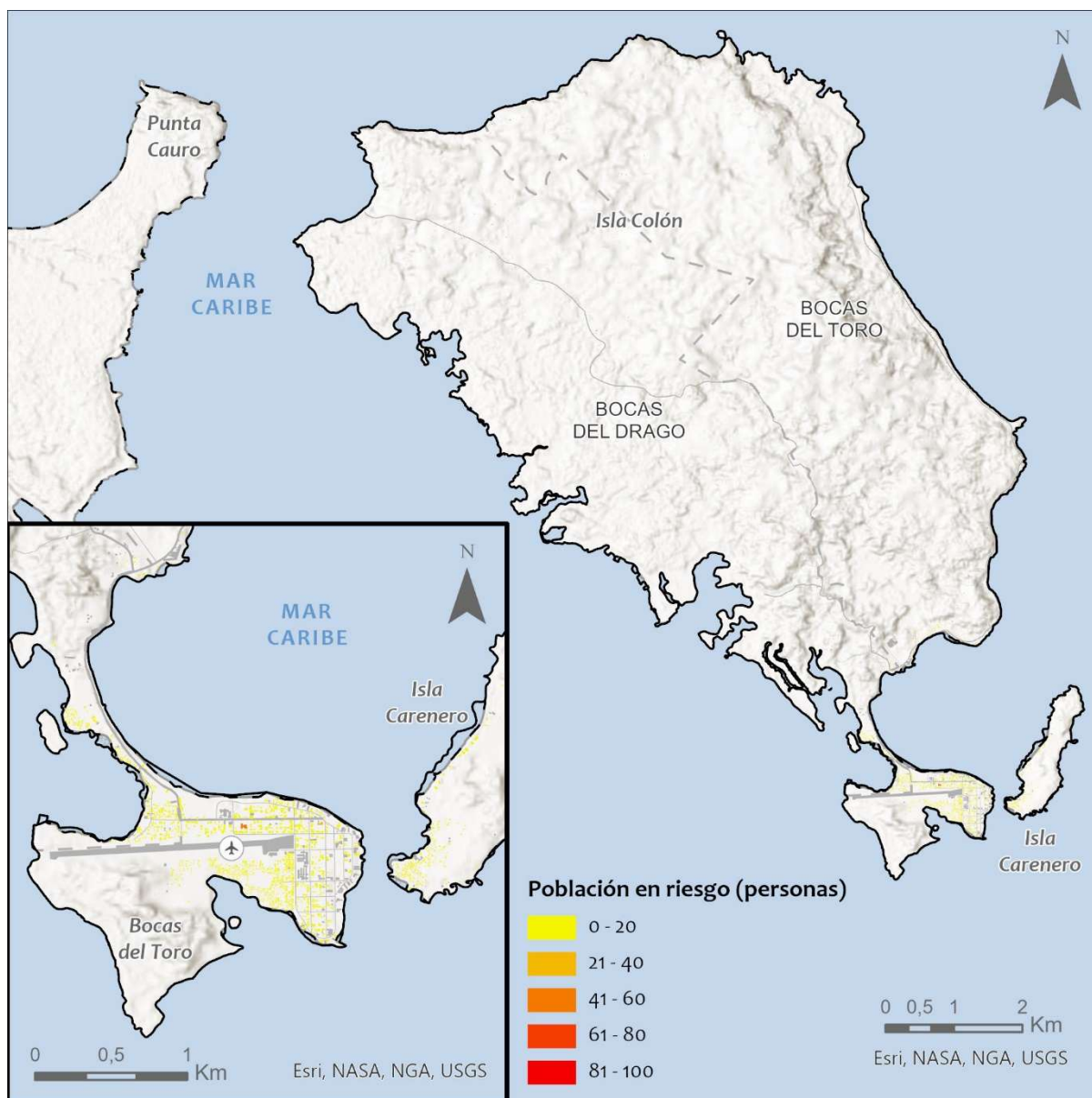


Figura 72. Mapa de los daños sociales sobre la población por inundación costera para un evento extremo de 100 años de periodo de retorno (percentil del 95%) en el horizonte 2050 para el escenario de emisiones SSP5-8.5. Fuente: IHCantabria, 2024.

9.5.3. Evaluación de los daños sobre las infraestructuras críticas

Los resultados del cálculo del riesgo por inundación costera sobre las infraestructuras críticas, medidos a través de los daños económicos sobre las mismas se muestran en la Figura 73, y se detallan en la Tabla 22.

