

SERIE

Plan Indicativo de Ordenamiento Territorial Ambiental
(PIOTA) para la Cuenca Hidrográfica del Canal de
Panamá (CHCP) - Autoridad del Canal de Panamá (ACP)

Prospectiva: tendencias y escenarios de la disponibilidad de recursos hídricos en la cuenca hidrográfica del Canal de Panamá



Este documento fue preparado por el Consorcio IDOM-Future Water para el Banco Interamericano de Desarrollo, bajo la coordinación del equipo compuesto de Marion Le Pommellec (CSD/RND), Alfred Grunwaldt (CSD/CCS), Raúl Muñoz (INE/WSA), Héctor Valdés Conroy (CSD/RND), Omar Garzonio (INE/WSA) y Géraud Albaret (CSD/RND).

Fue financiado por las cooperaciones técnicas PN-T1230 “Gestión integrada de las cuencas prioritarias para la adaptación al cambio climático”; RG-T3352 “Manejo integrado de cuencas y apoyo al diseño y operación de infraestructura hídrica”;

y RG-T3329 “Apoyo a los procesos de evaluación de riesgo climático y de desastres para fomentar la resiliencia y el desarrollo sostenible”.

Forma parte de una serie de cuatro productos: (1) Diagnóstico Integral de la Cuenca Hidrográfica de la Cuenca de Panamá; (2) Prospectiva: Tendencias y Escenarios de la disponibilidad de recursos hídricos en la Cuenca Hidrográfica del Canal de Panamá; (3) Estrategia de Desarrollo Sostenible y Descarbonización (EDSD) de la Cuenca Hidrográfica del Canal de Panamá - “Ruta Verde 2050”; y (4) Plan indicativo de ordenamiento territorial ambiental.

Índices

CONTENIDO

2	PROSPECTIVA: TENDENCIAS Y ESCENARIOS	12
2.1	Construcción del Modelo de Oferta/Demanda para la capacidad hídrica	12
2.1.1	Integración del diagnóstico territorial	12
2.1.2	Aproximación metodológica para el cálculo de la robustez climática	12
2.1.3	Desarrollo de la herramienta	16
2.1.4	Proceso participativo	55
2.1.5	Identificación e inclusión de indicadores de desempeño y umbrales de garantía	57
2.2	Clima histórico y proyecciones	60
2.2.1	Tendencias en el periodo histórico	60
2.2.2	Regionalización de proyecciones	64
2.2.3	Identificación y caracterización del clima futuro	70
2.3	Análisis de vulnerabilidad y riesgo climático	74
2.3.1	Metodología	75
2.3.2	Caracterización de las amenazas climáticas	80
2.3.3	Categorización y clasificación espacial del riesgo climático a nivel de regiones, subcuencas y corregimientos	84
2.3.4	Lineamientos para la adaptación	106
2.4	Escenarios de desarrollo territorial	110
2.4.1	Prospectiva: identificación, análisis y prospectiva de variables territoriales	110

2.4.2	Validación de los escenarios a modelar	126
2.4.3	Consideración de escenarios en términos de demanda	132
2.4.4	Modelo territorial futuro	136
2.5	Análisis de balance hídrico y robustez climática	142
2.5.1	Medidas de adaptación	142
2.5.2	Descripción escenarios a simular	144
2.5.3	Resultados para condiciones de línea base	152
2.5.4	Resultados del escenario tendencial	153
2.5.5	Resultado de los escenarios de posible intervención territorial	156
2.5.6	Análisis de sensibilidad	166
2.6	Rutas de adaptación	170
2.6.1	Concepto	170
2.6.2	Diseño y formulación	171
2.6.3	No-arrepentimiento, co-beneficios y sinergias	179
2.6.4	Vulnerabilidades residuales	180

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig 1.	Diagrama de flujo de la metodología RDM aplicada a la Fase de Prospectiva del proyecto PIOTA	14
Fig 2.	Evolución del número de documentos científico-técnicos que han referenciado o usado WEAP u otros modelos de simulación para la planificación hidrológica en el periodo 1990-2017	17
Fig 3.	Fases en la construcción de un modelo en WEAP	18
Fig 4.	Esquema de escenarios simulados para la fase de prospectiva del PIOTA	19
Fig 5.	Esquema topológico del sistema de recursos hídricos de la CHCP	20
Fig 6.	Esquema de niveles WEAP para los nodos de demanda poblacional urbana-industrial para los subsistemas Gatún (PUI.GAT, izqda.) y Alhajuela (PUI.MAD, dcha.)	23
Fig 7.	Esquema ilustrativo de la ubicación topológica del nodo de demanda poblacional urbana-industrial en el subsistema Alhajuela (PUI.MAD) en el modelo WEAP-CHCP	24
Fig 8.	Esquema de niveles WEAP para los nodos de demanda poblacional rural para los subsistemas Gatún (PR.GAT) y Alhajuela (PR.MAD)	25
Fig 9.	Esquema ilustrativo de la ubicación topológica del nodo de demanda rural del subsistema Gatún en el modelo WEAP-CHCP.	25
Fig 10.	Esquema de niveles WEAP para los nodos de demanda agropecuaria (A.GAT y A.MAD)	26
Fig 11.	Esquema ilustrativo de la ubicación topológica del nodo de demanda para el mantenimiento de las operaciones del Canal de Panamá (T.GAT) en el modelo WEAP-CHCP.	27
Fig 12.	Esquema de niveles WEAP para los nodos de demanda de esclusaje (T.GAT)	27
Fig 13.	Ubicación de los embalses Gatún y Alhajuela en el esquema topológico del modelo WEAP-CHCP.	28
Fig 14.	Método hidrológico de WEAP	31
Fig 15	Esquema topológico del módulo hidrológico en WEAP	32
Fig 16	Delimitación de subcuencas	33
Fig 17	Agrupación estaciones homogéneas	35
Fig 18	Datos de precipitación en la estación Arca Sonia de ETESA	37
Fig 19	Ejemplo gráficos dobles masas	38
Fig 20	Polígonos de Thiessen	40
Fig 21	Serie de precipitación areal 1988-2018 subcuenca Trinidad, en WEAP	41
Fig 22	Estaciones termométricas	42
Fig 23	Serie de temperatura 1988-2018 subcuenca Trinidad, en WEAP	46
Fig 24	Datos de humedad relativa	47
Fig 25	Datos de velocidad del viento a 2 metros	48

Fig 26 Estaciones hidrométricas.....	49
Fig 27 Caudales observados y simulados en el río Pequeñí para el periodo de calibración (2009-2018).....	54
Fig 28 Caudales observados y simulados en el río Pequeñí para el periodo de validación (1999-2008)	54
Fig 29 Caudales observados y simulados en el río Gatún con la estimación inicial (1989-2018).....	55
Fig 30 Caudales observados y simulados en el río Gatún después de la calibración (1989-2018)	55
Fig 31. Etapas del proceso RDM y talleres de participación y capacitación realizados durante la Fase de Prospectiva.....	56
Fig 32. Distribución de la precipitación mensual acumulada media en la CHCP (1988-2018)	61
Fig 33. Precipitación anual acumulada media en la CHCP (1988-2018)	62
Fig 34. Evolución histórica del SPI en la CHCP (1988-2018)	62
Fig 35. Estacionalidad de las temperaturas anuales promedio (1988-2018)	63
Fig 36. Evolución de las temperaturas anuales promedio (1988-2018)	64
Fig 37. Rangos de variación de precipitación y temperatura anual promedio predichos por los modelos de los ensambles CORDEX (regionalización dinámica) y NASA-NEX (regionalización estadística) para los horizontes climáticos 2015-2045 (centrado en 2030) y 2045-2075 (centrado en 2060) y para la CHCP	67
Fig 38. Dispersión en la estacionalidad entre las proyecciones de los diferentes modelos incluidos en NASA-NEX sobre el periodo histórico y los datos de las estaciones meteorológicas (vea sección 2.2.1) ..	68
Fig 39. Dispersión en la tendencia normalizada entre las proyecciones de los diferentes modelos incluidos en NASA-NEX sobre el periodo histórico y los datos locales	69
Fig 40. Obtención de puntuación global y ordenación (ej. para variable prec.)	69
Fig 41. Proyecciones climáticas de la temperatura hasta 2080 en base a los múltiples modelos del ensamble NASA-NEX mostrando la variabilidad anual y las trayectorias RCP4.5 y RCP8.5.....	70
Fig 42. Proyecciones climáticas de la precipitación hasta 2080 en base a los múltiples modelos del ensamble NASA-NEX mostrando en la variabilidad anual y las trayectorias RCP4.5 y RCP8.5.	71
Fig 43. Cambios medios proyectados en temperatura y precipitación para dos horizontes temporales respecto al periodo histórico y para las trayectorias RCP4.5 y RCP8.5	71
Fig 44. Cambios proyectados en la estacionalidad de la precipitación para dos horizontes temporales respecto al periodo histórico y para las trayectorias RCP4.5 y RCP8.5	72
Fig 45. Cambios proyectados en la estacionalidad de la temperatura para dos horizontes temporales respecto al periodo histórico y para las trayectorias RCP4.5 y RCP8.5	72
Fig 46. Conceptualización del riesgo climático	75
Fig 47. Variables utilizadas para la determinación del Riesgo Climático	79
Fig 48. Mapa de incremento de peligrosidad asociado a lluvias intensas.	81
Fig 49. Mapa de incremento de peligrosidad asociado a lluvias intensas.	82
Fig 50. Mapa de incremento de peligrosidad asociado a periodos de altas temperatura.	83
Fig 51. Mapa de riesgo climático por deslizamiento en la CHCP.....	85
Fig 52. Mapa de riesgo climático por deslizamiento en la CHCP.....	86
Fig 53. Mapa de riesgo climático por inundación en la CHCP.	87
Fig 54. Mapa de riesgo climático por inundación en la CHCP.	88
Fig 55. Mapa de riesgo climático por altas temperaturas (histórico).	89
Fig 56. Mapa de riesgo climático por altas temperaturas.	90
Fig 57. Índice de vulnerabilidad al cambio climático de Panamá, desagregación por corregimiento..	106
Fig 58. Variables territoriales y demandas de agua.....	111
Fig 59. Esquema de demanda de agua.....	111
Fig 60. Zonas poblacionales estudio Stantec.....	112
Fig 61. Esquema de metodología utilizada para la proyección de población de la CHCP.....	118
Fig 62. Esquema de metodología utilizada para la proyección de las 8 zonas poblacionales	121
Fig 63. Variables decisivas	125
Fig 64. Resultados de la votación sobre medidas de adaptación.....	130
Fig 65. Variables territoriales del escenario tendencial.....	133

Fig 66. Demandas de agua del escenario tendencial.....	133
Fig 67. Variables territoriales del escenario ambicioso	134
Fig 68. Demandas de agua del escenario ambicioso	135
Fig 69. Variables territoriales del escenario consensuado	136
Fig 70. Demandas de agua del escenario consensuado	136
Fig 71. Población estimada para abastecimiento de agua en los horizontes del PIOTA	137
Fig 72. Evolución de las superficies de los usos de suelo de la CHCP.....	138
Fig 73. Medidas de adaptación de gestión eficiente de la demanda	143
Fig 74. Medidas de adaptación de aumento de la oferta	144
Fig 75. Rango de variación de cambios multiplicativos de precipitación y aditivos de temperatura simulados en el modelo WEAP-CHCP.	146
Fig 76. Curvas elevación-volumen (izqda.) y guía (dcha.) para los embalses de Alhajuela (panel superior) y Gatún (panel inferior)	149
Fig 77. SRC para la condición de línea de base y la cobertura anual promedio de la Cuenca (panel izquierdo.), y la cobertura mínima (panel dcho.). Los símbolos en negro y azul representan las tasas de cambio proyectadas por los diferentes modelos regionales del ensamble NEX-GDDP para diferentes trayectorias de emisión (RCP 4.5 y 8.5) y horizontes temporales (H2015-2045, H2045-2075).	152
Fig 78. Superficie de Respuesta Climática del escenario tendencial sobre los cuatro horizontes analizados (2025, 2030, 2040 y 2070)	154
Fig 79. Superficies de Respuesta Climática para los escenarios tendencial (TTT), ambicioso-base (A00) y ambicioso-combinado (AX1)	162
Fig 80. Superficies de Respuesta Climática para los escenarios tendencial (TTT), consensuado-base (C00) y consensuado-combinado1 (CX3)	164
Fig 81. Valores de robustez climática para diferentes umbrales de garantía e indicadores de desempeño (cobertura promedio interanual, panel superior; cobertura mínima, panel inferior)	167
Fig 82. Esquema conceptual DAPP e integración con el proceso de elaboración del PIOTA.....	171
Fig 83. Rutas de adaptación para la CHCP para condiciones de estrés hídrico. Escenario “consensuado”.	175
Fig 84. Rutas de adaptación para la CHCP para condiciones de estrés hídrico. Escenario “ambicioso”	176
Fig 85. Rutas de adaptación para la CHCP para un año hidrológico promedio. Escenario “consensuado”	177

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Principales características de la herramienta WEAP.....	16
Tabla 2. Dominio y parámetros generales de simulación para el modelo WEAP-CHCP.....	19
Tabla 3. Listado de subcuencas terrestres representadas y simuladas en el modelo WEAP-CHCP.....	21
Tabla 4. Caracterización de nodo de demanda poblacional urbano-industrial (PUI) en WEAP-CHCP. .	23
Tabla 5. Caracterización de nodo de demanda poblacional rural (PR) en WEAP-CHCP.	24
Tabla 6. Caracterización de los nodos de demanda agropecuaria (A) en WEAP-CHCP.....	26
Tabla 7. Principales parámetros utilizados para caracterizar los embalses en el modelo WEAP-CHCP.....	29
Tabla 8. Área y latitud de cada subcuenca.....	34
Tabla 9. Grupos homogéneos y estación de referencia	36
Tabla 10. Coeficiente de Thiessen por subcuenca.....	39
Tabla 11. Número de meses con dato de temperatura	43
Tabla 12. Estaciones termométricas	44
Tabla 13. Gradiente térmico por subcuenca.....	45
Tabla 14. Humedad relativa.....	47
Tabla 15. Velocidad del viento	48
Tabla 16. Estaciones hidrométricas.....	49
Tabla 17. Parámetros del suelo en el modelo WEAP	50
Tabla 18. Criterios de valoración de los índices NSE y PBIAS para la calibración.....	52
Tabla 19. Rango de parámetros del modelo WEAP después de la calibración.....	53
Tabla 20. Resumen de los indicadores después del proceso de calibración y validación del modelo.....	53
Tabla 21. Modelos climáticos incluidos en el ensamble NASA-NEX y sus características.....	65
Tabla 22. Modelos climáticos incluidos en el ensamble NASA-NEX y sus características.....	66
Tabla 23. Categorización del incremento de peligrosidad asociado a lluvias intensas	77
Tabla 24. Categorización del incremento de peligrosidad asociado a periodos de altas temperaturas.....	77
Tabla 25. Nivel de amenaza climática.....	77
Tabla 26. Rango de clasificación de los niveles de amenaza climática.....	78
Tabla 27. Variables vinculadas a la valoración de la vulnerabilidad	78
Tabla 28. Rango de clasificación de los niveles de vulnerabilidad.....	79
Tabla 29. Matriz de amenaza climática y vulnerabilidad.....	80
Tabla 30. Rango de clasificación de los niveles de vulnerabilidad	80
Tabla 31. Riesgo por deslizamiento en cada región de la CHCP	91
Tabla 32. Riesgo por inundación en cada región de la CHCP	92
Tabla 33. Riesgo por altas temperaturas en cada región de la CHCP	93
Tabla 34. Riesgo por deslizamiento en cada subcuenca de la CHCP	94
Tabla 35. Riesgo por inundación en cada subcuenca de la CHCP	95
Tabla 36. Riesgo por altas temperaturas en cada subcuenca de la CHCP	96
Tabla 37. Riesgo por deslizamiento en cada corregimiento de la CHCP.....	97
Tabla 38. Riesgo por inundación en cada corregimiento de la CHCP	100
Tabla 39. Riesgo por altas temperaturas en cada corregimiento de la CHCP	103
Tabla 40. Propuesta de medidas de adaptación frente a riesgos climáticos.....	107
Tabla 41. Consumo per cápita de agua potable (en gal./hab./día) por tipo de conexión y categoría poblacional	113
Tabla 42. Porcentajes del agua contabilizada y no contabilizada por categoría poblacional	113
Tabla 43. Demanda per cápita de agua potable para el escenario tendencial	113
Tabla 44. Dotación per cápita por zona poblacional	114
Tabla 45. Demandas de agua para la navegación por escenario	115
Tabla 46. Demanda agrícola de agua del cultivo de piña.....	116
Tabla 47. Consumo de agua por cabeza de ganado vacuno al año (según tipo de animal).....	116
Tabla 48. Consumo de agua de ganado vacuno (m3) en la CHCP (año 2011)	117

Tabla 49. Tasa de Crecimiento Media Anual por corregimiento de la CHCP	119
Tabla 50. Proyección de población de la CHCP por región (2020, 2025, 2030, 2040 y 2070).....	120
Tabla 51. Tasa de Crecimiento Media Anual por zona abastecida de la CHCP.....	121
Tabla 52. Proyección de población tendencial de las 8 zonas poblacionales (2020, 2025, 2030, 2040 y 2070)	122
Tabla 53. Plantas potabilizadoras.....	123
Tabla 54. Demandas insatisfechas del escenario tendencial.....	124
Tabla 55. Variables territoriales de los escenarios tendencial y consensuado.....	137
Tabla 56. Listado de medidas consideradas para la simulación de escenarios	145
Tabla 57. Listado y caracterización de escenarios simulados en el modelo WEAP-CHCP.	146
Tabla 58. Parametrización de la demanda urbana para la condición de línea de base.	147
Tabla 59. Parametrización de la demanda rural para la condición de línea de base.....	147
Tabla 60. Parametrización de la demanda agropecuaria para la condición de línea de base.	148
Tabla 61. Parametrización de la demanda para la operación del Canal de Panamá para la condición de línea de base.	148
Tabla 62. Principales parámetros utilizados para caracterizar los embalses en el modelo WEAP-CHCP.	148
Tabla 63. Principales parámetros utilizados para caracterizar los embalses en el modelo WEAP-CHCP....	150
Tabla 64. Parametrización adoptada para la configuración “base” de cada uno de los escenarios tendencial, ambicioso y consensuado considerados en el proyecto PIOTA.....	150
Tabla 65. Valores de demanda no cubierta, cobertura y robustez climática predichos por el modelo WEAP-CHCP para la condición de línea de base actual.	152
Tabla 66. Robustez climática calculada en función de las superficies de la respuesta para cada horizonte del escenario tendencial	153
Tabla 67. Escenarios seleccionados y valores de robustez climática para cobertura promedio (umbral de garantía del 95%) y cobertura mínima (umbral de garantía del 85%). Rojo (<35%), Naranja (35-50%), Verde (>50%).	157
Tabla 68. Demanda no cubierta y cobertura (valores promedio y max/min en año con más déficit) para la configuración base de los escenarios ambicioso y consensuado.....	158
Tabla 69. Demanda no cubierta y cobertura (valores promedio y max/min en año con más déficit) para los de los escenarios ambicioso y consensuado con portafolio de adaptación “Gestión”.....	158
Tabla 70. Demanda no cubierta y cobertura (valores promedio y max/min en año con más déficit) para los de los escenarios ambicioso y consensuado con medidas aisladas orientadas a incrementar la disponibilidad de recursos.	158
Tabla 71. Demanda no cubierta y cobertura (valores promedio y max/min en año con más déficit) para los de los escenarios ambicioso y consensuado con diferentes portafolios consistentes en la combinación de medidas orientadas a la reducción de las demandas y el aumento de la disponibilidad de recursos.....	160
Tabla 72. Políticas de adaptación y medidas consideradas.....	172
Tabla 73. Valoración comparada de rutas de adaptación para el escenario “consensuado”	178

ABREVIATURAS

ACP: Autoridad del Canal de Panamá

ANAM: Autoridad Nacional del Ambiente

ATP: acrónimo en inglés de Adaptive Tipping Points – Puntos de Inflexión

AVRC: Análisis de la vulnerabilidad y riesgo frente a amenazas climáticas

BCSD: acrónimo en inglés de Bias-Correction and Spatial Disaggregation – Método de corrección del sesgo por desagregación espacial

CDN-1: Primera Contribución Determinada a Nivel Nacional de Panamá

CHCP: Cuenca Hidrográfica del Canal de Panamá

CICH: Comisión Interinstitucional de la Cuenca Hidrográfica del Canal de Panamá

CMNUCC: Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático

CONAGUA: Consejo Nacional del Agua

CORDEX: acrónimo en inglés de Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment – Experimentación Coordinada Regionalización del Clima

DAPP: acrónimo en inglés de Dynamic Adaptive Policy Pathways – Políticas Dinámicas de Gestión Adaptativa

ERM: acrónimo en inglés de Environmental Resources Management

ETCCDI: acrónimo en inglés de Expert Team on Climate Change Detection and Indices – Panel de Expertos en Detección e Índices de Cambio Climático

ETESA: Empresa de Transmisión Eléctrica

EUROCLIMA+: Programa de la Unión Europea sobre sostenibilidad ambiental y cambio climático en América Latina.

FAO: acrónimo en inglés de Food and Agriculture Organization – Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura

FODA: Fortalezas, Oportunidades, Debilidades y Amenazas

GEI: Gases de Efecto Invernadero

HIAM: Sección de Meteorología e Hidrología de la Autoridad del Canal de Panamá

IDAAN: Instituto de Acueductos y Alcantarillados Nacionales

IDEAM: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales

INEC: Instituto Nacional de Estadística y Censo

IPCC: acrónimo en inglés de Intergovernmental Panel on Climate Change – Grupo Intergubernamental de Expertos para el Cambio Climático

MiAMBIENTE: Ministerio de Ambiente

NASA: acrónimo en inglés de National Aeronautics and Space Administration – Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio

NASA-NEX: acrónimo en inglés de NASA Earth Exchange – NASA Intercambio Terrestre

NEX-GDDP: acrónimo en inglés de NASA Earth Exchange – Global Daily Downscaled Climate Projections – NASA Intercambio Terrestre – Proyecciones Climáticas Globales Diarias Regionalizadas

NSE: Coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe

PBIAS: acrónimo en inglés de Percent Bias – Porcentaje de parcialidad (aplicado a la desviación relativa de caudales)

PIEA: Programa de Incentivos Económicos Ambientales

PIOTA: Plan Indicativo de Ordenamiento Territorial Ambiental

POT: Plan de Ordenamiento Territorial

RCP: acrónimo en inglés de Representative Concentration Pathways - Trayectorias de Concentración Representativas

RDM: acrónimo en inglés de Robust Decision Making - Toma de Decisiones Robusta

SAGARPA: Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural

SAM: Sinergias Adaptación-Mitigación

SIG: Sistemas de Información Geográfica

SPI: acrónimo en inglés Standardized Precipitation Index - Índice Estandarizado de Precipitación

SRC: Superficie de Respuesta Climática

SUDS: Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible

TCA: Tasa de Crecimiento Anual

TCMA: Tasa de Crecimiento Media Anual

USAID: acrónimo en inglés de United States Agency for International Development - Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional

WEAP: acrónimo en inglés de Water Evaluation and Planning System - Sistema de Evaluación y Planificación del Agua

WMO: acrónimo en inglés de World Meteorological Organization - Organización Meteorológica Mundial

WSDI: acrónimo en inglés de Warm Spell Duration Index - Índice de días cálidos

Introducción



El presente documento representa la segunda etapa para la construcción del Plan Indicativo de Ordenamiento Territorial y Ambiental (PIOTA) para la Cuenca Hidrográfica del Canal de Panamá (CHCP). Este proceso, liderado por la Autoridad del Canal de Panamá (ACP), tiene por objetivo principal ofrecer los lineamientos estratégicos necesarios para consolidar una propuesta de desarrollo sostenible para la CHCP. El PIOTA procura, por tanto, planificar la implementación de usos y actividades humanas, contribuyendo a la cohesión social con un modelo de gestión territorial que garantice la conservación y gestión integral de los recursos naturales, considerando, de modo especial, las incertidumbres asociadas a una variabilidad climática, que ya es sensible, y que pone de manifiesto una serie de amenazas que deben, necesariamente, ser consideradas en la toma de decisiones.

Precisamente este producto, bajo el título de “Prospectiva: tendencias y escenarios”, ofrece el resultado de un conjunto de análisis técnicos realizados con el propósito de evaluar cómo la evolución del clima futuro puede transformar la realidad proyectada y qué medidas de adaptación serán convenientes desarrollar para minimizar eventuales impactos sobre las poblaciones, ecosistemas, infraestructuras y actividades en la CHCP. La gestión de los recursos hídricos, como elemento estructurante de las dinámicas naturales y socioe-

conómicas en este territorio, ha concentrado el mayor esfuerzo de análisis. De manera puntual, se ha configurado un sistema completo de simulación numérica avanzado (modelo de oferta/demanda) para evaluar el comportamiento del balance hídrico de la Cuenca bajo diferentes escenarios de desarrollo territorial, horizontes temporales e hipótesis acerca de la evolución del clima futuro.

Este trabajo se ha desarrollado bajo la metodología de “toma de decisiones robustas” (Robust Decision Making-RDM, por sus siglas en inglés), de modo que, desplegando un proceso técnico-participativo con la ACP y actores socioeconómicos clave, ha sido posible determinar, por un lado, las condiciones bajo las cuales el sistema hidrológico puede seguir proveyendo bienes y servicios y, por otro, diseñar las diferentes opciones de adaptación que pueden ser implementadas – por medio de rutas estratégicas de adaptación – para garantizar las condiciones de resiliencia necesarias.

2.1

PROSPECTIVA: TENDENCIAS Y ESCENARIO

Construcción del Modelo de Oferta/Demanda para la capacidad hídrica





2

PROSPECTIVA: TENDENCIAS Y ESCENARIOS

2.1

Construcción del Modelo de Oferta/Demanda para la capacidad hídrica

2.1.1

Integración del diagnóstico territorial

Esta segunda fase para la elaboración del PIOTA parte de los análisis realizados en la fase previa de diagnóstico integral. Así, las tendencias y evolución previsible tienen su origen en los datos que, de modo sectorial, fueron estudiados anteriormente. Como conclusión de la fase de diagnóstico integral del PIOTA se realizó un análisis de problemas y oportunidades que, a su vez, se sintetizó en un FODA (Fortalezas, Oportunidades, Debilidades y Amenazas). Esta síntesis FODA sirvió para establecer una serie de indicadores, los cuales tenían por objetivo determinar el estado del territorio de la Cuenca con relación a los diferentes aspectos analizados.

Estos indicadores, que sintetizan la línea base de la CHCP, han sido el fundamento para construir los

escenarios territoriales, es decir, variables que permiten generar un modelo de desarrollo territorial a futuro. A modo de ejemplo, el más evidente es el crecimiento poblacional: un incremento de la población significa la necesidad de aumentar el suelo destinado a usos residenciales (para acoger a los nuevos habitantes) y, mayores recursos de agua para abastecimiento, etc. Pero, a estas consecuencias de tipo inmediato, es necesario añadir la incertidumbre climática que influye en la disponibilidad de recursos y, de igual modo, las acciones sobre el territorio que pueden incidir en la mayor o menor resiliencia frente al cambio climático. Así, y como se describe en posteriores apartados, se ha construido un modelo que integra las principales variables territoriales identificadas en la fase de diagnóstico con las proyecciones de cambio climático, con el objetivo de identificar su impacto en la CHCP.

2.1.2

Aproximación metodológica para el cálculo de la robustez climática

El objetivo principal de la Fase de Prospectiva del PIOTA es evaluar la robustez climática del sistema de recursos hídricos de la Cuenca Hidrográfica del Canal de Panamá, esto es, la capacidad para cubrir las demandas de agua actuales y futuras bajo el rango probable de incertidumbre climática esperado por efecto del cambio climático. Las de-

mandas de agua futuras se analizarán bajo diferentes escenarios de desarrollo territorial, los cuales se proyectarán a diferentes horizontes temporales en un intento de incorporar las tendencias de cambio esperadas y deseadas en la Cuenca, así como la adopción de actuaciones, y un portafolio de medidas de adaptación que den soporte al Plan de Ordenamiento Territorial Ambiental de la Cuenca.

Para el análisis de robustez climática se ha empleado una metodología denominada Toma de Decisiones Robustas (RDM¹), en la que se adopta una aproximación ascendente o abajo-arriba (*bottom-up*). La RDM comienza con el análisis del comportamiento de un sistema, el cual se modela para conocer su respuesta (ej. capacidad para satisfacer las demandas de agua), frente a un rango plausible de condicionantes climáticas, ambientales y de gestión. En un paso posterior, la respuesta del sistema es evaluada en combinación con los patrones de cambio climático proyectados por un conjunto o ensamble de modelos, en un intento de calcular la probabilidad de cumplir con unos criterios de garantía, previamente concertados con los agentes locales, a través de mecanismos de participación.

La metodología RDM contrasta con las aproximaciones clásicas de arriba-abajo (*top-down*), donde las proyecciones de cambio climático son utilizadas para forzar las herramientas de modelación, en un intento de predecir el comportamiento del sistema. En general, los resultados derivados de los métodos arriba-abajo o de análisis de escenarios, están sujetos a mayores incertidumbres que los métodos abajo-arriba o de análisis de sistemas. Igualmente, los RDM han resultado muy apropiados para dar soporte a los análisis de costo-efectividad y costo-beneficio, asociados a la elaboración de programas de medidas para adaptación al cambio climático.

La aplicación de la metodología RDM, como apoyo a la planificación territorial, es una novedad y presenta desafíos en cuanto al diseño de las herramientas de modelación y la obtención de una propuesta concreta de imagen futura, y su conse-

cución, con el diseño de rutas de adaptación robustas. En esencia, la aplicación de una metodología RDM consta de tres fases:

- Fase de exploración, construcción y concertación
- Fase de evaluación de impactos o vulnerabilidad
- Fase de definición y selección de opciones para la gestión del riesgo o la adaptación

En la Figura 1 se resume de manera esquemática el diagrama de flujo empleado para la aplicación del método RDM en el sistema de recursos hídricos de la Cuenca Hidrográfica del Canal de Panamá. En una primera fase, se procede a la construcción, parametrización y verificación de la bondad del modelo hidrológico y de oferta-demanda de la Cuenca para reproducir los patrones de generación y asignación de recursos hídricos observados (sección 2.1.3 Desarrollo de la herramienta). En paralelo, se procede a la caracterización del clima histórico a partir de observaciones y a la regionalización del clima futuro a partir de los modelos y escenarios de cambio climático seleccionados para la región de estudio (sección 2.2 Clima histórico y proyecciones).

La aplicación de los modelos, los cuales fueron implementados con la herramienta *Water Evaluation And Planning System* (WEAP²), permite el cálculo de uno o varios indicadores de desempeño que informan sobre la capacidad del sistema para satisfacer un criterio. En el caso concreto del PIOTA, el indicador de desempeño seleccionado es la cobertura volumétrica de agua, definida como el % de la demanda total de agua que se satisface (2.1.5 Identificación e inclusión de indicadores de desempeño y umbrales). En un primer ejercicio de simulación se caracteriza la condición de línea de base, donde el modelo entonces es forzado con el patrón de demandas actuales y con un continuo plausible de variación climática que incluye el clima histórico y un clima histórico-perturbado, de acuerdo con el rango plausible de cambios de precipitación y temperatura predichos en la región por los

1. Robust Decision Making-RDM, por sus siglas en inglés

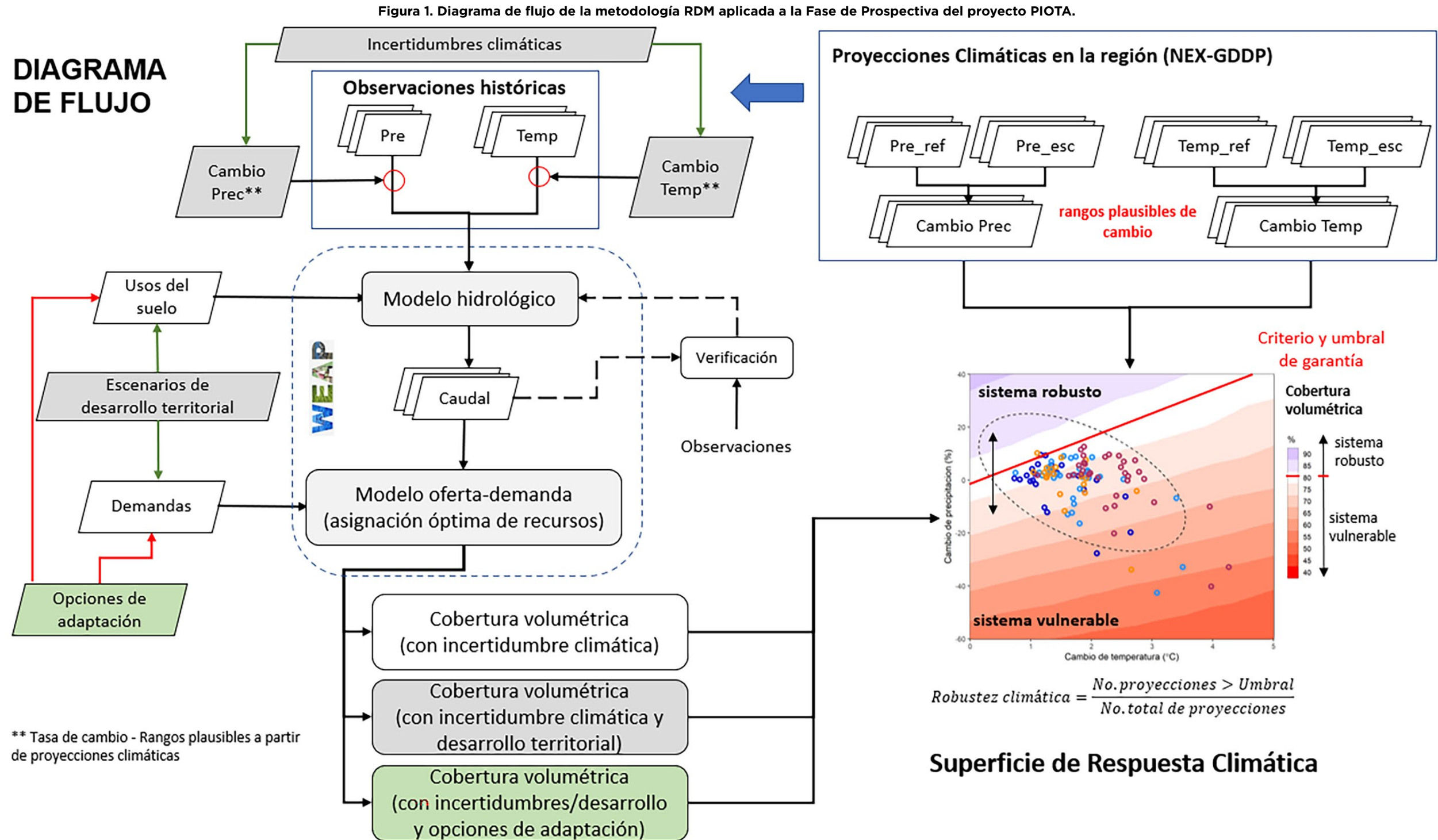
2. Water Evaluation And Planning System - WEAP, por sus siglas en inglés, es un software para la planificación integrada de los recursos hídricos.

modelos regionales de clima. Se obtiene así la Superficie de Respuesta Climática (SRC), que es la representación gráfica de cómo se comporta la Cuenca en términos de cobertura para el continuo de clima simulado. La proyección de los modelos climáticos

sobre la SRC, permite obtener la robustez climática como porcentaje de modelos que están por encima de un umbral de garantía, que es previamente concertado con los expertos y agentes involucrados en la planificación (sección 2.1.4 Proceso participativo).

El ejercicio de simulación se repite en fases posteriores considerando diferentes escenarios de desarrollo territorial y de adaptación, que pueden incluir cambios en los patrones de uso del suelo, de

demanda de agua, cambios en las reglas de operación de las infraestructuras existentes o de prioridad de asignación entre usos, etc.



Fuente: Equipo PIOTA, 2021.

Desarrollo de la herramienta

Aspectos generales del modelo WEAP-CHCP

Para evaluar el comportamiento de la Cuenca bajo diferentes escenarios de desarrollo territorial (incertidumbre no climática) y de cambio climático (incertidumbre climática) se ha construido un modelo integrado de simulación hidrológica y asignación de recursos utilizando la herramienta WEAP (*Water Evaluation And Planning*, www.weap21.org), plataforma de modelación dinámica que in-

tegra herramientas de evaluación del balance de agua (modelación hidrológica) y una rutina de optimización para la asignación del recurso disponible entre diferentes nodos de demanda. Las principales características de la herramienta WEAP se recogen en la tabla 1.

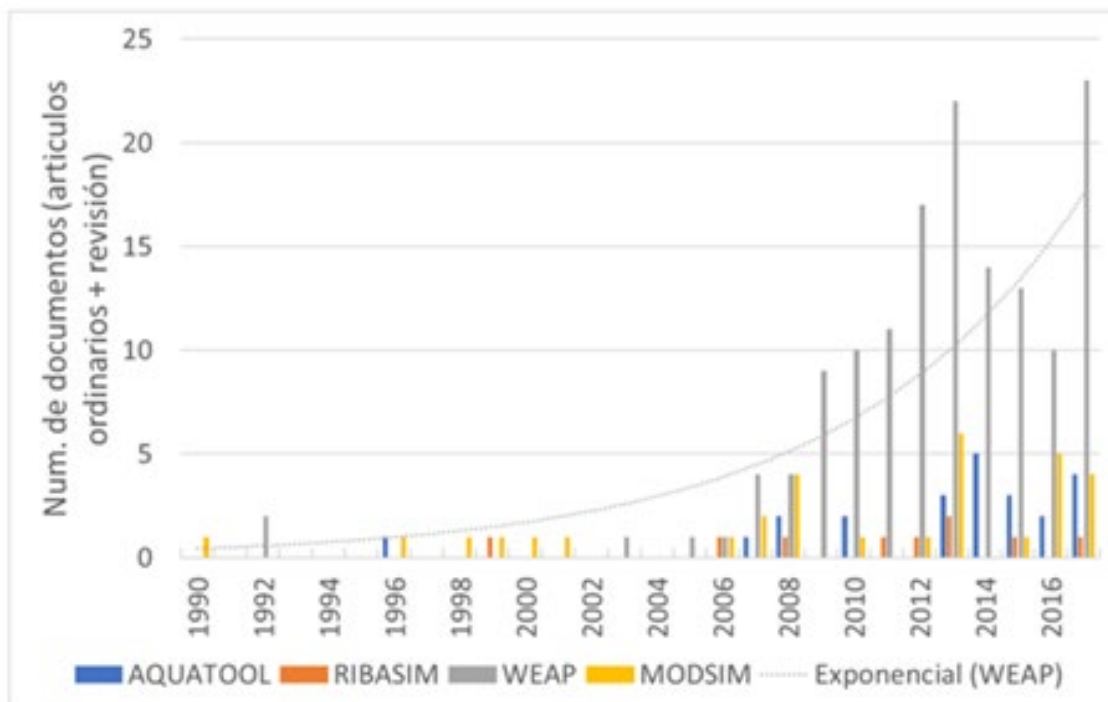
La comunidad de usuarios de WEAP ha crecido considerablemente en los últimos años, y es claramente superior a otras herramientas de simulación dinámica para la planificación de recursos hídricos (Figura 2). Este aumento puede ilustrarse a través de la evolución del número de documentos científicos y técnicos que han referenciado a estas herramientas en el periodo 1990-2017.

Tabla 1. Principales características de la herramienta WEAP

Enfoque integrado	Enfoque único para realizar evaluaciones de planificación integrada de recursos hídricos.
Proceso de participación	Una estructura transparente que facilita la participación de los actores involucrados en un proceso abierto.
Balance de agua	Una base de datos mantiene la información de demanda y suministro para manejar el modelo de balance de masa en una arquitectura de nodo-enlace.
Basado en simulación	Calcula la demanda, oferta, escorrentía, infiltración, requisitos para las cosechas, flujos y almacenamiento del agua, y generación, tratamiento, descarga de contaminantes y de calidad de agua en ríos para variados escenarios hidrológicos y de políticas.
Escenarios de políticas de uso de agua	Evalúa una amplia gama de opciones de desarrollo y manejo del agua y toma en cuenta los múltiples y opuestos usos de los recursos hídricos.
Interfaz amigable	Interfaz gráfica basada en mapas SIG con conceptos de "arrastrar y soltar" ("drag-and-drop") con resultados flexibles como mapas, gráficos y tablas.
Integración de modelos	Enlaces dinámicos a otros modelos y programas como QUAL2K, MODFLOW, MODPATH, PEST, Excel y GAMS.

Fuente: www.weap21.org

Figura 2. Evolución del número de documentos científico-técnicos que han referenciado o usado WEAP u otros modelos de simulación para la planificación hidrológica en el periodo 1990-2017



Fuente: Equipo PIOTA, 2021.

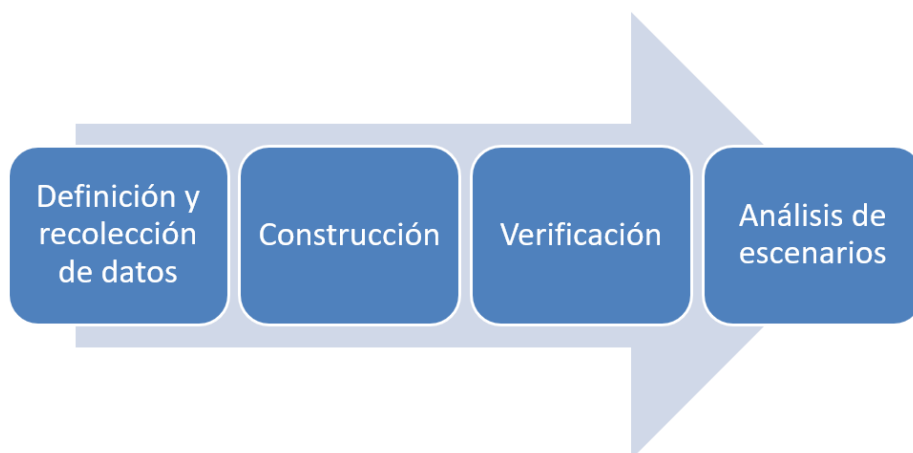
Las posibilidades ofrecidas por WEAP son amplias. Las principales utilidades se circunscriben a:

- Evaluación de escenarios climáticos
- Análisis de cambios en condiciones de la Cuenca
- Generación de proyecciones de cambio de demanda
- Evaluación de cambios en las condiciones regulatorias y reglas de operación

- Evaluación de impactos por infraestructuras y análisis costo-efectividad/beneficio

Típicamente, el proceso de construcción de un modelo de evaluación-asignación de recursos en WEAP se divide en 4 fases (Figura 3): a) definición del modelo conceptual y recolección de datos; b) construcción y parametrización; c) verificación de resultados; y d) análisis de escenarios de cambio

Figura 3. Fases en la construcción de un modelo en WEAP.



Fuente: Equipo PIOTA, 2021.

La simulación hidrológica y asignación de recursos en WEAP, pivota sobre la construcción de un modelo topológico orientado a objetos (nodos y conexiones). A continuación, se describen los aspectos generales considerados, dejándose para las siguientes secciones una descripción más detallada de la modelación hidrológica, y la parametrización del modelo para las condiciones de línea de base.

2.1.3.1.1

Dominio y parámetros generales de simulación

El ámbito de simulación se circunscribe a los dominios del Sistema de Recursos Hídricos de la CHCP, que está integrado por la cuenca vertiente al embalse Gatún y las regiones aledañas, cuyas demandas hídricas son total o parcialmente cubiertas con recursos propios generados dentro de los límites físicos de la Cuenca. El sistema de recursos hídricos de la CHCP se ha subdividido en dos subsistemas, el subsistema Alhajuela (o Madden), delimitado espacialmente por la cuenca vertiente al embalse Alhajuela, y el subsistema Gatún, que incluye el resto de la CHCP.

La simulación del modelo oferta-demanda se extiende durante un periodo de 31 años (1988-2018) y un paso de tiempo mensual (Tabla 2). Esta resolución temporal de un mes se ha considerado apropiada para el análisis de la robustez climática del sistema, y para dar soporte al objetivo de planificación del PIOTA. Es importante advertir que

el modelo WEAP-CHCP, no se ha pensado como herramienta de gestión operacional del sistema ni tampoco para evaluar el riesgo de inundaciones por eventos extremos de precipitación.

El año 1 del periodo de simulación (1988) se emplea en WEAP como año de base común para todos los periodos y escenarios de simulación planteados. La primera simulación que se extiende entre 1989-2018 se refiere a la condición de línea de base o de referencia, según terminología de WEAP. Aquí, el modelo se fuerza con el clima histórico observado en dicho periodo y unas demandas de agua que se han proyectado al horizonte 2020, según los datos más actualizados disponibles; y que fueron recolectados y procesados durante la fase de diagnóstico del PIOTA.

Para evaluar la robustez climática de la Cuenca, para diferentes trayectorias de desarrollo territorial y de cambios en las demandas y necesidades hídricas, se han generado tres escenarios de desarrollo adicionales (tendencial, ambicioso y consensuado), que se proyectan a cuatro horizontes temporales (2025, 2030, 2040 y 2070). Para cada combinación escenario-horizonte, se fuerza el modelo con la serie histórica de clima para el periodo de referencia (1989-2018), la cual es previamente perturbada por la incertidumbre climática (cambios plausibles de precipitación y temperatura) predicha por los modelos regionalizados de cambio climático. En la sección 2.2 Clima histórico y proyecciones, se da una explicación detallada del clima histórico y las proyecciones de cambio climá-

tico esperados en la Cuenca; mientras que, en la sección 2.4 Escenarios de desarrollo territorial, se describe en profundidad la parametrización de los escenarios territoriales planteados.