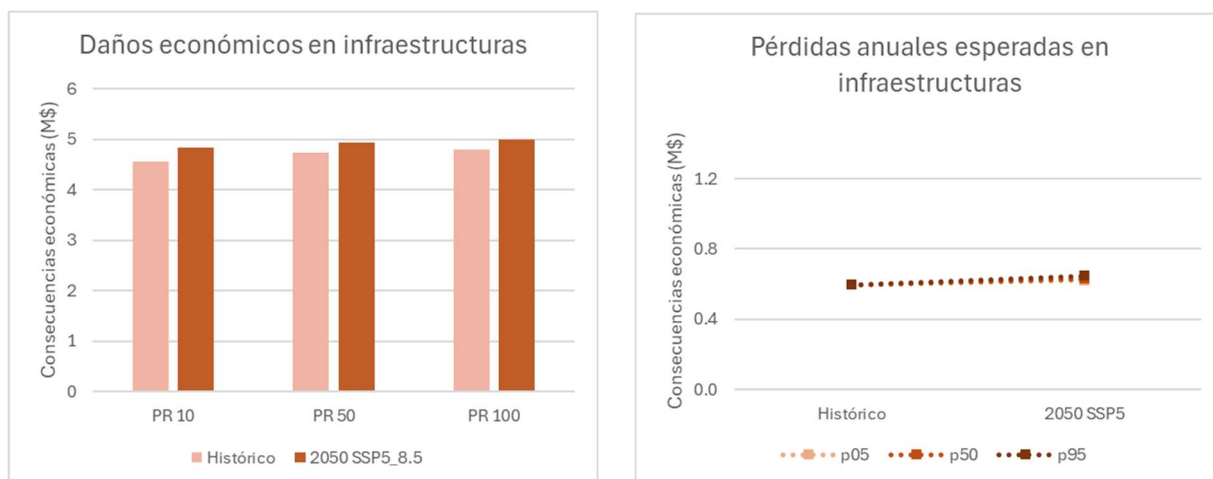


Figura 73. Resumen gráfico de los resultados de daños económicos (millones de dólares, MUSD \$) por inundación costera en las infraestructuras. Fuente: IHCantabria, 2024.

Indicador de riesgo de inundación	T10	T50	T100	PAE
PERIODO HISTÓRICO				
Daños económicos en las infraestructuras	4.55	4.73	4.78	0.60
HORIZONTE 2050 SSP5-8.5				
Daños económicos en las infraestructuras (percentil 5%)	4.75	4.86	4.92	0.62
Daños económicos en las infraestructuras (percentil 50%)	4.82	4.94	4.99	0.63
Daños económicos en las infraestructuras (percentil 95%)	4.95	5.07	5.11	0.65

Tabla 22. Resultados de daños económicos (millones de dólares, MUSD \$) por inundación costera en las infraestructuras. Fuente: IHCantabria, 2024.

En el área de estudio, las estimaciones obtenidas muestran que los daños económicos sobre las infraestructuras críticas oscilan entre los 4.55 millones de dólares para un evento extremo de periodo de retorno de 5 años, y los 4.78 millones de dólares para un evento extremo de periodo de retorno de 100 años. Esto se traduce en una estimación de pérdidas anuales esperadas de 0.60 millones de dólares.

Para el horizonte 2050, escenario climático SSP5-8.5, se prevé que todas estas estimaciones se incrementen. Las pérdidas anuales esperadas aumentarán hasta un valor entre los 0.62 y los 0.65 millones de dólares, lo que implica un aumento de entre el 3.91% y el 8.30% en función del percentil considerado.

Especialmente, y al igual que sucedía para el caso de las edificaciones y la población, estos daños tendrán lugar, principalmente, en las infraestructuras situadas en el entorno del aeropuerto, así como en la franja costera de Big Creek. Las figuras siguientes muestran la distribución espacial de los daños sociales sobre la población por inundación costera para un evento extremo de 100 años de periodo de retorno en el escenario histórico y en el horizonte 2050 para el escenario de emisiones SSP5-8.5.