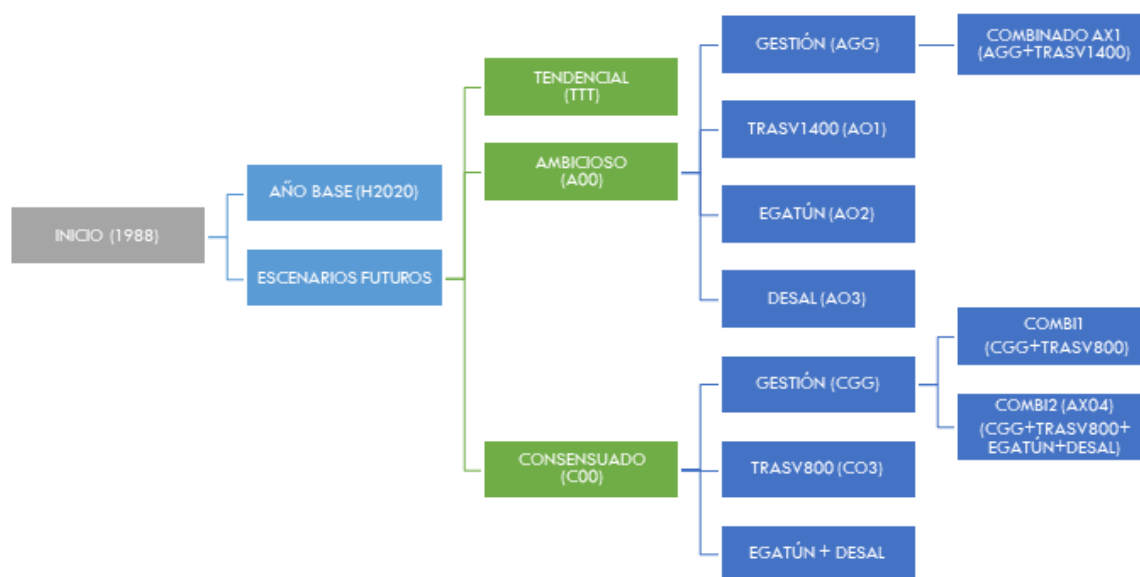
Tabla 2. Dominio y parámetros generales de simulación para el modelo WEAP-CHCP.

Ámbito de simulación	Cuenca Hidrográfica del Canal de Panamá y demandas anexas dependientes
Periodo de simulación	1988 – 2018. El primer año se utiliza como periodo de calentamiento del modelo, mientras que los resultados refieren al periodo 1989-2018 (30 años)
Resolución temporal	Mensual
Número total de objetos representados	68
Objetos “Río”	10
Objetos “Embalses”	2
Unidades de Demanda	7
Cuencas	10
Conexiones por escorrentía/infiltración	10
Conexiones para “Toma de agua”	7
Conexiones para “Retorno de flujo”	6
Estaciones con mediciones de caudal	7
Nodos auxiliares de “Agua subterránea”	10

Fuente: Equipo PIOTA, 2021.

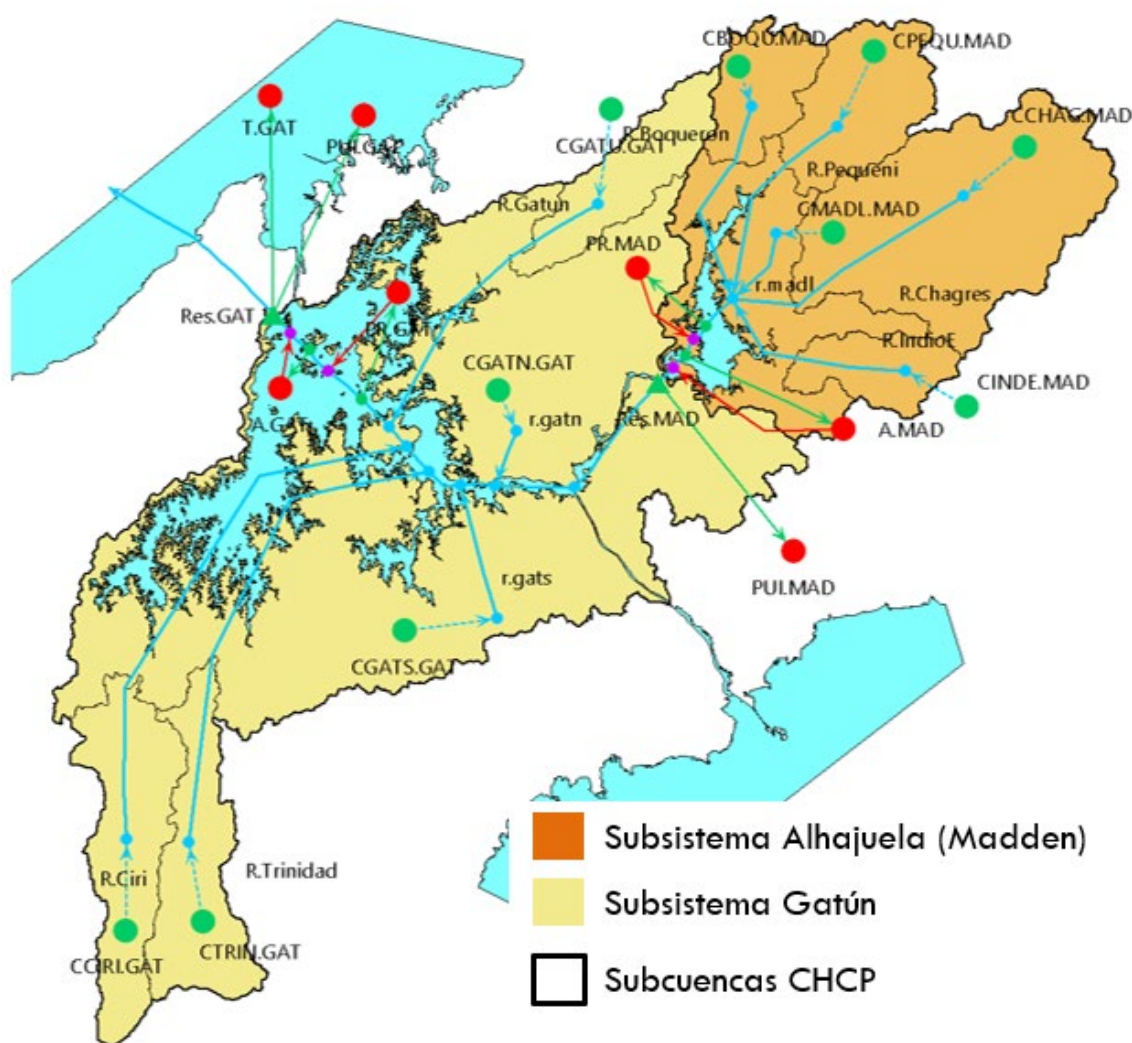
En la Figura 4 se muestra el esquema de escenarios simulados durante la fase de prospectiva y de análisis de robustez climática. A su vez, cada escenario futuro se parametriza para cuatro horizontes temporales que representan el corto (2025), medio (2030 y 2040) y largo plazo (2070).

Figura 4. Esquema de escenarios simulados para la fase de prospectiva del PIOTA.



Fuente: Equipo PIOTA, 2021.

Figura 5. Esquema topológico del sistema de recursos hídricos de la CHCP.



Fuente: Equipo PIOTA, 2021.

2.1.3.1.2

Evaluación de recursos disponibles

Los recursos disponibles en cada subsistema se cuantifican mediante la modelación hidrológica de cada una de las 10 subcuencas³ en las que se divi-

de la CHCP (Tabla 3). Para cada subcuenca se ha calibrado y validado un modelo hidrológico agregado, utilizando el método del balance de agua en el suelo. En el apartado 2.1.3.2 Generación del modelo hidrológico se detalla el trabajo de calibración y validación para cada una de las subcuencas modeladas.

3. La utilización de estos ámbitos geográficos es necesario para la modelación hidrológica. La división y denominación de las subcuencas es la empleada por la sección de Meteorología e Hidrología (HIAM) de la ACP.

Tabla 3. Listado de subcuencas terrestres representadas y simuladas en el modelo WEAP-CHCP.

Subsistema (acrónimo)	Subcuenca	Superficie (km²)	Tipo	ID_WEAP
Alhajuela (MAD)	Río Boquerón	90.7	Aforada	CBOQU.MAD
	Río Pequení	144.6	Aforada	CPEQU.MAD
	Río Chagres	406.7	Aforada	CCHAG.MAD
	Río Indio Este	80.4	Aforada	CINDE.MAD
	Madden Local	262.7	No aforada	CMADL.MAD
Gatún (GAT)	Río Cirí Grande	192.5	Aforada	CCIRI.GAT
	Río Trinidad	170.9	Aforada	CTRIN.GAT
	Río Gatún	118.9	Aforada	CGATU.GAT
	Gatún Norte (tributarios no aforados en el margen derecho)	679.3	No aforada	CGATN.GAT
	Gatún Sur (tributarios no aforados en el margen izquierdo)	733.3	No aforada	CGATS.GAT

Fuente: Equipo PIOTA, 2021, con base en datos de la ACP.

2.1.3.1.3

Demandas

Para el cálculo de las demandas por nodo y para cada paso temporal, se han tenido en cuenta tres criterios básicos:

- 1) la actividad anual (medida como unidades equivalentes de demanda),
- 2) una dotación neta de agua por unidad equivalente de demanda, y
- 3) una curva estacional de demanda que simula la distribución de la demanda anual por meses.

$$DN_m^i = Na * Da * W_m$$

[Ecuación 1]

Donde DN_m^i es la demanda neta para el nodo de demanda i (ej. urbana, rural, agropecuario o transporte) y el mes m ; Na representa la actividad anual en unidades equivalente de demanda (ej. habitantes, superficie de cultivo en ha, superficie industrial equivalente en ha, número de cabezas de ganado, unidades equivalentes de esclusaje Panamax); Da es el valor dotación volumétrica anual de agua por unidad equivalente de demanda (ej. m³/ha por año); y W_m es el porcentaje promedio que representa la demanda mensual en el mes m , en relación con la demanda anual.

En ambos subsistemas se ha seguido un esquema similar integrado por tres nodos de demanda consuntiva, estos son:

- 1) Demanda Urbana e Industrial, para simular la demanda poblacional urbana y la demanda industrial conectada a la red de distribución.
- 2) Demanda Rural, para simular la demanda de la población en áreas rurales, y
- 3) Demanda Agropecuaria, para simular la demanda de agua para riego de cultivos (ej. piña) y la necesaria para cubrir la demanda del hato ganadero.

Finalmente, se ha implementado un nodo adicional de demanda no consuntiva en el subsistema Gatún para simular las necesidades de agua vinculadas a las operaciones del Canal de Panamá.

La demanda hidroeléctrica no se ha incluido en el modelo por tratarse de un uso no consuntivo y de baja prioridad en el esquema de asignación de recursos de la CHCP. En cualquiera de los casos, el modelo se ha parametrizado teniendo en cuenta la capacidad máxima de turbinado en cada uno de los subsistemas. La generación de energía hidroeléctrica estaría sujeta a los vertidos simulados para cada uno de los embalses de la Cuenca. La demanda concesional de carácter industrial no conectada a la red de abastecimiento se ha considerado despreciable y no se ha tenido en cuenta para la simulación.

A su vez, y de acuerdo con la información recopilada en la fase de diagnóstico, cada nodo de demanda se ha subdividido en diferentes niveles para representar, de la manera más ajustada posible, la complejidad de la Cuenca, así como los cambios en los valores de aquellos parámetros clave que determinan los requerimientos anuales y mensuales de agua de cada nodo.

A continuación, se describe brevemente la metodología empleada para caracterizar cada nodo de demanda. Más detalles y valores concretos se refieren en el apartado 2.4.1.1 Prospectiva de las demandas de agua.

Demanda Urbano-Industrial (PUI)

Esta demanda incluye dos subunidades de demanda:

- 1) población urbana y suburbana (raíz PU),
- 2) industrial (raíz I) (Tabla 4, Figura 6).

La demanda de la población urbana y suburbana a nivel de subsistema se ingresa en el modelo WEAP desagregada por zonas poblacionales. Los datos de partida para el periodo de análisis actual, se derivan de las estadísticas de población anual censadas por el INEC para los 59 corregimientos poblacionales clasificados bajo la categoría “urbano-suburbano” en el estudio de STANTEC⁴.

Para cada zona poblacional se ha estimado un valor ponderado de dotación de agua promedio por habitante, de acuerdo con lo indicado a continuación:

- a) un porcentaje (%) de población “urbana” y “suburbana” estimada en cada zona poblacional,
- b) un valor de dotación representativo para cada subtipo de población,
- c) un supuesto que considera la mezcla de un patrón de consumo de agua bajo, medio y alto en cada zona poblacional.

Las estimaciones de dotación también consideran dotaciones unitarias diferentes para la fracción medida y no medida del agua suministrada a través de la red de abastecimiento.

La demanda industrial se ha considerado con la de la población urbana, asumiéndose que está circunscrita a las zonas urbanas-suburbanas y conectadas a la red pública de abastecimiento. Para el cálculo de la demanda se han realizado estimaciones propias de superficie industrial equivalente y, por separado, para el área metropolitana de Colón, área metropolitana de Panamá, y zonas urbanas-suburbanas ubicadas en el resto del territorio de cada subsistema. Se ha considerado una dotación industrial de partida de 1 litro/s/ha como valor recomendable para mantener la actividad. Finalmente, se ha ajustado una curva mensual de demanda de agua que es proporcional al número de días por mes con relación al total de días del año.

En el modelo WEAP, las tomas de agua para satisfacer la demanda se han ubicado en los respectivos embalses de Gatún y Alhajuela, por lo que se asume que el volumen de agua extraída para cubrir las demandas estará sujeto a las fluctuaciones del nivel de agua almacenado en los embalses y sus reglas de operación. Se ha trabajado bajo el supuesto de que estas tomas de agua están conectadas a la red de potabilización y abastecimiento de agua potable y bajo los escenarios de: 1) capacidad ilimitada de potabilización y suministro, y 2) caudal de suministro restringido por la capacidad nominal de la infraestructura de potabilización proyectada a 2025 en cada subsistema. La diferencia entre ambos horizontes permite evaluar las necesidades de infraestructura de potabilización y abastecimiento requeridas para cubrir el 100% de las necesidades hídricas de cada nodo de demanda.

Las pérdidas de agua simuladas en los nodos PUI. GAT y PUI.MAD⁵ se asumen que no retornan al sistema, y, por tanto, dejan de estar disponibles para la satisfacción de otras demandas (en la terminología de WEAP se entienden como consumos efectivos de agua).

4. STANTEC. (2019). *Municipal and Industrial Water Demand and Raw Water Consumption Forecast 2020-2050*. Panamá

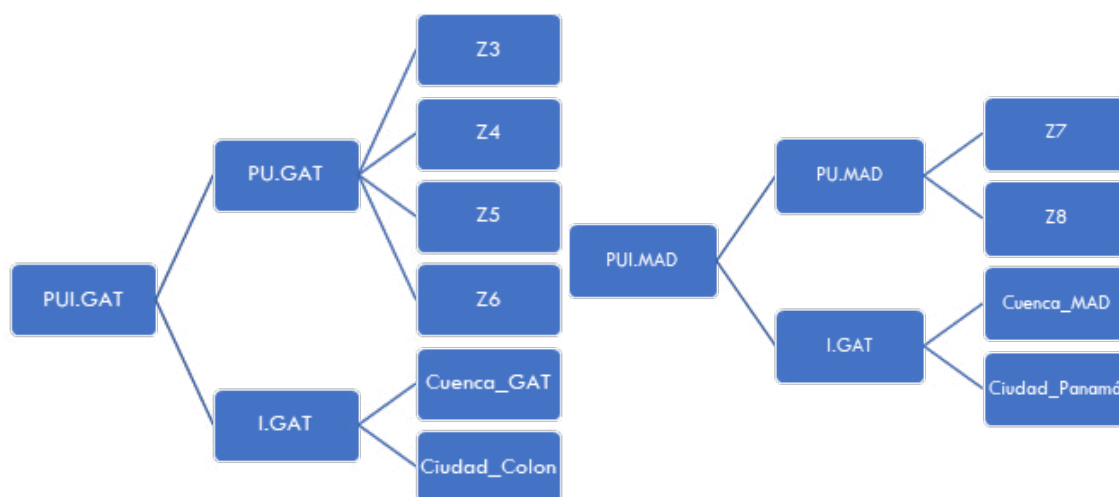
5. Demanda Urbano-Industrial de los subsistemas Gatún y Alhajuela.

Tabla 4. Caracterización de nodo de demanda poblacional urbano-industrial (PUI) en WEAP-CHCP.

Subsistema (acrónimo)	Subcategoría demanda	Subnivel Nodo
Gatún (PUI.GAT)	Población Urbana-Suburbana	Zonal Poblacional 3
		Zonal Poblacional 4
		Zonal Poblacional 5
		Zonal Poblacional 6
	Industrial	Ciudad Colón
		Resto territorio subsistema Gatún
Alhajuela (PUI.MAD)	Población Urbana-Suburbana	Zonal Poblacional 7
		Zonal Poblacional 8
	Industrial	Ciudad Panamá
		Resto territorio subsistema Alhajuela

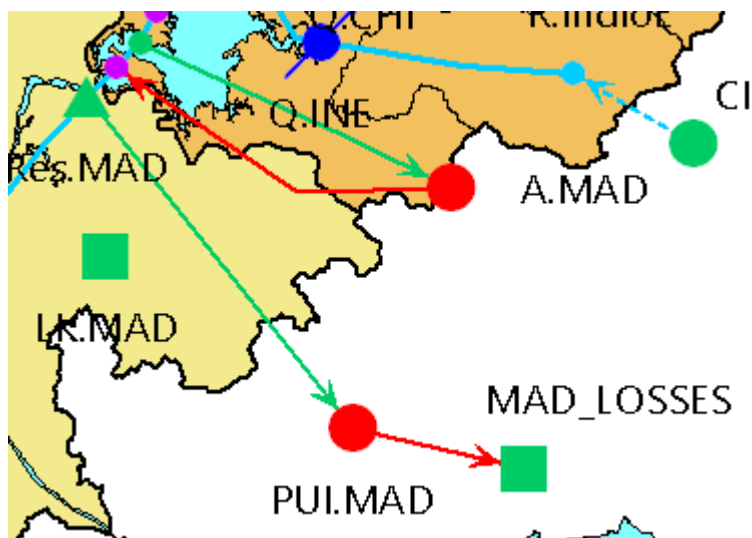
Fuente: Equipo PIOTA, 2021.

Figura 6. Esquema de niveles WEAP para los nodos de demanda poblacional urbana-industrial para los subsistemas Gatún (PUI.GAT, izqda.) y Alhajuela (PUI.MAD, dcha.)



Fuente: Equipo PIOTA, 2021.

Figura 7. Esquema ilustrativo de la ubicación topológica del nodo de demanda poblacional urbana-industrial en el subsistema Alhajuela (PUI.MAD) en el modelo WEAP-CHCP.



Fuente: Equipo PIOTA, 2021.

Demanda Rural (PR)

La demanda rural en cada uno de los subsistemas se parametriza de acuerdo con el esquema de la Tabla 5 y Figura 8. La metodología para el cálculo de la demanda rural es similar al empleado para la demanda poblacional urbana-industrial. Para el cálculo de la demanda de la población rural, se uti-

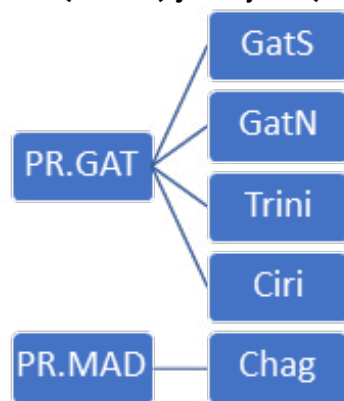
lizaron los datos de población correspondientes a los 28 corregimientos de población categorizados como “rurales”, según el citado informe de STANTEC. Los datos de población rural se agregaron a nivel de subcuenca. La asignación de la dotación por habitante se realizó en base a los datos del estudio de STANTEC.

Tabla 5. Caracterización de nodo de demanda poblacional rural (PR) en WEAP-CHCP.

Subsistema (acrónimo)	Subcategoría demanda	Subnivel Nodo
Gatún (PR.GAT)	Población Rural	Subcuenca Gatún Sur
		Subcuenca Gatún Norte
		Subcuenca Trinidad
		Subcuenca Cirí Grande
Alhajuela (PR.MAD)	Población Rural	Subcuenca Chagres

Fuente: Equipo PIOTA, 2021.

Figura 8. Esquema de niveles WEAP para los nodos de demanda poblacional rural para los subsistemas Gatún (PR.GAT) y Alhajuela (PR.MAD)



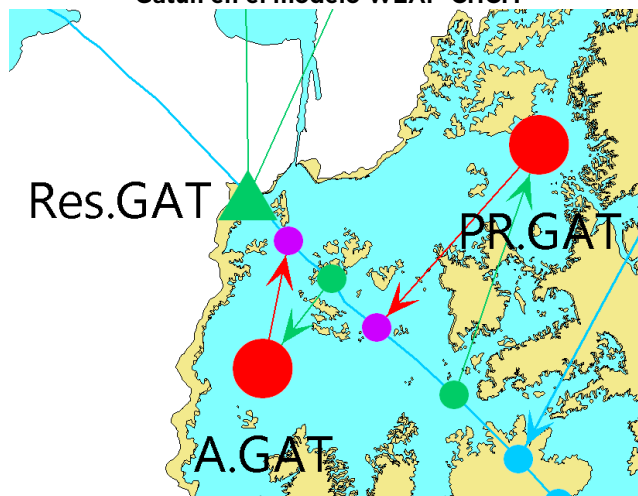
Fuente: Equipo PIOTA, 2021.

Finalmente, se ha ajustado una curva de demanda mensual, que es proporcional al número de días por mes con relación al total de días del año.

En el modelo WEAP, las tomas de agua para satisfacer la demanda poblacional rural se ubican sobre los ríos, e inmediatamente aguas debajo de la confluencia de los tributarios que integran cada

subsistema hidrológico, por lo que, se trabaja con el supuesto de que el abastecimiento está influenciado por el régimen de caudal total generado en las cuencas de cada subsistema. Las pérdidas de agua simuladas en los nodos PR se asumen que retornan al sistema hidrológico mediante una conexión al río.

Figura 9. Esquema ilustrativo de la ubicación topológica del nodo de demanda rural del subsistema Gatún en el modelo WEAP-CHCP.



Fuente: Equipo PIOTA, 2021.

Demanda Agropecuaria

Por representatividad y preponderancia en términos de superficie cultivada, se ha considerado únicamente la piña como cultivo de riego para su modelación en WEAP. Este cultivo solo tiene presencia en el subsistema Gatún a partir de los valores de superficie y un valor de dotación de riego obtenido para la región según el estudio “Deter-

minación de Balance Hídrico y Caudal Ambiental” (MiAMBIENTE & ACP, 2017). La demanda anual de agua se distribuye mensualmente adoptando una curva de demanda estacional típica, que tiene en cuenta las fechas de siembra, cosecha y la evolución del coeficiente de cultivos típicos observados en la región.

La demanda pecuaria total se ha parametrizado en el modelo WEAP-CHCP teniendo en cuenta la superficie de pasto, y un valor de dotación anual por superficie equivalente de pasto que se ha estimado

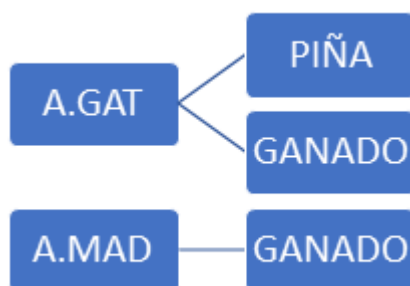
a partir de las necesidades hídricas del hato ganadero y los consumos de agua de las instalaciones anexas (ver sección 2.4.1.1.4).

Tabla 6. Caracterización de los nodos de demanda agropecuaria (A) en WEAP-CHCP.

Subsistema	Subcategoría demanda	Subnivel Nodo
Gatún	Agrícola	Piña
	Pecuaria	Pasto
(A.GAT)		
Alhajuela	Pecuaria	Pasto
(A.MAD)		

Fuente: Equipo PIOTA, 2021.

Figura 10. Esquema de niveles WEAP para los nodos de demanda agropecuaria (A.GAT y A.MAD)



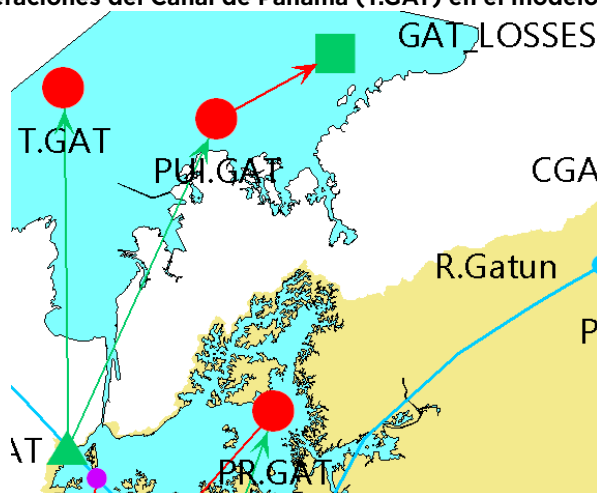
Fuente: Equipo PIOTA, 2021.

En ambos subsistemas, la toma de agua para cubrir la demanda agropecuaria se ubica sobre el tramo de río y aguas debajo de la toma de agua para abastecer la demanda de la población rural. También las pérdidas de agua asociadas al nodo de demanda agropecuario se asumen que retornan al sistema hidrológico mediante una conexión al río (representación conceptual).

Demanda de agua para las operaciones del Canal de Panamá (T.GAT)

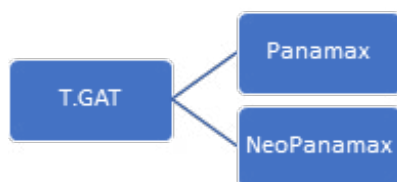
Se trata de un nodo de demanda (T.GAT) conectado al nodo del embalse Gatún para cubrir las necesidades hídricas de la operación ordinaria del Canal (transporte). En este caso, la demanda se parametriza en el modelo en términos de Unidades de Esclusajes Panamax Equivalente por día. Cada Unidad Panamax Equivalente corresponde a una demanda de agua de 55 millones de galones por día.

Figura 11. Esquema ilustrativo de la ubicación topológica del nodo de demanda para el mantenimiento de las operaciones del Canal de Panamá (T.GAT) en el modelo WEAP-CHCP.



Fuente: Equipo PIOTA, 2021.

Figura 12. Esquema de niveles WEAP para los nodos de demanda de esclusaje (T.GAT)



Fuente: Equipo PIOTA, 2021.

2.1.3.1.4

Pérdidas y retornos

En el modelo WEAP-CHCP se han considerado las pérdidas de agua que tienen lugar en los nodos de demanda poblacional urbano-industrial (nodos PUI), población rural (nodos PR), y agropecuaria (nodos A). Las pérdidas se parametrizan como tasas porcentuales respecto de la demanda total de cada nodo. WEAP utiliza estos valores de pérdida para calcular el requerimiento de suministro, definido como el volumen de agua total que es necesario para cubrir la demanda neta y las pérdidas de agua del nodo, según la ecuación.

$$RS_m^i = 100 * \frac{DN}{(100-P)} \quad [\text{Ecuación 2}]$$

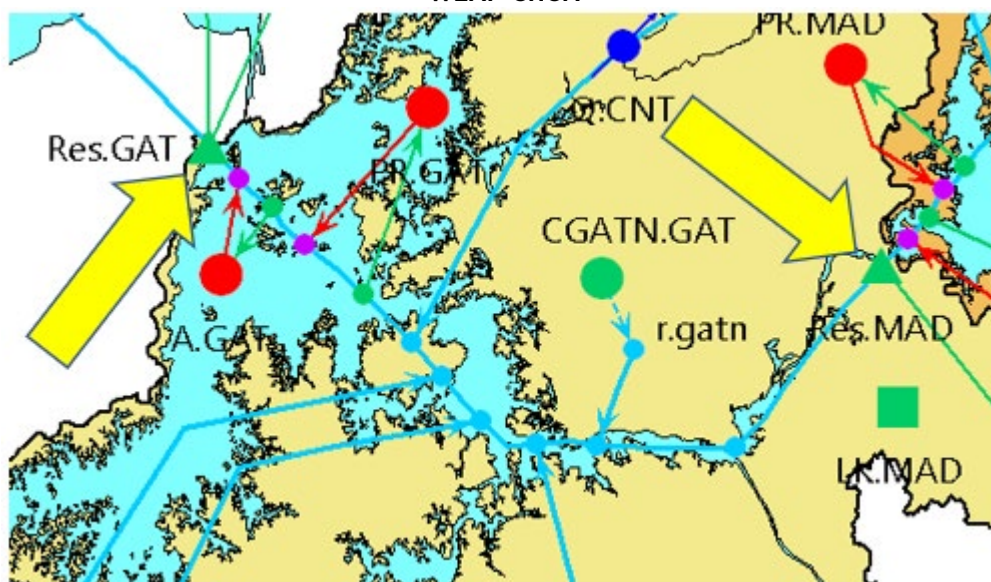
Donde RS_m^i es el requerimiento de suministro en el mes m para el nodo de demanda i , DN es la demanda neta anual (ver [Ecuación 1]).

2.1.3.1.5

Embalses

En el modelo WEAP-CHCP se ha incluido dos nodos tipo “embalse” (embalse Gatún -Res.GAT- y embalse Alhajuela -Res.MAD-, Figura 13) para simular el régimen de almacenamiento, regulación y provisión de agua a los nodos de demanda poblacional urbano-industrial (PUI.GAT y PUI.MAD) y de operación del Canal (T.GAT), y de vertidos de agua fuera de la Cuenca.

Figura 13. Ubicación de los embalses Gatún y Alhajuela en el esquema topológico del modelo WEAP-CHCP.



Fuente: Equipo PIOTA, 2021.

Cada embalse se ha parametrizado en base a información relativa a sus características físicas, las reglas de operación que regulan los vertidos, y el

criterio de prioridad de llenado que determina el grado de prelación asignado al llenado del embalse frente al abastecimiento de los nodos de demanda.

Tabla 7. Principales parámetros utilizados para caracterizar los embalses en el modelo WEAP-CHCP.

Parámetro	Descripción
Parámetros físicos	
Capacidad de almacenamiento	Capacidad total de almacenamiento
Almacenamiento al inicio del periodo de simulación	Inicialización. Dato medido en enero de 1988.
Curva de Elevación-Volumen	Determina la relación entre la altura de la lámina de agua y el volumen total embalsado.
Evaporación neta	Diferencia entre la precipitación directa sobre espejo de agua del embalse y la evaporación directa. Los datos se dan en valores de lámina de agua (mm) de acuerdo con las series de datos meteorológicos utilizados para forzar el modelo de simulación.
Máximo efluente hidráulico	Máximo caudal que puede verterse aguas abajo debido a las restricciones hidráulicas del embalse
Filtraciones y fugas	Pérdidas de agua del embalse por fugas y filtraciones. En WEAP-CHCP las fugas y filtraciones a nivel mensual pasan a formar parte de los vertidos aguas abajo.
Parámetros de operación	
Nivel superior de conservación (en volumen)	Volumen máximo de agua que puede almacenarse dejando un margen para control de inundaciones. En el modelo WEAP-CHCP, estos datos se configuran mensualmente de acuerdo con la curva de vertido de cada embalse
Nivel superior de amortiguamiento	Volumen de embalse por debajo del cual, los vertidos se restringen de acuerdo con un coeficiente de amortiguación. En el modelo WEAP-CHCP, estos datos se configuran mensualmente de acuerdo con la curva guía de operación de cada embalse
Volumen muerto	Volumen de embalse no disponible para asignación.
Coeficiente de amortiguamiento	Representa la tasa de vertido que debe aplicarse cuando el nivel de embalse está por debajo del nivel superior de amortiguamiento. Se aplica sobre el volumen efectivo disponible.
Parámetros para generación hidroeléctrica	
Máximo caudal de turbinado	Máximo caudal turbinable en m ³ /s
Nivel de turbinado	Nivel sobre el que empieza a turbinarse
Prioridad de llenado	Nivel de prioridad entre almacenamiento/llenado y vertido/suelta. 1 = mayor prioridad para llenado, 99 = mayor prioridad para abastecimiento.

Fuente: Equipo PIOTA, 2021.

Dos parámetros, el coeficiente de amortiguamiento y el nivel de prioridad de llenado, han recibido especial atención. Su determinación ha estado sujeta a un proceso de calibración por tanteo, donde se analizó la bondad del ajuste y correlación temporal entre los vertidos observados y los simulados en ambos embalses para el periodo de histórico 1988-2019. Se encontró un juego de valores que simulaba, de manera satisfactoria, la dinámica de niveles y vertidos.

2.1.3.2

Generación del modelo hidrológico

La ACP cuenta en la actualidad con tres modelos hidrológicos diferentes, cada uno orientado a cumplir un objetivo particular. Sin embargo, ninguno de estos modelos permite su utilización directa sobre el modelo de oferta-demanda que se ha desarrollado sobre el WEAP, el cual tiene como objetivo simular la disponibilidad de los recursos hídricos bajo escenarios de cambio climático y de desarrollo territorial. Por lo tanto, se opta por crear un mo-

delo específico adecuado a las necesidades de la presente consultoría.

2.1.3.2.1

Modelo y método hidrológico empleado

Selección del modelo hidrológico

El análisis oferta-demanda debe incluir un cálculo o submodelo hidrológico de resolución suficiente para determinar la oferta hídrica, capaz de simular y generar la serie de caudales en las diferentes subcuencas que componen el sistema. Por ello, siguiendo la tendencia de las herramientas hidrológicas existentes, se ha optado por generar un modelo específico enfocado a su uso concreto en el modelo global oferta-demanda WEAP.

El propio software WEAP cuenta con un módulo de cálculo hidrológico, siendo esta la opción empleada frente a la posibilidad de crear un modelo externo, cuyos resultados debieran, posteriormente, introducirse como datos de entrada en WEAP. Los motivos principales para emplear el módulo del WEAP son la facilidad de integración, que permitirá a la ACP disponer de todas las utilidades del modelo oferta-demanda en una única herramienta, y por supuesto, el hecho de que el propio módulo hidrológico del WEAP, es perfectamente adecuado para cumplir el objetivo de determinar la oferta hídrica. En cualquier caso, previo a su utilización en el análisis oferta-demanda, se deben ajustar los parámetros del submodelo hidrológico empleado, para que se asemejen al resto de información hidrológica disponible, principalmente, en lo relativo a los datos de caudales medidos en las estaciones hidrométricas, así como en los volúmenes globales en los embalses.

El módulo hidrológico del WEAP, a su vez, permite utilizar varios métodos de cálculo orientados a los diferentes usos para los cuales suele emplearse los modelos oferta-demanda cuyos métodos se describen a continuación:

- Coeficiente simplificado en demandas de riego: calcula la evapotranspiración de la Cuenca, sin simular procesos de escorrentía o infiltración, y su uso está orientado en modelos enfocados a modelos de demanda de riego.
- Coeficiente simplificado: similar al anterior, pero añade un reparto proporcional entre escorrentía y flujo subterráneo de las precipitaciones no consumidas por la evapotranspiración.
- MABIA (FAO56): enfocado a simular las necesidades y programación de la irrigación mediante la simulación de la transpiración, evaporación, el crecimiento de los cultivos y sus rendimientos.
- Desarrollo de las plantas: simula el crecimiento de las plantas, el uso del agua y el rendimiento, desarrollado para estudiar los impactos de la alteración de la concentración atmosférica de CO₂, el estrés de la temperatura, la variabilidad de la duración de la temporada y el estrés hídrico en el uso del agua de las plantas y el rendimiento de los cultivos.
- Humedad del suelo o escurrimiento de lluvia: en el cual además de la evapotranspiración se simula los procesos de escorrentía e infiltración, para lo cual se requiere una parametrización más amplia del suelo y mayor número de datos climáticos.

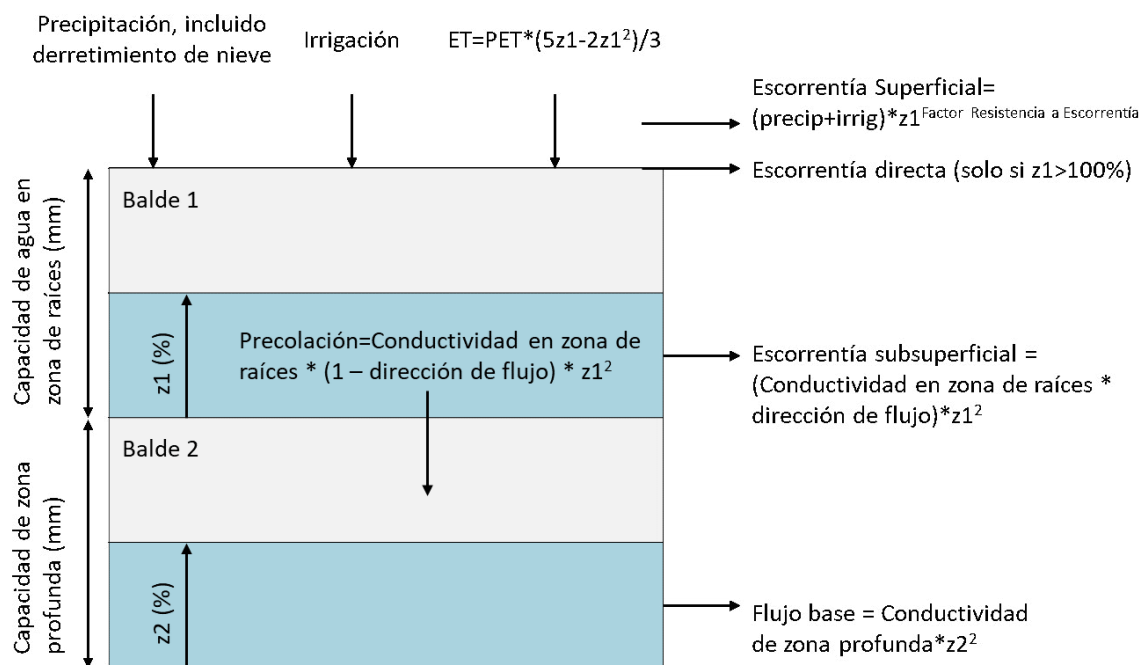
De entre estos, se emplea el método de la humedad del suelo, por tratarse del más completo, y que mejor simula los diferentes procesos del ciclo hidrológico.

Descripción del método hidrológico

Se trata de un método hidrológico de precipitación-escorrentía basado en la humedad del suelo. Conceptualmente, es un método cuasi-físico unidimensional en el cual se concibe el suelo como dos baldes⁶ de balance de agua para cada tipo de cobertura o uso del suelo que representan los diferentes fenómenos en la Cuenca, repartiendo el agua entre escorrentía superficial, evapotranspiración, infiltración, flujo base y percolación.

6. En un modelo de balance hidrológico se conceptualiza la cuenca como un *balde* o una serie de *baldes* interconectados. El *balde* es la representación del almacenamiento de agua en el suelo, es decir, un recipiente para contener el agua.

Figura 14. Método hidrológico de WEAP



Fuente: weap21.org

La ecuación del balance de masa del modelo hidrológico empleado (Yates et al. 2005), mostrado en la figura anterior, describe de manera empírica los

procesos que intervienen a partir de los parámetros de usos del suelo. Las ecuaciones son:

- Balde superior:

$$Sw_j \frac{dz_{1,j}}{dt} = P_e(t) - PET(t)K_{c,j}(t) \left(\frac{5z_{1,j} - 2z_{1,j}^2}{3} \right) - P_e(t)z_{1,j}^{RRF_j} - f_j k_s z_{1,j}^2 - (1 - f_j) k_s z_{1,j}^2$$

- Balde inferior:

$$Dw_j \frac{dz_{2,j}}{dt} = -k_d z_{2,j}^2 + (1 - f_j) k_s z_{1,j}^2$$

Los valores de cada área se agregan a nivel de subcuenca. A cada subcuenca se le debe aplicar un conjunto homogéneo de datos climáticos (precipitación, temperatura, humedad relativa y velocidad del viento) y una distribución por tipos de cobertura/usos del suelo. El programa realiza el cálculo del balance hídrico mediante un algoritmo de programación lineal que optimiza los recursos disponibles para maximizar la satisfacción de la demanda,

según las restricciones de operación y normas de prioridad y preferencia.

Montaje inicial del modelo

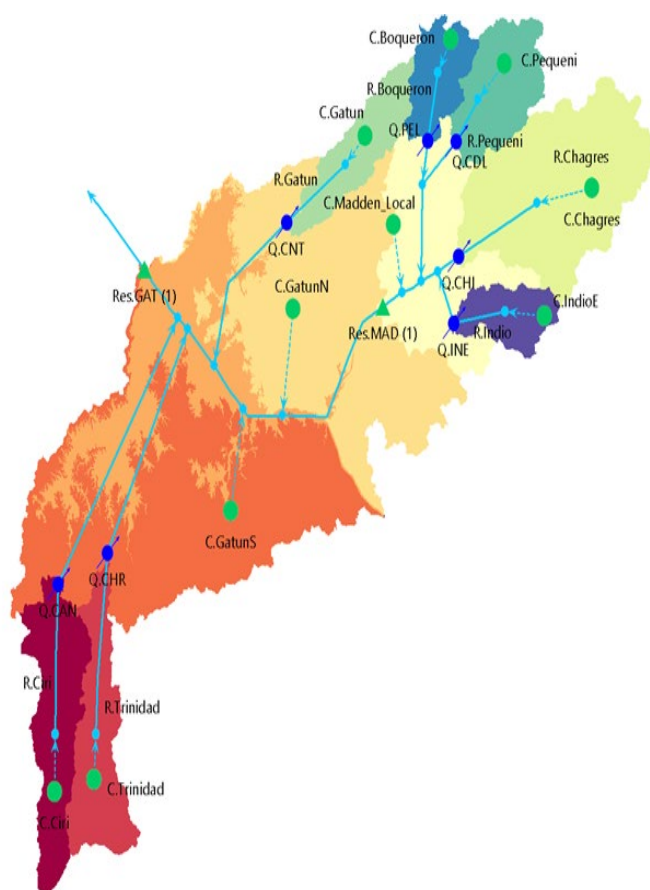
Como se ha explicado anteriormente, el cálculo hidrológico estará integrado en el modelo global de oferta-demanda desarrollado sobre el WEAP. Por lo tanto, el cálculo hidrológico partirá del esquema general de subcuencas, empleado por el WEAP,

que, a su vez, ha sido previamente pensado para poder integrar las diferentes disciplinas involucradas en el análisis oferta-demanda. La Cuenca completa se modela a escala de subcuencas, es decir, se ha dividido en subcuencas tanto aforadas como no aforadas.

Las subcuencas aforadas se corresponden con las áreas de cabecera de la CHCP, las cuales han sido divididas tomando como punto de cierre de las

subcuencas la ubicación de las estaciones hidrométricas existentes. Por su parte, las subcuencas no aforadas, se corresponden con las áreas que drenan directamente al embalse Alhajuela y al embalse Gatún, por cada una de las vertientes norte y sur⁷ de la Cuenca. Estas subcuencas no aforadas están formadas por el conjunto de las áreas aguas abajo de las estaciones hidrométricas más las áreas drenantes a todos los pequeños cauces que vierten directamente a dichos embalses.

Figura 15 Esquema topológico del módulo hidrológico en WEAP



Fuente: Equipo PIOTA, 2021.

Sobre este esquema se introducen los diferentes datos requeridos para el cálculo hidrológico, principalmente, de tipo climático y de caracterización del terreno, a través de parámetros. Una vez se tienen todos los datos necesarios para el cálculo hidrológico, se procede al ajuste de los parámetros de las subcuencas de cabecera, aforadas mediante la comparación con los caudales y volúmenes registrados en las estaciones de aforo. En estas

subcuencas, el proceso de ajuste se realiza sobre los parámetros hidrológicos, debido a que dentro del balance hídrico tiene mucho mayor volumen la oferta hídrica respecto al volumen de demandas.

Posteriormente, en las subcuencas locales de los embalses se aplican ajustes de los parámetros hidrológicos, basados en los resultados de las subcuencas de cabecera. Con el submodelo hidrológi-

7. Terminología empleada por la sección de meteorología e hidrología (HIAM) de la Autoridad del Canal de Panamá. También denominadas vertientes noreste y suroeste.

co ajustado, se incluye en el cálculo las demandas actuales del sistema completo de la Cuenca, para, finalmente, realizar una comparación global del balance hídrico respecto a los datos disponibles en los embalses.

2.1.3.2.2

Procedencia y tratamiento de los datos

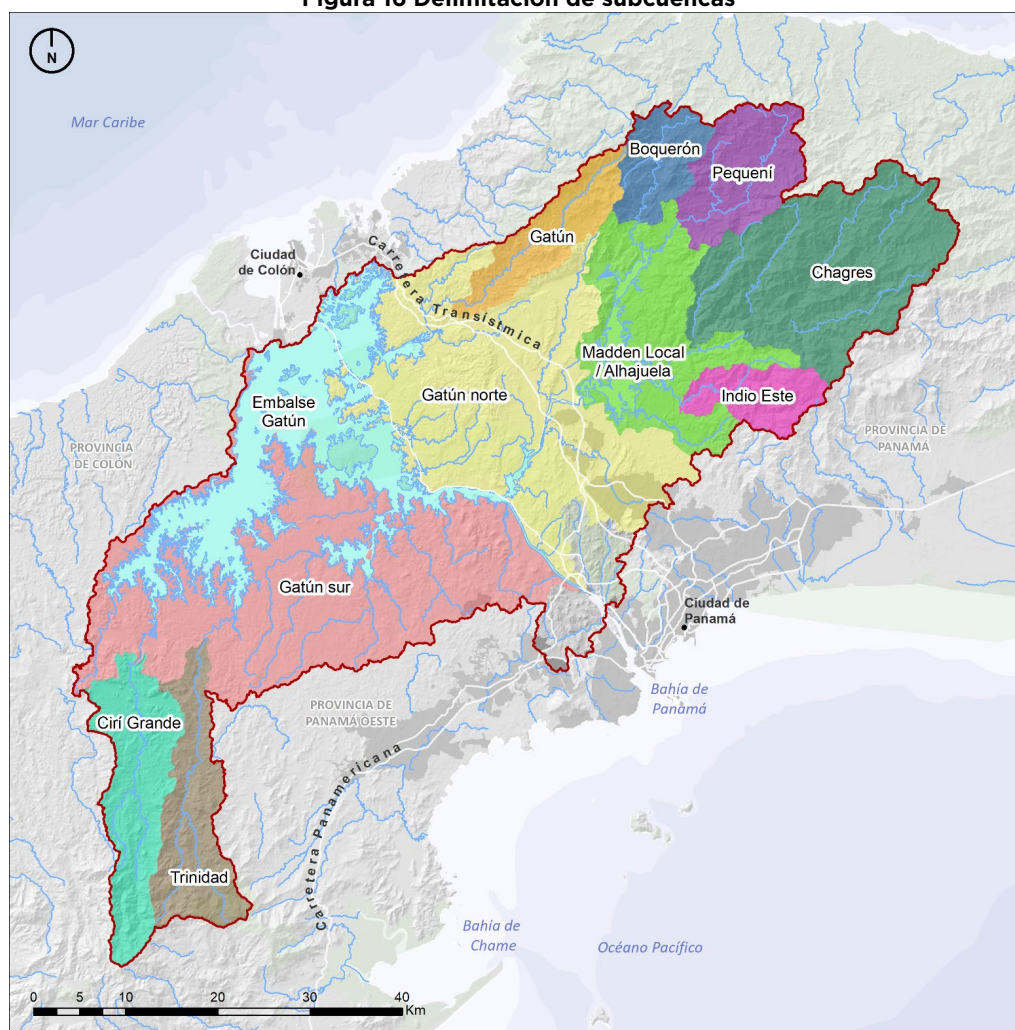
El modelo hidrológico precisa varios tipos de información, datos físicos de las subcuencas (superficie y latitud), datos climatológicos (precipitación, temperatura, humedad relativa y velocidad del viento), datos hidrométricos (caudales) y parámetros de caracterización del terreno, relacionados con los diferentes procesos físicos a simular: evapotranspiración, escorrentía, infiltración, etc.

Datos físicos

El primer grupo de datos necesarios para el cálculo hidrológico son los relativos a la descripción física de cada una de las subcuencas en que se ha dividido la CHCP. En concreto se requieren datos de superficie y latitud de cada subcuenca.

La delimitación de la Cuenca, así como la división en subcuencas, parten de la información geográfica (capa en formato *shapefile*) facilitada por la ACP. Esta división tiene en cuenta los puntos de control (estaciones hidrométricas) existentes en los principales cauces de la Cuenca y, por tanto, es un esquema óptimo para la calibración del modelo hidrológico. Tan solo se ha realizado un ajuste sobre esta base para incluir las principales islas existentes en el embalse Gatún (Barro Colorado, Tigre, Puma, Pantera, Lion Hill, etc.), dentro del área de la subcuenca directa de Gatún Norte.

Figura 16 Delimitación de subcuencas



Fuente: Equipo PIOTA, 2021.

A partir de esta delimitación y mediante herramientas SIG se han obtenido los datos de superfi-

cie y latitud media. La Tabla 8 muestra los valores resultantes en cada subcuenca:

Tabla 8. Área y latitud de cada subcuenca

Subcuencas	Área (km²)	Latitud
Boquerón	90.65	9.4416
Pequení	144.58	9.4307
Chagres	406.71	9.3353
Indio Este	80.42	9.2122
Madden Local	262.74	9.2746
Gatún	118.84	9.3714
Gatún Norte	703.53	9.2094
Cirí Grande	192.52	8.8246
Trinidad	170.89	8.8025
Gatún Sur	733.34	9.0299

Fuente: Equipo PIOTA, 2021, con base en datos de la ACP.

El dato de la superficie es empleado por el módulo hidrológico para el cálculo de la precipitación total y los consiguientes procesos hidrológicos, mientras que la latitud influye, especialmente, en la radiación solar empleada en el cálculo de la evapotranspiración.

Cabe destacar que dentro del propio WEAP, estos dos datos no se engloban dentro de una sección específica relativa a datos físicos, sino que el dato de superficie se integra dentro de la sección de “usos del suelo”, mientras que la latitud se recoge en la sección de “clima”.

Datos climatológicos/hidrológicos

En este apartado se incluyen todos los datos relativos al comportamiento hidrológico climático de la Cuenca. Para simular el proceso hidrológico en las subcuencas, el *software* requiere de datos de precipitación, temperatura, humedad relativa y velocidad del viento. Los dos primeros son de importancia prioritaria para el cálculo, por lo que se recomienda disponer de datos desgregados a la escala temporal empleada, en este caso mensuales para todo el periodo de simulación, y representativos de cada subcuenca. Mientras que, la humedad relativa y la velocidad del viento tienen una importancia secundaria y, por tanto, será suficiente con disponer de valores representativos de un año medio en toda la Cuenca.

Por su parte, para la calibración del modelo, se requieren datos de caudales aforados para un pe-

riodo suficientemente largo como para permitir la comparación con los resultados simulados. En este caso, se dispone de estaciones hidrométricas de los principales cauces de la Cuenca, que serán empleados como principal fuente de comparación en el ajuste del modelo. A continuación, se detalla el proceso de análisis y tratamiento de cada uno de los datos:

1. Precipitación

La precipitación es el dato fundamental para conocer la cantidad de agua disponible en la Cuenca. A partir de la precipitación bruta caída sobre la Cuenca, y mediante el cálculo hidrológico, se obtiene la precipitación neta, tras la abstracción de pérdidas y la simulación del balance hidrológico completo para, finalmente, obtener la oferta hídrica de la Cuenca.

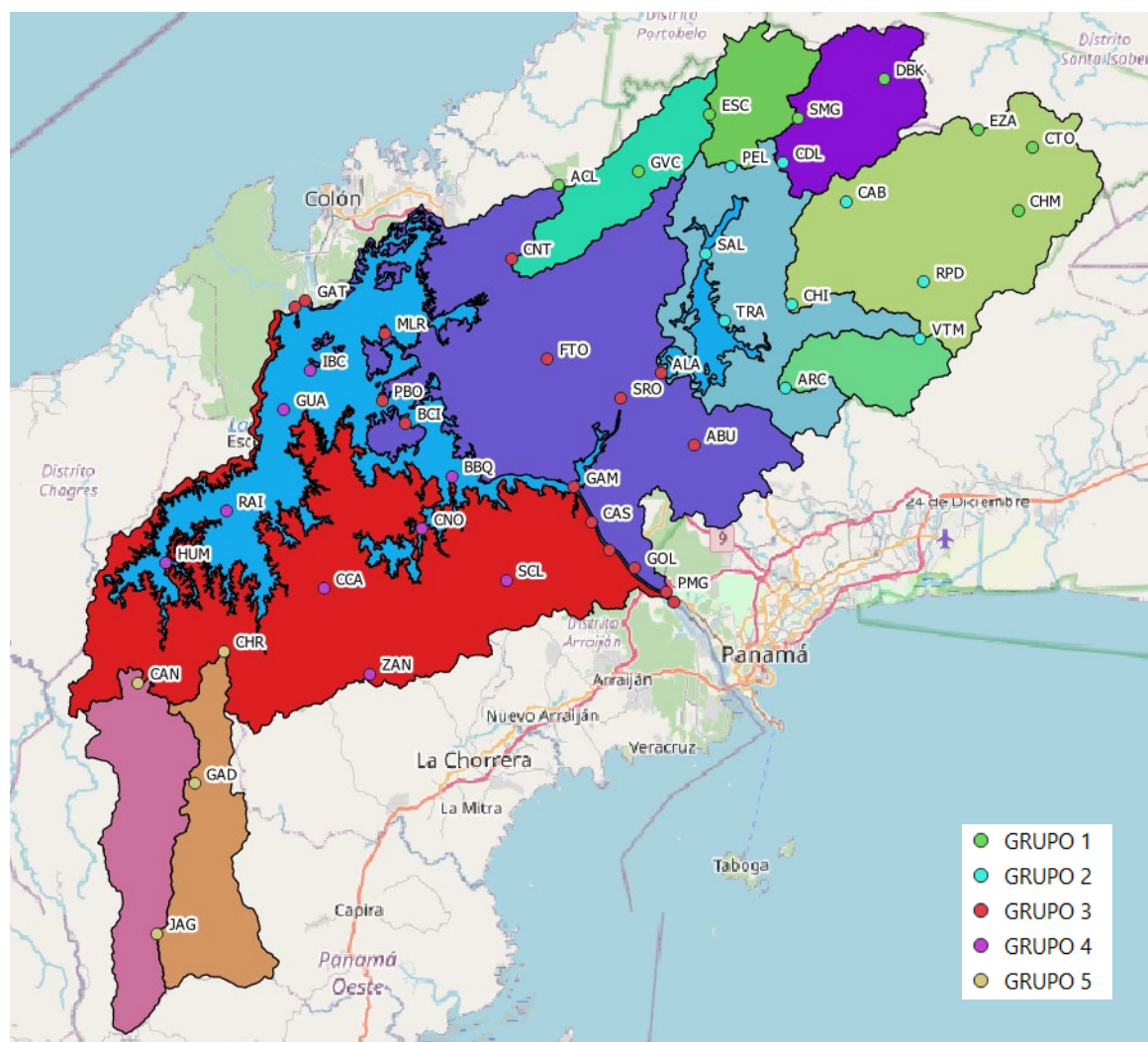
Se dispone de datos de precipitación mensual, facilitados por la ACP, de las 46 estaciones hidrometeorológicas situadas en la Cuenca. Para todas estas estaciones se dispone de una serie completa, desde febrero del año 1972 hasta enero de 2019, aunque se van a emplear únicamente aquellos datos coincidentes con el periodo de simulación seleccionado, es decir, 1988-2018.

Previo a la utilización de la información, se realiza un análisis básico de los datos mediante la obtención de estadística de los datos y el método de las dobles acumulaciones o dobles masas. Para ello, en primer lugar, se agrupan las estaciones en con-

juntos homogéneos, atendiendo a su situación física (localización y altura) y sus características pluviométricas (precipitación media anual y coeficiente de variación). Así se obtienen cinco grupos que por su localización pueden describirse como:

- Grupo 1: estaciones situadas en la cabecera de la vertiente norte, situadas mayormente a cotas altas.
- Grupo 2: estaciones situadas a cotas medias de la vertiente norte, situadas en los alrededores de la Cuenca concerniente al embalse de Alhajuela.
- Grupo 3: estaciones situadas a cotas bajas de la vertiente norte, situadas principalmente en la subcuenca de Gatún Norte.
- Grupo 4: estaciones situadas a cotas bajas de la vertiente sur, situadas principalmente en la subcuenca de Gatún Sur.
- Grupo 5: estaciones situadas en la cabecera de la vertiente sur, situadas mayormente a cotas medias y altas.

Figura 17 Agrupación estaciones homogéneas



Fuente: Equipo PIOTA, 2021.

Posteriormente, en cada uno de estos grupos se selecciona una estación de referencia, cuya ubicación y datos tengan valores intermedios respecto al resto de su grupo.

En la Tabla 9 se muestran las características de las estaciones y su organización por grupos, resaltando la estación de referencia:

Tabla 9. Grupos homogéneos y estación de referencia

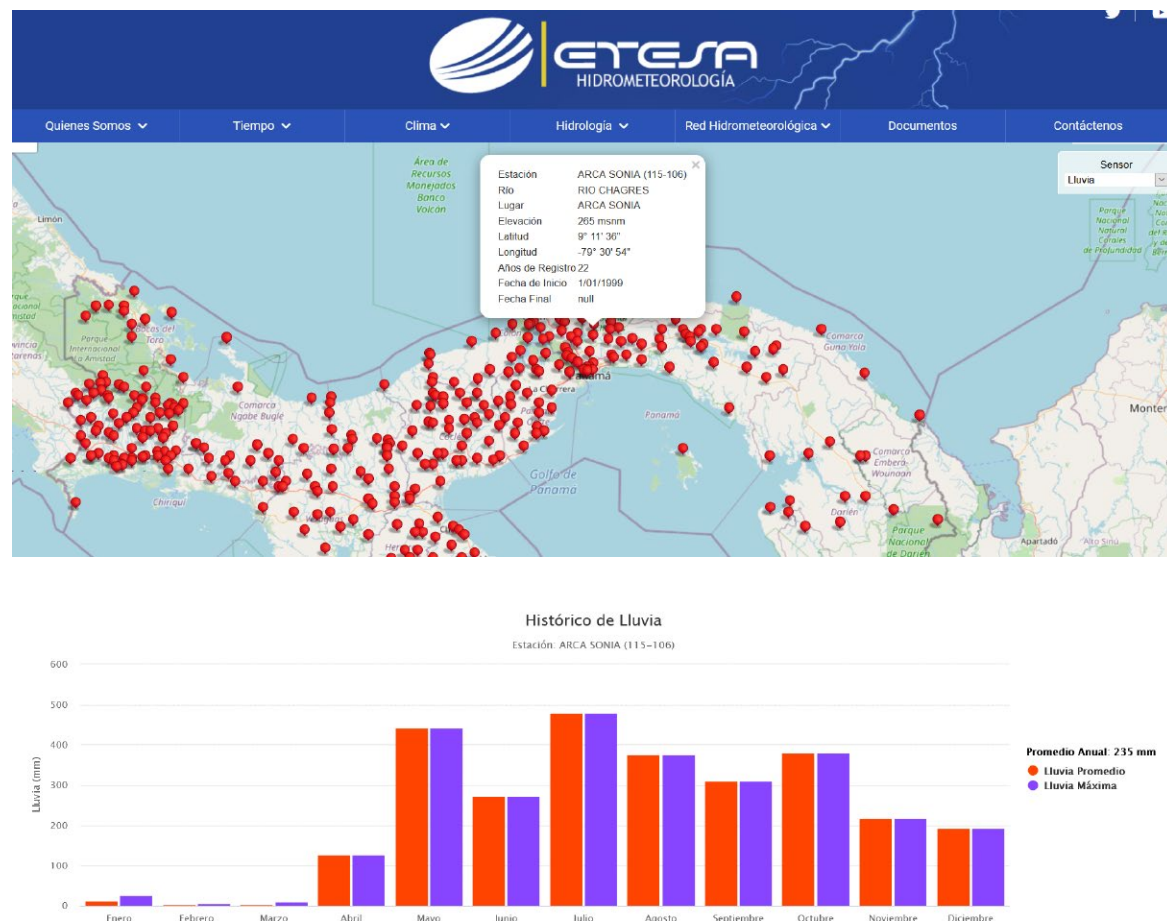
Código estación	Nombre estación	Altura (m)	Promedio anual precipitación (mm)	Coef. Variación precipitación	Grupo
ACL	Agua Clara	460	3713.41	0.1896	Grupo 1
CHM	Chamón	640	3748.78	0.1998	Grupo 1
CTO	Chagrecito	490	7197.37	0.1739	Grupo 1
DBK	Dos Bocas	229	4858.79	0.1882	Grupo 1
ESC	Escandalosa	480	3414.03	0.1748	Grupo 1
EZA	Esperanza	552	4825.34	0.2009	Grupo 1
SMG	San Miguel	520	3984.59	0.1911	Grupo 1
GVC	Valle Central de Río Gatún	253	2570.04	0.2271	Grupo 1
ARC	Arca Sonia	265	8106.29	0.2021	Grupo 2
CAB	Chico Cabecera	340	3422.67	0.2109	Grupo 2
CDL	Candelaria	98	3240.26	0.1887	Grupo 2
CHI	Chico	104	2674.42	0.1742	Grupo 2
PEL	Peluca	107	3000.59	0.2035	Grupo 2
RPD	Río Piedras	192	2679.02	0.2038	Grupo 2
SAL	Salamanca	82	2343.60	0.2332	Grupo 2
TRA	Tranquilla	64	2562.12	0.1872	Grupo 2
VTM	Vistamares	969	3038.11	0.1946	Grupo 2
ALA	Alhajuela	40	2295.78	0.1714	Grupo 3
BCI	Barro Colorado	34	2552.72	0.2514	Grupo 3
ABU	Buenos Aires	125	2520.00	0.1849	Grupo 3
CAS	Cascadas	47	2218.65	0.1444	Grupo 3
CNT	Ciento	38	2963.89	0.1852	Grupo 3
EMH	Empire Hill	61	2119.49	0.1747	Grupo 3
FTO	Frijolito	349	2297.37	0.1816	Grupo 3
GAM	Gamboia	31	2132.03	0.1603	Grupo 3
GAT	Gatún	31	2816.11	0.1622	Grupo 3
GOL	Gold Hill	180	1940.81	0.1861	Grupo 3
GTW	Gatún West	33	2781.18	0.1771	Grupo 3
MIR	Miraflores	20	2084.21	0.1604	Grupo 3
MLR	Monte Lirio	34	2752.72	0.2039	Grupo 3
PBO	Punta Bahía	25	2551.48	0.2270	Grupo 3
PMG	Pedro Miguel	31	2135.44	0.1218	Grupo 3
SRO	Santa Rosa	28	2360.53	0.1800	Grupo 3
BBQ	Barbacoa	53	2390.99	0.2145	Grupo 4
CCA	Cerro Cama	120	2287.17	0.1910	Grupo 4
CNO	Caño	33	2149.54	0.1953	Grupo 4
GUA	Guacha	29	2275.37	0.2320	Grupo 4
HUM	Humedad	31	2406.04	0.1919	Grupo 4
IBC	Isla Bruja Chiquita	24	2437.36	0.2242	Grupo 4
RAI	Las Raíces	34	2248.45	0.2207	Grupo 4
SCL	Santa Clara	102	2288.77	0.1831	Grupo 4
ZAN	Zanguenga	112	2135.96	0.1816	Grupo 4
CAN	Los Cañones	104	2553.68	0.1874	Grupo 5
CHR	El Chorro	43	2192.17	0.1893	Grupo 5
GAD	Gasparillal	346	2229.69	0.1950	Grupo 5
JAG	Jagua	546	2772.64	0.1771	Grupo 5

Fuente: Equipo PIOTA, 2021 con datos de la ACP.

Del análisis estadístico básico de los datos, tan solo se observa una discrepancia relevante en la precipitación media de la estación de Arca Sonia (ARC): esta presenta un valor muy elevado respecto al resto de estaciones de su grupo, y que no justifica ni su localización ni su altura. Para contrastar este dato se acude a la información disponible en la página web de ETESA (<https://www.hidromet.com.pa/es/clima-historicos>), donde se

encuentra un resumen del histórico de lluvia de esta estación. Según esta información la estación de Arca Sonia tiene una precipitación media mensual de 235 mm (2,820 mm al año), mientras que el valor obtenido de los datos disponibles es de 8,106 mm al año (que supone un promedio de 676 mm al mes). Por lo tanto, se decide no emplear la estación Arca Sonia en el cálculo de la precipitación areal de cada subcuenca.

Figura 18 Datos de precipitación en la estación Arca Sonia de ETESA



Fuente: ETESA (<https://www.hidromet.com.pa/es/clima-historicos>).

Para reforzar esta decisión, se ha realizado un ejercicio adicional que consiste en calibrar la subcuenca de Indio Este (única subcuenca aforada afectada por el área de influencia de la estación Arca Sonia), considerando los valores de precipitación de esta estación y sin considerarla. La variación de parámetros necesaria, para alcanzar un resultado satisfactorio de calibración, con los datos de precipitación de la estación y sin ella; y, a su vez, comparando respecto a la variación de los parámetros de las subcuencas vecinas, muestran efectivamente

una discordancia. En concreto, si se emplean los datos de la estación Arca Sonia, se requiere aumentar entre un 250% y 300% el valor inicialmente estimado del parámetro del suelo Kc (coeficiente de cultivo); mientras que, si no se emplea la estación, el porcentaje de variación es del -5%. En las subcuencas vecinas este coeficiente una vez calibrado varía entre un -25% y un 35%.

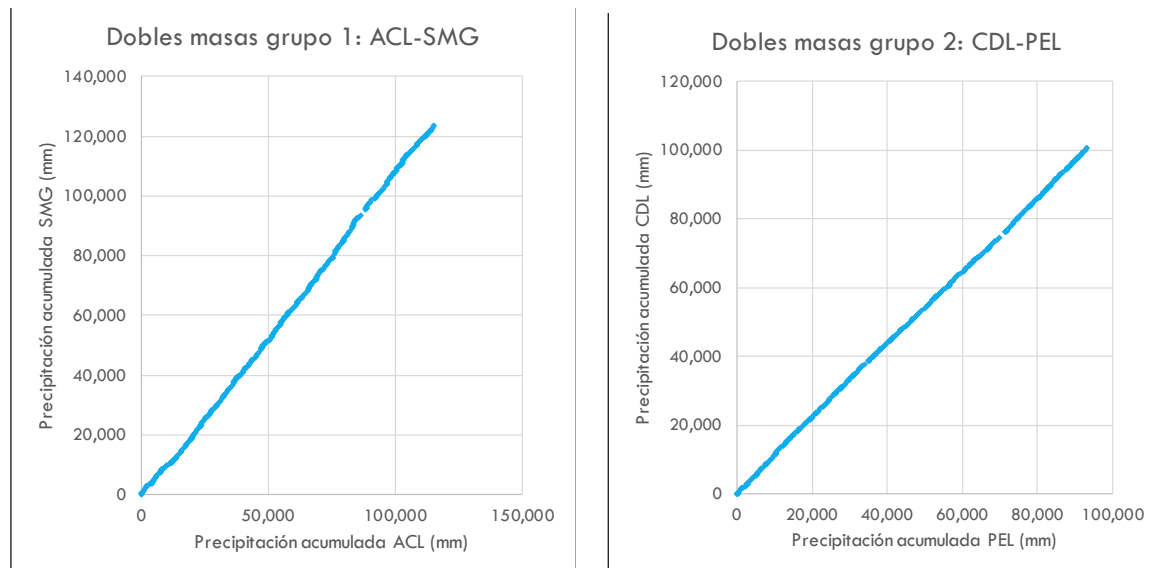
Finalmente, se aplica el método de las dobles masas, comprobando el ajuste de la precipitación

media de cada estación, respecto a la estación de referencia de su grupo. El método se basa en la premisa de que la precipitación acumulada de una estación, respecto a otra estación de características homogéneas, presenta una relación lineal a lo largo del tiempo. De este modo se pueden evidenciar errores de varios tipos (mediciones puntuales incorrectas, errores sistemáticos en la medición, cambios de localización o condiciones de una esta-

ción, etc.), eliminar datos incorrectos e incluso corregir esta información.

Se realizan las gráficas, en cada uno de los grupos, acumulando la precipitación mensual para el periodo de simulación. El análisis de los resultados muestra una buena tendencia lineal en todas las estaciones, lo que permite validar los datos de precipitación de todas las estaciones.

Figura 19 Ejemplo gráficos doubles masas



Fuente: Equipo PIOTA, 2021 con datos de la ACP.

El reparto espacial de la precipitación se obtiene mediante la utilización del método de los polígonos de Thiessen, el cual permite establecer los porcentajes de influencia de las estaciones, sobre cada subcuenca, por un criterio de cercanía. Los coeficientes de Thiessen se obtienen como relación de

la superficie del polígono correspondiente dentro de la subcuenca, respecto a la superficie total de la subcuenca. Posteriormente, la precipitación a aplicar, en cada subcuenca, será el resultado de ponderar los valores de precipitación, de cada estación, por su porcentaje de influencia.

$$P_m = \sum \frac{A_i}{A} * P_{i,m} = \frac{A_1}{A} * P_{1,m} + \frac{A_2}{A} * P_{2,m} + \frac{A_3}{A} * P_{3,m} + \dots$$

Donde:

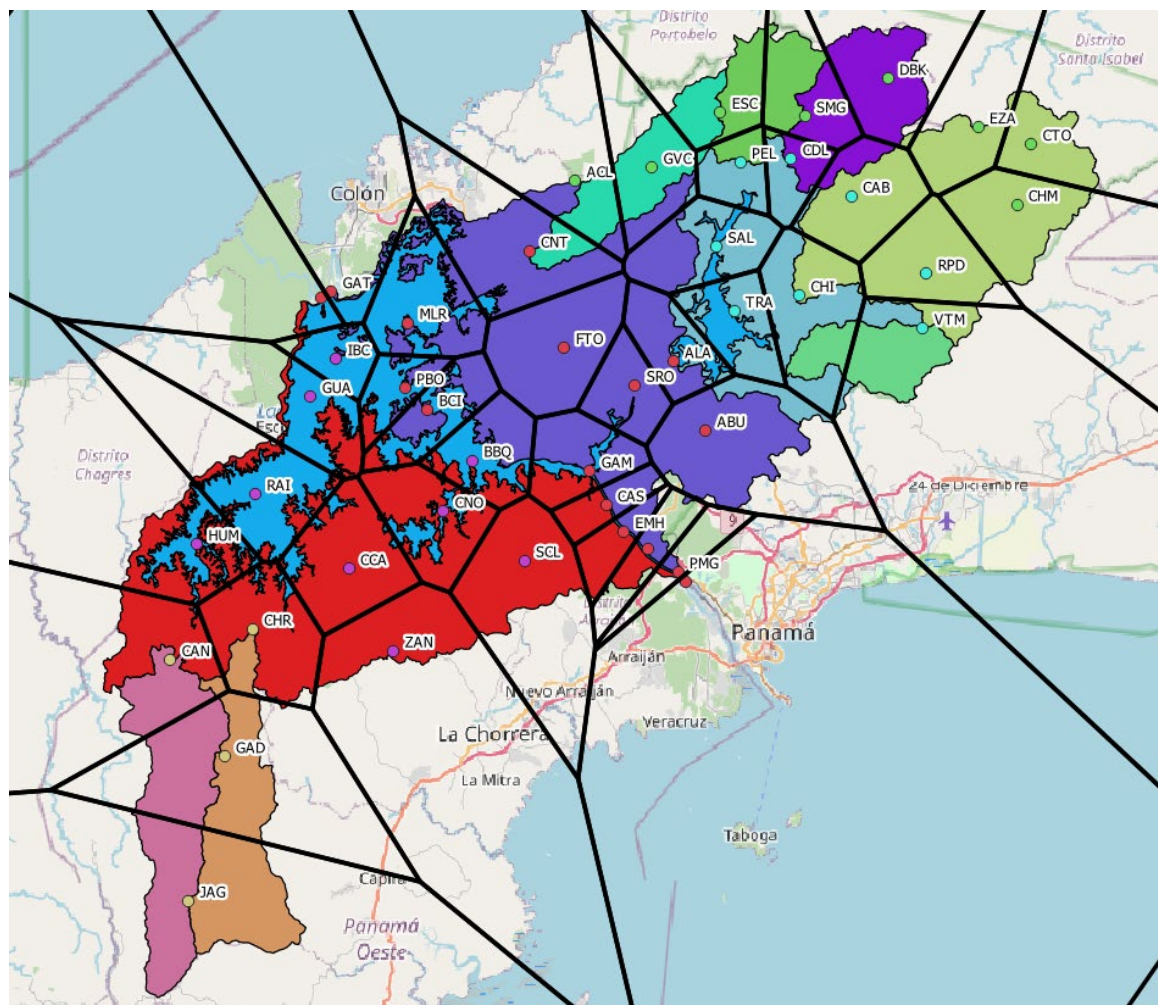
- P_m es la precipitación media ponderada del mes m en la subcuenca considerada.
- P_i la precipitación en la estación i el mes m
- A la superficie total de la subcuenca
- A_i la superficie del polígono de la estación i

Tabla 10. Coeficiente de Thiessen por subcuenca

Código	Boquerón	Pequení	Chagres	Indio Este	Madden Local	Gatún	Gatún Norte	Cirí Grande	Trinidad	Gatún Sur
ACL	-	-	-	-	0.04600	-	0.06271	-	-	-
ALA	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ARC	-	-	-	-	-	-	0.04151	-	-	0.02573
BBQ	-	-	-	-	-	-	0.04567	-	-	0.00979
BCI	-	-	-	-	0.07032	-	0.16193	-	-	-
ABU	-	0.10612	0.19466	-	0.01015	-	-	-	-	-
CAB	-	-	-	-	-	-	-	0.23286	0.02042	0.08412
CAN	-	-	-	-	-	-	0.02186	-	-	0.02471
CAS	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.14317
CCA	0.01989	0.11565	-	-	0.08531	-	-	-	-	-
CDL	-	-	0.06232	0.30664	0.26979	-	-	-	-	-
CHI	-	-	0.22095	-	-	-	-	-	-	-
CHM	-	-	-	-	-	-	-	-	0.08546	0.12684
CHR	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.10367
CNO	-	-	-	-	-	0.12965	0.14083	-	-	-
CNT	-	-	0.13584	-	-	-	-	-	-	-
CTO	0.00014	0.54608	0.00377	-	-	-	-	-	-	-
DBK	-	-	-	-	-	-	0.01203	-	-	0.03292
EMH	0.38444	-	-	-	-	0.22706	-	-	-	-
ESC	-	0.00036	0.11987	-	-	-	-	-	-	-
EZA	-	-	-	-	-	-	0.17276	-	-	-
FTO	-	-	-	-	-	-	-	0.36563	0.37180	0.00049
GAD	-	-	-	-	-	-	0.06586	-	-	0.02356
GAM	-	-	-	-	-	-	0.00570	-	-	0.00001
GAT	-	-	-	-	-	-	0.01221	-	-	0.01456
GOL	-	-	-	-	-	-	0.00037	-	-	0.00343
GTW	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.03298
GUA	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.07878
HUM	-	-	-	-	-	-	0.00276	-	-	0.00154
IBC	-	-	-	-	-	-	-	0.40151	0.52231	-
JAG	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.00001
MIR	-	-	-	-	-	-	0.05999	-	-	-
MLR	-	-	-	-	-	-	0.01447	-	-	0.00806
PBO	0.14298	-	-	-	0.10804	0.01154	0.00001	-	-	-
PEL	-	-	-	-	-	-	0.00354	-	-	0.00151
PMG	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.03240
RAI	-	-	0.21971	-	0.00003	-	-	-	-	-
RPD	-	-	-	-	0.17863	-	0.05024	-	-	-
SAL	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.13904
SCL	0.45255	0.23180	-	-	-	-	-	-	-	-
SMG	-	-	-	-	-	-	0.07683	-	-	-
SRO	-	-	-	-	0.16700	-	0.00039	-	-	-
TRA	-	-	-	-	0.00739	0.41067	0.02451	-	-	-
GVC	-	-	0.04289	0.69337	0.05736	-	-	-	-	-
VTM	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.11268
ZAN	-	-	-	-	0.04600	-	0.06271	-	-	-

Fuente: Equipo PIOTA, 2021.

Figura 20 Polígonos de Thiessen

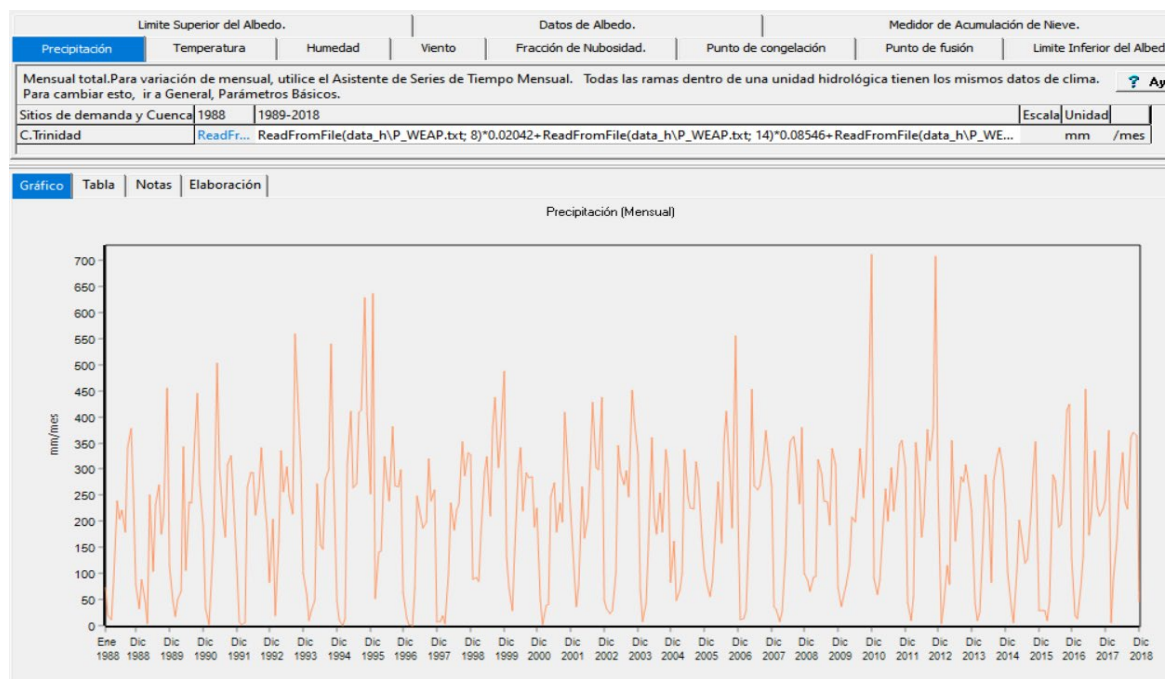


Fuente: Equipo PIOTA, 2021.

La precipitación de cálculo se obtiene directamente, dentro del WEAP, mediante la programación de la fórmula anterior en cada subcuenca; haciendo referencia a un archivo global, con las precipitaciones por estación de la serie completa. De este modo, el programa se encarga de obtener la serie de preci-

pitación areal, ponderada mes a mes, a lo largo de todo el periodo de estudio. Este cálculo, dentro del WEAP, permitirá en el futuro emplear el mismo modelo para calcular otros periodos de simulación o ampliar la serie a futuros registros, con tan solo actualizar el archivo global de precipitaciones.

Figura 21 Serie de precipitación areal 1988-2018 subcuenca Trinidad, en WEAP



Fuente: Equipo PIOTA, 2021.

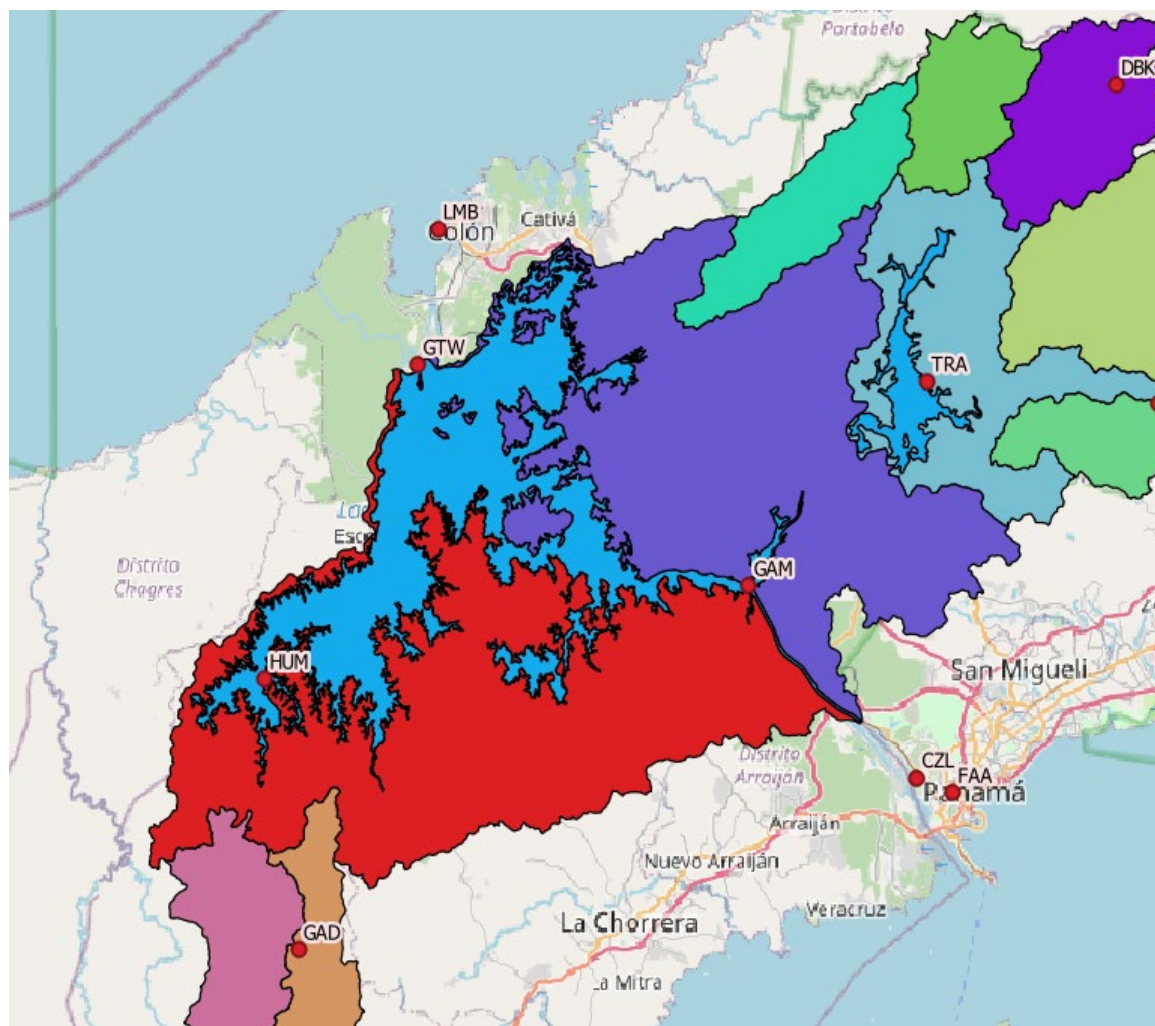
2. Temperatura

La temperatura es el segundo dato en importancia, a la hora de realizar un cálculo hidrológico del recurso disponible. A través de la serie de temperaturas, se obtienen una de las principales pérdidas por evapotranspiración.

Se dispone de los datos, facilitados por la ACP, de 11 estaciones con mediciones de temperatura, situadas dentro de la Cuenca o en sus cercanías. Se

trata de datos de temperatura media con una periodicidad de medición general horaria que, en algunos años y estaciones, disminuye hasta duraciones diezminutales. En el caso de la temperatura, las series disponibles no son completas ni homogéneas, en cuanto al periodo de medición. Si bien, alguna de las estaciones dispone de datos desde año 1975 al año 2020, en otras estaciones no se dispone de datos de todo el periodo de cálculo (1988-2018), por lo que se hace necesario realizar un tratamiento y relleno de los datos.

Figura 22 Estaciones termométricas



Fuente: Equipo PIOTA, 2021.

El primer paso consiste en adecuar los datos a la escala de trabajo mensual; para ello, se calcula la temperatura promedio mensual en cada estación. Posteriormente, se eliminan aquellos datos erróneos, cuyas diferencias son muy elevadas con los meses anterior y posterior, así como respecto a datos de ese mismo mes, pero de otros años. Estos valores erróneos están asociados, principalmente, a los cortes de mediciones en la serie y casos don-

de se tiene mediciones de unas pocas horas o días para obtener el valor medio del mes completo.

Sobre esta base, se realiza el recuento de meses con dato en cada estación. La Tabla 11 muestra el número de meses con dato, coloreado en verde aquellos años completos, en amarillo los años con algunos meses incompletos y, en rojo, los años sin dato.

Tabla 11. Número de meses con dato de temperatura

AÑO	CZL	DBK	FAA	GAD	GAM	GTW	HUM	JAG	LMB	TRA	VTM
1975	0	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0
1976	0	0	12	0	0	0	0	0	0	0	0
1977	0	0	12	0	0	0	0	0	0	0	0
1978	0	0	12	0	0	0	0	0	0	0	0
1979	0	0	12	0	2	0	0	0	0	0	0
1980	0	0	12	0	12	0	0	0	0	0	0
1981	0	0	12	0	12	0	0	0	0	0	0
1982	0	0	12	0	12	0	0	0	0	0	0
1983	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0
1984	0	0	9	0	12	0	0	0	0	0	0
1985	0	0	12	0	12	0	0	0	0	0	0
1986	0	0	12	0	12	0	0	0	0	0	0
1987	0	0	12	0	12	0	0	0	0	0	0
1988	0	0	12	0	12	0	0	0	0	0	0
1989	0	0	12	0	12	0	0	0	0	0	0
1990	0	0	12	0	12	0	0	0	0	0	0
1991	0	0	12	0	12	0	0	0	0	0	0
1992	0	0	12	0	12	0	0	0	0	0	0
1993	0	0	12	0	12	0	0	0	0	0	0
1994	0	0	12	0	12	0	0	0	0	0	0
1995	0	0	12	0	12	0	0	0	0	0	0
1996	0	0	12	0	12	0	0	0	0	0	0
1997	0	0	12	0	12	0	0	0	0	0	0
1998	0	0	12	0	12	0	0	0	0	0	0
1999	0	0	12	0	12	0	0	0	0	0	0
2000	0	0	12	0	12	0	0	0	7	0	4
2001	0	0	12	4	12	0	0	0	12	0	12
2002	0	0	12	7	12	0	0	0	12	0	11
2003	0	0	12	11	12	0	0	0	12	0	12
2004	0	0	12	12	12	0	0	0	12	0	12
2005	0	0	12	12	12	0	0	0	12	0	12
2006	0	0	12	12	12	7	0	0	12	0	12
2007	12	0	12	12	12	12	0	9	12	4	12
2008	12	5	12	12	12	12	0	12	12	12	12
2009	12	8	12	12	12	10	0	12	12	12	12
2010	11	5	12	12	12	10	3	12	12	12	11
2011	12	3	12	12	12	11	12	12	12	12	8
2012	12	0	11	12	12	12	12	4	12	12	0
2013	12	0	12	12	12	12	12	10	12	12	0
2014	10	0	12	11	12	12	12	0	9	12	0
2015	11	11	7	8	8	12	11	11	11	0	11
2016	12	10	12	12	12	12	10	12	12	10	12
2017	12	12	12	12	12	12	12	12	12	11	8
2018	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	0
2019	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	0
2020	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	0

Fuente: Equipo PIOTA, 2021, con datos de la ACP.

Como complemento a lo anterior, y previo al relleno de los datos faltantes, se hace un análisis global de las estadísticas de las series disponibles en cada estación. Se recopilan los principales datos de cada serie y se selecciona una estación para obtener el gradiente térmico entre estaciones. La estación de referencia seleccionada es la de Gamboa (GAM), por ser la estación situada dentro de la Cuenca que tiene el periodo de medición más amplio y mayor número de años completos.

Tomando de referencia la temperatura media anual, se calculan los gradientes térmicos respecto a la estación de referencia. El gradiente térmico indica la variación de temperatura con la altura. En condiciones normales, un orden de magnitud válido para el gradiente térmico es 0,006°C/m (6°C por cada 1000 metros de altura). A continuación, se recopila los principales datos de cada estación y el gradiente térmico obtenido:

Tabla 12. Estaciones termométricas

Código estación	Nombre estación	Altura (m)	Subcuenca	Año inicial	Año final	Años completos	Tª Media	Gradiente GAM (°C/m)
CZL	Corozal Oeste	9	Fuera de la CHCP	2007	2020	11	27.05	0.032936
DBK	Dos Bocas	229	Pequení	2008	2020	4	24.96	0.006835
FAA	Balboa FAA	10	Fuera de la CHCP	1975	2020	41	26.90	0.027443
GAD	Gasparillal	346	Trinidad	2001	2020	15	24.39	0.006121
GAM	Gamboa	31	Gatún norte	1979	2020	39	26.31	-
GTW	Gatún West	33	Gatún sur	2006	2020	11	26.88	0.378088
HUM	Humedad	31	Gatún sur	2010	2020	8	26.81	0.551216
JAG	Jagua	546	Cirí Grande	2007	2020	9	23.30	0.005863
LMB	Limón Bay	3	Fuera de la CHCP	2000	2020	18	26.93	0.021697
TRA	Tranquilla	64	Madden Local / Alhajuela	2007	2020	10	26.10	0.006659
VTM	Vistamares	969	Indio Este	2000	2017	9	20.70	0.005981

Fuente: Equipo PIOTA, 2021, con datos de la ACP.

Como se aprecia en la tabla anterior, muchas de las estaciones de la Cuenca (datos rellenos en verde) tienen un gradiente con un orden de magnitud esperado del entorno de los 0.006-0.007°C/m. En el caso de las estaciones situadas fuera de la Cuenca de estudio (Corozal Oeste, Balboa FAA y Limón Bay), se aprecia que el gradiente se encuentra en el entorno de 0.02-0.03 °C/m (datos rellenos en amarillo); esto se debe probablemente a la influencia marítima, ya que se trata de estaciones situadas en zonas costeras, prácticamente al nivel del mar. Estas estaciones no serán utilizadas, por encontrarse fuera de la Cuenca y con unas condiciones costeras que no son representativas del comportamiento del resto de subcuencas.

Finalmente, hay dos estaciones (GTW y HUM) que, aun estando dentro de la Cuenca, presentan valores de gradiente fuera de lo normal 0.35-0.55 °C/m (datos rellenos en rojo). Estos casos pueden deberse a que las diferencias de altura con la estación

de referencia son muy pequeñas; de cualquier manera, se trata de las estaciones con menor disponibilidad de series de datos anuales, y, además, la calidad de datos graficados presenta más variabilidad de la esperada. Siguiendo un criterio de prudencia, y al disponer de otras estaciones con datos, se opta por excluir las dos estaciones para la obtención de la temperatura media mensual. Por lo tanto, las estaciones seleccionadas para su utilización serán aquellas (relleno verde) que estando dentro de la Cuenca presentan valores de gradiente similares al esperado.

El relleno de datos se realiza en dos fases:

- En primer lugar, se rellenan los vacíos en la estación de referencia. Como se dispone de casi 40 años con datos, se tomará como dato la temperatura media mensual del mes a rellenar, obtenida como promedio del resto de serie con datos.

- En el resto de las estaciones seleccionadas, como ninguna de sus series es tan amplia como para emplear el criterio anterior, serán rellenas con base en la información de la estación de referencia, y aplicando el gradiente térmico calculado con anterioridad.

De este modo, se obtiene una serie de temperaturas mensuales para el periodo de 1980 (primer año completo de la estación de referencia) al año 2020. Si bien, dentro del WEAP solo se empleará el periodo de cálculo 1988-2018, el archivo queda pre-

parado por si, en futuros usos del modelo, se desea realizar cálculos adicionales.