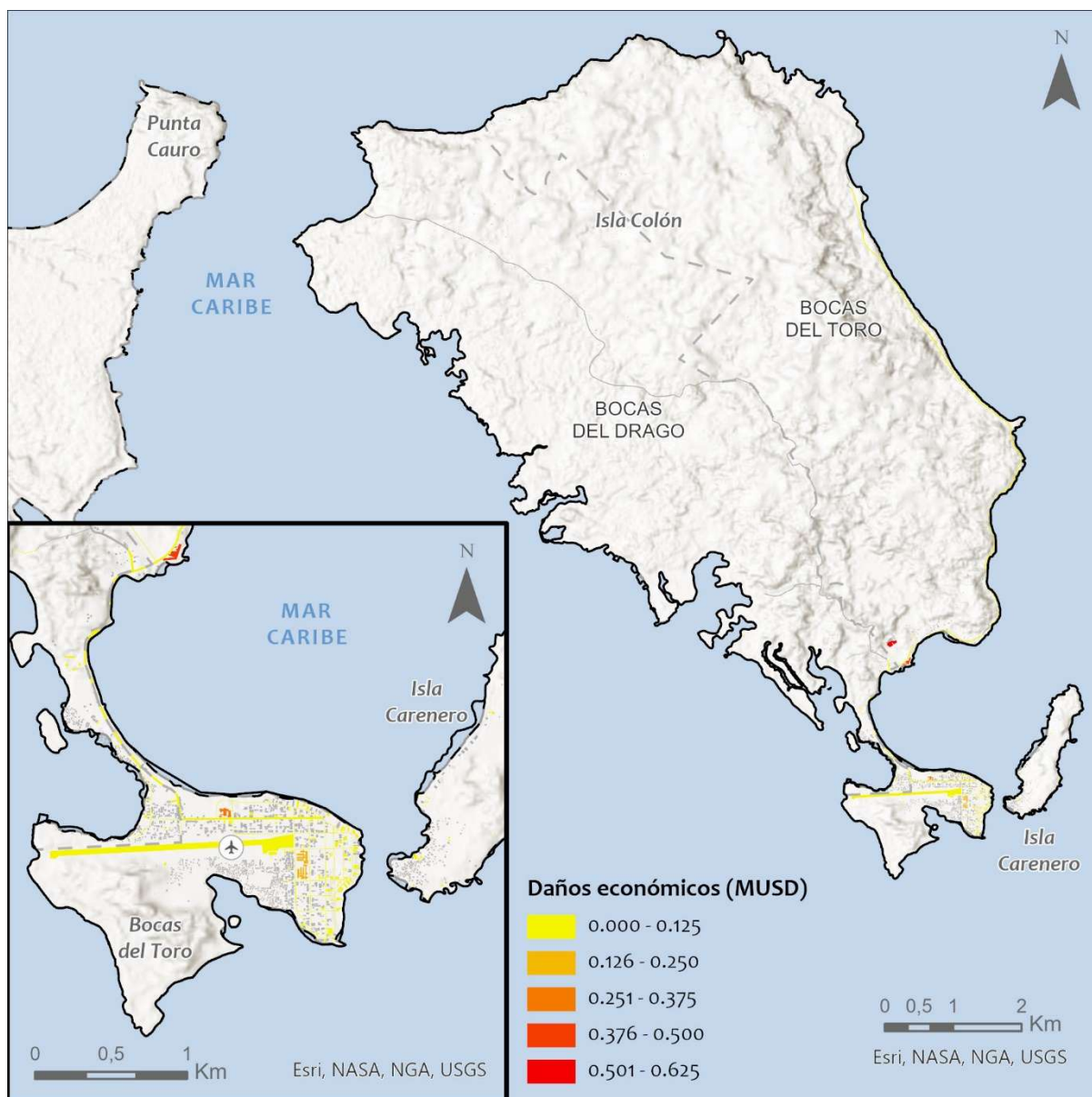


Figura 74. Mapa de los daños económicos sobre las infraestructuras críticas por inundación costera para un evento extremo de 100 años de periodo de retorno en el escenario histórico. Fuente: IHCantabria, 2024.