La temperatura empleada en cada subcuenca se obtiene a partir de la serie de la estación más representativa (considerando criterios de cercanía y altura) y aplicando un gradiente térmico de $0.006^{\circ}\text{C}/\text{m}$, entre la altura de la estación y la altura media de la subcuenca. En la Tabla 13 se muestran la estación empleada en cada subcuenca, así como el gradiente total respecto a esa estación:

Tabla 13. Gradiente térmico por subcuenca

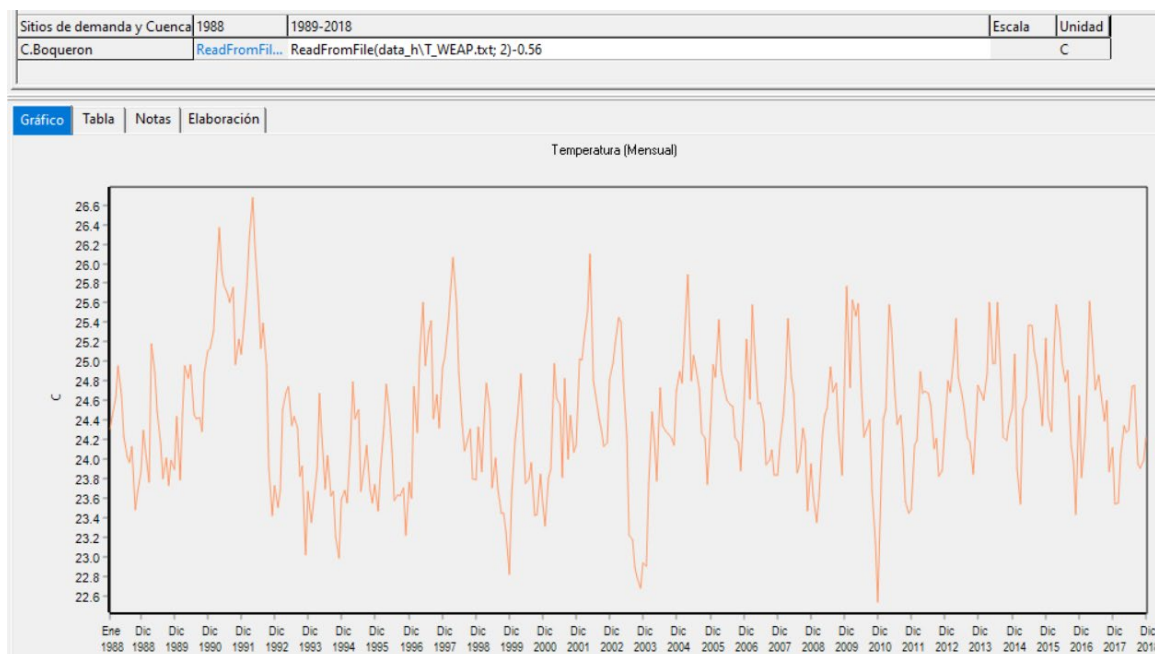
Subcuencas	Altura media subcuenca(m)	Código estación representativa	Nombre estación representativa	Altura estación (m)	Gradiente ($^{\circ}\text{C}$)
Boquerón	323	DBK	Dos Bocas	229	-0.56
Pequení	310	DBK	Dos Bocas	229	-0.49
Chagres	474	VTM	Vistamares	969	2.97
Indio Este	521	VTM	Vistamares	969	2.69
Madden Local / Alhajuela	242	TRA	Tranquilla	64	-1.07
Gatún	318	DBK	Dos Bocas	229	-0.53
Gatún Norte	132	GAM	Gamboa	31	-0.61
Cirí Grande	328	GAD	Gasparillal	346	0.11
Trinidad	324	GAD	Gasparillal	346	0.13
Gatún Sur	103	GAM	Gamboa	31	-0.43

Fuente: Equipo PIOTA, 2021 con datos de la ACP.

Finalmente, es dentro del WEAP donde se obtiene la temperatura de cálculo, mediante la programación de la fórmula que, haciendo referencia a un archivo global con las series de temperatura por estación, aplica el gradiente global de cada subcuenca. De este modo, el programa se encarga de calcular la serie de temperaturas, mes a mes, a lo

largo de todo el periodo de estudio. Este cálculo, dentro del WEAP, permitirá en un futuro emplear el mismo modelo para calcular otros periodos de simulación, o ampliar la serie a futuros registros, con tan solo actualizar el archivo global de temperaturas.

Figura 23 Serie de temperatura 1988-2018 subcuenca Trinidad, en WEAP



Fuente: Equipo PIOTA, 2021.

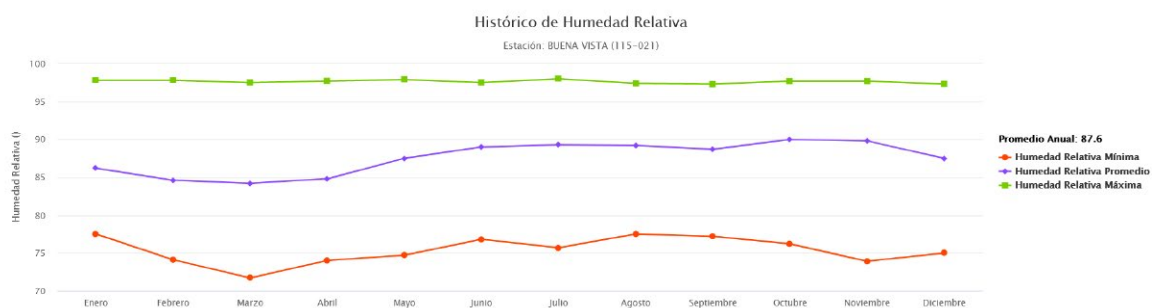
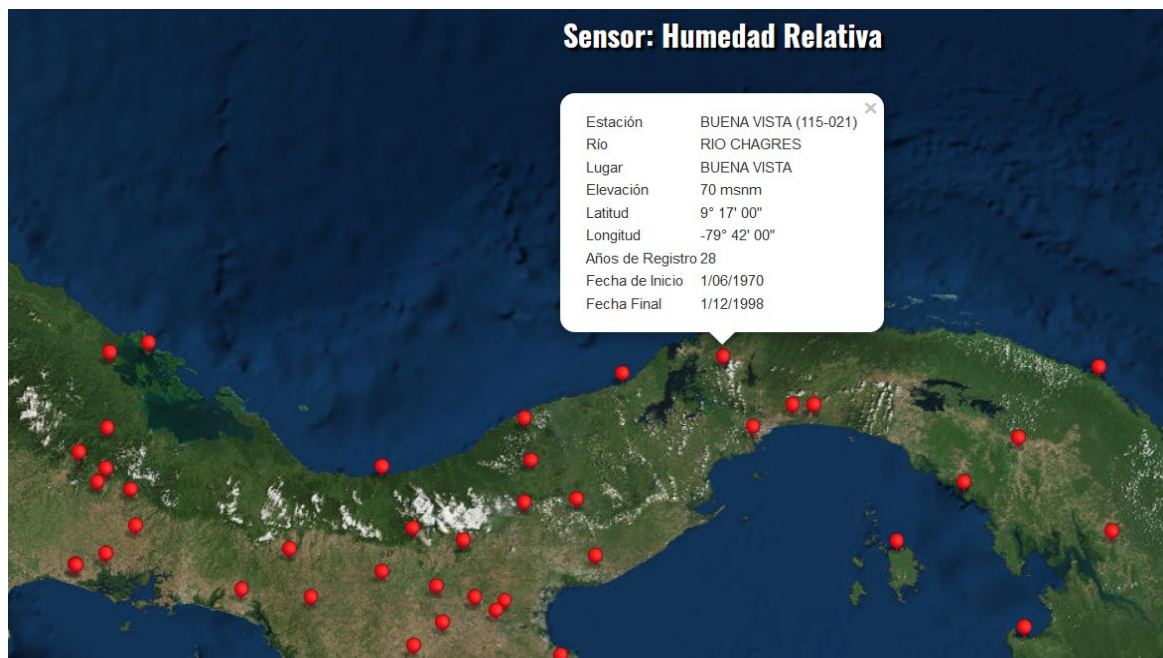
3. Humedad relativa y velocidad del viento

La humedad relativa y la velocidad del viento tienen una importancia menor, respecto a la temperatura y la precipitación. Estos datos son empleados por el módulo hidrológico para calcular la evapotranspiración, pero con una influencia menor al resto de variables. Por tanto, es suficiente emplear datos de un año promedio y replicar estos valores a lo largo de todo el periodo de simulación. Para ello,

como fuente de información, se emplean los datos mensuales del año promedio de una estación situada dentro de la Cuenca o en las inmediaciones, disponible en la web de ETESA.

Para la humedad relativa se emplean los datos de la estación de Buena Vista (código ETESA 115-021), que se encuentra dentro de la Cuenca y dispone de una serie de datos de 28 años. Las estadísticas de la estación y los valores para año promedio se muestran en las siguientes figuras.

Figura 24 Datos de humedad relativa



Fuente: ETESA (<https://www.hidromet.com.pa/es/clima-historicos>)

Tabla 14. Humedad relativa

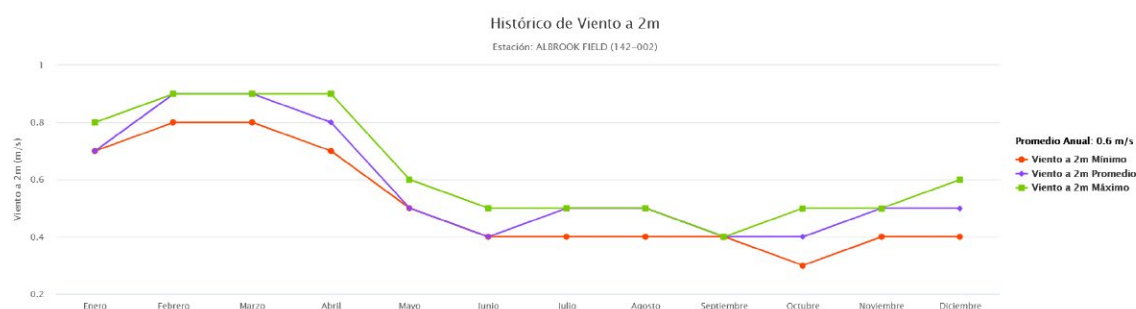
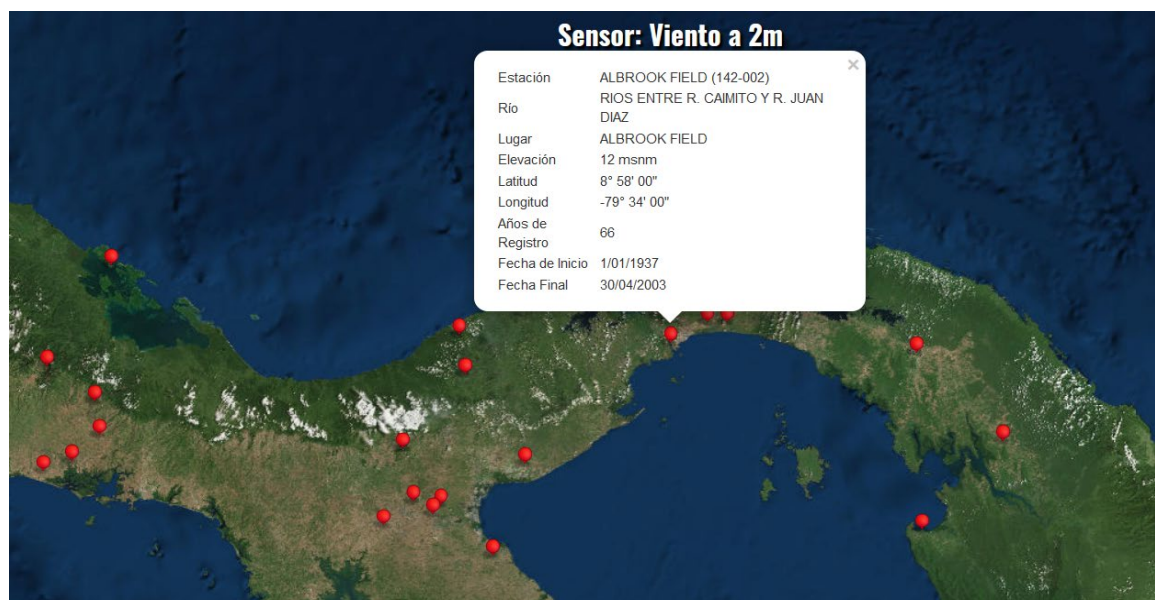
Mes	Humedad promedio (%)
ENE	86.2
FEB	84.6
MAR	84.2
ABR	84.8
MAY	87.5
JUN	89.0
JUL	89.3
AGO	89.2
SEP	88.7
OCT	90.0
NOV	89.8
DIC	87.5

Fuente: Equipo PIOTA, 2021. Datos de ETESA (<https://www.hidromet.com.pa/es/clima-historicos>).

En el caso de la velocidad del viento, el dato concreto que se requiere es la velocidad del viento a 2 metros de altura. Para esta variable, la estación

más cercana a la Cuenca es Albrook Field (142-002) con 66 años de registro.

Figura 25 Datos de velocidad del viento a 2 metros



Fuente: ETESA (<https://www.hidromet.com.pa/es/clima-historicos>).

Tabla 15. Velocidad del viento

Mes	Velocidad viento a 2 metros (m/s)
ENE	0.7
FEB	0.9
MAR	0.9
ABR	0.8
MAY	0.5
JUN	0.4
JUL	0.5
AGO	0.5
SEP	0.4
OCT	0.4
NOV	0.5
DIC	0.5

Fuente: Equipo PIOTA, 2021 Datos de ETESA (<https://www.hidromet.com.pa/es/clima-historicos>).

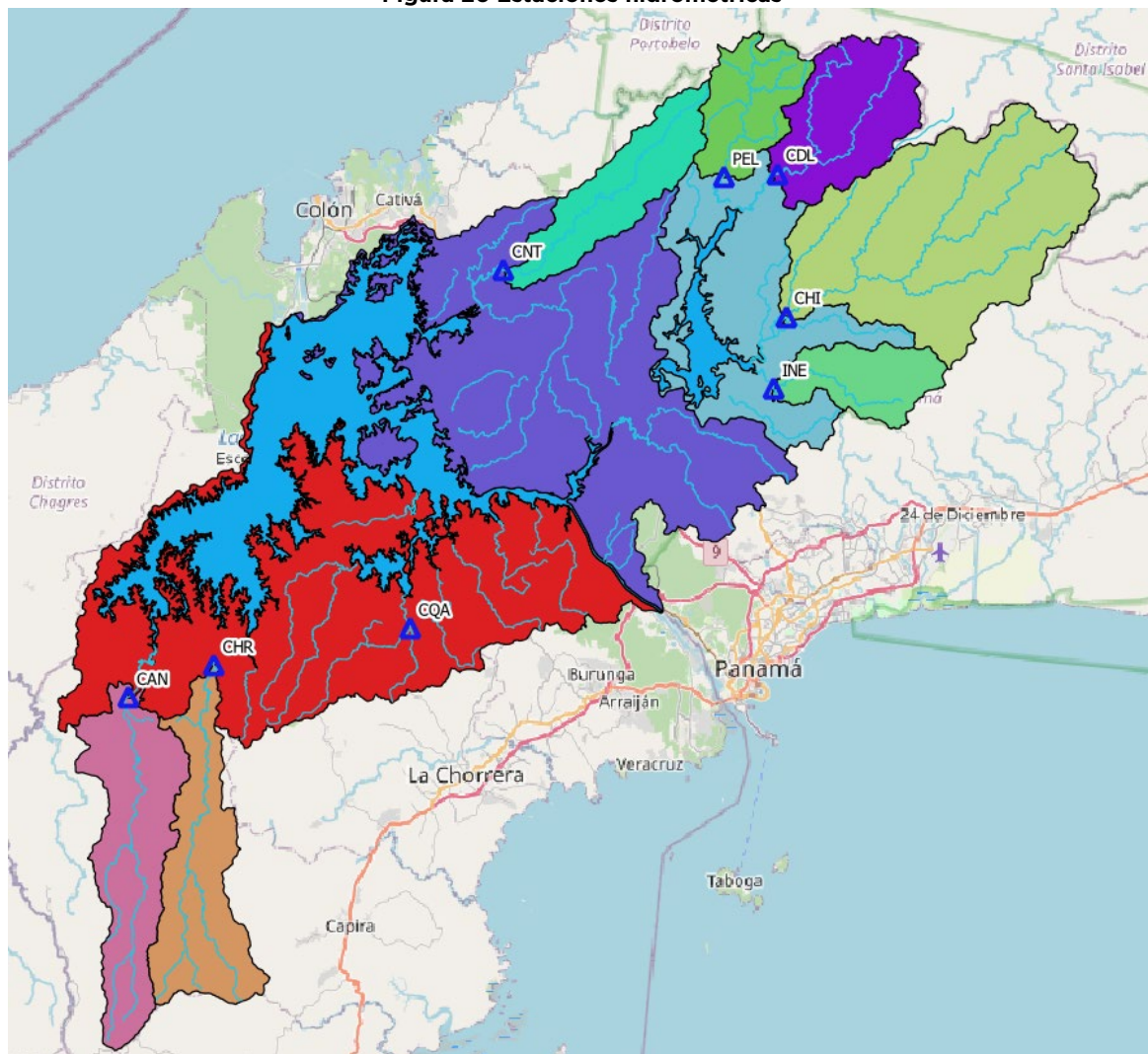
4. Caudales

Por último, para la calibración del módulo hidrológico se necesitan datos de aforos en los ríos. Se dispone de registros de 8 estaciones hidrométricas, situadas sobre los principales ríos de las sub-

cuenas. La mayor parte de las estaciones disponen de datos del periodo comprendido entre el año 1934 hasta el año 2019, por lo que la coincidencia con el periodo de simulación es completa. Tan solo la estación de Guarumal (INE), en la subcuenca In-

dio Este, tiene un periodo inferior al de simulación. este caso, el periodo de comparación en el proce-
Sus datos van del año 2008 al 2019, por lo que en so de calibración se ajusta a los datos disponibles.

Figura 26 Estaciones hidrométricas



Fuente: Equipo PIOTA, 2021.

Tabla 16. Estaciones hidrométricas

Nombre estación hidrométrica	Código estación hidrométrica	Subcuenca	Año inicial	Año final	Años completos
Peluca	PEL	Boquerón	1934	2019	86
Candelaria	CDL	Pequení	1934	2019	86
Chico	CHI	Chagres	1934	2019	86
Guarumal	INE	Indio Este	2008	2019	12
Ciento	CNT	Gatún	1934	2019	86
Los Cañones	CAN	Cirí Grande	1934	2019	86
El Chorro	CHR	Trinidad	1934	2019	86
Caño Quebrado	CQA	Gatún Sur	1989	2019	31

Fuente: Equipo PIOTA, 2021.

Cabe destacar que la división de subcuencas del modelo WEAP responde a la ubicación de las estaciones hidrométricas, de modo que funcionen

como puntos de control. De hecho, en el cálculo hidrológico, la información hidrométrica será empleada como referencia para comparar los resulta-

dos del modelo y ajustar los parámetros del suelo para minimizar las diferencias en lo que se entienden como proceso de calibración, el cual se detalla más adelante.

Parámetros del suelo

Los parámetros de usos de suelo dentro de WEAP, para el método empleado, son los presentados en la Tabla 17 junto al balde, donde se aplican conforme al esquema presentado con anterioridad.

Tabla 17. Parámetros del suelo en el modelo WEAP

Balde 1	Kc	Coeficiente de Cultivo.
	RRF	Factor de Resistencia a la Escorrentía
	Sw	Capacidad de Agua del Suelo
	Z1	Z1 Inicial
	F	Dirección Preferencial del Flujo
Balde 2	Ks	Conductividad de la Zona Radicular
	Dw	Capacidad Agua Profunda
	Z2	Z2 Inicial
	Kd	Conductividad Profunda

Fuente: Equipo PIOTA, 2021.

Los datos iniciales se estiman a partir de la información de usos del suelo (clasificación de usos de suelo de 2020 de la CHCP que se incluyó en el capítulo de diagnóstico del PIOTA), mapas hidrogeológicos disponibles en el Atlas Ambiental de la República de Panamá 2010 y bibliografía existente (Yates et al. 2005; Escobar & Sandoval, 2014; Amato et al. 2006; Allen et al. 1998).

Estos parámetros, que se detallan a continuación, son los que deben ajustarse durante el proceso de calibración para conseguir una buena correlación entre los caudales simulados y observados, consiguiendo una mejor respuesta hidrológica de la Cuenca.

- Conductividad de la zona radicular (Ks): determina la capacidad de que el agua se transporte como escorrentía subsuperficial y percolación (en mm/mes). Los valores iniciales de este parámetro se estimaron para cada uso de suelo.
- Conductividad de la zona profunda (Kd): representa la capacidad de que el agua se transporte como flujo base (en mm/mes). Este valor es constante para todos los usos de suelo.
- Factor de resistencia a la escorrentía (RRF): factor adimensional que controla la escorrentía

directa y le influyen directamente el grado de cobertura vegetal y la pendiente de la cuenca. Cuanto mayor sea el valor, menor escorrentía directa.

- Dirección preferencial de flujo (f): este parámetro determina la proporción de agua en la zona radicular (balde superior) que fluye como escorrentía subsuperficial o se infiltra al balde inferior, variando entre 1 (flujo 100% horizontal) hasta 0 (100% vertical).
- Coeficiente de Cultivo (Kc): depende del tipo de cultivo (uso del suelo) y afecta directamente a la evapotranspiración. Los valores iniciales se estimaron a partir de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) según Allen et al. (1998).
- Capacidad de agua del suelo en la zona de raíces (Sw): es la capacidad de agua efectiva, en mm, que es capaz de almacenar la capa superior del suelo (balde 1).
- Capacidad de agua profunda (Dw): la capacidad de agua efectiva, en mm, que tiene el balde inferior. Este valor es único para cada cuenca y no varía con los distintos usos del suelo.

- Z1 y Z2: representan los almacenamientos de agua relativos (en %) de los balde superior e inferior, respectivamente.

La estimación inicial se apoya en la bibliografía existente, ya mencionada, para cuantificar los parámetros en función de los usos del suelo disponibles en cada subcuenca. El análisis de estos parámetros es una etapa importante de la modelación hidrológica, sin embargo, está sujeta a la posterior calibración y ajuste para mejorar la representatividad del modelo.

Los parámetros dependen, principalmente, de los usos del suelo, por lo que dentro del esquema de funcionamiento del WEAP, se hace necesario indicar, en cada subcuenca, la superficie de cada tipo de suelo, lo cual se realiza mediante herramientas de cálculo SIG.

2.1.3.2.3

Proceso de calibración del módulo hidrológico

Previo a la utilización del modelo y la realización de cálculos, es recomendable ejecutar un proceso de calibración, donde se busque minimizar diferencias entre los resultados del modelo y datos medidos en campo.

El proceso de calibración, a su vez, se divide en dos fases: una primera de calibración, donde se ajustan los parámetros; y otra de validación, donde se verifica que los parámetros ajustados son correctos. Finalmente, el proceso de calibración debe ser acorde a los periodos de simulación previstos, así como los objetivos globales buscados en el modelo.

El proceso de calibración, de cualquier modelo matemático, consiste en modificar los parámetros inicialmente estimados de manera que los valores simulados numéricamente, se ajusten a los datos conocidos, con el objetivo de aumentar la representatividad del modelo respecto a la realidad medida.

En el caso de un modelo hidrológico, en el cual intervienen multitud de parámetros estimados a partir de información secundaria, al no ser viable la caracterización completa de la Cuenca a partir de

mediciones directas en campo, el proceso de calibración resulta fundamental. En este caso concreto, el ajuste se realiza tomando como referencia los caudales medidos en las estaciones hidrométricas de las subcuencas aforadas.

Se puede apreciar, en las ecuaciones del balance hidrológico (detalladas anteriormente en la descripción del método hidrológico), que la relación entre los distintos términos que intervienen es no lineal. En el proceso de calibración, se comienza detectando, mediante un análisis de sensibilidad general, los parámetros más sensibles en el modelo de estudio. El resultado de este análisis muestra que los cuatro parámetros principales son K_c , K_s , Sw y f ; afectando, los dos primeros, en mayor medida a los volúmenes y, los dos últimos, a caudales pico y base. Por tanto, son estos parámetros sobre los que se realizan los ajustes, principalmente.

Por su parte, el proceso de validación consiste en verificar la bondad del ajuste de los parámetros calibrados, comparando los resultados del modelo con los datos registrados en un periodo de tiempo diferente al empleado en la calibración. Finalmente, y una vez validada la calibración de parámetros, se realizará la simulación del periodo total de cálculo, que refleje de manera representativa el comportamiento hidrológico de la CHCP.

El primer paso para concluir el proceso completo (calibración-validación-simulación), consiste en determinar los periodos de tiempo que comprenderán cada cálculo, y que serán en función de los datos disponibles. De cara al proceso de calibración, se va a emplear como periodo completo un intervalo de 30 años (1989-2018), siendo el año inicial 1988 un año de calentamiento para minimizar la influencia de las condiciones de humedad inicial del terreno estimadas. Como periodo de calibración, se escoge el último intervalo de 10 años disponible (2009-2018), por ser el más cercano a los usos del suelo empleados; mientras que los 10 años anteriores (1999-2008) se emplearán para la validación.

Sin embargo, debe puntualizarse aquí que, en la subcuenca Indio Este, no se dispone de la serie completa anteriormente mencionada, sino solo un periodo de 11 años entre 2008 y 2018. Por ello, en este caso particular, se ha utilizado el intervalo de los últimos

5 años disponibles para la calibración (2014-2018); y los 5 anteriores para la validación (2009-2013).

Para establecer el grado de correspondencia entre los caudales simulados y observados, se debe utilizar una función objetivo sobre la que se busque el valor óptimo, durante la variación de parámetros calibrados. En este caso, se han utilizado dos índices de referencia, ampliamente reconocidos en modelos hidrológicos (Moriassi et al. 2007). Estos son el coeficiente de eficiencia de Nash-Sut-

cliffe (NSE), que determina la magnitud relativa de la varianza residual (ruido) en comparación con la variación de datos observados; y el sesgo o desviación relativa de caudales (PBIAS), que evalúa el error en volumen de agua y penaliza de forma severa las épocas de caudales bajos. Un PBIAS positivo indica una subestimación y uno negativo indica una sobreestimación de caudales

Las ecuaciones que emplean estos indicadores son:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{s,i} - Q_{o,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{s,i} - \bar{Q}_o)^2}$$

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{s,i} - Q_{o,i}) * 100}{\sum_{i=1}^n Q_{o,i}}$$

Donde $Q_{s,i}$ es el caudal simulado y $Q_{o,i}$ el observado/medido para el periodo i , $\bar{Q}_o$ es el promedio de los caudales observados en los n días totales.

El índice NSE varía entre 0 y 1, generalmente, siendo 1 el ajuste perfecto. La literatura existente (Moriassi et al. 2007) indica que la calibración se puede considerar aceptable en valores superiores a 0.60 y excelente en valores superiores a 0.8. El PBIAS se mide en porcentaje (%) y se puede considerar muy

bueno para valores < 310 . Lógicamente, la exigencia de estos indicadores en la validación es menor que en la calibración, por ello se considera en la literatura como aceptable un índice de Nash-Sutcliffe superior a 0.50, siendo muy buenas las validaciones por encima de 0.70.

En la tabla 18 se recogen los criterios particulares que fueron adoptados en la calibración.

Tabla 18. Criterios de valoración de los índices NSE y PBIAS para la calibración

Valoración	PBIAS	NSE
Excelente	$< \pm 5$	0.9-1.00
Muy Bueno	$< \pm 10$	> 0.8
Bueno	$< \pm 15$	> 0.6
Insuficiente	$> \pm 15$	< 0.6

Fuente: Equipo PIOTA, 2021.

Para cuantificar el proceso de validación, los indicadores empleados son los mismos (NSE y PBIAS). Igualmente, se comprobó el ajuste de parámetros para el periodo completo de 30 años de simulación hidrológica (1989-2018).

Para el objetivo global resulta adecuado, en este caso, la priorización del ajuste de los volúmenes (PBIAS) frente a caudales pico y base, dado que el modelo debe diagnosticar, de una manera adecuada, la oferta del recurso hídrico disponible para, junto con las demandas del sistema, realizar escenarios de planificación ante variaciones futuras. De

esta forma, los parámetros más relevantes del proceso de calibración han sido el coeficiente de cultivo (Kc) y la conductividad en la zona de raíces (Ks). Además, se tiene en cuenta que los valores del PBIAS para el periodo completo fueran siempre inferiores a 35, modificando los parámetros del periodo de calibración si era necesario.

Resultados de la calibración

Se obtuvo un set de parámetros, en las distintas subcuencas, para los usos del suelo empleados que permiten ajustar la respuesta de la simulación a los caudales observados. Puede apreciarse que los cuatro parámetros sobre los que se ha actuado, para cada uso de suelo, se mueven en un rango que dependerá de cada subcuenca particular. El resto no han sufrido variaciones respecto a su estimación inicial.

Tabla 19. Rango de parámetros del modelo WEAP después de la calibración

Usos del Suelo	Kc		Sw		F		Ks		RRF	Z1	Z2	Kd	Dw
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max					
Área Poblada	0.53	0.95	200	600	0.7	1	18	50	1				
Afloramiento Rocoso y Tierra Desnuda	0.3	0.54	240	720	0.9	1	30.6	85	3.3				
Bosque Latifoliado Mixto Maduro	0.45	0.81	700	2100	0.6	0.96	54	150	9				
Bosque Latifoliado Mixto Secundario	0.6	1.08	350	1050	0.3	0.48	54	150	6.5				
Bosque Plantado de Conífera	0.75	1.25	300	900	0.3	0.48	54	150	5.5				
Bosque Plantado de Latifoliadas	0.6	1.08	350	1050	0.3	0.48	54	150	6.5				
Café	0.71	1.25	600	1800	0.6	0.96	18	50	6	30	40	100	1000
Maíz	0.9	1.25	620	1860	0.7	1	18	50	6				
Pasto	0.64	1.15	180	540	0.65	1	54	150	2				
Piña	0.23	0.41	400	1200	0.6	0.96	13.5	37.5	4.5				
Explotación Minera	0.75	1.25	250	750	0.8	1	31.5	87.5	2.5				
Rastrojo y Vegetación Arbustiva	0.26	0.47	1000	2100	0.5	0.8	36	100	3.5				
Vegetación Baja Inundable	0.9	1.25	700	2100	0.4	0.64	63	175	4				
Vegetación Herbácea	0.75	1.25	1000	2100	0.6	0.96	37.8	105	3.5				

Fuente: Equipo PIOTA, 2021.

El comportamiento del modelo hidrológico para las 7 subcuencas aforadas ha sido siempre excelente o muy bueno, según los criterios de valoración adoptados; y buenos o muy buenos, en la validación. Además, en el periodo completo, la valoración

es también buena o muy buena, quedando el PBIAS siempre por debajo del 1%, lo que se traduce en errores de volúmenes muy pequeños, idóneos para el trabajo posterior. Se resumen todos los indicadores obtenidos en la Tabla 20:

Tabla 20. Resumen de los indicadores después del proceso de calibración y validación del modelo

Periodo	Indicadores	Boqueron	Pequeni	Chagres	Indio Este*	Gatun	Ciri Grande	Trinidad
Calibración (2009-2018)	NSE	0.924	0.942	0.924	0.819	0.956	0.934	0.868
	PBIAS	4.588	2.725	5.644	1.473	6.588	3.298	4.972
Validación (1999-2008)	NSE	0.912	0.877	0.740	0.687	0.818	0.890	0.834
	PBIAS	-5.522	-3.588	-0.596	4.286	-7.118	4.201	3.946
Completo (1989-2018)	NSE	0.897	0.763	0.639	0.673	0.886	0.788	0.642
	PBIAS	0.047	-0.087	-0.307	0.453	0.133	0.164	0.000

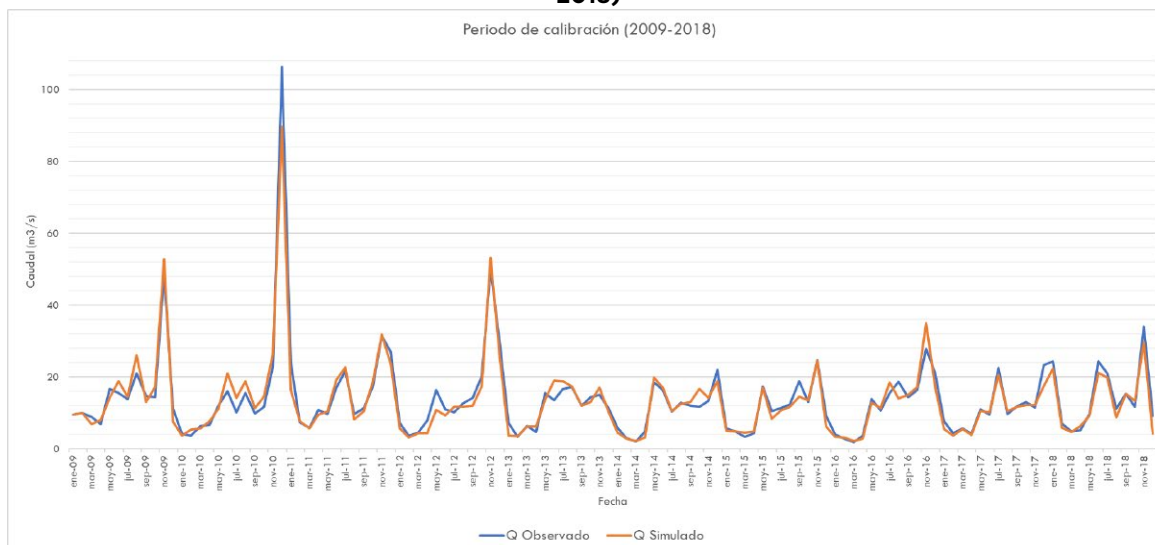
* En Indio Este no se dispone de los datos totales (1989-2018). Los periodos usados son: completo 2008-2018 (11 años), calibración 2014-2018 (5 años) y validación 2009-2013 (5 años)

Fuente: Equipo PIOTA, 2021.

A modo de ejemplo del procedimiento empleado, se recogen en las siguientes figuras la respuesta hidrológica del modelo con los caudales simulados frente a los observados para la subcuenca del río Pequeni. La primera figura ilustra el periodo de calibración (2009-2018), una vez ajustados los parámetros, y, la siguiente, muestra el intervalo de va-

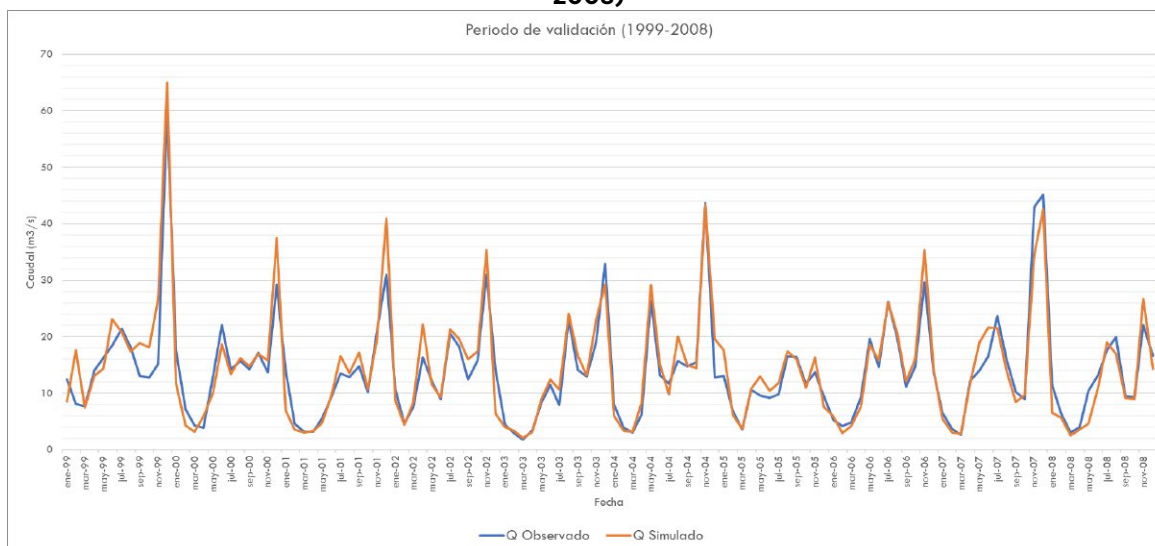
lidación (1999-2008). Como se puede comprobar, tanto con las gráficas como con los indicadores objetivo, mostrados en la tabla anterior, el ajuste final consigue reproducir de manera bastante precisa el comportamiento real de la Cuenca.

Figura 27 Caudales observados y simulados en el río Pequení para el periodo de calibración (2009-2018)



Fuente: Equipo PIOTA, 2021.

Figura 28 Caudales observados y simulados en el río Pequení para el periodo de validación (1999-2008)

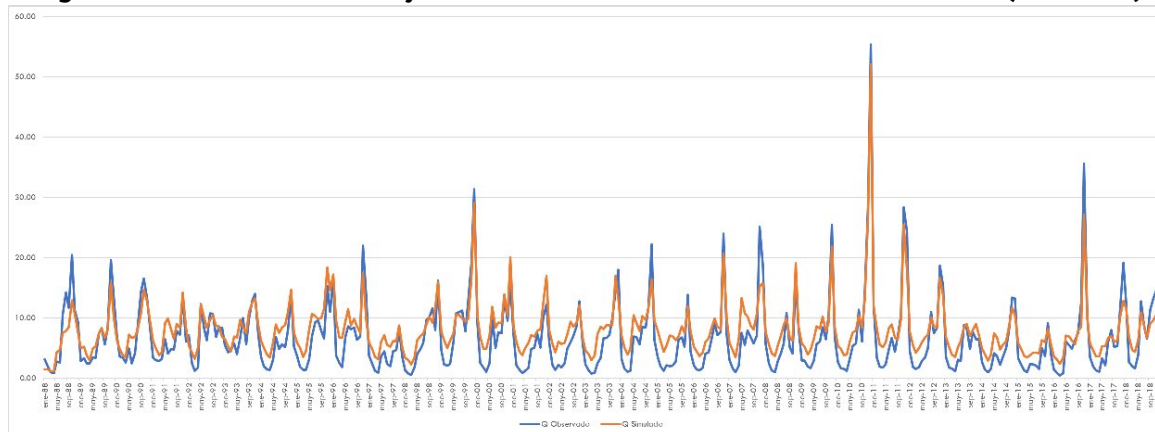


Fuente: Equipo PIOTA, 2021.

En las dos figuras siguientes se ilustra este análisis en el caso de la subcuenca Gatún; primero, mostrando la fase previa simulada antes de la calibración (parámetros inicialmente estimados); y, posteriormente, con los parámetros ya ajustados. En

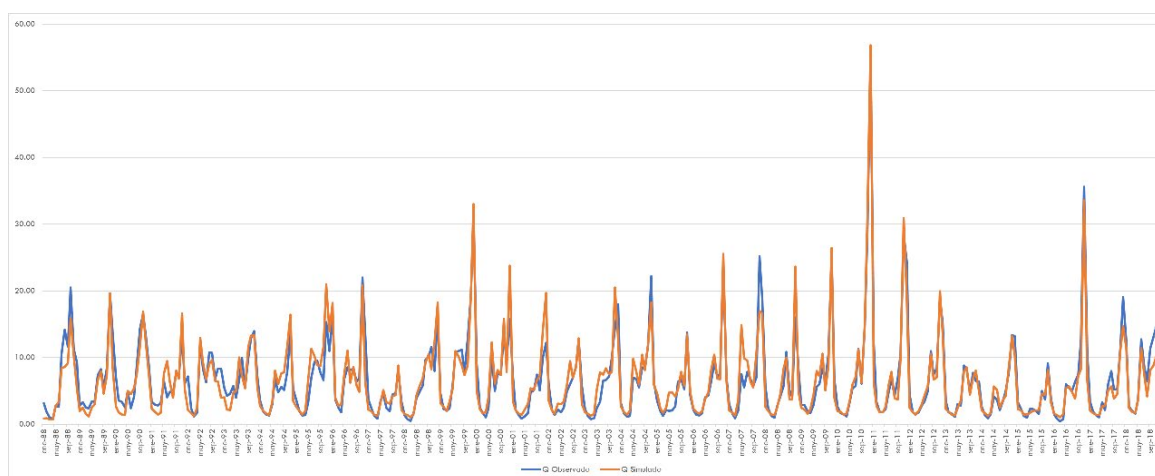
este caso, el promedio de caudales medidos en el periodo completo es de $6.56 \text{ m}^3/\text{s}$, frente a los $6.55 \text{ m}^3/\text{s}$ simulados tras la calibración. Gráficamente, se aprecia de manera clara la mejora de los resultados tras el proceso de ajuste de parámetros.

Figura 29 Caudales observados y simulados en el río Gatún con la estimación inicial (1989-2018)



Fuente: Equipo PIOTA, 2021.

Figura 30 Caudales observados y simulados en el río Gatún después de la calibración (1989-2018)



Fuente: Equipo PIOTA, 2021.

2.1.3.2.4

Conclusiones del cálculo hidrológico

El modelo hidrológico final, calibrado, permite obtener una serie calibrada de caudales en cada punto de control requerido, logrando el objetivo de cuantificar el recurso hídrico disponible. El análisis conjunto de los resultados del modelo y del estudio de demandas, permitirá evaluar los escenarios de desarrollo futuros para, finalmente, identificar las estrategias que contribuyan a reducir la vulnerabilidad del sistema. El análisis realizado de los datos, tras la calibración, muestra un comportamiento muy representativo en todas las subcuencas, lo

que aumenta la confiabilidad del modelo global para su utilización en los diferentes análisis.

2.1.4

Proceso participativo

La participación de expertos y agentes locales es clave para avanzar de manera sólida a lo largo de las diferentes etapas del proceso RDM (Figura 31). A continuación, se realiza un resumen de las actividades realizadas en el proceso participativo (también se pueden consultar aportes directos en lo indicado en la sección 2.4.2 Validación de los escenarios a modelar del presente documento).

Figura 31. Etapas del proceso RDM y talleres de participación y capacitación realizados durante la Fase de Prospectiva.



Fuente: Equipo PIOTA, 2021.

A continuación, se detallan el alcance y objetivos de las actividades organizadas para fomentar la participación de los expertos y agente locales.

- Taller Inicial: desarrollado el 11 febrero de 2021. Fue un taller de carácter técnico dirigido a expertos y profesionales con experiencia en modelación, gestión y planificación de recursos hídricos en el área de estudio. Se registraron un total de 34 personas, entre ellas personal de la ACP; (12), Ministerio de Ambiente; (8), Universidad Tecnológica de Panamá; (4), CATHALAC; (2), BID; (1), y del equipo consultor; (7). Los objetivos del taller fueron:
 - Presentación de la metodología RDM.
 - Presentación del modelo WEAP-CHCP (avance de la estructura topológica y parametrización inicial).
 - Concertación de indicadores de desempeño, de criterios y umbrales de garantía, y exploración de factores clave para la simulación de escenarios de desarrollo territorial. Para este último ejercicio se realizó una encuesta.
- Taller Intermedio: desarrollado el 8 de abril de 2021. Fue un taller de presentación de resulta-

dos abierto a una comunidad amplia de actores y agentes locales. Se registraron un total de 76 personas, que incluyó personal de la ACP, universidades, municipios del ámbito de estudio, instituciones y representantes de la Red de Jóvenes Ambientalistas, Comités Locales, etc. Los objetivos del taller fueron:

- Construcción y calibración del modelo WEAP-CHCP y control de resultados para condición de línea de base (1989-2018).
- Caracterización del clima histórico y regionalización de escenarios de cambio climático.
- Presentación de escenario de desarrollo tendencial y resultados de robustez climática.
- Conclusiones y próximos pasos.
- Taller Final: se desarrolló el 18 de mayo de 2021. Fue un taller de presentación de resultados y de participación abierto a una comunidad amplia de actores y agentes locales. Se registraron un total de 75 personas, que incluyó personal de la ACP, universidades, municipios del ámbito de estudio, instituciones y representantes de la Red de Jóvenes Ambientalistas, Comités Locales, etc. Los objetivos del taller fueron:

- Presentación y consolidación de los resultados actualizados para el escenario tendencial y ambicioso.
- Presentación del escenario concertado (trayectoria de desarrollo) y medidas de adaptación a evaluar.
- Encuesta para sondear la aceptabilidad de las medidas de adaptación.

Adicional a los talleres abiertos con los expertos y agentes locales, se organizó un curso de capacitación guiado en el uso de la herramienta WEAP en el marco del proyecto PIOTA. Este curso de capacitación estuvo dirigido a personal técnico de la ACP y del Ministerio de Ambiente. El material en formato de presentaciones y ejercicios prácticos fue ajustado a las necesidades específicas de la ACP. El curso se desarrolló entre el 10 y el 17 de marzo en tres se-

siones diarias de 4 horas de duración cada una. Los objetivos del curso de capacitación fueron:

- 1) Ofrecer una capacitación guiada sobre el uso del modelo WEAP incluyendo:
 - Funcionalidades básicas y avanzadas.
 - Destrezas específicas de especial interés para la planificación de la Cuenca y el desarrollo del PIOTA.
- 2) Trabajar directamente sobre el modelo WEAP-CHCP para consolidar su estructura y parametrización.
 - El modelo WEAP-CHCP es la herramienta de modelación que sirve de base para medir la robustez climática de la Cuenca frente a diferentes escenarios de desarrollo territorial y de cambio climático.
 - Fomenta la participación directa de los técnicos especialistas en la construcción y obtención los resultados de la fase II del proyecto

2.1.5

Identificación e inclusión de indicadores de desempeño y umbrales de garantía

WEAP permite cuantificar diferentes indicadores, que informan sobre el desempeño y capacidad de un sistema de recursos hídricos para cubrir las demandas de agua de cada uno de los usos identificados en una cuenca. Durante el Taller inicial, desarrollado el 11 de febrero de 2021, se sondeó entre los participantes la idoneidad de tres indicadores de desempeño (cobertura mensual, cobertura anual y confiabilidad) para los efectos de la planificación territorial de la Cuenca.

- Cobertura mensual. Porcentaje del requerimiento de suministro de un nodo, o conjunto de nodos, que es cubierto con los recursos disponibles en el mes simulado.

- Cobertura anual. Porcentaje del requerimiento de suministro de un nodo, o conjunto de nodos, que es cubierto con los recursos disponibles en el año simulado.
- Confiabilidad. Porcentaje de pasos de tiempo (meses o años) para los que se cubre el 100% del requerimiento de suministro.

Se seleccionó la cobertura anual promedio en el periodo de simulación de 30 años, y la cobertura anual mínima (correspondiente al año con mayor déficit hídrico) como indicadores de referencia para evaluar el comportamiento y la robustez climática del sistema para diferentes escenarios de desarrollo y horizontes temporales.

Los umbrales garantía se concertaron con personal experto de la ACP y el equipo consultor. Estos umbrales o niveles de garantía representan el valor mínimo de cobertura volumétrica que deben asegurarse para el conjunto del sistema y dan una idea del grado de tolerancia para cubrir las demandas totales de los diferentes usos. Esta tolerancia puede ajustarse de acuerdo con el indicador de desempeño utilizado y su significado.

Para el caso concreto de la CHCP, para el indicador de cobertura anual promedio se seleccionó un umbral de garantía del 95% para el sistema en su conjunto, mientras que, para la cobertura anual mínima, el cual informa sobre la cobertura en situación de máxima escasez de recursos, se adoptó un umbral del 85%. La robustez climática del sistema se calculó para ambos supuestos. Sin embargo, los estudios han puesto de relevancia que el uso de la cobertura mínima con un umbral de garantía del 85% resulta más apropiado para evaluar la efectividad de las medidas de adaptación, en términos de robustez climática.

2.2

PROSPECTIVA: TENDENCIAS Y ESCENARIO

Clima Histórico y Proyecciones





2.2

Clima histórico y proyecciones

La metodología RDM requiere el uso de un conjunto de datos climáticos históricos de referencia y de proyecciones de cambio climático, suficientemente exhaustivo y amplio, con el fin de poder acotar toda la incertidumbre climática y, de esta forma, calcular la robustez de los diferentes escenarios planteados. Por ejemplo: no es recomendable utilizar las salidas de unos pocos modelos climáticos y, en cambio, sí lo es utilizar salidas de múltiples modelos obtenidos de un ensamble. Solo así se puede acotar la incertidumbre y calcular la robustez, en base a la caracterización del rango plausible de cambios de temperatura y precipitación proyectadas para diferentes Trayectorias de Concentración Representativas (RCPs) y en referencia a las tendencias históricas.

Así, el objetivo de este capítulo es:

1. Consolidar un conjunto de observaciones de datos de precipitación y temperatura para un periodo de referencia histórico en la región de estudio, la CHCP, y analizar el comportamiento estacional e interanual de la precipitación y temperatura.

2. Procesar para la Cuenca las proyecciones climáticas de un ensamble de modelos climáticos. Validar y regionalizar estas proyecciones para la zona de estudio.
3. Caracterizar las proyecciones climáticas y el rango plausible de cambios.

2.2.1

Tendencias en el periodo histórico

En este apartado se analizan las tendencias históricas de precipitación y temperatura en la CHCP, con el objetivo de identificar posibles cambios que hayan condicionado, significativamente, la disponibilidad del recurso hídrico en la Cuenca. Para llevar a cabo esta caracterización histórica, se ha analizado la serie temporal de datos termoplumiométricos más completa y homogeneizada, correspondiente a los últimos 30 años (1988-2018). En el análisis se ha utilizado la media de la precipitación diaria recogida por las 46 estaciones pluviométricas ubicadas en la CHCP (Tabla 9), así como la media de las temperaturas media, mínima y máxima de las 3 estaciones termométricas con más datos en la Cuenca o en las proximidades: Gamboa (GAM), Gatún West (GTW) y Balboa (FAA).

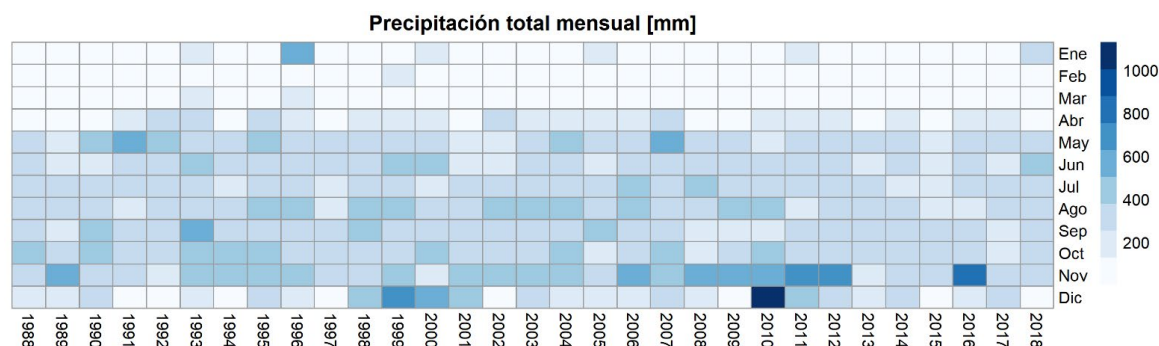
Para analizar la significancia de las tendencias encontradas se ha aplicado el test no-paramétrico de Man-Kendall⁸, idóneo para analizar series de datos ambientales con aplicaciones hidrológicas. Así mismo, en las series con significancia estadística se ha calculado la pendiente equivalente a la tendencia, mediante el cálculo del test no-paramétrico de Sen⁹.

De igual forma, para analizar con más detalle la evolución histórica de las precipitaciones se ha analizado el Índice de Precipitación Estandarizado¹⁰ (por sus siglas en inglés – Standardized Precipitation Index, SPI). El SPI fue desarrollado para poder cuantificar el déficit de precipitación para diferentes escalas temporales y, en base a ello, poder evaluar el impacto del déficit de precipitación sobre la disponibilidad de los distintos tipos de recursos hídricos. A través del uso del índice SPI, es posible cuantificar y comparar las intensidades de los déficits de precipitación entre zonas con climas muy diferentes. Además, tiene la propiedad de que puede integrarse sobre un amplio rango de esca-

las temporales, lo que hace que pueda ser utilizado como indicador de diferentes tipos de sequía, tanto aquellas que son de corta duración y que producen efectos principalmente sobre los sectores agrícola, forestal y pecuario, como para caracterizar sequías climáticas de larga duración que deriven en sequías hidrológicas. Los valores positivos del SPI indican una precipitación superior a la media, y los valores negativos del mismo, una precipitación inferior a la media.

Del análisis de los resultados obtenidos se observa (Figura 32) como la distribución de la precipitación mensual acumulada media, muestra una marcada estacionalidad, que se mantiene estable a lo largo de toda la serie temporal. Los primeros meses del año (enero, febrero y marzo) son los que recogen menos precipitaciones, distribuyéndose los valores más notables de precipitación mensual acumulada a lo largo del resto de meses del año, en especial, durante el mes de noviembre que presenta los valores más elevados.

Figura 32. Distribución de la precipitación mensual acumulada media en la CHCP (1988-2018)



Fuente: Equipo PIOTA, 2021.

Por su parte, el análisis de las precipitaciones anuales acumuladas medias (Figura 33), indica que no hay una tendencia estadísticamente significativa ($p\text{-valor} = 1$) en la serie de datos, siendo la media anual de 2,993 mm/año. Del mismo modo, la Figura 34 muestra la alternancia de periodos más se-

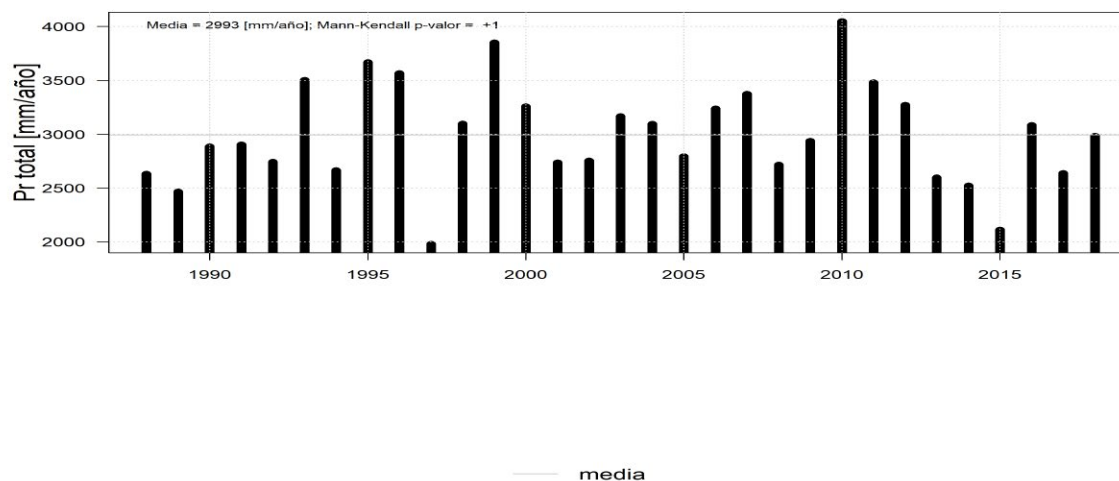
cos con periodos más húmedos a lo largo de los 30 años, mediante la evolución temporal del SPI-12 meses. Estos cambios están condicionados en gran medida por la ocurrencia de fenómenos de El Niño o La Niña. Así pueden observarse periodos húmedos de gran magnitud y duración coinciden-

8. Kendall, M. G. (1975). Rank correlation methods. Charles Griffin. London. p.120.
9. Sen, P.K (1968) Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall's Tau. Journal of the American Statistical Association, 63, 1379-1389.
10. McKee, T. B., N. J. Doesken, and J. Kliest, 1993: The relationship of drought frequency and duration to time scales. In *Proceedings of the 8th Conference of Applied Climatology, 17-22 January, Anaheim, CA*. American Meteorological Society, Boston, MA. 179-184.

tes con el fenómeno de La Niña (1995-1996, 1999-2001 y 2010-2011), y los correspondientes periodos secos de similar magnitud y duración coincidentes con fuertes eventos de El Niño (1988-1991, 1997-1998 y 2014-2016). Cuando el fenómeno de El Niño es muy intenso, la probabilidad de formación de huracanes en el Mar Caribe disminuye. Por tanto,

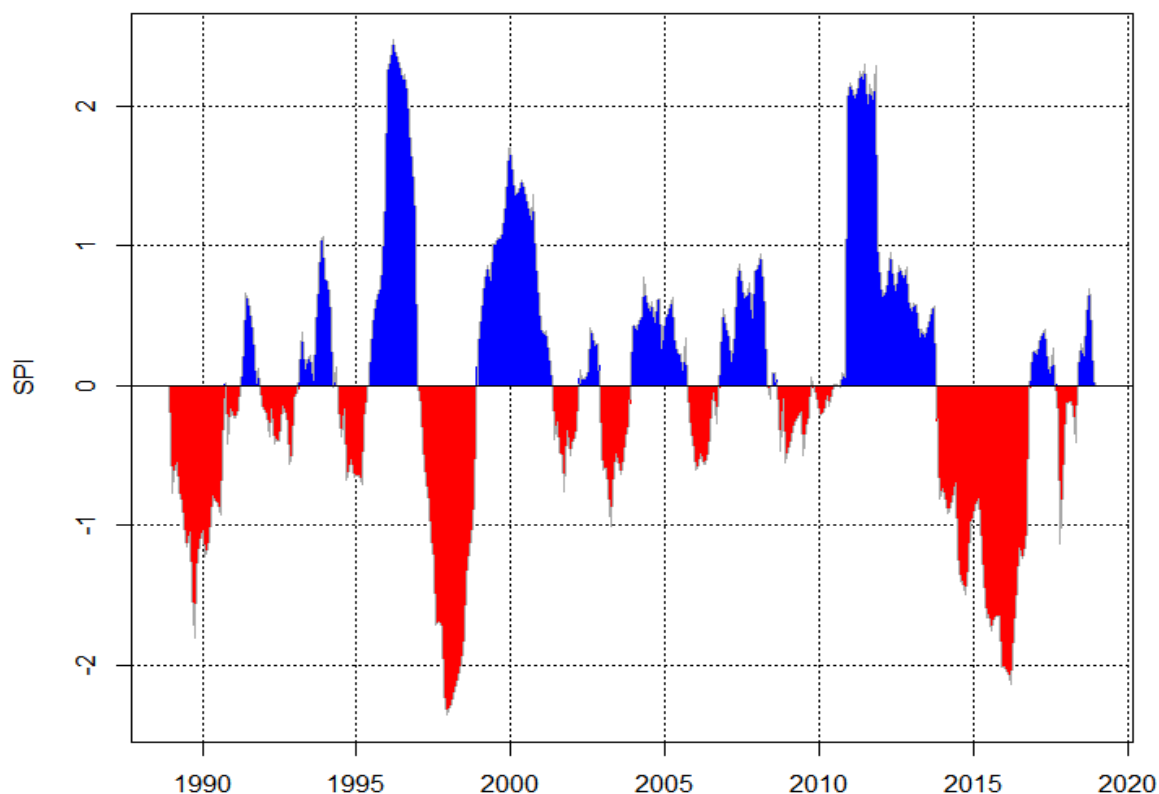
se da una disminución de la cantidad de lluvia acumulada. Tanto el fenómeno del 97-98 como el del 14-16, presentan unas magnitudes similares. Si bien el último periodo seco registrado presenta una duración mayor que el anterior, del análisis de la serie no puede afirmarse una mayor recurrencia de este tipo de fenómenos.

Figura 33. Precipitación anual acumulada media en la CHCP (1988-2018)



Fuente: Equipo PIOTA, 2021.

Figura 34. Evolución histórica del SPI en la CHCP (1988-2018)

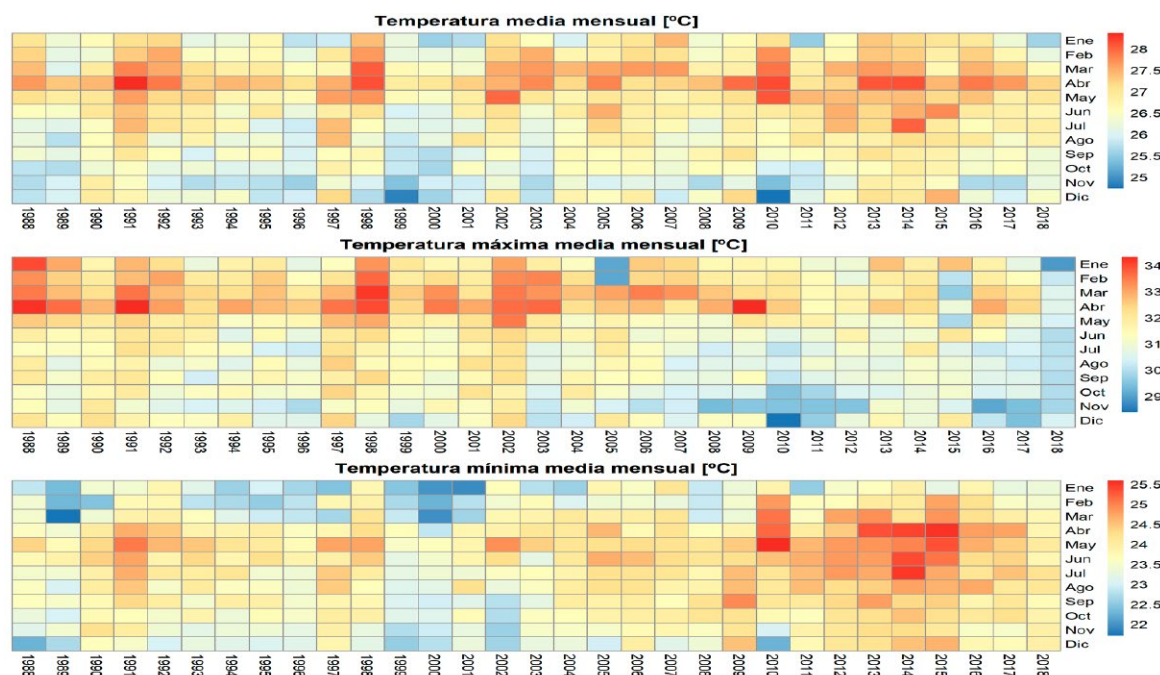


Fuente: Equipo PIOTA, 2021.

Por último, en la estacionalidad de las temperaturas promedio de la zona (Figura 35), se observa como los meses más calurosos del año son normalmente los de la primera mitad del año (enero-julio), frente a una segunda mitad del año con temperaturas menos elevadas. Si bien es cierto que, en los últimos años del periodo (a partir de 2000), se registran temperaturas ligeramente más cálidas durante todo el año, en comparación con los años anteriores, el análisis de las temperaturas anuales

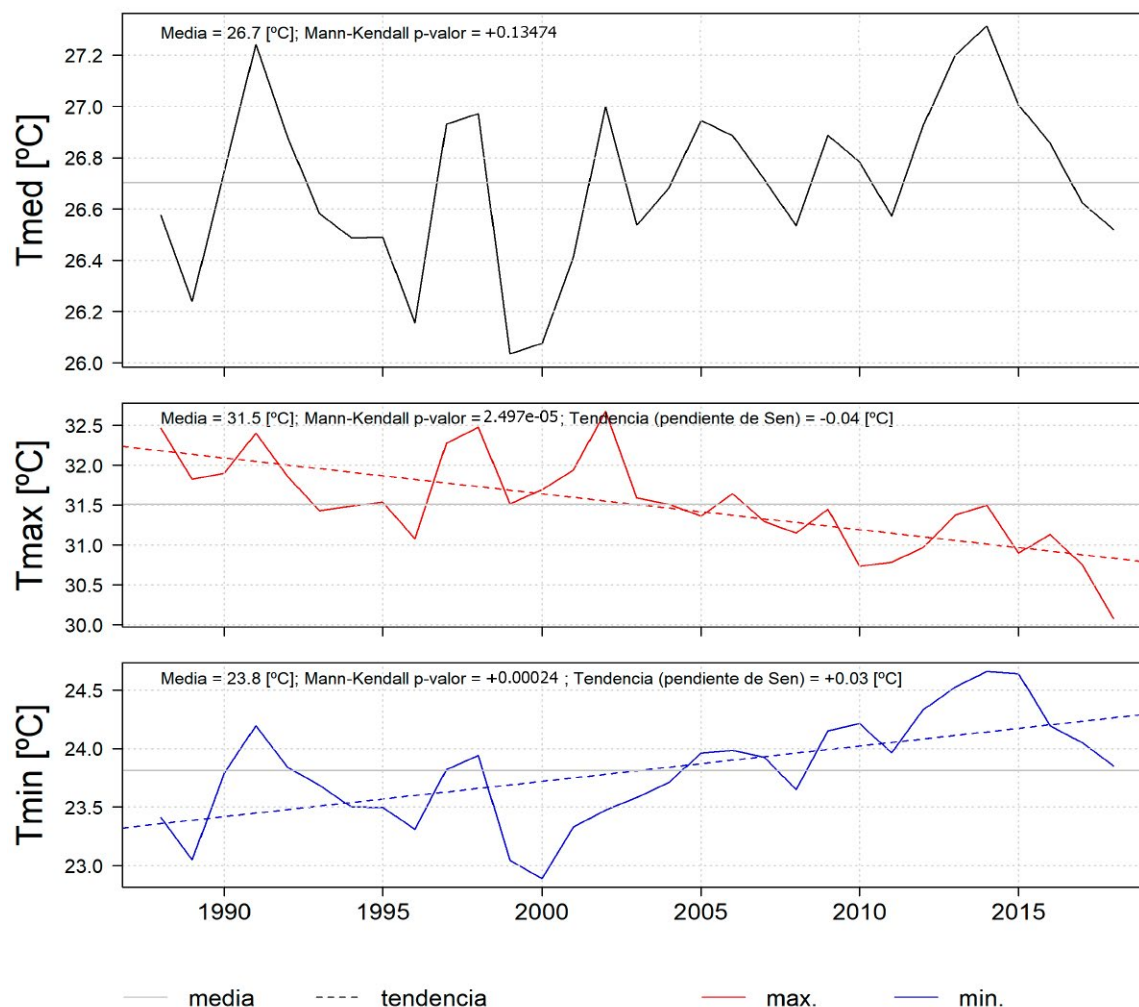
promedio (Figura 36) no muestra una tendencia estadísticamente significativa (p -valor = 0.1) para la temperatura media anual de la zona de estudio, siendo ésta de 26.7 °C. Ciertamente, esta tendencia sí es significativa para los valores de temperatura máxima (p -valor = 2.4e-05) y mínima (p -valor = 2.4e-04), pero su tendencia es tan irrelevante (-0.04 y +0.03, respectivamente) que no acaba afectando a la temperatura media promedio.

Figura 35. Estacionalidad de las temperaturas anuales promedio (1988-2018)



Fuente: Equipo PIOTA, 2021.

Figura 36. Evolución de las temperaturas anuales promedio (1988-2018)



Fuente: Equipo PIOTA, 2021.

2.2.2

Regionalización de proyecciones

Los escenarios de clima futuro se obtuvieron a partir de las proyecciones facilitadas por la iniciativa NEX-GDDP de la NASA (en adelante NASA-NEX). NASA-NEX es un producto consolidado, que incluye proyecciones estadísticamente regionalizadas de datos diarios de temperatura (máxima y mínima) y de precipitación para los 21 modelos climáticos del proyecto CMIP5; y para dos trayectorias de emisión de gases: RCPs 4.5 y RCP 8.5 (véase la Tabla 21 para un listado de los modelos y su origen).

La técnica estadística de regionalización (o escalado regional) empleada para generar NASA-NEX se basa en el método de corrección del sesgo por des-

agregación espacial (BCSD, en sus siglas en inglés) que, a su vez, usa datos combinados de reanálisis y observaciones históricas para la corrección (producto GMFD de la Universidad de Princeton). Los datos están disponibles a una resolución espacial alta de 0.25 grados (~ 25 km x 25 km) para el período comprendido entre 1950 y 2100 (Tabla 21). Las particularidades del conjunto de datos NASA-NEX proporcionan los datos necesarios para acotar y caracterizar las incertidumbres climáticas de la región de estudio, permitiendo generar escenarios, de precipitación y temperatura, más robustos y adecuados a los objetivos generales.

Tabla 21. Modelos climáticos incluidos en el ensamble NASA-NEX y sus características

Modelo	Centro de investigación	País	Resolución (Original)		Resolución (NASA-NEX)	
			Lat (°)	Lon (°)	Lat (°)	Lon (°)
BCC-CSM1-1	GCESS	China	2.79	2.81	0.25	0.25
BNU-ESM	NSF-DOE-NCAR	China	2.79	2.81	0.25	0.25
CanESM2	LASG-CESS	Canada	2.79	2.81	0.25	0.25
CCSM4	NSF-DOE-NCAR	USA	0.94	1.25	0.25	0.25
CESM1-BGC	NSF-DOE-NCAR	USA	0.94	1.25	0.25	0.25
CNRM-CM5	CSIRO-QCCCE	France	1.40	1.41	0.25	0.25
CSIRO-MK3-6-0	CCCma	Australia	1.87	1.88	0.25	0.25
GFDL-CM3	NOAAGFDL	USA	2.00	2.50	0.25	0.25
GFDL-ESM2G	NOAAGFDL	USA	2.02	2.00	0.25	0.25
GFDL-ESM2M	NOAAGFDL	USA	2.02	2.50	0.25	0.25
INMCM4	IPSL	Russia	1.50	2.00	0.25	0.25
IPSL-CM5A-LR	IPSL	France	1.89	3.75	0.25	0.25
IPSL-CM5A-MR	MIROC	France	1.27	2.50	0.25	0.25
MIROC5	MPI-M	Japan	1.40	1.41	0.25	0.25
MIROC-ESM	MIROC	Japan	2.79	2.81	0.25	0.25
MIROC-ESM-CHEM	MIROC	Japan	2.79	2.81	0.25	0.25
MPI-ESM-LR	MPI-M	Germany	1.87	1.88	0.25	0.25
MPI-ESM-MR	MRI	Germany	1.87	1.88	0.25	0.25
MRI-CGCM3	NICAM	Japan	1.12	1.13	0.25	0.25
NorESM1-M	NorESM1-M	Norway	1.89	2.50	0.25	0.25

Fuente: iniciativa NEX-GDDP de la NASA.

Como fue mencionado anteriormente, el ensamble de NASA-NEX incluye las trayectorias de emisión de gases RCPs 4.5 y RCP 8.5. RCP 4.5, que representa un “escenario de estabilización”, en el que las emisiones de gases de efecto invernadero alcanzan su punto máximo alrededor de 2040 y, luego, se reducen. El RCP 8.5, en cambio, representa un escenario más pesimista en el que las emisiones no disminuyen a lo largo del siglo. Estos escenarios se seleccionan, generalmente, para analizar el riesgo climático ya que abarcan una amplia gama de posibles cambios futuros del clima, y por tanto de temperatura y precipitación.

Habitualmente, se utilizan periodos de 30 años para analizar los cambios climáticos medios, considerando las variaciones interanuales en la tem-

peratura y las precipitaciones. Junto con los dos escenarios RCP, anteriormente citados, las proyecciones se evalúan en los siguientes horizontes temporales, con el año central indicado (1990, 2030 y 2060):

- Período de referencia [1990]: 1979 – 2005.
- Futuro cercano [2030]: 2015 – 2045.
- Futuro lejano [2060]: 2045 – 2075.

La Tabla 22 muestra un resumen de los escenarios, horizontes y modelos utilizados para este estudio. En total se han utilizado y analizado salidas climáticas de 105 (5 * 21) combinaciones de escenario-horizonte.

Tabla 22. Modelos climáticos incluidos en el ensamble NASA-NEX y sus características

RCP escenarios	Horizontes temporales	N.º de modelos climáticos
Histórico	1990 (1979-2005)	21
RCP45	2030 (2015-2045)	21
	2060 (2045-2075)	21
RCP85	2030 (2015-2045)	21
	2060 (2045-2075)	21

Fuente: Equipo PIOTA, 2021.

Tras la extracción de los datos para la Cuenca, los siguientes pasos para procesar y regionalizar las proyecciones de NASA-NEX, se pueden dividir en tres:

- 1) Comprobación de la coherencia del producto regionalizado con salidas de estudios previos y proyecciones utilizadas en la zona.
- 2) Ponderación de las proyecciones climáticas, según el nivel de ajuste con periodo de observación histórica.
- 3) Regionalización a nivel local, mediante la perturbación de las series temporales de precipitación y temperatura de cada subcuenca.

Estos tres pasos serán detallados a continuación.

2.2.2.1

Comprobación de la regionalización estadística NASA-NEX 25 km

Existen diferentes trabajos previos en Panamá sobre el cambio climático. Lo más relevantes son:

- La tercera comunicación nacional sobre cambio climático del Ministerio de Ambiente, producido según los acuerdos ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático.
- “Escenarios regionalizados para Centroamérica” del programa EUROCLIMA+ y proyecciones regionalizadas basadas en métodos dinámicos procedentes de la iniciativa CORDEX.

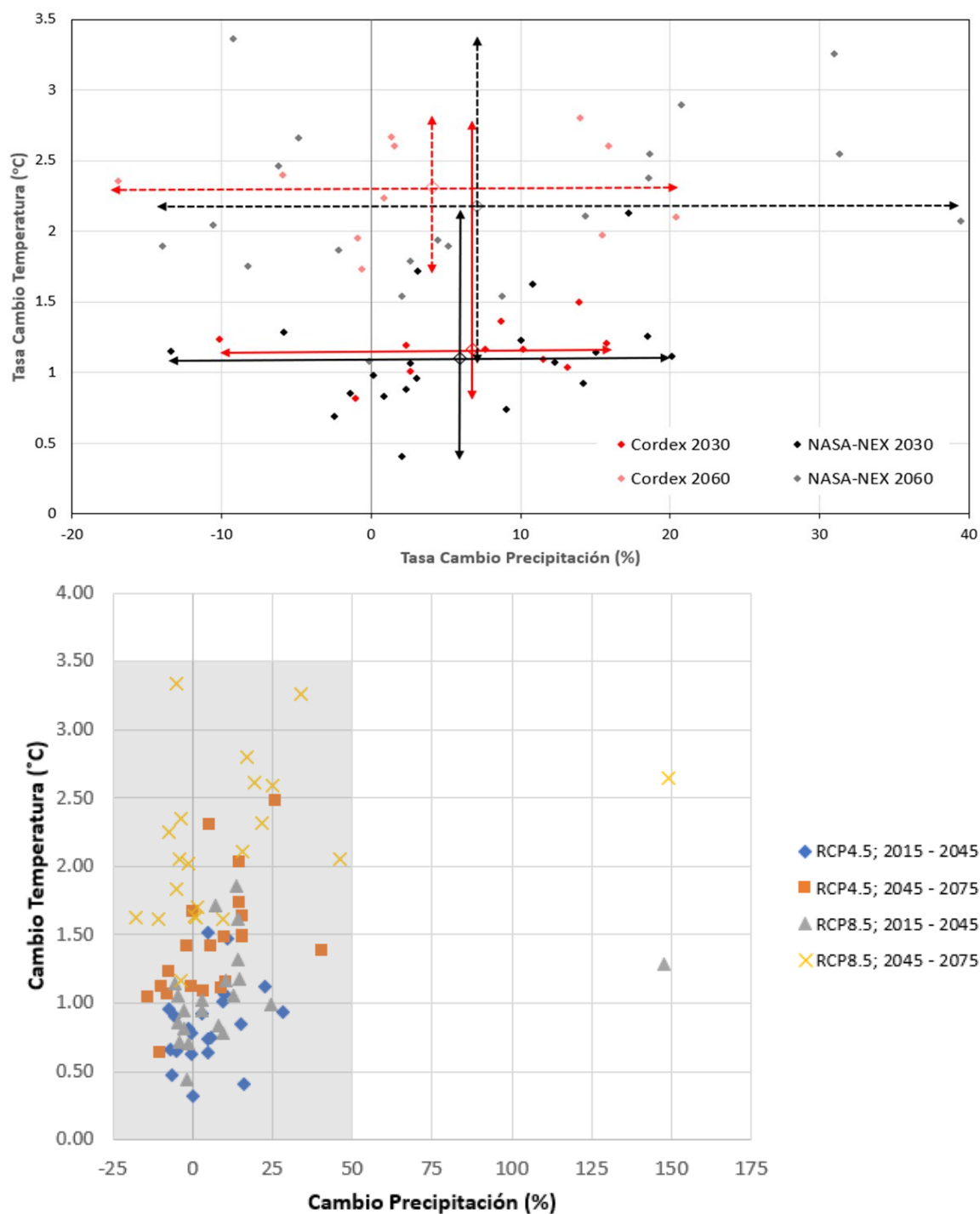
Para la 3ª comunicación nacional, en total se utilizaron salidas de 7 modelos climáticos para las trayectorias de emisión de gases RCPs 4.5 y RCP 8.5.

Para el método RDM, es necesario poder contar con una gama más amplia de escenarios climáticos. Aun así, es conveniente que los modelos utilizados sean mayormente coherentes con los que se utilizaron anteriormente. Tras esta comprobación, se ha concluido que NASA-NEX incluye la mayoría (5 de los 7) modelos climáticos que utilizó el Ministerio de Ambiente, anteriormente.

En la aplicación de la metodología RDM, es clave conocer bien el rango plausible de cambios en temperatura y precipitación. Al tener un ensamble de 21 modelos y dos RCPs, se debe poder acotar ese rango de incertidumbre bien. Aun así, conviene comprobar que el rango de los cambios proyectados, en los estudios anteriores, sea coherente con los rangos que resultan del ensamble NASA-NEX.

Para esta comparación y validación, se descendieron y analizaron datos de CORDEX para los mismos horizontes y trayectorias de emisión de gases RCP. Se analizaron los cambios medios de precipitación y temperatura sobre el periodo histórico y sobre toda la CHCP. En la Figura 37 cada punto representa un modelo climático para un cierto horizonte (2030 o 2060) y fuente (CORDEX o NASA-NEX). En el eje X (horizontal) se representa la tasa de cambio de precipitación (%) y en el eje Y (vertical) la tasa de cambio de temperatura (°C). En color rojo, se representan las proyecciones provenientes de CORDEX y, en color negro, los de NASA-NEX. Para facilitar su interpretación, las flechas indican el rango (entre mínimo y máximo) de las combinaciones horizonte-ensamble. Como se puede apreciar, las flechas rojas están mayormente envueltas dentro de las flechas negras, lo cual indica que los cambios proyectados por CORDEX (regionalización dinámica) están dentro del rango de los cambios proyectados por el ensamble de NASA-NEX.

Figura 37. Rangos de variación de precipitación y temperatura anual promedio predichos por los modelos de los ensambles CORDEX (regionalización dinámica) y NASA-NEX (regionalización estadística) para los horizontes climáticos 2015-2045 (centrado en 2030) y 2045-2075 (centrado en 2060) y para la CHCP



Fuente: Equipo PIOTA, 2021.

En otras palabras, utilizando NASA-NEX podemos tener la seguridad de contar con la incertidumbre climática que proyecta también CORDEX. Por este motivo, se concluye que NASA-NEX es coherente con las salidas de las proyecciones obtenidas

mediante regionalización dinámica en el proyecto “Escenarios regionalizados para Centroamérica” del programa EUROCLIMA+ y proyecciones regionalizadas basadas en métodos dinámicos procedentes de la iniciativa CORDEX.

Ponderación según ajuste con el clima histórico

El segundo paso es la asignación de diferentes pesos a cada una de las proyecciones climáticas, en base a la coherencia de los patrones de clima extraídas con observaciones históricas y los derivados de las ejecuciones retrospectivas del producto NEX-GDDP. Estos pesos permiten estimar, en posteriores subfases del trabajo, el índice ponderado de robustez del sistema a partir de las Superficies de Respuesta al Clima.

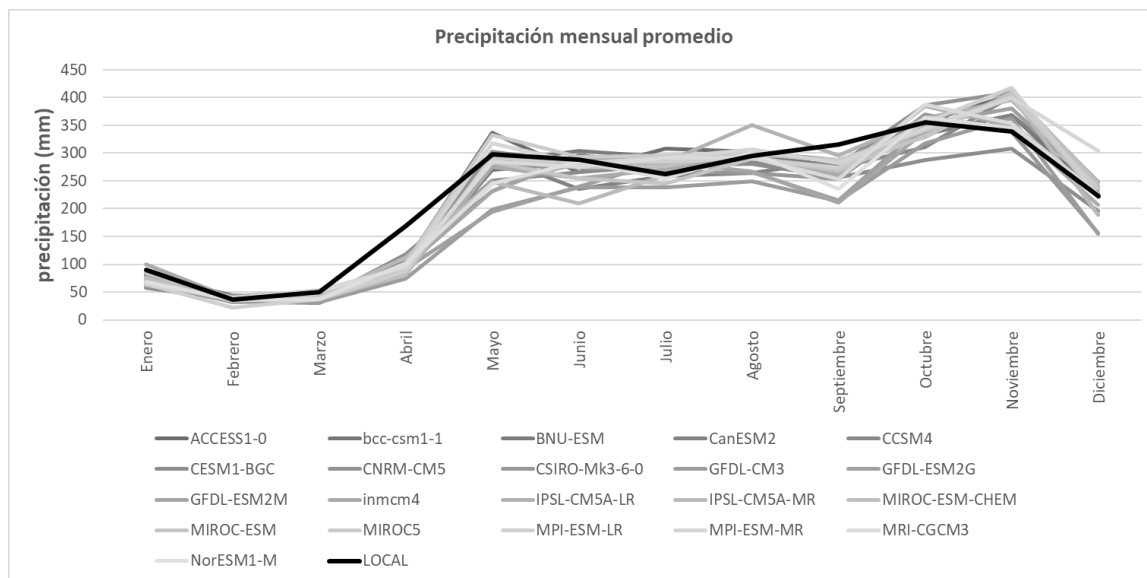
Esta ponderación se realizó analizando el contraste y ajuste entre el clima histórico observado y las proyecciones históricas de los modelos climáticos, en base a tres criterios:

- Tendencia interanual
- Extremos

Las proyecciones históricas de los diferentes modelos climáticos, generalmente, reproducen bien la estacionalidad de la precipitación en la zona según las observaciones, como se puede observar en Figura 38. Las anomalías entre estas proyecciones y el observado se han utilizado como uno de los criterios de puntuación para la ponderación. De igual manera, la tendencia normalizada (Figura 39) y los extremos se han utilizado como criterios de ponderación. El resultado es un peso para cada modelo, que indica el ajuste que tiene aquel modelo con la serie observada, tomando en cuenta los tres criterios antes mencionados. Este peso se aplica a los modelos para el cálculo de la robustez.

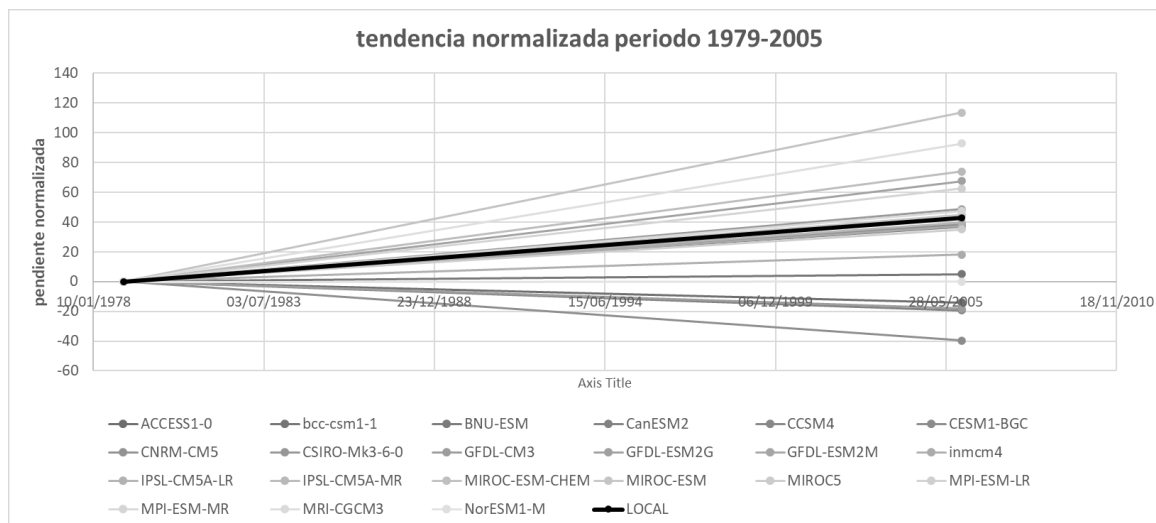
- Estacionalidad

Figura 38. Dispersión en la estacionalidad entre las proyecciones de los diferentes modelos incluidos en NASA-NEX sobre el periodo histórico y los datos de las estaciones meteorológicas (vea sección 2.2.1)



Fuente: Equipo PIOTA, 2021.

Figura 39. Dispersión en la tendencia normalizada entre las proyecciones de los diferentes modelos incluidos en NASA-NEX sobre el periodo histórico y los datos locales



Fuente: Equipo PIOTA, 2021

Figura 40. Obtención de puntuación global y ordenación (ej. para variable prec.)

Modelo	Criterio (desviación estadística)			Criterio (desviación normalizada)			Ponderación global		Orden	Peso
	Estacionalid	Tendencia	Extremos	Estacionalid	Tendencia	Extremos	Total	1/Total		
ACCESS1-0	130.80	3256.39	11.54	0.29	0.48	0.00	0.76	1.31	13	0.0290
bcc-csm1-1	101.73	1444.66	14.47	0.00	0.21	0.04	0.25	3.94	3	0.0874
BNU-ESM	107.33	35.66	19.33	0.06	0.00	0.11	0.17	5.82	1	0.1290
CanESM2	114.02	3869.55	36.76	0.12	0.57	0.36	1.05	0.95	16	0.0211
CCSM4	130.40	20.35	19.95	0.28	0.00	0.12	0.41	2.47	8	0.0547
CESM1-BGC	129.10	6814.86	48.03	0.27	1.00	0.52	1.79	0.56	20	0.0124
CNRM-CM5	116.73	14.10	13.13	0.15	0.00	0.02	0.17	5.82	2	0.1289
CSIRO-Mk3-6-0	135.21	33.19	41.70	0.33	0.00	0.43	0.77	1.30	14	0.0289
GFDL-CM3	203.45	3719.98	81.12	1.00	0.55	1.00	2.55	0.39	21	0.0087
GFDL-ESM2G	181.79	601.64	55.30	0.79	0.09	0.63	1.50	0.66	19	0.0147
GFDL-ESM2M	167.97	33.41	40.20	0.65	0.00	0.41	1.07	0.94	17	0.0208
inmcm4	117.42	621.93	36.47	0.15	0.09	0.36	0.60	1.66	11	0.0367
IPSL-CM5A-LR	126.31	11.32	22.31	0.24	0.00	0.15	0.40	2.52	7	0.0557
IPSL-CM5A-MR	141.89	961.04	46.31	0.39	0.14	0.50	1.04	0.97	15	0.0214
MIROC-ESM-CHEM	125.10	4978.44	20.70	0.23	0.73	0.13	1.09	0.92	18	0.0203
MIROC-ESM	119.68	3.79	26.48	0.18	0.00	0.21	0.39	2.56	6	0.0566
MIROC5	111.77	61.38	21.81	0.10	0.01	0.15	0.25	3.93	4	0.0870
MPI-ESM-LR	127.45	378.50	20.70	0.25	0.06	0.13	0.44	2.28	9	0.0504
MPI-ESM-MR	137.74	20.36	12.39	0.35	0.00	0.01	0.37	2.71	5	0.0601
MRI-CGCM3	108.38	2491.28	14.28	0.07	0.37	0.04	0.47	2.13	10	0.0471
NorESM1-M	120.32	1842.46	33.01	0.18	0.27	0.31	0.76	1.31	12	0.0291

Fuente: Equipo PIOTA, 2021.

2.2.2.3

Regionalización mediante perturbación del clima histórico

El paso final del proceso de regionalización consiste en perturbar las series temporales históricas de precipitación y temperatura de cada subcuenca, con factores de cambio aditivos y multiplicativos en base al rango plausible obtenido de las proyec-

ciones. Estas perturbaciones son necesarias para 1) conocer la respuesta del sistema sobre posibles futuros cambios de clima, 2) crear las superficies de respuesta climática (véase la sección 2.5) y, finalmente, 3) calcular la robustez. De este modo, se crea un gran número de posibles escenarios; muchos más que los que saldrían si utilizáramos el método tradicional “*top-down*”, es decir, utilizando las salidas directas de las proyecciones climáticas.

Para este análisis se ha trabajado con:

- Temperatura, variándolo entre 0°C y 3,0°C en un total de 10 pasos.
- Precipitación, variándolo entre -15% hasta +50% en un total de 18 pasos.
- Lo cual resulta en 180 escenarios climáticos (10x18) a utilizar para forzar el modelo de simulación y conocer la sensibilidad climática sobre todo el rango de posibles cambios.

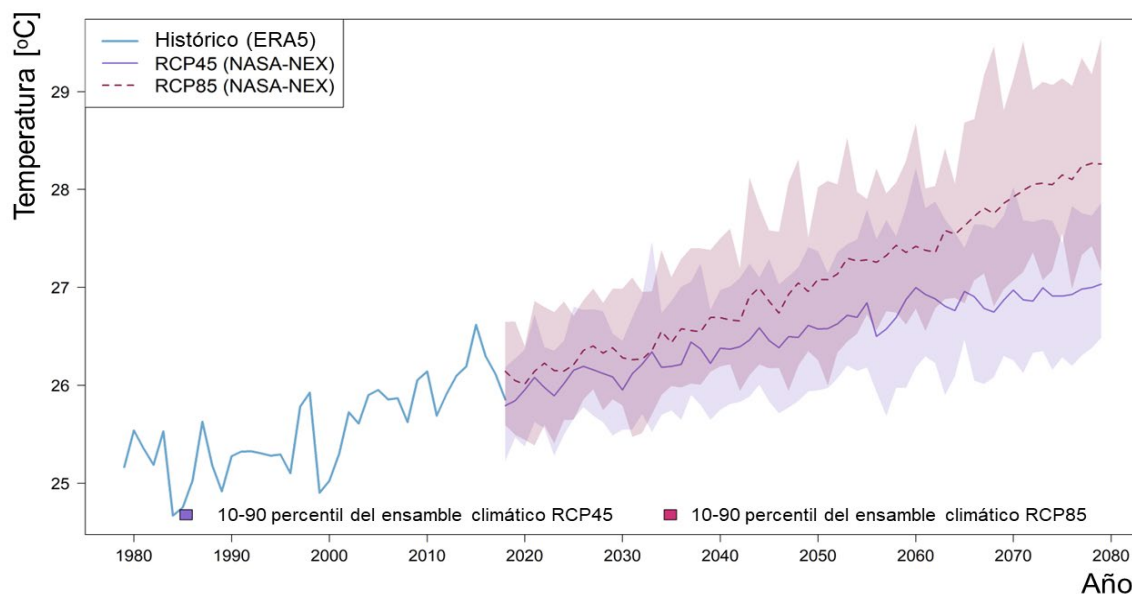
Más detalles sobre la aproximación metodológica de esta tarea se encuentran en sección 2.5.

2.2.3

Identificación y caracterización del clima futuro

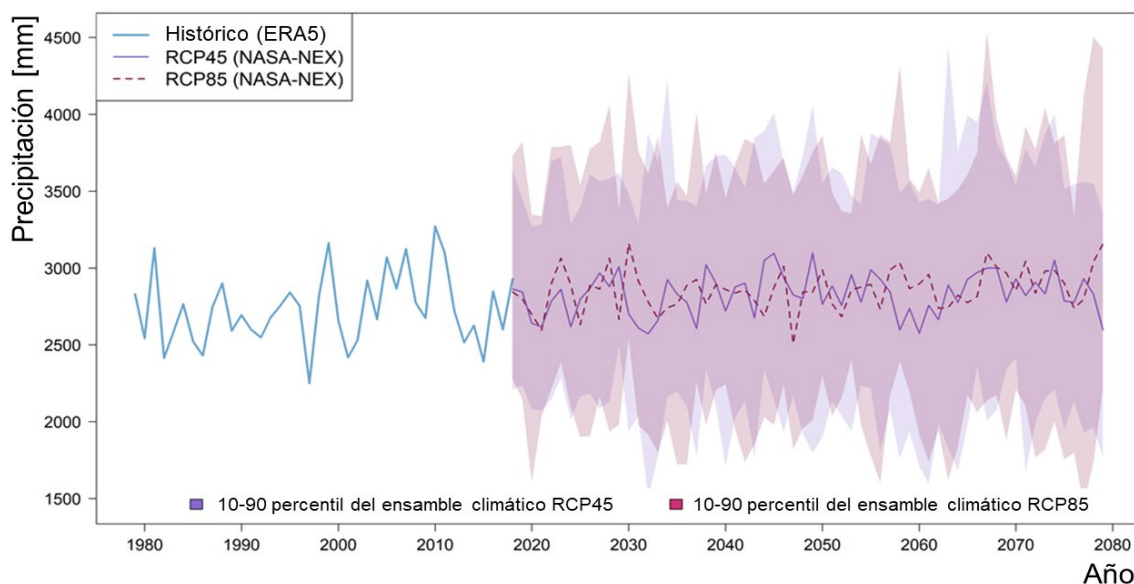
Esta sección identifica las variables e indicadores más relevantes para caracterizar el clima futuro. La Figura 41 y Figura 42 muestran como los modelos climáticos proyectan la temperatura y precipitación hasta el año 2080. Se puede apreciar que los modelos, para la trayectoria de emisiones de gases RCP8.5, predicen temperaturas bastante más altas que para RCP4.5, pero, en ambos casos, hay una tendencia positiva muy marcada y significativa. Para la precipitación, la señal de cambio es menos clara en esta representación gráfica. En la Figura 43 se visualizan los cambios medios en ambas variables (precipitación en eje x, temperatura en eje y).

Figura 41. Proyecciones climáticas de la temperatura hasta 2080 en base a los múltiples modelos del ensamble NASA-NEX mostrando la variabilidad anual y las trayectorias RCP4.5 y RCP8.5.