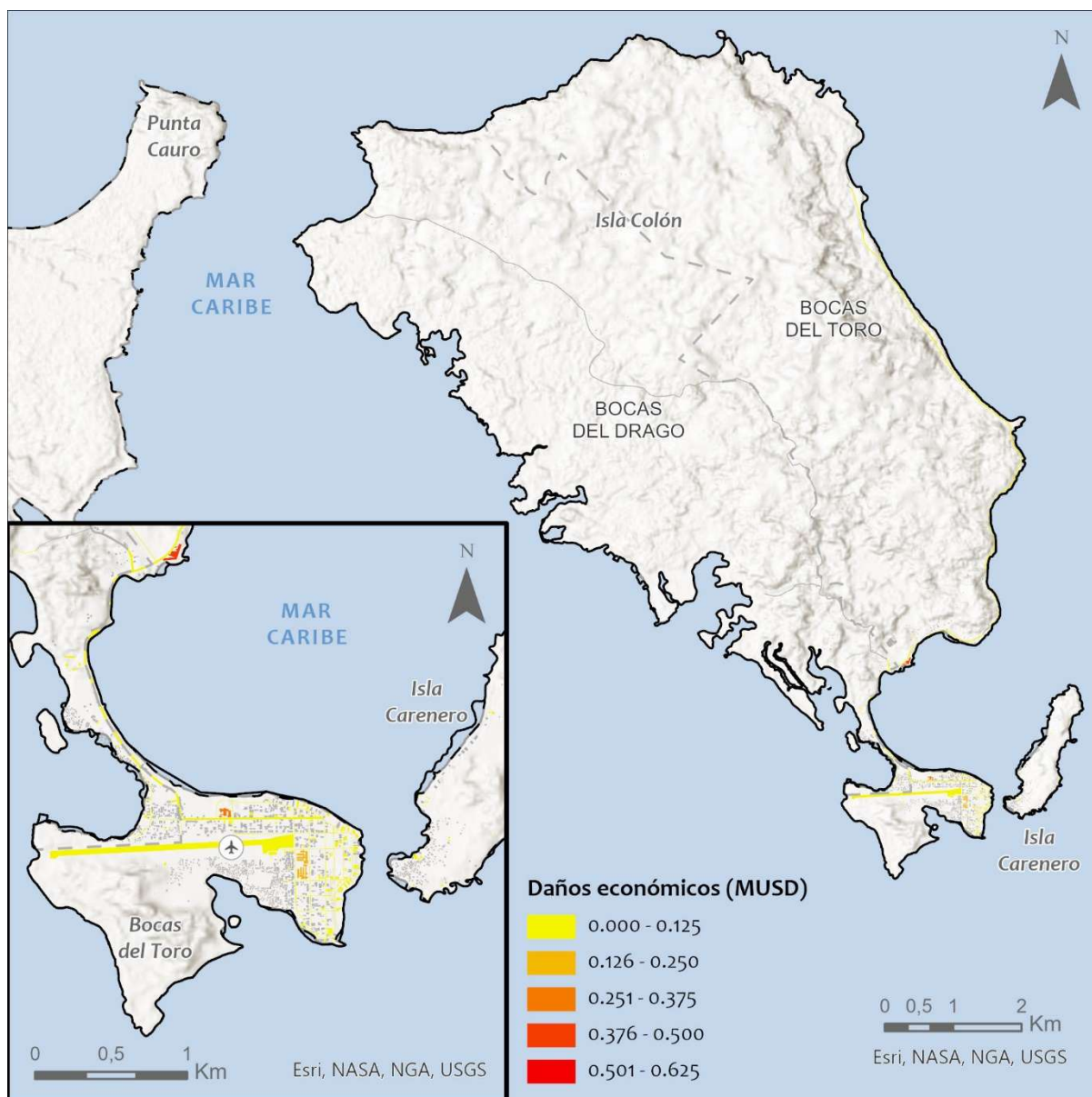


Figura 75. Mapa de los daños económicos sobre las infraestructuras críticas por inundación costera para un evento extremo de 100 años de periodo de retorno (percentil del 95%) en el horizonte 2050 para el escenario de emisiones SSP5-8.5. Fuente: IHCantabria, 2024.

10. CONCLUSIONES

10.1. Evaluación de los ecosistemas clave para la provisión de servicios a la ciudad

El bosque latifoliado mixto maduro en el área de Bocas del Toro se destaca como un ecosistema fundamental para la regulación hidrológica, ofreciendo servicios ecosistémicos esenciales tanto frente a inundaciones como a sequías. Este ecosistema actúa en la interceptación y almacenamiento de agua, lo que permite una significativa reducción de la escorrentía superficial. Además, su sistema radicular y la capa de materia orgánica generan condiciones que facilitan la infiltración, lo que contribuye a la recarga de acuíferos subterráneos durante períodos de escasez hídrica.

En este contexto, cerca del 50% de las llanuras de inundación modeladas proporcionan el servicio ecosistémico de regulación hidrológica, con más de un 50% en conservación pasiva, cerca de un 20% en conservación activa, en torno a un 15% en restauración activa y un 20% en restauración intensiva. Esto evidencia la importancia de conservar los bosques presentes en llanuras de inundación, pero también en la importancia de las medidas de restauración y reforestación para mejorar la gestión del agua.

Además, se reporta que más del 30% del bosque latifoliado mixto maduro en ladera contribuye al control de escorrentía. De este porcentaje, cerca del 90% está destinado a conservación pasiva y el 10% restante a conservación activa. Respecto a las áreas de restauración intensiva, suponen en torno a un 3% del bosque ya existente que proporciona servicio. Estos datos destacan la necesidad de implementar estrategias de manejo que fortalezcan estos ecosistemas para mejorar su efectividad en la mitigación de inundaciones.

En cuanto al servicio de captura y almacenamiento de agua, el 50% del bosque maduro proporciona este servicio, de este porcentaje, más del 50% está destinado a conservación pasiva, cerca de un 20% a conservación activa y más de un 30% a restauración activa. Respecto a las áreas de restauración intensiva, suponen más de un 8% del bosque ya existente que proporciona servicio. Esta distribución resalta la importancia de implementar estrategias de manejo que fortalezcan estos ecosistemas para mejorar su efectividad en la mitigación de inundaciones.

El bosque de manglar se identifica como un ecosistema crítico para la protección costera, reduciendo la extensión de inundaciones causadas por eventos meteorológicos extremos. La tendencia hacia el mantenimiento de las condiciones de aptitud hidroclimática en escenario SSP585 2050 subraya la necesidad de conservar y proteger los manglares, dado que su capacidad para atenuar huracanes, marejadas y erosión costera (entre otros) es fundamental para la seguridad de las comunidades locales.

En conclusión, una gestión integrada y sostenible de estos ecosistemas es vital para fortalecer su resiliencia y garantizar la provisión continua de servicios ecosistémicos esenciales en un contexto de cambio climático creciente.

10.2. Estudio de riesgo por escasez de recursos hídricos

El riesgo de escasez de recursos hídricos en la situación actual, en el área de estudio se encuentra entre los niveles bajo y medio de riesgo, resaltando como más afectadas las zonas de Isla Colón desprovistas por el momento de servicios básicos.

En el escenario climático analizado con datos históricos (situación actual), el recurso superficial que se genera en el Big Creek es suficiente para cubrir la demanda de agua que demanda la planta de tratamiento, sin embargo, el problema actualmente es que esta capacidad de tratamiento no es suficiente para abastecer a la población presente en las islas de manera continua a lo largo del año, ya que la gran actividad turística que se genera durante largas temporadas incrementa de manera considerable la demanda de agua. La planta de tratamiento también se abastece de pozos, pero su uso depende de la disponibilidad de diésel para el funcionamiento de las bombas de extracción, por lo que no se puede estimar la cantidad de agua que están aportando al sistema.

Según la información obtenida en los talleres de validación de resultados realizados en Isla Colón, la planta de tratamiento de agua produce 400,000 galones diarios, 200,000 galones por la mañana y 200,000 galones por la tarde, por lo que la mayoría de los negocios de hostelería, cuentan con tanques de almacenamiento para tener agua corriente de forma continua. También está ampliamente extendida la cosecha de lluvia tanto en establecimientos turísticos, como en viviendas particulares.

En los escenarios futuros el riesgo se va incrementando progresivamente conforme lo hace el déficit hídrico con el horizonte temporal. La combinación del descenso de las precipitaciones y el ascenso de las temperaturas, reducen la producción de agua superficial en la cuenca disponible para consumo. Esto encaja con lo que se está comenzando a notar en los últimos años que, durante épocas de escasas precipitaciones, el Lago Big Creek baja sus niveles, disminuyendo así la capacidad de brindar el recurso hídrico.

Para el horizonte 2030, prácticamente todo el área de estudio se encuentra en riesgo alto, y para el horizonte 2050, ya la totalidad de los barrios y lugares poblados en las islas lo hacen.

10.3. Estudio de riesgo por inundación costera

Los daños producidos por inundación costera en el área de estudio tendrán lugar, principalmente, en las edificaciones e infraestructuras situadas en el entorno del aeropuerto, así como en la isla Carenero, y en la franja costera de Big Creek.