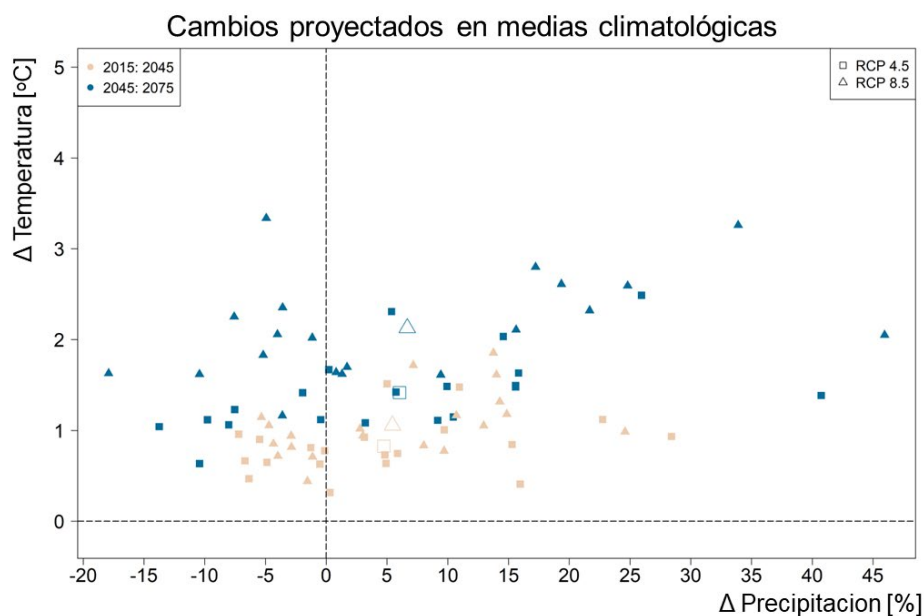
Fuente: Equipo PIOTA, 2021.

Figura 42. Proyecciones climáticas de la precipitación hasta 2080 en base a los múltiples modelos del ensamble NASA-NEX mostrando en la variabilidad anual y las trayectorias RCP4.5 y RCP8.5.



Fuente: Equipo PIOTA, 2021

Figura 43. Cambios medios proyectados en temperatura y precipitación para dos horizontes temporales respecto al periodo histórico y para las trayectorias RCP4.5 y RCP8.5

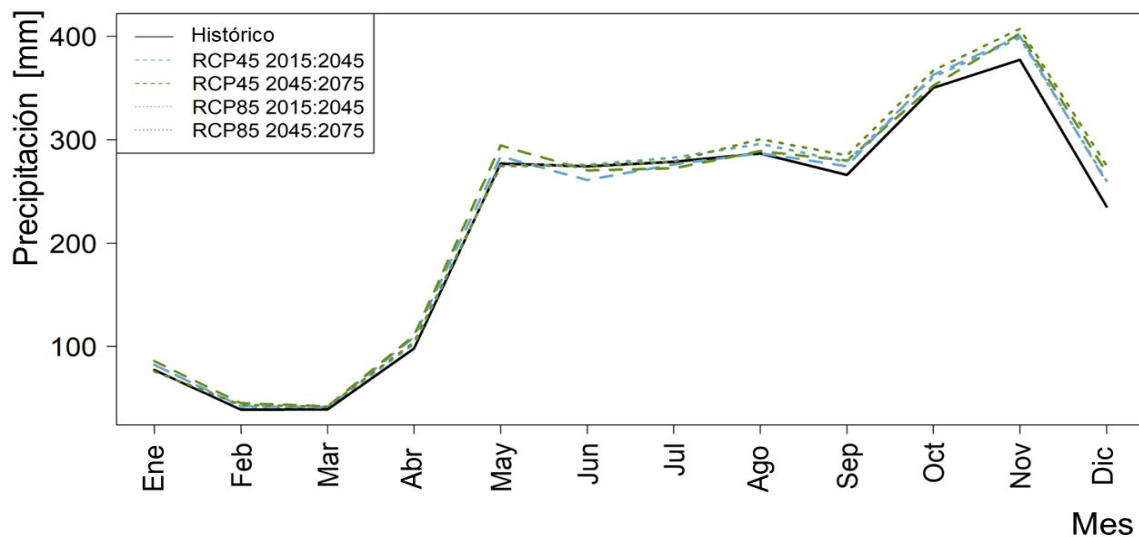


Fuente: Equipo PIOTA, 2021.

La Figura 44 y la Figura 45 muestran los cambios proyectados en la estacionalidad de la precipitación y temperatura. Se puede apreciar que el incremento de precipitación se proyecta, mayormente, en el mes más lluvioso (noviembre). En la temperatura no se observan cambios relevantes

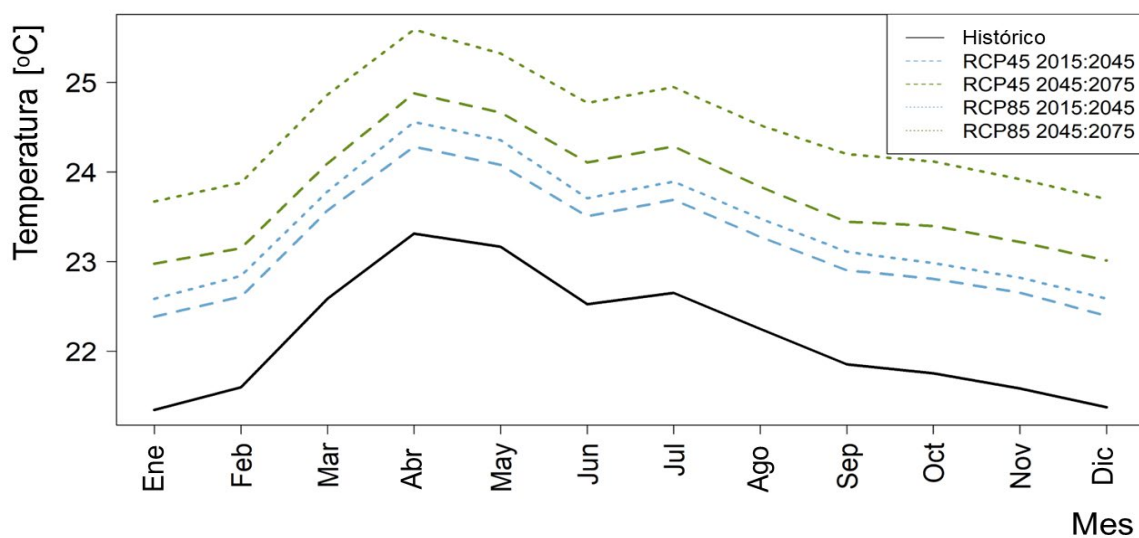
en la estacionalidad. Cambios proyectados en los extremos de temperatura y precipitación, y cómo afectan al riesgo climático, se discuten en la siguiente sección.

Figura 44. Cambios proyectados en la estacionalidad de la precipitación para dos horizontes temporales respecto al periodo histórico y para las trayectorias RCP4.5 y RCP8.5



Fuente: Equipo PIOTA, 2021.

Figura 45. Cambios proyectados en la estacionalidad de la temperatura para dos horizontes temporales respecto al periodo histórico y para las trayectorias RCP4.5 y RCP8.5



Fuente: Equipo PIOTA, 2021.

2.3

PROSPECTIVA: TENDENCIAS Y ESCENARIO

Análisis de Vulnerabilidad y Riesgo Climático





2.3

Análisis de vulnerabilidad y riesgo climático

Los resultados de las proyecciones climáticas realizadas proporcionan información sobre los potenciales impactos climáticos que la gestión de la CHCP debe enfrentar, estratégicamente, en el corto y medio plazo.

El nivel de implicación con los desafíos climáticos, por parte de la ACP, se encuentra completamente alineado con lo establecido en la Primera Contribución Determinada a Nivel Nacional de Panamá¹¹ (CDN-1), actualizada y publicada en diciembre de 2020 por parte del Ministerio de Ambiente, en cumplimiento de los compromisos adquiridos ante la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC).

La CDN-1, que es el documento rector de la acción nacional en cuanto a desempeño climático se refiere, reconoce la relevancia estratégica que el Canal de Panamá y su Cuenca Hidrográfica presentan en términos socioeconómicos y ambientales para el país. A su vez, esboza cuáles son las principales amenazas climáticas

que la gestión de la CHCP debe hacer frente, y que se manifiestan en impactos evidentes, tales como: mayor probabilidad y ocurrencia de eventos extremos, escasez de recursos hídricos en periodos estivales, demanda de producción hidroeléctrica asociada al aumento de temperaturas máximas, o extensión de las superficies dedicadas a la producción agrícola.

Entre los compromisos definidos por la CDN-1 para el Sector de Cuencas Hidrográficas, se encuentra la culminación del proceso de elaboración del PIOTA para la CHCP, considerándolo como un referente para el resto de cuencas hidrográficas en el país, promoviendo un modelo de desarrollo territorial que integre el mantenimiento de los servicios ecosistémicos y, cuya aplicación en forma de infraestructura verde, pueda resultar en un aumento de la resiliencia, reducción de emisiones, y conservación y aumento del almacenamiento de carbono, a través del mejoramiento y aumento de la cobertura vegetal que propicie la conectividad, restauración de suelos, manejo sostenible de los bosques y la conservación de las reservas forestales de carbono.

11. MiAMBIENTE, 2020. <https://www4.unfccc.int/sites/ndcstaging/PublishedDocuments/Panama%20First/CDN1%20Actualizada%20Rep%C3%BAblica%20de%20Panam%C3%A1.pdf>

Un elemento fundamental, para tener en cuenta a la hora de estructurar la propuesta de ordenamiento territorial para la CHCP, es disponer de un amplio entendimiento de los riesgos asociados a la variabilidad climática, que cabe esperar sobre sus sistemas naturales y humanos. En este capítulo se expone el Análisis de la Vulnerabilidad y Riesgo frente a amenazas Climáticas (AVRC) realizado. Este análisis de riesgo climático va a permitir una mayor comprensión de las potenciales amenazas climáticas y sus potenciales impactos futuros, sobre su población, actividad productiva, infraestructuras y el ambiente.

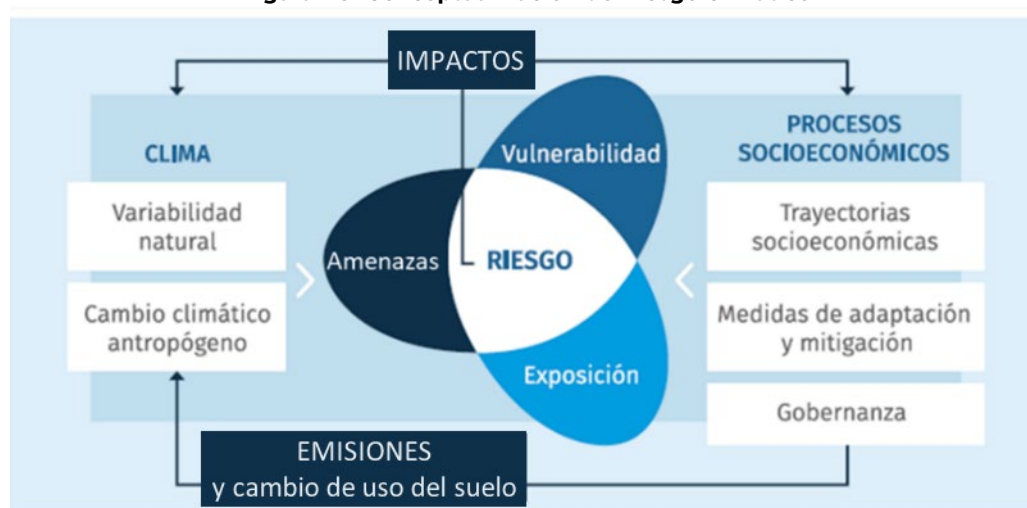
2.3.1

Metodología

El trabajo desarrollado retoma y da continuidad al Análisis de riesgos realizado durante la fase del Diagnóstico Integral, completado también como parte del proceso de construcción del PIOTA (capítulo 1.3 Análisis de riesgos), a través de la inclusión del componente de clima futuro en el análisis.

Según define el Grupo Intergubernamental de Expertos para el Cambio Climático (IPCC), el riesgo climático se compone de tres factores: amenaza, exposición y vulnerabilidad.

Figura 46. Conceptualización del riesgo climático



Fuente: Adaptado del Quinto Informe de Evaluación del IPCC (2014).

Por tanto, tal y como muestra la Figura 46, la existencia de un determinado riesgo climático viene dada por la coincidencia en el espacio/tiempo de tres elementos: exposición y vulnerabilidad para una determinada amenaza. El nivel o aceptabilidad del riesgo van a depender de la caracterización de estos tres factores, puesto que determinan sus potenciales impactos. Es claro que elevados niveles de amenaza, exposición y vulnerabilidad, implican alto riesgo.

La amenaza obedece, primordialmente, a un desencadenante climático y se caracteriza por su peligrosidad (periodo de recurrencia y grado de severidad). Un ejemplo de amenaza corresponde a los eventos de inundaciones o deslizamientos, para los cuales se tiene un registro histórico de ocurrencia y se puede estimar su incidencia futura, bajo diversos

escenarios de cambio climático. El grado de variabilidad climática condiciona el nivel de amenaza a considerar para periodos futuros. La exposición se corresponde con la localización de un posible elemento sensible en el ámbito de afección de la amenaza considerada. Sin exposición no hay riesgo.

El último de los elementos que caracterizan el riesgo climático es la vulnerabilidad. Este factor da una medida del potencial impacto asociado a una amenaza determinada sobre un receptor concreto (población, infraestructuras, actividades y servicios, medio ambiente), así como a su facultad de recuperación.

En el caso de la CHCP, el análisis de vulnerabilidad y riesgo climático se ha basado en la determinación de la exposición y vulnerabilidad de diferentes receptores, sensibles frente a las amenazas

con mayor potencial de impactar al desarrollo territorial sostenible¹² (inundaciones, deslizamientos y periodos de altas temperaturas). La metodología contempla dos horizontes temporales: uno actual y uno futuro (a partir de proyecciones). A estos horizontes se les asignan diferentes escenarios climáticos (RCP 4.5 y RCP 8.5), que condicionan la peligrosidad de las amenazas consideradas.

El análisis de vulnerabilidad se completa en base a los resultados del Diagnóstico, extrayendo la información necesaria para determinar las cadenas de impacto asociadas a cada amenaza. La estimación del riesgo climático se ha realizado en función de la superposición de la vulnerabilidad y las amenazas estudiadas. Este análisis tiene como resultado principal un conjunto de mapas de clasificación de zonas por regiones (unidad de gestión para la ACP), subcuencas y corregimientos, considerando los riesgos a fenómenos naturales extremos y de cambio climático. Este trabajo se ha realizado por medio de indicadores espaciales, operados con un sistema de información geográfica (SIG).

2.3.1.1

Variabilidad climática de las amenazas consideradas

En este análisis se ha evaluado el grado de variabilidad climática de cada amenaza considerada, permitiendo evaluar la evolución temporal de parámetros termopluviométricos con respecto al periodo histórico. El incremento de la peligrosidad, de cada amenaza, se calcula en función de la evolución temporal de una serie de desencadenantes climáticos, representados por estadísticas definidas por el Panel de Expertos en Detección e Índices de Cambio Climático (ETCCDI, por sus siglas en inglés), y divulgados a través de la iniciativa Climdex¹³, para caracterizar fenómenos como sequías, lluvias intensas, heladas o altas temperaturas. En este apartado se analizan, especialmente, los desencadenantes climáticos correspondientes a lluvias intensas y las altas temperaturas.

Por un lado, la variabilidad de las lluvias intensas, que determinan eventos de inundaciones y deslizamientos, se analizan mediante el índice de número de días muy húmedos (R95p), considerando como días húmedos aquellos en los que la precipitación es superior al percentil 95 (WMO, 2009). Por otro, la variabilidad de los periodos de altas temperaturas, que determinan eventos de olas de calor, se analiza mediante el índice de días cálidos (WSDI, por sus siglas en inglés *Warm Spell Duration Index*), que representa el número de días al año que forman parte de una secuencia de al menos seis días consecutivos con la temperatura máxima mayor al percentil 90 del total de registros (WMO, 2019)¹⁴.

Para generar estas estadísticas, se han utilizado las Proyecciones Climáticas de Precipitación y Temperatura NASA-NEX descritas en el apartado 2.2, con una resolución espacial de 25x25 km. Se consideran tres periodos temporales: el histórico o periodo de referencia (1979-2005), un horizonte 2030, de futuro cercano (2015-2045) y otro horizonte 2060, de futuro lejano (2045-2075), bajo dos escenarios de cambio climático, uno intermedio (RCP 4.5), y uno pesimista (RCP 8.5). Para el cálculo de estadísticas se ha utilizado el ensamble de los 21 modelos que contiene el conjunto de datos NASA-NEX, mediante la media ponderada en base a los resultados obtenidos en el apartado 2.2.

Para determinar su evolución en el tiempo, y poder asociar un nivel de amenaza, se utilizan las proyecciones climáticas y, de este modo, calcular el porcentaje de cambio del índice de los horizontes futuros (2030 y 2060) y escenarios (RCP 4.5 y RCP 8.5), con respecto al periodo histórico, a través de las siguientes fórmulas para cada índice, respectivamente:

El porcentaje de cambio, con respecto al periodo histórico, de los índices anteriores ha sido reclasificado con el objetivo de categorizar el incremento de peligrosidad de cada amenaza, tal y como se muestra a continuación en la Tabla 23 y Tabla 24:

12. Los riesgos climáticos, asociados a la posible evolución del balance hídrico de la Cuenca y sus rutas de adaptación asociadas, constituyen uno de los principales ejes articuladores de la elaboración del PIOTA, y reciben especial atención a lo largo del resto de apartados del presente documento.

13. <https://www.climdex.org/>

14. World Meteorological Organization (2019). Guidelines on Analysis of extremes in a changing climate in support of informed decisions for adaptation.

Tabla 23. Categorización del incremento de peligrosidad asociado a lluvias intensas

Índice	Porcentaje de cambio respecto al histórico (%)	Incremento de peligrosidad
R95p	$x \leq 0$	Nulo
	$25\% < x \leq 50\%$	Bajo
	$50\% < x \leq 75\%$	Medio
	$75\% < x \leq 100$	Alto
	$x > 100\%$	Muy Alto

Fuente: Equipo redactor PIOTA, 2021.

Tabla 24. Categorización del incremento de peligrosidad asociado a periodos de altas temperaturas

Índice	Porcentaje de cambio respecto al histórico (%)	Incremento de peligrosidad
WSDI	$x \leq 0$	Nulo
	$25\% < x \leq 50\%$	Bajo
	$50\% < x \leq 75\%$	Medio
	$75\% < x \leq 100$	Alto
	$x > 100\%$	Muy Alto

Fuente: Equipo redactor PIOTA, 2021.

Tras el análisis del incremento de peligrosidad de cada amenaza en escenarios futuros, y junto con el nivel de amenaza actual recogido en la etapa de Diagnóstico, se reevalúan los niveles de amenaza climática que suponen inundaciones y deslizamientos. En cuanto a los niveles de amenaza actual de los periodos de altas temperaturas, se ha supuesto

un nivel de amenaza actual bajo y constante para todo el territorio de la CHCP, y posteriormente, se ha reevaluado su incremento de peligrosidad de la misma forma. Los niveles de amenaza climática resultantes, debido al aumento en su peligrosidad en el futuro, se definen en la Tabla 25.

Tabla 25. Nivel de amenaza climática

	Incremento de peligrosidad nulo	Incremento de peligrosidad bajo	Incremento de peligrosidad medio	Incremento de peligrosidad alto	Incremento de peligrosidad muy alto
Amenaza actual muy alta	Amenaza muy alta	Amenaza muy alta	Amenaza muy alta	Amenaza muy alta	Amenaza muy alta
Amenaza actual alta	Amenaza alta	Amenaza alta	Amenaza muy alta	Amenaza muy alta	Amenaza muy alta
Amenaza actual media	Amenaza media	Amenaza media	Amenaza alta	Amenaza alto	Amenaza muy alta
Amenaza actual baja	Amenaza baja	Amenaza baja	Amenaza media	Amenaza alto	Amenaza muy alta

Fuente: Equipo redactor PIOTA, 2021.

La amenaza climática resultante muestra una estratificación en cuatros niveles: baja, media, alta y muy alta, cuyos valores se clasificaron de acuerdo

con los rangos de clasificación descritos en la Tabla 26:

Tabla 26. Rango de clasificación de los niveles de amenaza climática

Rango de clasificación	Nivel de Amenaza
1.00 – 1.99	Amenaza Baja
2.00 – 2.49	Amenaza Media
2.50 – 2.99	Amenaza Alta
> 3.00	Amenaza Muy Alta

Fuente: Equipo redactor PIOTA, 2021.

2.3.1.2

Vulnerabilidad y riesgo

En el capítulo 1.3 Análisis de riesgos del Diagnóstico, se evaluaron cuatro aspectos clave de la vulnerabilidad (físico, social, económico y ambiental-ecológico) que permiten analizar el riesgo climático desde diferentes perspectivas. Su cálculo se realizó a escala de lugares poblados, resultan-

do en un total de 289, de acuerdo con la información disponible del censo correspondiente al 2010. En este apartado se hace uso de la vulnerabilidad combinada calculada en la etapa del Diagnóstico, tal y como se describe a continuación.

Para realizar el análisis de vulnerabilidad se asignaron pesos a cada componente de variabilidad, conforme a la Tabla 27:

Tabla 27. Variables vinculadas a la valoración de la vulnerabilidad

Componente de vulnerabilidad	Variable	Nivel de vulnerabilidad				Peso
		Baja	Media	Alta	Muy alta	
		1	2	3	4	
Vulnerabilidad Física	(A) Porcentaje de viviendas con piso de Tierra	0-10% del total de viviendas poseen piso de tierra	11-25% del total de viviendas poseen piso de tierra	26-50% del total de viviendas poseen piso de tierra	> 50% del total de viviendas poseen piso de tierra	5
	(B) Porcentaje de viviendas sin televisor	0-10% del total de viviendas no poseen televisor	11-25% del total de viviendas no poseen televisor	26-50% del total de viviendas no poseen televisor	>50% del total de viviendas no poseen televisor	2
	(C) Porcentaje de viviendas sin teléfono residencial	0-10% del total de viviendas no poseen teléfono residencial	11-25% del total de viviendas no poseen teléfono residencial	26-50% del total de viviendas no poseen teléfono residencial	>50% del total de viviendas no poseen teléfono residencial	2
Vulnerabilidad Social	(D) Porcentaje de población con menos de 18 años	0-10% del total de la población es menor a 18 años	11-20% del total de la población es menor a 18 años	21-30% del total de la población es menor a 18 años	>30% del total de la población es menor a 18 años	3
	(E) Porcentaje de población analfabeta	0% del total de la población analfabeta	1-5% del total de la población analfabeta	6-10% del total de la población analfabeta	>10% del total de la población analfabeta	3
Vulnerabilidad Económica	(F) Porcentaje de población Ocupada	>50% del total de la población se encuentra ocupada	26-50% del total de la población se encuentra ocupada	11-25% del total de la población se encuentra ocupada	0-10% del total de la población se encuentra ocupada	4

Componente de vulnerabilidad	Variable	Nivel de vulnerabilidad				Peso
Vulnerabilidad ambiental y ecológica	(G) Distancia de los lugares poblados a cauces de ríos principales	El lugar poblado se encuentra a más de 200 m del cauce del río	El lugar poblado se encuentra entre 100 m y 200 m del cauce del río	El lugar poblado se encuentra entre 50 m y 99 m del cauce del río	El lugar poblado se encuentra a menos de 50 m del cauce del río	5
	(H) Distancia de los lugares poblados a cauces de ríos secundarios y quebradas	El lugar poblado se encuentra a más de 100 m del cauce del río o quebrada	El lugar poblado se encuentra entre 50 m y 100 m del cauce del río o quebrada	El lugar poblado se encuentra entre 25 m y 49 m del cauce del río o quebrada	El lugar poblado se encuentra a menos de 25 m del cauce del río o quebrada	5
	(I) Localización de los lugares poblados en terrenos con fuertes pendientes	El lugar poblado se encuentra ubicado en terrenos con pendientes inferiores al 7%	El lugar poblado se encuentra ubicado en terrenos con pendientes entre 7-12%	El lugar poblado se encuentra ubicado en terrenos con pendientes entre 13-25%	El lugar poblado se encuentra ubicado en terrenos con pendientes superiores a 25%	5

Fuente: Equipo redactor PIOTA, 2021.

La vulnerabilidad combinada resultante surge de la sumatoria lineal ponderada de las variables que la componen, de acuerdo con la siguiente fórmula:

Vulnerabilidad combinada: $((A*5) + (B*2) + (C*2) + (D*3) + (E*3) + (F*4) + (G*5) + (H*5) + (I*5))/29$

La vulnerabilidad resultante muestra una estratificación en cuatro niveles: bajo, medio, alto y muy alto, cuyos valores se clasificaron de acuerdo con los rangos de clasificación descritos en la Tabla 28:

Tabla 28. Rango de clasificación de los niveles de vulnerabilidad

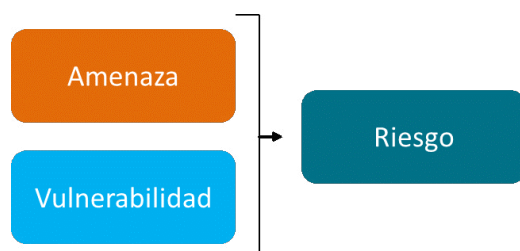
Rango de clasificación	Nivel de Vulnerabilidad
1.00 - 1.99	Vulnerabilidad Baja
2.00 - 2.49	Vulnerabilidad Media
2.50 - 2.99	Vulnerabilidad Alta
> 3.00	Vulnerabilidad Muy Alta

Fuente: Equipo redactor PIOTA, 2021.

Por último, la estimación del riesgo climático se ha realizado en función de la superposición de la vul-

nerabilidad y las amenazas (con la exposición implícita) estudiadas.

Figura 47. Variables utilizadas para la determinación del Riesgo Climático



Fuente: Equipo redactor PIOTA, 2021

En la Tabla 29 se muestra la matriz de amenaza y vulnerabilidad, utilizada para estimar el riesgo climático resultante.

Tabla 29. Matriz de amenaza climática y vulnerabilidad

	Vulnerabilidad baja	Vulnerabilidad media	Vulnerabilidad alta	Vulnerabilidad muy alta
Amenaza muy alta	Riesgo medio	Riesgo alto	Riesgo muy alto	Riesgo muy alto
Amenaza alta	Riesgo medio	Riesgo medio	Riesgo alto	Riesgo muy alto
Amenaza media	Riesgo bajo	Riesgo medio	Riesgo alto	Riesgo alto
Amenaza baja	Riesgo bajo	Riesgo bajo	Riesgo medio	Riesgo alto

Fuente: Equipo redactor PIOTA, 2021.

El riesgo climático resultante muestra una estratificación en cuatros niveles: bajo, medio, alto y muy alto, cuyos valores se clasificaron de acuerdo con

los rangos de clasificación descritos en la siguiente tabla:

Tabla 30. Rango de clasificación de los niveles de vulnerabilidad

Rango de clasificación	Nivel de Riesgo
1.00 – 1.99	Riesgo Bajo
2.00 – 2.99	Riesgo Medio
3.00 – 3.49	Riesgo Alto
> 3.50	Riesgo Muy Alto

Fuente: Equipo redactor PIOTA, 2021.

2.3.2

Caracterización de las amenazas climáticas

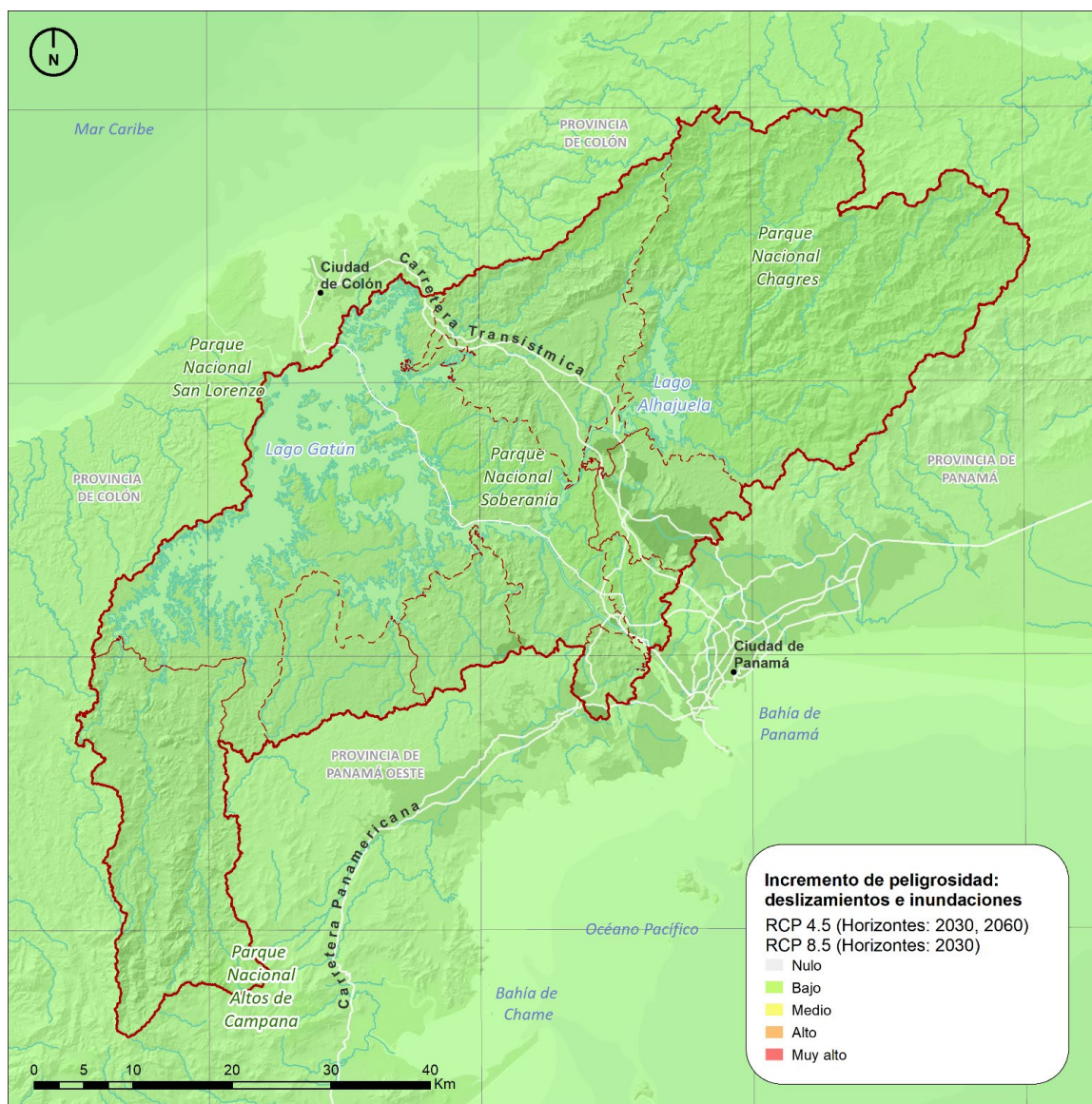
En este apartado se muestra el análisis del incremento de peligrosidad asociado a cada amenaza para los horizontes futuros (2030, 2060). El incremento de peligrosidad refleja el porcentaje de cambio respecto al histórico de los indicadores R95p y WSDI, categorizados de acuerdo a la Tabla 23 y la Tabla 24. Los resultados, mostrados a nivel del píxel del ensamble NA-SA-NEX, están en línea con los hallazgos del apartado 2.2.3 Identificación y caracterización del clima futuro.

Así, los fenómenos de lluvias intensas, vinculados a deslizamientos e inundaciones, presentan un incremento bajo de peligrosidad para el futuro cercano (horizonte 2030) y ambos RCPs (4.5 y 8.5), así como para el futuro lejano (horizonte 2060) del RCP 8.5, y para todo el ámbito geográfico de la CHCP (Figura 48). Sin embargo, se produce un incremento

de peligrosidad con nivel medio para el futuro lejano (horizonte 2060) del RCP 8.5, igualmente para toda la CHCP (Figura 49). Esto se debe al incremento de precipitación (5%) proyectado en los meses más lluviosos (octubre, noviembre) para este escenario.

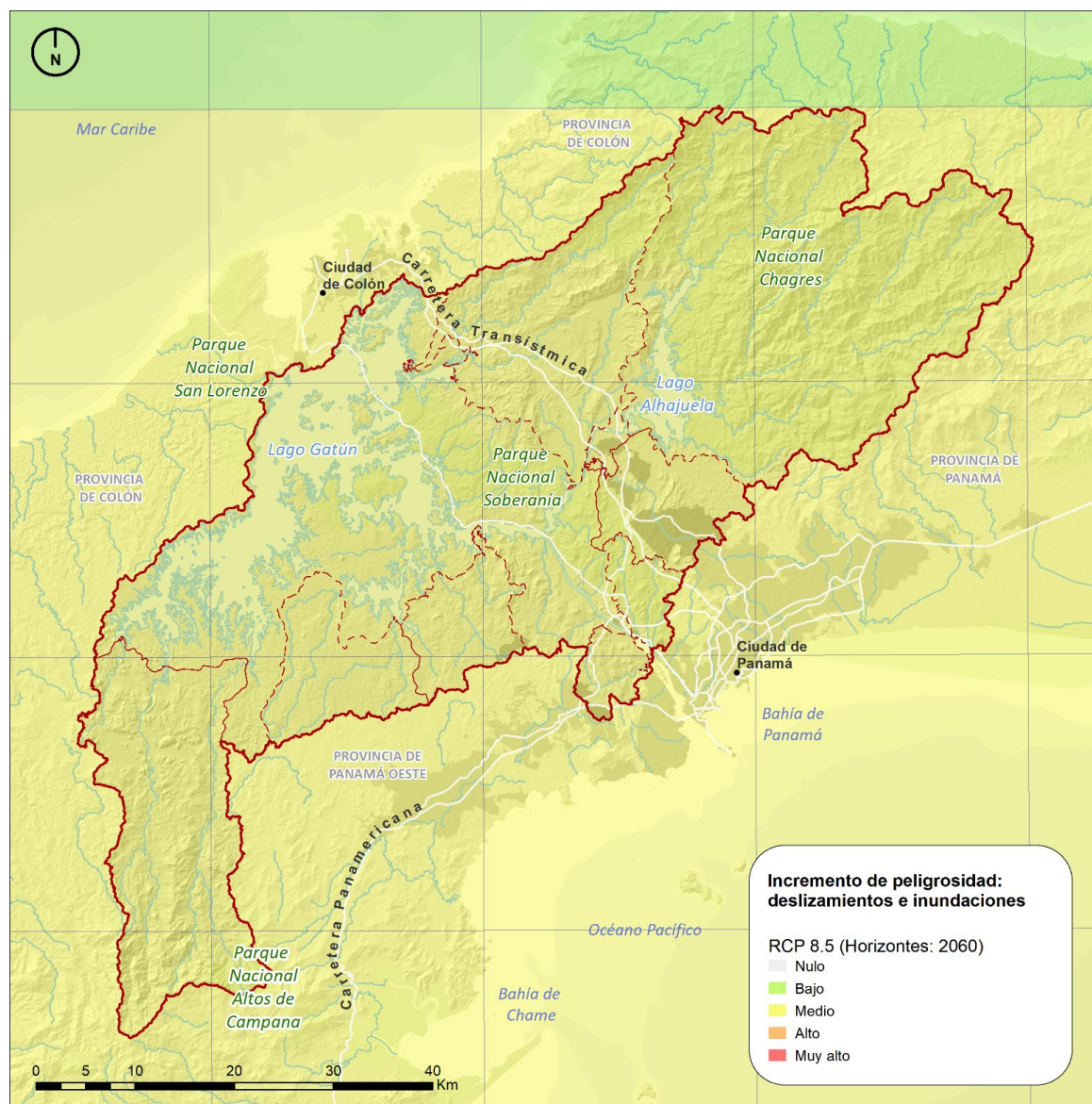
Además, existe un incremento de peligrosidad muy alto para toda la CHCP, asociado a altas temperaturas. Todos los horizontes temporales y todos los RCPs, como muestra la Figura 50, con valores en rojo para todo el territorio. Esto es, debido al aumento de las temperaturas (2 °C) a lo largo de todo el año, y para todas las proyecciones climáticas y horizontes que se observan en la Figura 45. Esto implica que, a pesar del bajo nivel de amenaza que actualmente suponen las altas temperaturas en la CHCP, su elevado incremento en peligrosidad hace que se transforme en una amenaza con nivel muy alto, de acuerdo con la clasificación establecida en la Tabla 25.

**Figura 48. Mapa de incremento de peligrosidad asociado a lluvias intensas.
RCP 4.5 (H2030, H2060). RCP 8.5 (H2030).**



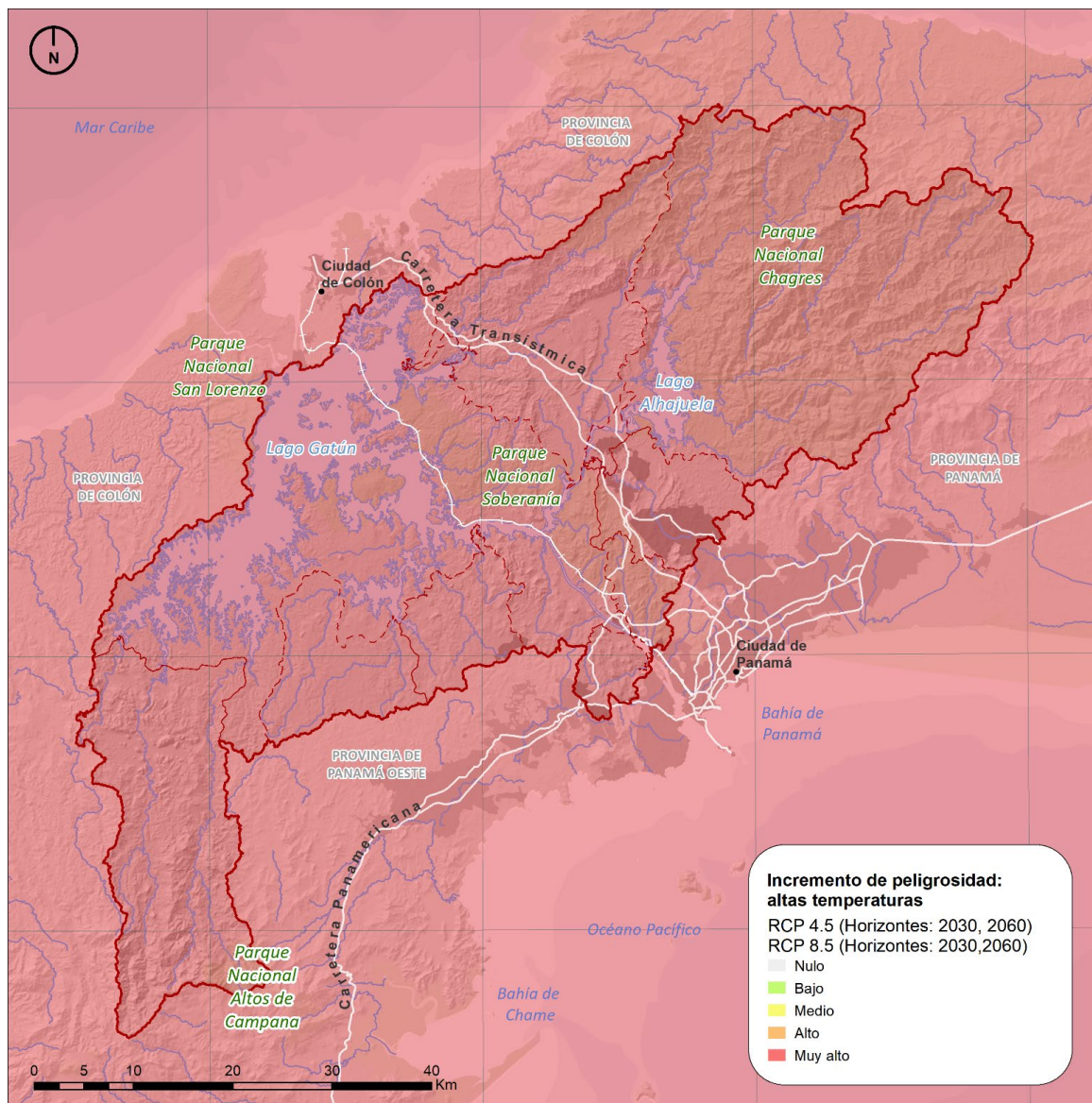
Fuente: Equipo redactor PIOTA, 2021.

**Figura 49. Mapa de incremento de peligrosidad asociado a lluvias intensas.
RCP 8.5 (H2060).**



Fuente: Equipo redactor PIOTA, 2021.

**Figura 50. Mapa de incremento de peligrosidad asociado a periodos de altas temperatura.
RCP 4.5 (H2030, H2060). RCP 8.5 (H2030, H2060).**



Fuente: Equipo redactor PIOTA, 2021.

Categorización y clasificación espacial del riesgo climático a nivel de regiones, subcuencas y corregimientos

Siguiendo la metodología planteada anteriormente, se ha calculado el riesgo climático para las amenazas por deslizamientos, inundaciones y altas temperaturas en los lugares poblados de la CHCP, para los horizontes temporales (2030, 2060) y RCPs (4.5 y 8.5) correspondientes. Los resultados se muestran en mapas de riesgo por amenaza y periodo histórico para los diferentes lugares poblados (Figura 51 a Figura 56). Así mismo, se realiza una clasificación, categorización y desagregación por región, subcuenca y corregimiento (Tabla 31 a Tabla 39).

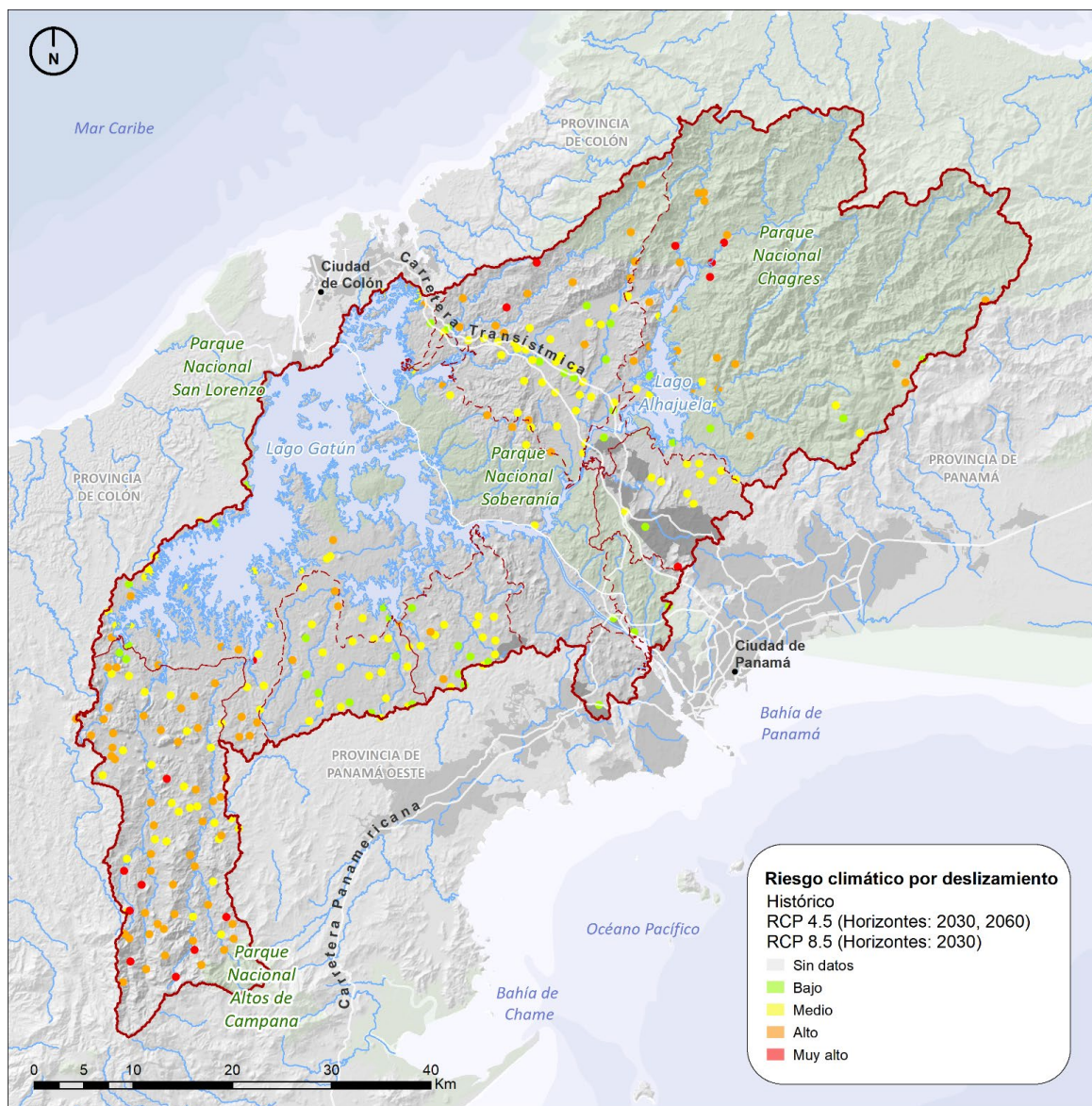
Las Figura 51 y Figura 52 muestran el riesgo climático por deslizamiento. En ellas se observa como existe un incremento generalizado del nivel de riesgo para los lugares poblados de la CHCP en el futuro lejano (horizonte 2060) y RCP 8.5. Mientras que, en el periodo histórico y futuro cercano (horizonte 2030), los lugares poblados presentan, mayoritariamente, niveles de riesgo bajos y medios, y en menor medida, altos o muy altos; en el horizonte 2060 del RCP 8.5, se reduce drásticamente el número de lugares poblados con un nivel de riesgo bajo pasando a adquirir un nivel de riesgo superior (medio, alto o muy alto). Los resultados, desagregados por regiones, subcuencas y corregimientos se encuentran detallados en las Tabla 31, Tabla 34 y Tabla 37, respectivamente. En ellas se refleja el aumento del número de lugares poblados con niveles de riesgo muy altos, pasando de 16-17 a 86. Las regiones que presentan un mayor número de lugares poblados con niveles de riesgo muy alto, para el futuro lejano (RCP 8.5) son Cirí y Trinidad; Chagres y Alhajuela; Corredor Transístmico Colón, así como la región del Lago Gatún.