Durante un evento de periodo de retorno de 100 años, para el escenario histórico, los daños económicos supondrían casi 23 MUSD \$, y en torno a 7747 personas estarían afectadas por residir en área inundable. En términos de pérdidas anuales esperadas, el análisis de los diferentes eventos se traduce en 2.5 MUSD \$ y 1007 personas afectadas.

Para el horizonte 2050, y escenario climático SSP5-8.5, se prevé que todas estas estimaciones se incrementen. Las pérdidas anuales esperadas aumentarán hasta un valor entre los 2.90 y los 3.37 MUSD \$, en función del percentil considerado, y 1007 personas de nuevo estarán afectadas. Un evento de la misma frecuencia (100 años de periodo de retorno) supondría un máximo de 28 MUSD \$ en daños económicos y 7747 afectadas.

11. RECOMENDACIONES

El proceso llevado a cabo para la evaluación de ecosistemas y riesgos hidroclimáticos en Isla Colón y Carenero ha dado lugar a la identificación de una serie de carencias en la información disponible y recomendaciones para futuros estudios de la misma naturaleza que se enumeran a continuación:

- Para la correcta caracterización de los caudales fluyentes, tanto en régimen medio como en régimen extremal, en el cauce del área de estudio sería conveniente contar al menos un aforo que permita calibrar el modelo hidrológico de la cuenca con una serie larga de datos observados.
- En cuanto al modelo de gestión de usos del agua, ha faltado disponer información detallada de las demandas de agua para el consumo humano en las zonas que se encuentran fuera de la red del IDAAN, y pozos de los cuales no se tiene información concreta. De igual manera, existen vacíos de información sobre otros usos del agua existentes en la cuenca. Asimismo, sería importante realizar un estudio de la capacidad de recarga de los acuíferos de los que se está extrayendo agua para la planta, ya que una sobreexplotación del recurso representaría un mayor problema a futuro.
- En el modelado de la inundación costera se ha realizado con la mejor información topográfica y batimétrica disponible, obteniendo los mejores resultados posibles dadas las características del proyecto. Sin embargo, si en futuros pudiera invertirse en la generación de datos más detallados la calidad de los resultados incrementaría considerablemente, ya que este tipo de información es fundamental en la caracterización de las amenazas de inundación.
- Otro aspecto que podría abordarse en futuros estudios de mayor alcance, y en la medida que se disponga de más información, es la estimación de los daños indirectos por inundación asociados a las infraestructuras críticas, que, además de sufrir daños directos, causan daños indirectos o sistémicos derivados de la interrupción de los flujos o servicios que prestan.