Por otro lado, las Figura 53 y Figura 54 muestran el riesgo climático por inundación. En ellas se ob-

serva, de igual manera, como existe un incremento generalizado del nivel de riesgo para los lugares poblados de la CHCP en el futuro lejano (horizonte 2060) y RCP 8.5. Mientras que, en el periodo histórico y futuro cercano (horizonte 2030), la mayoría de los lugares poblados presentan niveles de riesgo bajos y medios y, en menor medida, altos o muy altos. En el horizonte 2060 del RCP 8.5, se reduce considerablemente el número de lugares poblados con un nivel de riesgo bajo, pasando a adquirir un nivel de riesgo superior (medio, alto o muy alto). Los resultados, desagregados por regiones, subcuencas y corregimientos se encuentran detallados en las Tabla 32, Tabla 35 y Tabla 38, respectivamente. En ellas se refleja, de manera similar al caso de los deslizamientos, el aumento del número de lugares poblados con niveles de riesgo muy alto, pasando de 1 a 24. Las regiones que presentan un mayor número de lugares poblados con niveles de riesgo muy alto para el futuro lejano (RCP 8.5) son: Chagres y Alhajuela, así como el Corredor Transístmico Colón.

Finalmente, las Figura 55 y Figura 56 muestran el riesgo climático por altas temperaturas. En ellas se observa, de una manera todavía más severa, como existe un incremento general del nivel de riesgo para los lugares poblados de la CHCP en el futuro (horizontes 2030 y 2060) para ambos RCPs. Mientras que, en el periodo histórico, la mayoría de los lugares poblados presentan niveles de riesgo bajos; en los horizontes futuros todos los lugares poblados pasan a adquirir un nivel de riesgo superior (medio a muy alto). Los resultados, desagregados por regiones, subcuencas y corregimientos, se encuentran detallados en las Tabla 33, Tabla 36, Tabla 39, respectivamente. En ellas se observa, un aumento severo del número de lugares poblados con niveles de riesgo muy alto, pasando de ninguno a 119. Las regiones que presentan un mayor número de lugares poblados con niveles de riesgo muy alto, para los horizontes futuros, son: Cirí y Trinidad; Chagres y Alhajuela; Corredor Transístmico Colón; Lago Gatún, así como Los Hules, Tinajones y Caño Quebrado.

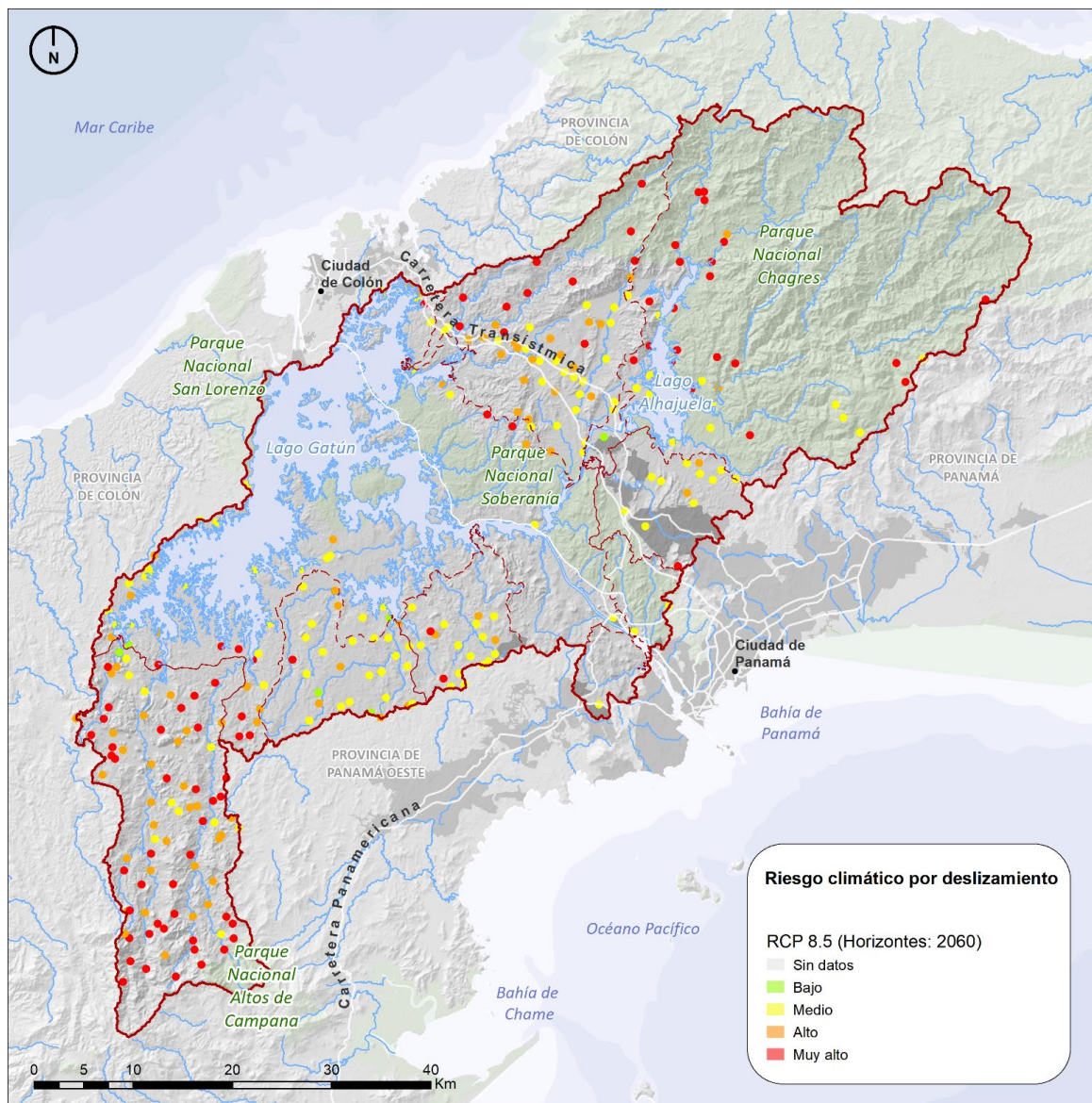
Figura 51. Mapa de riesgo climático por deslizamiento en la CHCP.
Histórico. RCP 4.5 (H2030, H2060). RCP 8.5 (H2030).



Fuente: Equipo redactor PIOTA, 2021.

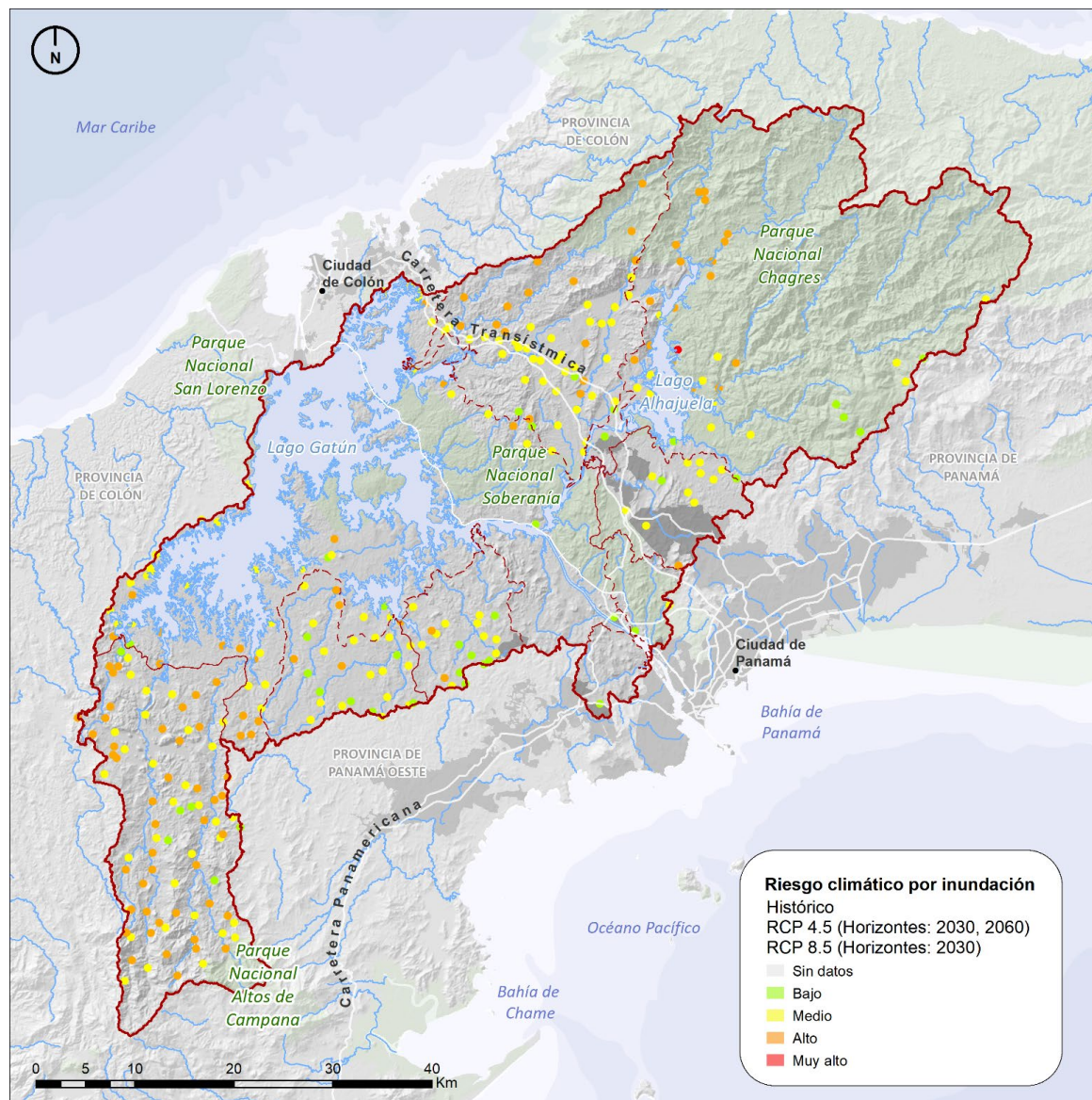
Figura 52. Mapa de riesgo climático por deslizamiento en la CHCP.

RCP 8.5 (H2060).



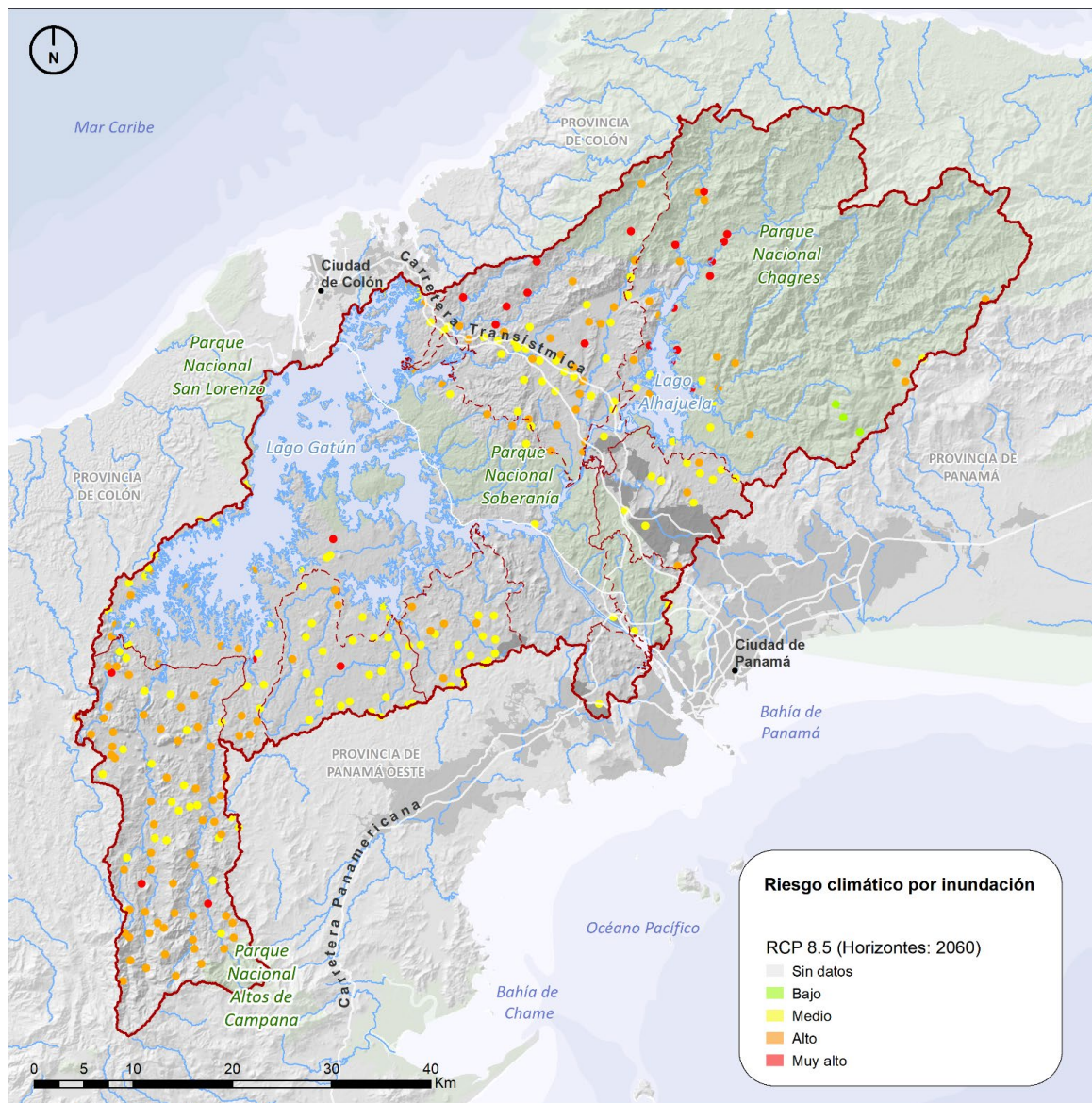
Fuente: Equipo redactor PIOTA, 2021.

Figura 53. Mapa de riesgo climático por inundación en la CHCP.
Histórico. RCP 4.5 (H2030, H2060). RCP 8.5 (H2030).



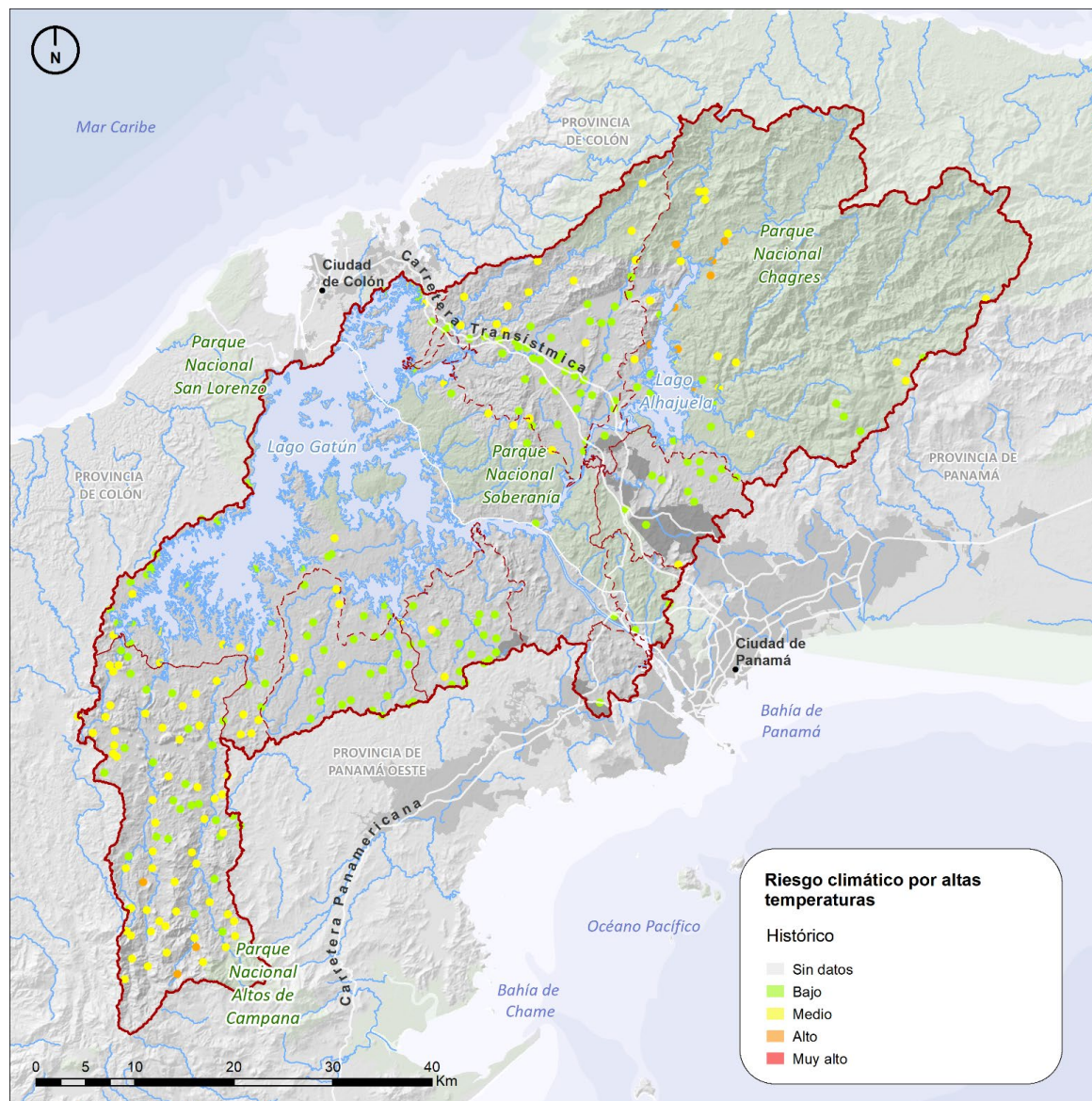
Fuente: Equipo redactor PIOTA, 2021.

**Figura 54. Mapa de riesgo climático por inundación en la CHCP.
RCP 8.5 (H2060).**



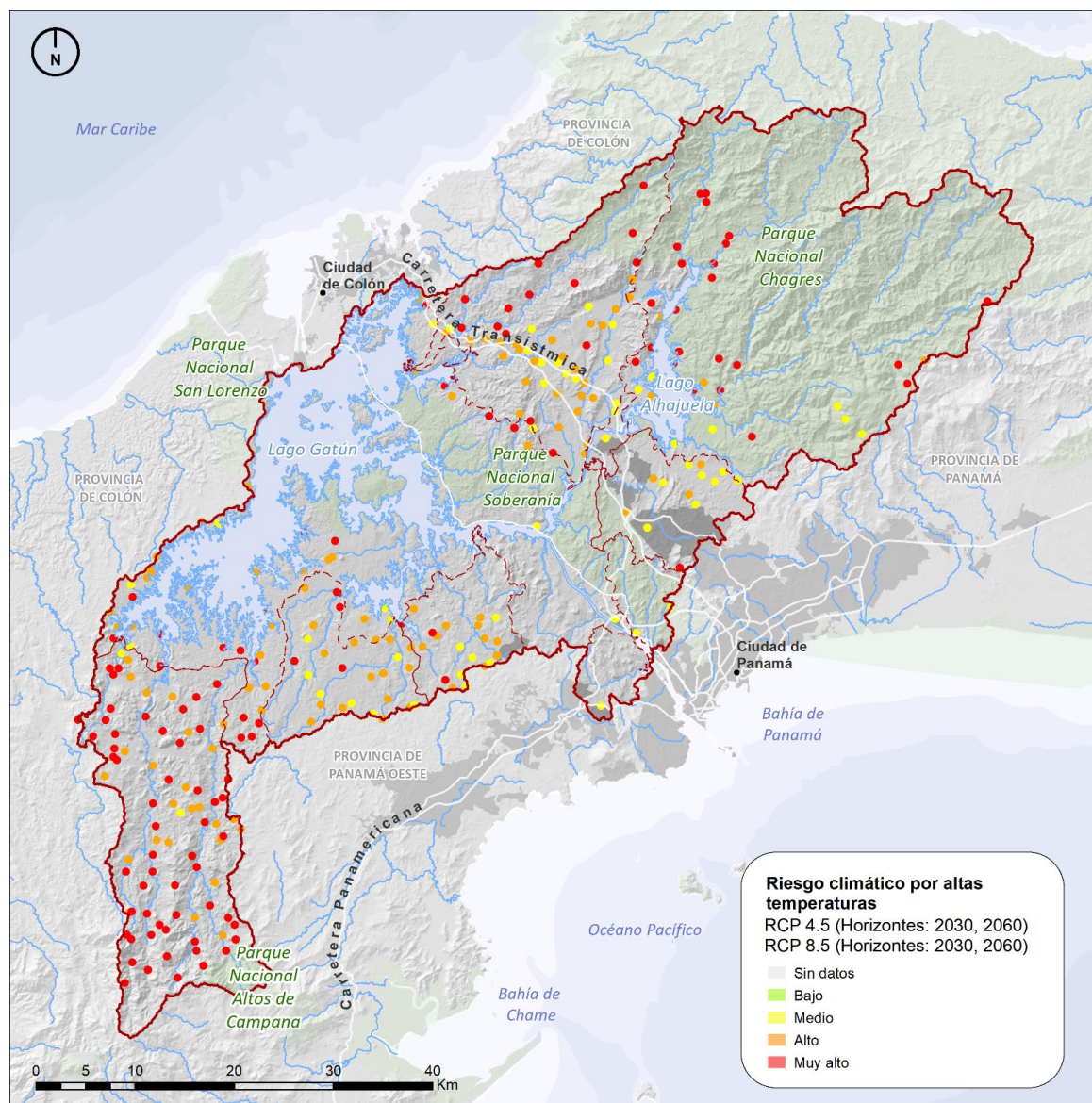
Fuente: Equipo redactor PIOTA, 2021.

Figura 55. Mapa de riesgo climático por altas temperaturas (histórico).
Histórico.



Fuente: Equipo redactor PIOTA, 2021.

**Figura 56. Mapa de riesgo climático por altas temperaturas.
RCP 4.5 (H2030, H2060). RCP 8.5 (H2030, 2060).**



Fuente: Equipo redactor PIOTA, 2021.

A continuación, se muestran las tablas de los riesgos climáticos desagregados por regiones, subcuencas y corregimientos:

Tabla 31. Riesgo por deslizamiento en cada región de la CHCP

Regiones	Horizonte	Riesgo promedio	Número de lugares poblados por nivel de riesgo				
			Muy alto	Alto	Medio	Bajo	Sin datos (S/D)
Chagres y Alhajuela	Histórico	3	4	20	9	5	16
	RCP 4.5 (2030, 2060)						
	RCP 8.5 (2060)						
	RCP 8.5 (2060)	3	21	3	14	---	
Baila Mono, Cañito, Paja y Pescado	Histórico	2	---	2	11	6	3
	RCP 4.5 (2030, 2060)						
	RCP 8.5 (2060)						
	RCP 8.5 (2060)	2	2	3	14	---	
Ciri y Trinidad	Histórico	3	8	46	25	2	17
	RCP 4.5 (2030, 2060)						
	RCP 8.5 (2030)						
	RCP 8.5 (2060)	3	40	30	10	1	
Corredor Transistmico Chilibre y Chilibrillo	Histórico	2	1		10	1	31
	RCP 4.5 (2030, 2060)						
	RCP 8.5 (2060)						
	RCP 8.5 (2070)	2	1	2	9	---	
Corredor Transistmico Colón	Histórico	2	2	12	30	8	14
	RCP 4.5 (2030, 2060)						
	RCP 8.5 (2060)						
	RCP 8.5 (2070)	3	11	18	23	---	
Lago Gatún	Histórico	2	1	18	29	10	15
	RCP 4.5 (2030, 2060)						
	RCP 8.5 (2060)						
	RCP 8.5 (2060)	3	10	16	29	3	
Lago Miraflores	Histórico	1	---	---	---	3	6
	RCP 4.5 (2030, 2060)						
	RCP 8.5 (2060)						
	RCP 8.5 (2070)	2	---	---	3	---	
Los Hules, Tinajones y Caño Quebrado	Histórico	2	---	3	16	7	6
	RCP 4.5 (2030, 2060)						
	RCP 8.5 (2060)						
	RCP 8.5 (2070)	2	1	6	17	2	
Total	Histórico		16	101	130	42	108
	RCP 4.5 (2030, 2060)						
	RCP 8.5 (2060)						
	RCP 8.5 (2060)		86	78	119	6	

Fuente: Equipo redactor PIOTA, 2021.

Tabla 32. Riesgo por inundación en cada región de la CHCP

Regiones	Horizonte	Riesgo promedio	Número de lugares poblados por nivel de riesgo				
			Muy alto	Alto	Medio	Bajo	Sin datos (S/D)
Chagres y Alhajuela	Histórico	2	1	17	14	6	16
	RCP 4.5 (2030, 2060)						
	RCP 8.5 (2060)						
	RCP 8.5 (2060)	3	11	14	10	3	
Baila Mono, Cañito, Paja y Pescado	Histórico	2	---	2	10	7	3
	RCP 4.5 (2030, 2060)						
	RCP 8.5 (2060)						
	RCP 8.5 (2060)	2	---	5	14	---	
Ciri y Trinidad	Histórico	2	---	44	31	6	17
	RCP 4.5 (2030, 2060)						
	RCP 8.5 (2030)						
	RCP 8.5 (2060)	3	3	56	22	---	
Corredor Transistmico Chilibre y Chilibrillo	Histórico	2	---	1	10	1	31
	RCP 4.5 (2030, 2060)						
	RCP 8.5 (2060)						
	RCP 8.5 (2070)	2	---	3	9	---	
Corredor Transistmico Colón	Histórico	2	---	15	33	4	14
	RCP 4.5 (2030, 2060)						
	RCP 8.5 (2060)						
	RCP 8.5 (2070)	3	7	21	24	---	
Lago Gatún	Histórico	2	---	18	34	6	15
	RCP 4.5 (2030, 2060)						
	RCP 8.5 (2060)						
	RCP 8.5 (2060)	2	2	23	33	---	
Lago Miraflores	Histórico	1	---	---	1	2	6
	RCP 4.5 (2030, 2060)						
	RCP 8.5 (2060)						
	RCP 8.5 (2070)	2	---	---	3	---	
Los Hules, Tinajones y Caño Quebrado	Histórico	2	---	4	15	7	6
	RCP 4.5 (2030, 2060)						
	RCP 8.5 (2060)						
	RCP 8.5 (2070)	2	1	3	22	---	
Total	Histórico		1	103	148	37	108
	RCP 4.5 (2030, 2060)						
	RCP 8.5 (2060)						
	RCP 8.5 (2060)		24	125	137	3	

Fuente: Equipo redactor PIOTA, 2021.

Tabla 33. Riesgo por altas temperaturas en cada región de la CHCP

Regiones	Horizonte	Riesgo promedio	Número de lugares poblados por nivel de riesgo				
			Muy alto	Alto	Medio	Bajo	Sin datos (S/D)
Chagres y Alhajuela	Histórico	2	---	8	15	15	16
	RCP 4.5 (2030, 2060)	3	23	7	8	---	
	RCP 8.5 (2030, 2060)						
Baila Mono, Cañito, Paja y Pescado	Histórico	1	---	---	2	17	3
	RCP 4.5 (2030, 2060)	3	2	11	6	---	
	RCP 8.5 (2030, 2060)						
Cirí y Trinidad	Histórico	2	---	3	52	26	17
	RCP 4.5 (2030, 2060)	4	55	24	2	---	
	RCP 8.5 (2030, 2060)						
Corredor Transístmico Chilibre y Chilibrillo	Histórico	1	---	---	1	11	31
	RCP 4.5 (2030, 2060)	3	1	4	7	---	
	RCP 8.5 (2030, 2060)						
Corredor Transístmico Colón	Histórico	1	---	---	14	38	14
	RCP 4.5 (2030, 2060)	3	12	24	14	---	
	RCP 8.5 (2030, 2060)						
Lago Gatún	Histórico	1	---	1	19	38	15
	RCP 4.5 (2030, 2060)	3	20	28	10	---	
	RCP 8.5 (2030, 2060)						
Lago Miraflores	Histórico	1	---	---	---	3	6
	RCP 4.5 (2030, 2060)	2	---	---	3	---	
	RCP 8.5 (2030, 2060)						
Los Hules, Tinajones y Caño Quebrado	Histórico	1	---	---	4	22	6
	RCP 4.5 (2030, 2060)	3	4	15	7	---	
	RCP 8.5 (2030, 2060)						
Total	Histórico		---	12	107	170	108
	RCP 4.5 (2030, 2060)		119	113	57	---	
	RCP 8.5 (2030, 2060)						

Fuente: Equipo redactor PIOTA, 2021.

Tabla 34. Riesgo por deslizamiento en cada subcuenca de la CHCP

Subcuenca	Horizonte	Riesgo promedio	Número de lugares poblados por nivel de riesgo				
			Muy alto	Alto	Medio	Bajo	Sin datos (S/D)
Boquerón	Histórico	3	---	3	---	---	1
	RCP 4.5 (2030, 2060)						
	RCP 8.5 (2060)						
	RCP 8.5 (2060)	4	3	---	---	---	
Chagres	Histórico	3	---	3	---	1	2
	RCP 4.5 (2030, 2060)						
	RCP 8.5 (2060)						
	RCP 8.5 (2060)	4	3		1	---	
Cirí Grande	Histórico	3	5	19	10	---	15
	RCP 4.5 (2030, 2060)						
	RCP 8.5 (2030)						
	RCP 8.5 (2060)	3	16	15	3	---	
Gatún	Histórico	3	1	6	---	---	2
	RCP 4.5 (2030, 2060)						
	RCP 8.5 (2060)						
	RCP 8.5 (2070)	4	6	1	---	---	
Gatún norte	Histórico	2	2	11	47	13	53
	RCP 4.5 (2030, 2060)						
	RCP 8.5 (2060)						
	RCP 8.5 (2070)	3	9	23	40	1	
Gatún sur	Histórico	2	1	27	53	21	17
	RCP 4.5 (2030, 2060)						
	RCP 8.5 (2060)						
	RCP 8.5 (2060)	3	17	25	55	5	
Indio	Histórico	2	1	27	53	21	3
	RCP 4.5 (2030, 2060)						
	RCP 8.5 (2060)						
	RCP 8.5 (2070)	3	1	---	3		
Madden local	Histórico	3	4	13	7	3	7
	RCP 4.5 (2030, 2060)						
	RCP 8.5 (2060)						
	RCP 8.5 (2070)	3	14	3	10	---	
Miraflores	Histórico	1	---	---	---	3	6
	RCP 4.5 (2030, 2060)						
	RCP 8.5 (2060)						
	RCP 8.5 (2070)	2	---	---	3	---	
Pequení	Histórico	---	---	---	---	---	1
	RCP 4.5 (2030, 2060)						
	RCP 8.5 (2060)						
	RCP 8.5 (2070)	---	---	---	---	---	
Trinidad	Histórico	3	3	18	11	---	1
	RCP 4.5 (2030, 2060)						
	RCP 8.5 (2060)						
	RCP 8.5 (2070)	3	17	11	4	---	

Subcuenca	Horizonte	Riesgo promedio	Número de lugares poblados por nivel de riesgo				
Total	Histórico		17	127	181	62	108
	RCP 4.5 (2030, 2060)						
	RCP 8.5 (2060)						
	RCP 8.5 (2060)		86	78	119	6	

Fuente: Equipo redactor PIOTA, 2021.

Tabla 35. Riesgo por inundación en cada subcuenca de la CHCP

Subcuenca	Horizonte	Riesgo promedio	Número de lugares poblados por nivel de riesgo				
			Muy alto	Alto	Medio	Bajo	Sin datos (S/D)
Boquerón	Histórico	3	---	3	---	---	1
	RCP 4.5 (2030, 2060)						
	RCP 8.5 (2060)						
	RCP 8.5 (2060)	3	1	2	---	---	
Chagres	Histórico	2	---	---	3	1	2
	RCP 4.5 (2030, 2060)						
	RCP 8.5 (2060)						
	RCP 8.5 (2060)	3	---	3	1	---	
Cirí Grande	Histórico	2	---	18	14	2	15
	RCP 4.5 (2030, 2060)						
	RCP 8.5 (2030)						
	RCP 8.5 (2060)	3	1	23	10	---	
Gatún	Histórico	3	---	7	---	---	2
	RCP 4.5 (2030, 2060)						
	RCP 8.5 (2060)						
	RCP 8.5 (2070)	4	4	3	---	---	
Gatún norte	Histórico	2	---	12	53	8	53
	RCP 4.5 (2030, 2060)						
	RCP 8.5 (2060)						
	RCP 8.5 (2070)	2	3	27	43		
Gatún sur	Histórico	2	---	31	53	18	17
	RCP 4.5 (2030, 2060)						
	RCP 8.5 (2060)						
	RCP 8.5 (2060)	2	4	35	63	---	
Indio	Histórico	1	---	---	1	3	3
	RCP 4.5 (2030, 2060)						
	RCP 8.5 (2060)						
	RCP 8.5 (2070)	2	---	1	3	---	
Madden local	Histórico	3	1	14	10	2	7
	RCP 4.5 (2030, 2060)						
	RCP 8.5 (2060)						
	RCP 8.5 (2070)	3	10	8	9		
Miraflores	Histórico	1	---	---	1	2	6
	RCP 4.5 (2030, 2060)						
	RCP 8.5 (2060)						
	RCP 8.5 (2070)	2	---	---	3	---	

Subcuenca	Horizonte	Riesgo promedio	Número de lugares poblados por nivel de riesgo				
Pequení	Histórico	---	---	---	---	---	1
	RCP 4.5 (2030, 2060)						
	RCP 8.5 (2060)						
	RCP 8.5 (2070)	---	---	---	---	---	
Trinidad	Histórico	2	---	16	13	3	1
	RCP 4.5 (2030, 2060)						
	RCP 8.5 (2060)						
	RCP 8.5 (2070)	3	1	23	8	---	
Total	Histórico		1	101	148	39	108
	RCP 4.5 (2030, 2060)						
	RCP 8.5 (2060)						
	RCP 8.5 (2060)		24	125	137	3	

Fuente: Equipo redactor PIOTA, 2021.

Tabla 36. Riesgo por altas temperaturas en cada subcuenca de la CHCP

Subcuenca	Horizonte	Riesgo promedio	Número de lugares poblados por nivel de riesgo				
			Muy alto	Alto	Medio	Bajo	Sin datos (S/D)
Boquerón	Histórico	2	---	---	3	---	1
	RCP 4.5 (2030, 2060)	4	3	---	---	---	
	RCP 8.5 (2030, 2060)						
Chagres	Histórico	2	---	---	3	1	2
	RCP 4.5 (2030, 2060)	4	3	1	---	---	
	RCP 8.5 (2030, 2060)						
Ciri Grande	Histórico	2	---	1	23	10	15
	RCP 4.5 (2030, 2060)	4	29	9	1	---	
	RCP 8.5 (2030, 2060)						
Gatún	Histórico	2	---	---	7	---	2
	RCP 4.5 (2030, 2060)	4	7	---	---	---	
	RCP 8.5 (2030, 2060)						
Gatún norte	Histórico	1	---	---	13	60	53
	RCP 4.5 (2030, 2060)	3	13	34	26	---	
	RCP 8.5 (2030, 2060)						
Gatún sur	Histórico	1		1	30	71	17
	RCP 4.5 (2030, 2060)	3	31	52	19	---	
	RCP 8.5 (2030, 2060)						
Indio	Histórico	1	---	---	1	3	3
	RCP 4.5 (2030, 2060)	3	1	---	3	---	
	RCP 8.5 (2030, 2060)						
Madden local	Histórico	2	---	8	8	11	7
	RCP 4.5 (2030, 2060)	3	16	6	5	---	
	RCP 8.5 (2030, 2060)						
Miraflores	Histórico	1	---	---	---	3	6
	RCP 4.5 (2030, 2060)	2	---	---	3	---	
	RCP 8.5 (2030, 2060)						
Pequení	Histórico	---	---	---	---	---	1
	RCP 4.5 (2030, 2060)	---	---	---	---	---	
	RCP 8.5 (2030, 2060)						

Subcuenca	Horizonte	Riesgo promedio	Número de lugares poblados por nivel de riesgo				
Trinidad	Histórico	2	---	2	9	11	1
	RCP 4.5 (2030, 2060)	4	21	11	---	---	
	RCP 8.5 (2030, 2060)						
Total	Histórico		---	12	107	170	108
	RCP 4.5 (2030, 2060)		119	113	57	---	
	RCP 8.5 (2030, 2060)						

Fuente: Equipo redactor PIOTA, 2021.

Tabla 37. Riesgo por deslizamiento en cada corregimiento de la CHCP

Corregimiento	Horizonte	Riesgo promedio	Número de lugares poblados por nivel de riesgo				
			Muy alto	Alto	Medio	Bajo	Sin datos (S/D)
24 de diciembre	Histórico	2	---	---	1	---	3
	RCP 4.5 (2030, 2060)						
	RCP 8.5 (2030)						
	RCP 8.5 (2060)	2	---	---	1	---	
Amador	Histórico	2	---	2	8	---	12
	RCP 4.5 (2030, 2060)						
	RCP 8.5 (2030)						
	RCP 8.5 (2060)	2	---	4	6	---	
Ancón	Histórico	2	2	2	---	3	1
	RCP 4.5 (2030, 2060)						
	RCP 8.5 (2030)						
	RCP 8.5 (2060)	3	4	---	3	---	
Arosemena	Histórico	3	---	2	2	---	5
	RCP 4.5 (2030, 2060)						
	RCP 8.5 (2030)						
	RCP 8.5 (2060)	3	1	3	---	---	
Arraiján	Histórico	1	---	---	---	1	1
	RCP 4.5 (2030, 2060)						
	RCP 8.5 (2030)						
	RCP 8.5 (2060)	2	---	---	1	---	
Buena Vista	Histórico	2	---	2	15	4	2
	RCP 4.5 (2030, 2060)						
	RCP 8.5 (2030)						
	RCP 8.5 (2060)	3	2	11	8	---	
Caimito	Histórico	3	---	1	1	---	3
	RCP 4.5 (2030, 2060)						
	RCP 8.5 (2030)						
	RCP 8.5 (2060)	3	---	2	---	---	
Cativá	Histórico	2	---	---	1	---	3
	RCP 4.5 (2030, 2060)						
	RCP 8.5 (2030)						
	RCP 8.5 (2060)	2	---	---	1	---	
Chilibre	Histórico	2	1	12	14	5	19
	RCP 4.5 (2030, 2060)						
	RCP 8.5 (2030)						
	RCP 8.5 (2060)	3	11	4	16	1	

Corregimiento	Horizonte	Riesgo promedio	Número de lugares poblados por nivel de riesgo				
Cirí de los Sotos	Histórico	3	---	10	3	---	3
	RCP 4.5 (2030, 2060)						
	RCP 8.5 (2030)						
	RCP 8.5 (2060)	4	7	6	---	---	
Cirí Grande	Histórico	3	2	4	6	---	3
	RCP 4.5 (2030, 2060)						
	RCP 8.5 (2030)						
	RCP 8.5 (2060)	3	4	5	3	---	
Ciricito	Histórico	2	---	3	8	3	2
	RCP 4.5 (2030, 2060)						
	RCP 8.5 (2030)						
	RCP 8.5 (2060)	2	1	3	9	1	
Cristóbal	Histórico	2	---	3	3	3	5
	RCP 4.5 (2030, 2060)						
	RCP 8.5 (2030)						
	RCP 8.5 (2060)	2	2	1	5	1	
El Arado	Histórico	2	---	1	3	3	1
	RCP 4.5 (2030, 2060)						
	RCP 8.5 (2030)						
	RCP 8.5 (2060)	2	1	1	5	---	
El Cacao	Histórico	3	5	20	4	---	2
	RCP 4.5 (2030, 2060)						
	RCP 8.5 (2030)						
	RCP 8.5 (2060)	4	19	9	1	---	
Escobal	Histórico	2	---	2	2	1	---
	RCP 4.5 (2030, 2060)						
	RCP 8.5 (2030)						
	RCP 8.5 (2060)	3	2	---	3	---	
Herrera	Histórico	2	---	---	6	4	1
	RCP 4.5 (2030, 2060)						
	RCP 8.5 (2030)						
	RCP 8.5 (2060)	2	---	2	7	1	
Hurtado	Histórico	---	---	---	---	---	1
	RCP 4.5 (2030, 2060)						
	RCP 8.5 (2030)						
	RCP 8.5 (2060)	---	---	---	---	---	
Iturralde	Histórico	2	1	2	6	3	1
	RCP 4.5 (2030, 2060)						
	RCP 8.5 (2030)						
	RCP 8.5 (2060)	2	2	2	7	1	
La Represa	Histórico	2	---	2	3	3	2
	RCP 4.5 (2030, 2060)						
	RCP 8.5 (2030)						
	RCP 8.5 (2060)	2	1	1	5	1	
La Trinidad	Histórico	3	1	10	10	---	1
	RCP 4.5 (2030, 2060)						
	RCP 8.5 (2030)						
	RCP 8.5 (2060)	3	9	9	3	---	

Corregimiento	Horizonte	Riesgo promedio	Número de lugares poblados por nivel de riesgo				
Las Cumbres	Histórico	4	1	---	---	---	8
	RCP 4.5 (2030, 2060)						
	RCP 8.5 (2030)						
	RCP 8.5 (2060)	4	1	---	---	---	
Limón	Histórico	2	1	4	6	1	8
	RCP 4.5 (2030, 2060)						
	RCP 8.5 (2030)						
	RCP 8.5 (2060)	3	3	5	4	---	
Mendoza	Histórico	2	---	1	4	---	1
	RCP 4.5 (2030, 2060)						
	RCP 8.5 (2030)						
	RCP 8.5 (2060)	2	---	1	4	---	
Nueva Providencia	Histórico	1	---	---	---	1	2
	RCP 4.5 (2030, 2060)						
	RCP 8.5 (2030)						
	RCP 8.5 (2060)	2	---	---	1	---	
Nuevo Emperador	Histórico	2	---	---	4	2	1
	RCP 4.5 (2030, 2060)						
	RCP 8.5 (2030)						
	RCP 8.5 (2060)	2	---	1	5	---	
Obaldía	Histórico	3	---	2	---	---	1
	RCP 4.5 (2030, 2060)						
	RCP 8.5 (2030)						
	RCP 8.5 (2060)	4	2	---	---	---	
Pacora	Histórico	1	---	---	---	1	1
	RCP 4.5 (2030, 2060)						
	RCP 8.5 (2030)						
	RCP 8.5 (2060)	2	---	---	1	---	
Puerto Pilón	Histórico	3	1	3	---	---	1
	RCP 4.5 (2030, 2060)						
	RCP 8.5 (2030)						
	RCP 8.5 (2060)	4	4	---	---	---	
Sabanitas	Histórico	3	---	2	2	---	1
	RCP 4.5 (2030, 2060)						
	RCP 8.5 (2030)						
	RCP 8.5 (2060)	3	1	2	1	---	
Salamanca	Histórico	3	1	8	4	2	1
	RCP 4.5 (2030, 2060)						
	RCP 8.5 (2030)						
	RCP 8.5 (2060)	3	8	2	5	---	
San Juan	Histórico	2	---	1	7	2	3
	RCP 4.5 (2030, 2060)						
	RCP 8.5 (2030)						
	RCP 8.5 (2060)	2	1	1	8	---	
Santa Clara	Histórico	2	---	---	3	---	1
	RCP 4.5 (2030, 2060)						
	RCP 8.5 (2030)						
	RCP 8.5 (2060)	2	---	1	2	---	

Corregimiento	Horizonte	Riesgo promedio	Número de lugares poblados por nivel de riesgo				
Santa Rosa	Histórico	2	---	2	4	---	8
	RCP 4.5 (2030, 2060)						
	RCP 8.5 (2030)						
	RCP 8.5 (2060)	2	---	2	4	---	
Total	Histórico						108
	RCP 4.5 (2030, 2060)						
	RCP 8.5 (2060)		16	101	130	42	
	RCP 8.5 (2060)		86	78	119	6	

Fuente: Equipo redactor PIOTA, 2021.