12. BIBLIOGRAFÍA

- Álvarez-Martínez, J. y otros, 2018. Modelling the area of occupancy of habitat types with remote sensing.. *Methods in Ecology and Evolution*, 9(3), pp. 580-593.
- Arenas-Castro, S., Regos, A. & González-Moreno, P., 2018. Modelos de distribución de especies en ecosistemas. En: *Geomática, Teledetección y Modelos Espaciales Aplicados a la Gestión de Sistemas Forestales*. s.l.:GEOFOREST, p. Capítulo 18.
- Beleño, E., Bolívar, G. & Jiménez-Pitre, I., 2022. Riesgos relacionados con el cambio climático de la flora y fauna asociada a bosques de manglar en el Caribe colombiano. *Intropica*, pp. 290-300.
- Cavalli, M., Trevisani, S., Comiti, F. & Marchi, L., 2013. Geomorphometric assessment of spatial sediment connectivity in small Alpine catchments.. *Geomorphology*, Volumen 188, pp. 31-41.
- Chausson, A. y otros, 2020. Mapping the effectiveness of nature-based solutions for climate change adaptation. *Global Change Biology*, 26(11), pp. 6134-6155.
- Cutler, D. y otros, 2007. Random forests for classification in ecology.. *Ecology*, 11(88), pp. 2783 - 2792.
- Daily, G. y otros, 1997. Ecosystem Services: Benefits Supplied to Human Societies by Natural Ecosystems. *Issues in Ecology - Spring*, 1(2), pp. 1-18.
- De Groot, R., Wilson, M. & Boumans, R., 2002. A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. *Ecological economics*, 41(3), pp. 393-408.
- Dunne, T., Zhang, W. & Abury, B., 1991. Effects of Rainfall, Vegetation, and Microtopography on Infiltration and Runoff. *Water resources research*, 27(9), pp. 2271-2285.
- Espinosa-Zuñiga, J., 2020. Aplicación de algoritmos Random Forest y XGBoost en una base de solicitudes de tarjetas de crédito. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 21(3).
- ETESA, 2008. *Resumen técnico análisis regional de crecidas máximas de Panamá, periodo 1971-2006*, Panamá: ETESA.
- Gaitan, J. y otros, 2021. La variación temporal del índice NDVI predice los cambios temporales de la cobertura vegetal en las tierras secas de la Patagonia argentina. *Ecosistemas*, 30(3).
- Ghofrani, Z., Sposito, V. & Faggian, R., 2017. A comprehensive review of blue-green infrastructure concepts. *International Journal of Environment and Sustainability*, 6(1).
- Guisan, A. & Thuilleer, W., 2005. Predicting species distribution: offering more than simple habitat models. *Ecology Letters*, 8(9), pp. 993-1009.
- Guo, L. y otros, 2020. Revealing the fingerprint of climate change in interannual NDVI variability among biomes. *Remote Sensing*, 12(8).
- Hein, L., Van Koppen, K., de Groot, R. & van Earland, E., 2006. Spatianscales, stakeholders and thevaluation of ecosystemservices. *Ecological Economics*, 57(2), pp. 209-228.
- Hernández-Romero, G. y otros, 2022. From forest dynamics to wetland siltation in mountainous landscapes: A RS-based framework for enhancing erosion control. *Remote Sensing*, 14(8).
- Hopp, L. & Mcdonnell, J., 2009. Connectivity at the hillslope scale : Identifying interactions between storm size , bedrock permeability , slope angle and soil depth. *Journal of Hydrology*, Volumen 376, pp. 378-391.
- IDOM-IHCantabria, 2016. *Estudios de desarrollo urbano y cambio climático para el Área Metropolitana de Panamá Pacífico*, s.l.: s.n.
- IHCantabria, 2024. *Estudio de Riesgo por Efectos del Cambio Climático y Generación del Atlas Interactivo de Visualización de los Resultados para la República de Panamá*, s.l.: s.n.
- IPCC, 2023. *Climate Change 2023: Synthesis Report*, Geneva, Switzerland: IPCC.
- Maetens, W. y otros, 2012. Effects of land use on annual runoff and soil loss in Europe and the Mediterranean: A meta-analysis of plot data.. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 36(5).
- MOP, 2007. *Atlas Nacional de la República de Panamá*, Panamá: s.n.
- Parruelo, J., Epstein, H., Lauenroth, W. & Burke, I., 1997. ANPP estimates from NDVI for the central grassland region of the United States. *Ecology*, 78(3), pp. 953-958.
- Pérez-Silos, I., Álvarez-Martínez, J. & Barquín, J., 2021. Large-scale afforestation for ecosystem service provisioning: learning from the past to improve the future. *Landscape Ecology*, Volumen 36, pp. 3329-3343.
- Ponce, B. & Hawkings, R., 1996. Runoff curve number: Has it reached maturity?. *Hydrological Engineering*, Volumen 1.
- Sekercioglu, C., 2014. Ecosystem functions and services. En: N. Sodhi & P. Ehrlich, edits. *Conservation Biology for all*. Oxford: Oxford University Press, pp. 45-72.
- Sinha, P. y otros, 2019. Assessing the spatial sensitivity of a random forest model: Application in gridded population modeling.. *Computers, Environment and Urban Systems*, Volumen 75, pp. 132-145.

- Stockdon, H., Holman, R., Howd, P. & Sallenger, A. H., 2006. Empirical parameterization of setup, swash, and runup. *Coastal Engineering*, 53(7), pp. 573-588.
- TNC, 2008. *Evaluación de Ecorregiones marinas en Mesoamérica*, s.l.: s.n.
- Ward, R., Friess, D., Day, R. & McKenzie, R., 2016. Impacts of climate change on mangrove ecosystems: a region by region overview. *Ecosystem Health and Sustainability*, 2(4).
- Zhong, Z., Li, J., Clausi, D. & Wong, A., 2019. Generative adversarial networks and conditional random fields for hyperspectral image classification.. *IEEE transactions on cybernetics*, 50(7), pp. 3318-3329.