Tabla 38. Riesgo por inundación en cada corregimiento de la CHCP

Corregimiento	Horizonte	Riesgo promedio	Número de lugares poblados por nivel de riesgo				
			Muy alto	Alto	Medio	Bajo	Sin datos (S/D)
24 de diciembre	Histórico	1	---	---	---	1	3
	RCP 4.5 (2030, 2060)						
	RCP 8.5 (2030)						
	RCP 8.5 (2060)	1	---	---	---	1	
Amador	Histórico	2	---	4	5	1	12
	RCP 4.5 (2030, 2060)						
	RCP 8.5 (2060)						
	RCP 8.5 (2060)	3	2	2	6	---	
Ancón	Histórico	2	---	4	1	2	1
	RCP 4.5 (2030, 2060)						
	RCP 8.5 (2030)						
	RCP 8.5 (2060)	3	4	---	3	---	
Arosemena	Histórico	3	---	2	2	---	5
	RCP 4.5 (2030, 2060)						
	RCP 8.5 (2030)						
	RCP 8.5 (2060)	3	---	2	2	---	
Arraiján	Histórico	1	---	---	---	1	1
	RCP 4.5 (2030, 2060)						
	RCP 8.5 (2030)						
	RCP 8.5 (2060)	2	---	---	1	---	
Buena Vista	Histórico	2	---	2	17	2	2
	RCP 4.5 (2030, 2060)						
	RCP 8.5 (2030)						
	RCP 8.5 (2060)	2	---	7	14	---	
Caimito	Histórico	3	---	1	1	---	3
	RCP 4.5 (2030, 2060)						
	RCP 8.5 (2030)						
	RCP 8.5 (2060)	3	---	1	1	---	
Cativá	Histórico	2	---	---	1	---	3
	RCP 4.5 (2030, 2060)						
	RCP 8.5 (2030)						
	RCP 8.5 (2060)	2	---	---	1	---	

Corregimiento	Horizonte	Riesgo promedio	Número de lugares poblados por nivel de riesgo				
Chilibre	Histórico	2	1	7	18	6	19
	RCP 4.5 (2030, 2060)						
	RCP 8.5 (2030)						
	RCP 8.5 (2060)	3	5	10	15	2	
Cirí de los Sotos	Histórico	3		10	3	---	3
	RCP 4.5 (2030, 2060)						
	RCP 8.5 (2030)						
	RCP 8.5 (2060)	3	1	10	2	---	
Cirí Grande	Histórico	2	---	6	3	3	3
	RCP 4.5 (2030, 2060)						
	RCP 8.5 (2030)						
	RCP 8.5 (2060)	3	1	5	6	---	
Circito	Histórico	2	---	3	10	1	2
	RCP 4.5 (2030, 2060)						
	RCP 8.5 (2030)						
	RCP 8.5 (2060)	2	---	6	8	---	
Cristóbal	Histórico	2	---	3	4	2	5
	RCP 4.5 (2030, 2060)						
	RCP 8.5 (2030)						
	RCP 8.5 (2060)	3	1	3	5	---	
El Arado	Histórico	2	---	1	3	3	1
	RCP 4.5 (2030, 2060)						
	RCP 8.5 (2030)						
	RCP 8.5 (2060)	2	---	---	2	5	
El Cacao	Histórico	3	---	16	12	1	2
	RCP 4.5 (2030, 2060)						
	RCP 8.5 (2030)						
	RCP 8.5 (2060)	3	1	25	3	---	
Escobal	Histórico	2	---	2	3	---	---
	RCP 4.5 (2030, 2060)						
	RCP 8.5 (2030)						
	RCP 8.5 (2060)	3	---	3	2	---	
Herrera	Histórico	2	---	---	6	4	1
	RCP 4.5 (2030, 2060)						
	RCP 8.5 (2030)						
	RCP 8.5 (2060)	2	---	---	10	---	
Hurtado	Histórico		---	---	---	---	1
	RCP 4.5 (2030, 2060)						
	RCP 8.5 (2030)						
	RCP 8.5 (2060)		---	---	---	---	
Iturralde	Histórico	2	---	3	6	3	1
	RCP 4.5 (2030, 2060)						
	RCP 8.5 (2030)						
	RCP 8.5 (2060)	2	1	3	8	---	

Corregimiento	Horizonte	Riesgo promedio	Número de lugares poblados por nivel de riesgo					
La Represa	Histórico	2	---	2	5	1	2	
	RCP 4.5 (2030, 2060)							
	RCP 8.5 (2030)							
	RCP 8.5 (2060)	2	---	3	5	---		
	La Trinidad	Histórico	2	---	10	10	1	1
		RCP 4.5 (2030, 2060)						
RCP 8.5 (2030)								
	RCP 8.5 (2060)	3	---	13	8	---		
	Las Cumbres	Histórico	3	---	1	---	---	8
		RCP 4.5 (2030, 2060)						
RCP 8.5 (2030)								
	RCP 8.5 (2060)	3	---	1	---	---		
	Limón	Histórico	2	---	4	8	---	8
		RCP 4.5 (2030, 2060)						
RCP 8.5 (2030)								
	RCP 8.5 (2060)	3	2	4	6	---		
	Mendoza	Histórico	2	---	1	4	---	1
		RCP 4.5 (2030, 2060)						
RCP 8.5 (2030)								
	RCP 8.5 (2060)	2	---	1	4	---		
	Nueva Providencia	Histórico	2	---	---	1	---	2
		RCP 4.5 (2030, 2060)						
RCP 8.5 (2030)								
	RCP 8.5 (2060)	2	---	---	1	---		
	Nuevo Emperador	Histórico	2	---	---	3	3	1
		RCP 4.5 (2030, 2060)						
RCP 8.5 (2030)								
	RCP 8.5 (2060)	2	---	---	6	---		
	Obaldía	Histórico	3	---	2	---	---	1
		RCP 4.5 (2030, 2060)						
RCP 8.5 (2030)								
	RCP 8.5 (2060)	3	---	2	---	---		
	Pacora	Histórico	1	---	---	---	1	1
		RCP 4.5 (2030, 2060)						
RCP 8.5 (2030)								
	RCP 8.5 (2060)	2	---	---	1	---		
	Puerto Pilón	Histórico	3	---	4	---	---	1
		RCP 4.5 (2030, 2060)						
RCP 8.5 (2030)								
	RCP 8.5 (2060)	4	3	1	---	---		
	Sabanitas	Histórico	2	---	1	3	---	1
		RCP 4.5 (2030, 2060)						
RCP 8.5 (2030)								
	RCP 8.5 (2060)	3	---	2	2	---		
	Salamanca	Histórico	3	---	8	7	---	1
		RCP 4.5 (2030, 2060)						
RCP 8.5 (2030)								
	RCP 8.5 (2060)	3	2	9	4	---		

Corregimiento	Horizonte	Riesgo promedio	Número de lugares poblados por nivel de riesgo				
San Juan	Histórico	2	---	3	6	1	3
	RCP 4.5 (2030, 2060)						
	RCP 8.5 (2030)						
	RCP 8.5 (2060)	3	1	4	5	---	
Santa Clara	Histórico	2	---		2	1	1
	RCP 4.5 (2030, 2060)						
	RCP 8.5 (2030)						
	RCP 8.5 (2060)	2	---	1	2	---	
Santa Rosa	Histórico	2	---	1	4	1	8
	RCP 4.5 (2030, 2060)						
	RCP 8.5 (2030)						
	RCP 8.5 (2060)	3	---	5	1	---	
Total	Histórico		1	101	148	39	108
	RCP 4.5 (2030, 2060)						
	RCP 8.5 (2030)						
	RCP 8.5 (2060)		24	125	137	3	

Fuente: Equipo redactor PIOTA, 2021.

Tabla 39. Riesgo por altas temperaturas en cada corregimiento de la CHCP

Corregimiento	Horizonte	Riesgo promedio	Número de lugares poblados por nivel de riesgo				
			Muy alto	Alto	Medio	Bajo	Sin datos (S/D)
24 de diciembre	Histórico	1	---	---	---	1	3
	RCP 4.5 (2030, 2060)	2	---	---	1	---	
	RCP 8.5 (2030, 2060)						
Amador	Histórico	1	---	---	4	6	12
	RCP 4.5 (2030, 2060)	3	4	6	---	---	
	RCP 8.5 (2030, 2060)						
Ancón	Histórico	2	---	3	1	3	1
	RCP 4.5 (2030, 2060)	3	4	---	3	---	
	RCP 8.5 (2030, 2060)						
Arosemena	Histórico	2	---	---	2	2	5
	RCP 4.5 (2030, 2060)	4	2	2	---	---	
	RCP 8.5 (2030, 2060)						
Arraiján	Histórico	1	---	---	---	1	1
	RCP 4.5 (2030, 2060)	2	---	---	1	---	
	RCP 8.5 (2030, 2060)						
Buena Vista	Histórico	1	---	---	2	19	2
	RCP 4.5 (2030, 2060)	3	2	11	8	---	
	RCP 8.5 (2030, 2060)						
Caimito	Histórico	2	---	---	1	1	3
	RCP 4.5 (2030, 2060)	4	1	1	---	---	
	RCP 8.5 (2030, 2060)						
Cativá	Histórico	1	---	---	---	1	3
	RCP 4.5 (2030, 2060)	3	---	1	---	---	
	RCP 8.5 (2030, 2060)						

Corregimiento	Horizonte	Riesgo promedio	Número de lugares poblados por nivel de riesgo				
Chilibre	Histórico	2	---	3	10	19	19
	RCP 4.5 (2030, 2060)	3	13	6	13	---	---
	RCP 8.5 (2030, 2060)	---	---	---	---	---	---
Ciri de los Sotos	Histórico	2	---	---	11	2	3
	RCP 4.5 (2030, 2060)	4	11	2	---	---	---
	RCP 8.5 (2030, 2060)	---	---	---	---	---	---
Ciri Grande	Histórico	2	---	1	5	6	3
	RCP 4.5 (2030, 2060)	3	6	5	1	---	---
	RCP 8.5 (2030, 2060)	---	---	---	---	---	---
Ciricito	Histórico	1	---	---	3	11	2
	RCP 4.5 (2030, 2060)	3	3	9	2	---	---
	RCP 8.5 (2030, 2060)	---	---	---	---	---	---
Cristóbal	Histórico	1	---	1	2	6	5
	RCP 4.5 (2030, 2060)	3	3	3	3	---	---
	RCP 8.5 (2030, 2060)	---	---	---	---	---	---
El Arado	Histórico	1	---	---	1	6	1
	RCP 4.5 (2030, 2060)	3	1	3	3	---	---
	RCP 8.5 (2030, 2060)	---	---	---	---	---	---
El Cacao	Histórico	2	---	2	23	4	2
	RCP 4.5 (2030, 2060)	4	25	4	---	---	---
	RCP 8.5 (2030, 2060)	---	---	---	---	---	---
Escobal	Histórico	1	---	---	2	3	---
	RCP 4.5 (2030, 2060)	3	2	2	1	---	---
	RCP 8.5 (2030, 2060)	---	---	---	---	---	---
Herrera	Histórico	1	---	---	---	10	1
	RCP 4.5 (2030, 2060)	---	---	---	---	---	---
	RCP 8.5 (2060)	---	---	---	---	---	---
Hurtado	Histórico	3	---	6	4	---	---
	RCP 4.5 (2030, 2060)	---	---	---	---	---	---
	RCP 8.5 (2030, 2060)	---	---	---	---	---	---
Iturralde	Histórico	1	---	1	2	9	1
	RCP 4.5 (2030, 2060)	3	3	6	3	---	---
	RCP 8.5 (2030, 2060)	---	---	---	---	---	---
La Represa	Histórico	1	---	---	2	6	2
	RCP 4.5 (2030, 2060)	3	2	4	2	---	---
	RCP 8.5 (2030, 2060)	---	---	---	---	---	---
La Trinidad	Histórico	2	---	---	11	10	1
	RCP 4.5 (2030, 2060)	4	11	10	---	---	---
	RCP 8.5 (2030, 2060)	---	---	---	---	---	---
Las Cumbres	Histórico	2	---	---	1	---	8
	RCP 4.5 (2030, 2060)	4	1	---	---	---	---
	RCP 8.5 (2030, 2060)	---	---	---	---	---	---
Limón	Histórico	1	---	---	5	7	8
	RCP 4.5 (2030, 2060)	3	5	6	1	---	---
	RCP 8.5 (2030, 2060)	---	---	---	---	---	---

Corregimiento	Horizonte	Riesgo promedio	Número de lugares poblados por nivel de riesgo				
Mendoza	Histórico	1	---	---	1	4	1
	RCP 4.5 (2030, 2060)	3	1	4	---	---	
	RCP 8.5 (2030, 2060)						
Nueva Providencia	Histórico	1	---	---	---	1	2
	RCP 4.5 (2030, 2060)	2	---	---	1	---	
	RCP 8.5 (2030, 2060)						
Nuevo Emperador	Histórico	1	---	---	---	6	1
	RCP 4.5 (2030, 2060)	3	---	4	2		
	RCP 8.5 (2030, 2060)					---	
Obaldía	Histórico	2	---	---	2	---	1
	RCP 4.5 (2030, 2060)	4	2	---	---	---	
	RCP 8.5 (2030, 2060)						
Pacora	Histórico	1	---	---	---	1	1
	RCP 4.5 (2030, 2060)	3	---	1	---	---	
	RCP 8.5 (2030, 2060)						
Puerto Pilón	Histórico	2	---	---	4	---	1
	RCP 4.5 (2030, 2060)	4	4	---	---	---	
	RCP 8.5 (2030, 2060)						
Sabanitas	Histórico	2	---	---	2	2	1
	RCP 4.5 (2030, 2060)	4	2	2	---	---	
	RCP 8.5 (2030, 2060)						
Salamanca	Histórico	2	---	1	7	7	1
	RCP 4.5 (2030, 2060)	3	8	5	2	---	
	RCP 8.5 (2030, 2060)						
San Juan	Histórico	1	---	---	1	9	3
	RCP 4.5 (2030, 2060)	3	1	5	4		
	RCP 8.5 (2030, 2060)					---	
Santa Clara	Histórico	1	---	---	---	3	1
	RCP 4.5 (2030, 2060)	3	---	2	1		
	RCP 8.5 (2030, 2060)					---	
Santa Rosa	Histórico	1	---	---	2	4	8
	RCP 4.5 (2030, 2060)	3	2	3	1		
	RCP 8.5 (2030, 2060)					---	
Total	Histórico		---	12	107	170	108
	RCP 4.5 (2030, 2060)		119	113	57		
	RCP 8.5 (2030, 2060)					---	

Fuente: Equipo redactor PIOTA, 2021.

El análisis presenta los riesgos climáticos de los lugares poblados de la CHCP frente a deslizamientos, inundaciones y altas temperaturas. Por lo general, se observa un aumento del número de lugares poblados con mayor nivel de riesgo para el horizonte de futuro lejano y RCP 8.5, en el caso de deslizamientos e inundaciones, en comparación con el periodo histórico. En cuanto al riesgo frente a elevadas temperaturas, para ambos horizontes tem-

porales y RCPs, existe un aumento del número de lugares poblados con mayor nivel de riesgo, con respecto al periodo histórico. Así, los corregimientos con presencia de lugares poblados en riesgo muy alto se recogen en la Tabla 39.

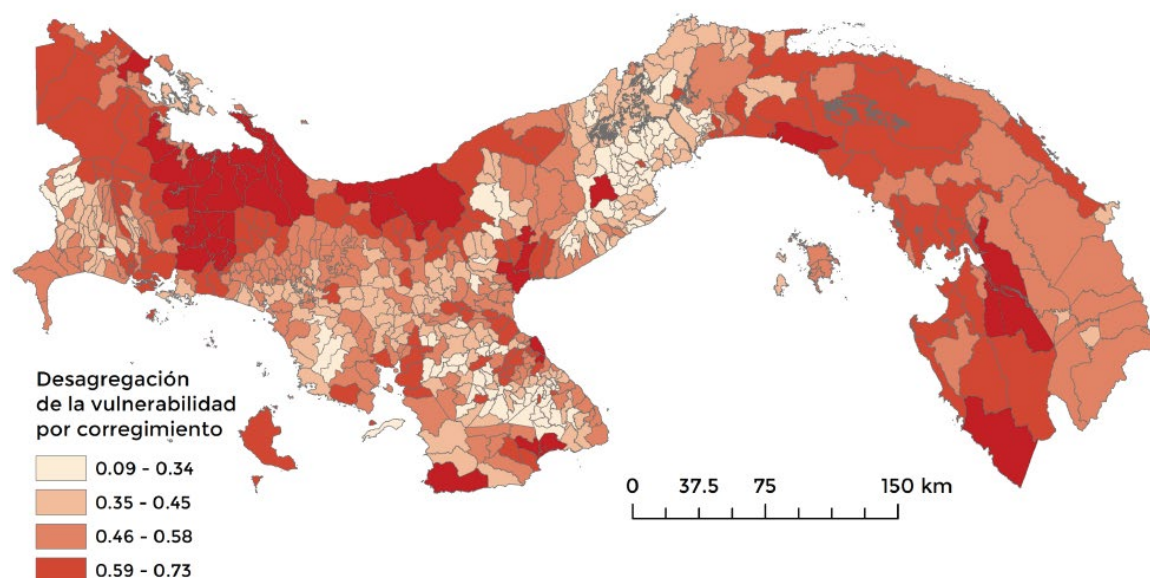
Los resultados de este análisis complementan los obtenidos en el Informe del Índice de Vulnerabilidad al Cambio Climático de la República de Pa-

namá¹⁵, recién publicado. No obstante, cabe mencionar que la metodología aquí empleada sigue el enfoque del Quinto informe de evaluación del IPCC y, por tanto, presenta algunas diferencias conceptuales, metodológicas y de escala respecto de la empleada para la obtención del Índice de Vulnerabilidad. A pesar de los diferentes enfoques, ambas metodologías se consideran válidas y con resultados homologables, en la mayoría de los casos.

La Figura 57 muestra el resultado del índice combinado generado por MiAMBIENTE, desagregado por corregimientos. En ésta se observa, de manera

general, como los corregimientos al sur del embalse Gatún presentan una vulnerabilidad baja, siendo media en aquellos al norte del mismo, y alta en las inmediaciones del embalse Alhajuela y Ciudad de Panamá. Dentro de la CHCP destacan los corregimientos de El Cacao y San Juan con los mayores valores para el índice propuesto. El nivel de detalle del análisis aquí realizado, a nivel de lugares poblados y diferenciado por amenaza, aporta información complementaria y valiosa sobre las zonas donde deben focalizarse las actuaciones de adaptación.

Figura 57. Índice de vulnerabilidad al cambio climático de Panamá, desagregación por corregimiento



Fuente: Ministerio de Ambiente de Panamá, 2021.

2.34

Lineamientos para la adaptación

El anterior análisis ha permitido clasificar el territorio de la CHCP y sus diferentes componentes atendiendo a su riesgo frente a diferentes amenazas climáticas, considerando posibles escenarios futuros. Los resultados obtenidos indican cómo, tanto en el caso de los deslizamientos, inundaciones y altas

temperaturas, las proyecciones climáticas disponibles apuntan hacia un aumento de la peligrosidad, respecto al registro histórico de referencia.

Esto obliga a considerar la necesidad de articular una estrategia de actuación, dirigida a la reducción del riesgo, en la que se prioricen acciones sobre los receptores y entornos, específicamente señalados en este documento. Con los resultados ob-

15. Índice de Vulnerabilidad al Cambio Climático de la República de Panamá (2021). Dirección de Cambio Climático, Ministerio de Ambiente.

tenidos, es recomendable adoptar soluciones de no-arrepentimiento¹⁶.

El trabajo ha sido completado considerando los insumos y limitaciones indicados de partida. En este sentido, cabe recomendar, en primer lugar, destinar los recursos necesarios para realizar tanto un completo análisis de la peligrosidad asociada a cada amenaza (especialmente en el caso de inundaciones y movimientos en masa, estructurando modelos matemáticos, adecuadamente alimentados y calibrados), como una regionalización de proyecciones climáticas con mejor resolución

espacial y temporal. De esta forma, los resultados que puedan arrojar nuevas revisiones del análisis de riesgos climáticos podrán aportar valores más precisos, con todas las ventajas estratégicas que esto conlleva a la hora de definir y llevar a cabo medidas de adaptación.

Si bien la definición de medidas de adaptación será completada en una posterior etapa del Programa de Acción Climática, a continuación (Tabla 40), se propone una serie de actuaciones que podría ser razonable, al menos analizar con atención.

Tabla 40. Propuesta de medidas de adaptación frente a riesgos climáticos

Amenaza	Medidas propuestas	Localización prioritaria
Deslizamientos	Desincentivar la ocupación actual y futura de áreas susceptibles a deslizamientos.	Corregimientos con presencia de lugares poblados en riesgo muy alto: Ancón, Arosemena,
	Estructuras de protección (muros, refuerzo de cimentaciones) en asentamientos e infraestructuras críticas.	Buena Vista, Chilibre, Cirí de los Sotos, Cirí Grande, Ciricito, Cristóbal, El Arado, El Cacao, Escobal, Iturralde, La Represa, La Trinidad, Las Cumbrés, Limón, Obaldía, Puerto Pílon, Sabanitas, Salamanca, San Juan.
	Identificación y estabilización de taludes.	
	Cobertura de seguros frente a desastres naturales.	
Inundaciones	Sistema de alerta temprana a nivel CHCP.	Subcuencas y corregimientos con presencia de
	Cartografía detallada de zonas inundables a nivel CHCP.	lugares poblados en riesgo muy alto: Amador,
	Desincentivar la ocupación actual y futura de áreas inundables.	Ancón, Chilibre, Cirí de los Sotos, Cirí Grande, Cristóbal, El Cacao, Iturralde, Limón, Puerto Pílon, Salamanca, San Juan.
	Mejora de la infraestructura de drenaje existente tanto en asentamientos urbanos como en la red vial y caminos.	
	Mantenimiento y limpieza de cunetas y sumideros.	
	Redes de drenaje separadas (aguas pluviales y residuales) en nuevos desarrollos urbanos.	
	Fomento de la adopción de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) en asentamientos urbanos.	
	Programa de salud y educación ambiental para atención oportuna de casos de enfermedades por vectores.	
	Preservación y reforestación de áreas de cabecera y bosques de galería.	
	Modificación a reglamentos de construcción, incorporando criterios de cambio climático (drenajes).	
	Cobertura de seguros frente a desastres naturales.	

16. Las medidas de no arrepentimiento (*no-regret options*, en inglés) son aquellas acciones que se consideran efectivas para mejorar un sistema concreto, independientemente de si se materializan o no cambios en clima pronosticados

Amenaza	Medidas propuestas	Localización prioritaria
Altas temperaturas	Mejora y reparto espacial homogéneo de la dotación de áreas verdes por habitante en áreas urbanas.	Corregimientos con lugares poblados en riesgo muy alto: Amador, Ancón, Arosemena, Buena Vista, Caimito, Chilibre, Ciri de los Sotos, Ciri Grande, Ciricito, Cristóbal, El Arado, El Cacao, Escobal, Iturralde, La Represa, La Trinidad, Las Cumbres, Limón, Mendoza, Obaldía, Puerto Pi-lón, Sabanitas, Salamanca, San Juan, Santa Rosa.
	Corredores verdes urbanos.	
	Optimizar el acceso a puntos de agua (fuentes).	
	Plan integral de prevención de incendios forestales en la CHCP.	
	Limitación de los trabajos al aire libre en horarios críticos.	
	Modificación a reglamentos de construcción, incorporando criterios de cambio climático (aislamientos).	
	Sistema de alerta temprana a nivel CHCP.	
Transversales	Campañas de información y alerta la población.	Poblaciones rurales en la CHCP Agentes socioeconómicos
	Educación y sensibilización ciudadana.	
	Fomento de la participación del sector productivo.	

Fuente: Equipo redactor PIOTA, 2021.

En todo caso, las diferentes opciones de adaptación que se planteen deberán estar dirigidas a mejorar la capacidad adaptativa de los diferentes receptores sensibles, caracterizados en el presente documento.

Gran parte de estas medidas encuentran espacio en la definición de la Estrategia de Desarrollo Sostenible y Descarbonización para la Cuenca y en la estructuración de la propuesta de PIOTA. No obstante, se sugiere que el proceso de priorización de medidas sea amplio y participativo, considerando además criterios adecuados tales como¹⁷:

- Eficiencia: ¿la medida optimiza el aprovechamiento de los recursos disponibles?
- Eficacia: ¿la medida alcanza completamente los objetivos establecidos?
- Equidad: ¿la medida beneficia a grupos o comunidades socioeconómicamente vulnerables?
- Urgencia: ¿Qué tan pronto debe implementarse esta medida?
- Flexibilidad: ¿la medida permite ser reajustada a lo largo de su implementación?

- Robustez: ¿la medida es solvente bajo diferentes escenarios climáticos futuros?
- Co-beneficios: ¿la medida resuelve adicionalmente otro tipo de problemas ambientales o sociales?
- No-arrepentimiento: ¿la medida es aún adecuada considerando que no haya cambios en el clima?
- Legitimidad: ¿es la medida política, cultural, social y ambientalmente aceptable?

17. UNFCCC - Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático (2011). Assessing the costs and benefits of adaptation options.

2.4

PROSPECTIVA: TENDENCIAS Y ESCENARIO

Escenarios de Desarrollo Territorial

4





2.4

Escenarios de desarrollo territorial

2.4.1

Prospectiva: identificación, análisis y prospectiva de variables territoriales

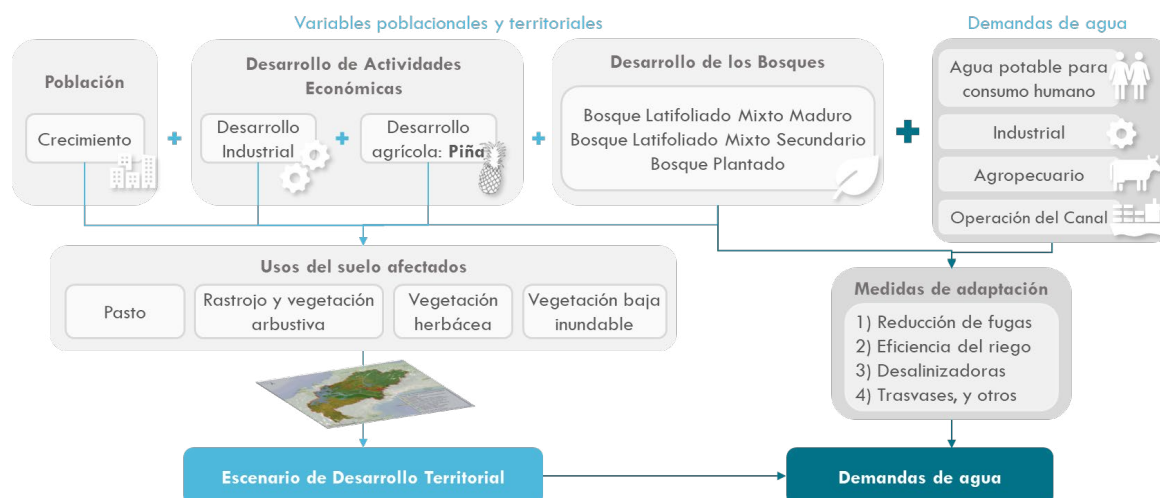
Para la creación de los escenarios de desarrollo territorial y de demanda de agua, es necesario primero conocer las variables básicas a considerar, así como su evolución temporal. En los siguientes apartados se muestra la prospectiva de estas variables básicas que sirven de partida para construir los escenarios de desarrollo territorial.

La prospectiva es un enfoque o una forma de ver el desarrollo territorial y urbano del ámbito de intervención de la CHCP de cara al futuro. Se trata de plantear el modelo territorial futuro a partir de las variables claves analizadas en la etapa de diagnóstico (la conformación del territorio, la articulación espacial y el funcionamiento de las diversas actividades que se desarrollan en la CHCP, entre otras). Así, se pueden proponer las hipótesis de

evolución de estas variables para modelar el futuro, mediante el desarrollo de escenarios, con horizonte en los años considerados para la elaboración del PIOTA (2025, 2030, 2040 y 2070).

Las hipótesis de cambio se fundamentan en la Tasa de Crecimiento Anual (TCA) de las variables territoriales que, como se explica en la sección 2.4.1.5, se basan en las variables decisivas detectadas en el diagnóstico (población, actividad económica y evolución de la cobertura boscosa) que necesitarán nuevos requerimientos de suelo. Estos requerimientos de expansión de suelo afectarán a otros usos del suelo (variables resultantes), que se verán disminuidos, lo que nos determinará el escenario territorial o estado futuro de los usos del suelo (según las TCA aplicadas). A su vez, este escenario territorial conlleva unas demandas de agua, las cuales se obtienen de los crecimientos de los usos y a las que se suma la demanda relativa a la operación del Canal. Estas variables suponen las demandas principales de agua, que serán proyectadas a los cuatro horizontes temporales, para cada escenario.

Figura 58. Variables territoriales y demandas de agua



Fuente: Equipo redactor PIOTA, 2021.

Tras el análisis de las variables, que se realiza en los siguientes apartados, se da comienzo a la construcción de los escenarios, el cual considera:

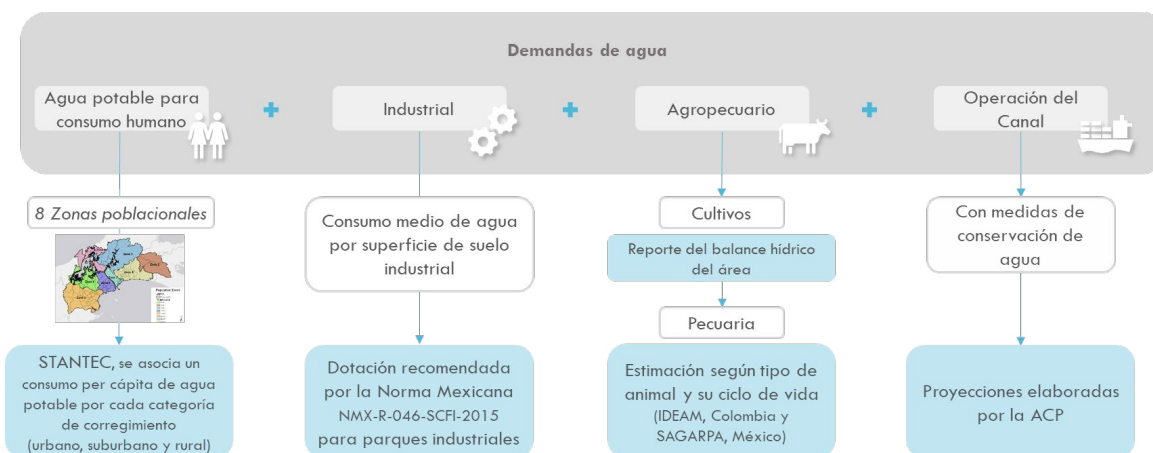
- un escenario tendencial, es decir, sin ningún tipo de intervención desde el punto de vista de la planificación de actividades sobre el territorio;
- un escenario ambicioso, que es la situación territorial idealizada con todos los criterios/elementos de planificación óptimos;
- un escenario consensuado, que conjuga los dos escenarios anteriores, y que es posible compa-

2.4.1.1

Prospectiva de las demandas de agua

En este apartado se detalla cómo se obtuvieron los valores de las demandas para cada uno de los usos que extraen el agua de la CHCP y, en su caso, asociado a la variable territorial aplicable, conforme al siguiente esquema y a la Figura 58:

Figura 59. Esquema de demanda de agua



Fuente: Equipo redactor PIOTA, 2021.

Agua potable para consumo humano

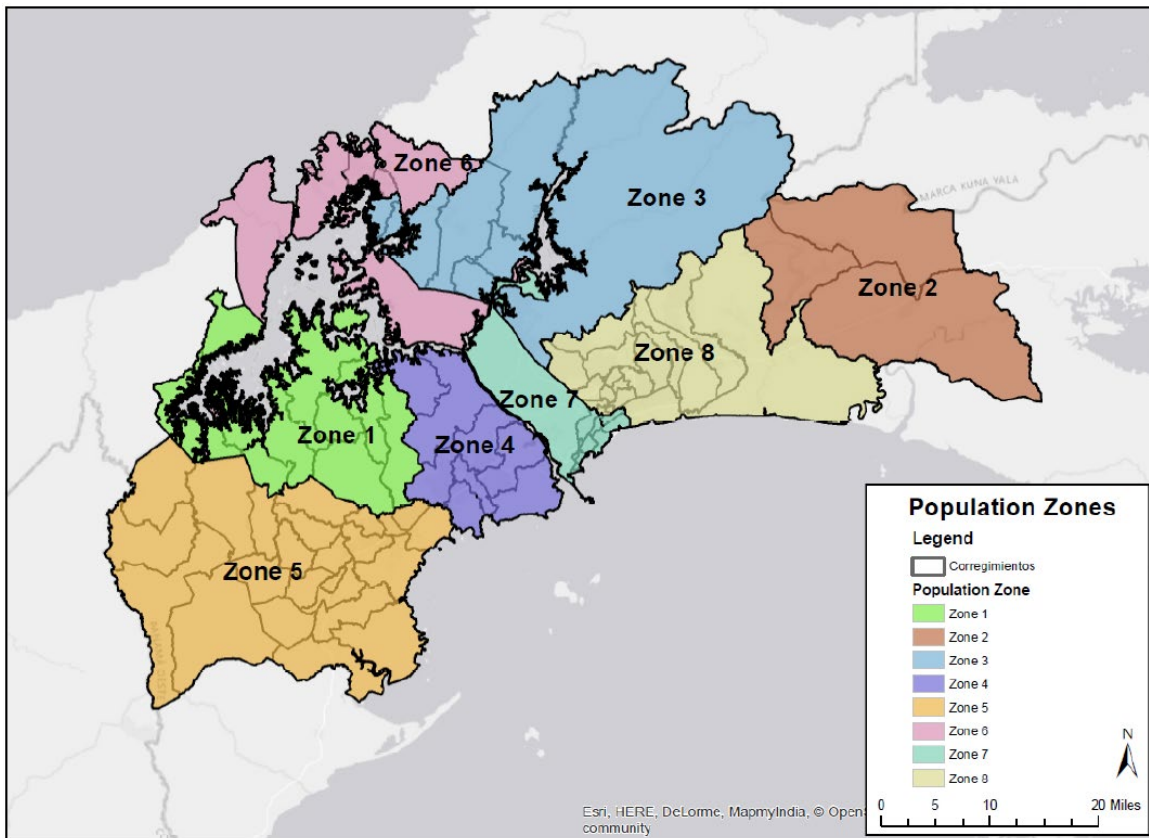
En la República de Panamá más de un 55% de los habitantes son abastecidos de agua proveniente de la CHCP. En términos generales, para estimar los requerimientos del uso del agua para consumo humano es fundamental conocer:

- La población por abastecer
- Las demandas netas por habitante

- Los subsistemas de abastecimiento
- Las pérdidas en los sistemas de distribución

Para la determinación de la población por abastecer se consideraron las 8 “zonas poblacionales” tomadas del estudio de Stantec¹⁸. Estas 8 zonas se componen de un total de 87 corregimientos que, de acuerdo con el estudio citado, son todos abastecidos por agua extraída de la CHCP, ya sea por medio de acueductos públicos o rurales.

Figura 60. Zonas poblacionales estudio Stantec



Fuente: estudio Stantec, 2018.

Conociendo la población a servir¹⁹, es necesario saber los patrones de consumo de agua potable. Para este propósito, en el estudio de Stantec se dividen los corregimientos por tres tipos de categorías: ur-

banos, suburbanos y rurales. A cada una de estas categorías se le asocia un consumo per cápita de agua potable.

18. STANTEC. (2019). *Municipal and Industrial Water Demand and Raw Water Consumption Forecast 2020-2050*. Panamá

19. La cantidad de habitantes fueron estimados a nivel de corregimientos, considerando los datos del INEC.

Tabla 41. Consumo per cápita de agua potable (en gal./hab./día) por tipo de conexión y categoría poblacional

Conexión	Categoría	Bajo	Medio	Alto
Contabilizada	Urbana	69	83	93
	Suburbana	55	63	75
	Rural	34	42	45
No contabilizada	Urbana	111	160	232
	Suburbana	111	160	232
	Rural	111	160	232

Fuente: equipo redactor PIOTA a partir de datos de Stantec, 2021.

Además, otra consideración para determinar la dotación por habitante, fueron los porcentajes del agua contabilizada y no contabilizada por tipo de

población (urbana, suburbana y rural). A continuación, se muestran los datos tomados en cuenta en el modelo:

Tabla 42. Porcentajes del agua contabilizada y no contabilizada por categoría poblacional

Categoría	Agua contabilizada (%)	Agua no contabilizada (%)
Urbana	61	39
Suburbana	40	60
Rural	50	50

Fuente: equipo redactor PIOTA a partir de datos de Stantec, 2021.

Finalmente, se obtuvieron las demandas per cápita de agua potable para cada tipo de categoría poblacional, siguiendo una distribución de los patrones de consumo de: 25% bajo, 50% medio y 25%

alto. A continuación, se muestran los resultados de las demandas per cápita de agua potable por tipo de categoría poblacional consideradas para el escenario tendencial:

Tabla 43. Demanda per cápita de agua potable para el escenario tendencial

Categoría	Consumo medio (gal./hab./día)	Consumo medio (l/hab./día)
Urbana	115	434
Suburbana	125	473
Rural	103	391

Fuente: equipo redactor PIOTA a partir de datos de Stantec, 2021.

Al disponer de las demandas per cápita de agua potable para cada categoría de población (urbana, suburbana y rural), ahora es necesario conocer la fuente de agua que abastece a cada zona poblacional. El criterio que se tomó en cuenta es que las poblaciones urbanas y suburbanas son servidas por los acueductos públicos del IDAAN, y el origen de sus aguas son los embalses Gatún y Alhajuela, donde se extrae el agua cruda para las potabilizadoras²⁰. Por otro lado, las poblaciones rurales, son abastecidas por los acueductos rurales, y se con-

sideró que se abastecen de los cuerpos de agua de las subcuencas donde se localizan los corregimientos rurales.

De este análisis se obtuvo que los corregimientos urbanos y suburbanos de las zonas 2, 3, 4, 5 y 6 son abastecidos por el sistema del embalse Gatún, mientras que los corregimientos urbanos y suburbanos de las zonas 7 y 8 (localizados en la provincia de Panamá), son abastecidos por el sistema del embalse Alhajuela. En cambio, la población rural

20. Federico Guardia Conte (Chilibre) extrae agua del embalse Alhajuela, mientras que Monte Esperanza, Miraflores, Laguna Alta, Antonio Yepes de León (Sabanitas), Mendoza y Escobal, extraen agua del embalse Gatún.

se abastece de agua proveniente de sus mismas subcuencas. Los corregimientos rurales se localizaron dentro de las siguientes subcuencas: Gatún Sur, Gatún Norte, Chagres, Trinidad y Ciri Grande.

De acuerdo con las clasificaciones del estudio de Stantec, de los 87 corregimientos considerados, 16 son urbanos, 43 suburbanos y 28 rurales. A continuación, se muestra la distribución de la población urbana y suburbana para cada una de las zonas poblacionales, y la dotación per cápita estimada:

Tabla 44. Dotación per cápita por zona poblacional

Zona población	Distribución poblacional		Dotación per cápita de agua potable	
	Suburbana (%)	Urbana (%)	Gal./hab./día	l/hab./día
Zona 2	100	0	125	473
Zona 3	100	0	125	473
Zona 4	100	0	125	473
Zona 5	100	0	125	473
Zona 6	11	89	116	438
Zona 7	14	86	116	440
Zona 8	100	0	125	473

Fuente: equipo redactor PIOTA a partir de datos de Stantec y del INEC.

La dotación per cápita de agua potable para los corregimientos rurales es de 391 litros/hab./día.

Por último, otro factor que está directamente ligado al uso del agua potable para consumo humano es la eficiencia de los sistemas de distribución. Actualmente las pérdidas en los sistemas de distribución son de cerca de un 30%, y este valor fue el considerado en el escenario tendencial.

2.4.1.1.2

Agua para la operación del Canal (transportación)

El Canal de Panamá es mundialmente reconocido por ser una ruta de navegación para el transporte marítimo, y para estos propósitos, opera los sistemas de esclusas Panamax y Neo Panamax. La ACP, considerando los datos de disponibilidad de agua, demanda de tránsitos y con el objetivo de mantener la calidad de agua del embalse Gatún, ha realizado el ejercicio de proyectar la demanda de agua para el tránsito de buques, teniendo en cuenta la capacidad actual del sistema. A futuro, cuando se definan alternativas para aumentar la capacidad de almacenamiento y/o incluir nuevas fuentes de agua, se deberán modelar otros escenarios.

Para determinar los tres escenarios, se ha considerado el paso de buques de manera irrestricta, la disponibilidad de agua y la conservación de la calidad del agua del embalse Gatún. De esta manera, de acuerdo con el volumen disponible en el sistema de embalses, se opera implementando medidas que permitan el ahorro de agua, mantener la calidad de agua y el máximo calado estacional para los buques.

En el escenario tendencial se considera el volumen de agua utilizado observado en los últimos años e implica que el uso se irá incrementando, proporcionalmente, al tránsito de buques (proyección de demanda de tránsito), si no se aplican medidas diferentes. En el escenario ambicioso se utilizan menores volúmenes de agua para el tránsito, a la vez que se cumplen con preservar la calidad de agua. El escenario deseado implica la aplicación de medidas optimizadas para el tránsito y mantener la calidad de agua del embalse Gatún.

A continuación, se muestran las demandas de agua proyectadas para la navegación para los diferentes horizontes y escenarios planteados en el presente estudio:

Tabla 45. Demandas de agua para la navegación por escenario

Año	Tendencial		Ambicioso		Consensuado	
	Esclusajes Pana-max equivalentes / día	Millones de metros cúbicos / día	Esclusajes Pana-max equivalentes / día	Millones de metros cúbicos / día	Esclusajes Pana-max equivalentes / día	Millones de metros cúbicos / día
2025	50.17	10.45	43.60	9.08	46.93	9.77
2030	55.31	11.51	47.98	9.99	51.64	10.75
2040	58.60	12.20	50.70	10.55	54.66	11.38
2070	58.60	12.20	50.70	10.55	54.66	11.38

Fuente: Sección de Meteorología e Hidrología (HIAM), ACP.

Es importante comentar que un esclusaje Panamax equivalente utiliza un volumen de 55 millones de galones de agua, y que la ACP supone que para el año 2034 no aumentará más la demanda de las esclusas (con el sistema actual).

tecidas por las redes de distribución y, por ende, se estimarán las mismas pérdidas (30%) que las consideradas para el consumo humano²².

2.4.1.1.4

Agua para uso agropecuario

2.4.1.1.3

Agua para uso industrial

La industria es otro de los sectores que hacen uso del agua de la CHCP. Esta agua se demanda por las industrias, ya sea para la elaboración de sus productos, como para el mantenimiento de sus materiales y equipos, entre otros. Una forma de determinar el suministro de agua industrial es con base a los requerimientos medios que se realizan en las industrias, de acuerdo con sus superficies. Es decir, que se puede asociar un consumo medio de agua por superficie de suelo industrial. Del análisis se considerará la superficie industrial dentro de la CHCP, así como las industrias que se localizan en las ciudades de Colón y Panamá.

La dotación de agua para el uso industrial considerada en el estudio es la equivalente a un gasto máximo horario de 1 l/s por hectárea²¹. Es decir, que cada hectárea de área industrial demandará 31,536 m³/año.

De acuerdo con la información recabada, la gran mayoría de las industrias están conectadas al suministro municipal. Por ello, en la modelación se considerará que las demandas industriales serán abas-

El sector agropecuario es otro de los sectores que consume agua de la CHCP. Referente a la agricultura, los cultivos de piña y café son los más extensos dentro de la Cuenca. Sin embargo, el único que hace uso de riego es la piña, y por eso, fue considerado en el análisis. Por otro lado, el consumo de agua del ganado vacuno fue considerado en la modelación, y éste se relaciona con las superficies de pasto dentro de la CHCP.

Demanda agrícola de agua del cultivo de piña

El cálculo de la demanda agrícola del cultivo de piña se realizó con base en los valores utilizados en el *Reporte de determinación del balance hídrico y caudal ambiental de la Cuenca del Río Indio*²³ (contigua a la CHCP), elaborado por el consultor *Environmental Resources Management* (ERM).

Para la determinación del requerimiento de agua del cultivo se aplicó la siguiente fórmula:

21. Dicha dotación es la recomendada por la Norma Mexicana NMX-R-046-SCFI-2015 para parques industriales
22. STANTEC. (2019). *Municipal and Industrial Water Demand and Raw Water Consumption Forecast 2020-2050*. Panamá.
23. Este reporte forma parte de los productos elaborados en el marco del Contrato 023-2016, firmado entre el Ministerio de Ambiente y la Autoridad del Canal de Panamá, denominado "Estudio para la elaboración del diseño conceptual del reservorio multipropósito en la Cuenca de Río Indio y proyectos complementarios para el manejo de la cuenca".

$$Da = 10 \frac{\left[(Kc \times ETp) - \frac{(P \times Ke)}{100} \right]}{Kr}$$

En donde,

- Da: requerimiento de agua del cultivo (m³/ha)
- 10: es el factor que aplica para convertir a m³/ha
- Kc: coeficiente de cultivo
- ETp: evapotranspiración de referencia potencial
- P: precipitación en mm
- Ke: coeficiente de escurrimiento
- Kr: coeficiente de eficiencia de riego

A continuación, se muestran los valores considerados y el resultado del requerimiento de agua por superficie para el cultivo de piña de la Cuenca:

Tabla 46. Demanda agrícola de agua del cultivo de piña

Variable	Unidad de medida	Piña
Kc	-	0.5
ETp	mm/año	1,567
P	mm/año	2,500
Ke	-	0.542
Kr	-	0.65
Da	m ³ /ha/año	11,845

Fuente: equipo redactor PIOTA a partir de datos de ERM.

Demanda pecuaria de agua del ganado vacuno

De acuerdo con datos obtenidos del Censo Agropecuario 2011, el hato ganadero de la Cuenca estaba conformado por unas 90,177 cabezas, de las cuales el 49.5% eran vacas, el 28.6% novillos y novillas y el 15.9% terneros y terneras; los bueyes, toros y toretes, apenas alcanzaban el 6% del ganado vacuno. Se estimaba, al 2012, una ocupación de

73,358 hectáreas de suelo de pastos asociados al sector pecuario dentro de la CHCP.

El ciclo de vida del ganado se ordena en la fase de cría (terneros y terneras), engorde (novillos, novillas y toretes) y terminación (toros, bueyes y vacas). En la Tabla 47 se destaca el consumo de agua por animal según su tipo:

Tabla 47. Consumo de agua por cabeza de ganado vacuno al año (según tipo de animal)

Tiempo	Cría	Engorde			Madurez o terminación		
	Terneros y terneras	Novillos	Novillas	Toretos	Toros	Bueyes	Vacas
Año (m ³)	9	16	16	20	25	22	32

Fuente: Estimación de la demanda de Agua (IDEAM 2010, Colombia) y Estimación de la demanda de agua (SAGARPA 2010, México).

Es ahora posible determinar el consumo de agua del ganado vacuno según tipo de animal. A conti-

nuación, se muestran los consumos de agua para el año 2011.

Tabla 48. Consumo de agua de ganado vacuno (m³) en la CHCP (año 2011)

Total m³	Cría	Engorde			Madurez o terminación		
	Terneros y terneras	Novillos	Novillas	Toretas	Toros	Bueyes	Vacas
2,092,872	129,267	201,184	211,200	45,280	72,075	5,962	1,427,904

Fuente: equipo redactor PIOTA a partir de datos del Censo Agropecuario 2011.

A su vez, existe un consumo de agua asociado a los establos y otras instalaciones de atención al ganado, el cual se consideró de 40 litros/día por cabeza de ganado²⁴.

De los resultados del hato ganadero de 2011, se determinó que se consumió un total de 3,409,456 m³, repartidos en 2,092,872 m³ de consumo del ganado y 1,316,584 m³ de consumo asociado a los establos.

Con esta información y con la superficie de suelo pecuario (pasto), es ahora posible medir la tasa de cabezas de ganado por superficie, así como el requerimiento de agua para el ganado vacuno por superficie. Se obtuvo que en la CHCP se tiene un promedio de 1.23 cabezas de ganado por cada hectárea de pasto. Así como se demanda un consumo de 46.47 m³/año por hectárea de pasto.

Concesiones de agua

Es importante mencionar que en las anteriores consideraciones se incluyen las concesiones otorgadas por la ACP para la extracción de agua en la CHCP²⁵. El uso con fines doméstico (de los acueductos rurales), la industria y la agricultura dentro de la Cuenca son los principales usos del agua considerados en las concesiones. Como se ha mencionado, se consideró que las poblaciones rurales son abastecidas de agua proveniente de los cuerpos de agua de las propias subcuencas donde se localizan. Mientras que en la modelación se consideró que las demandas industriales son abastecidas por las redes de distribución de agua potable. Por otro lado, la fuente del agua empleada para los usos agropecuarios es la misma subcuenca donde se localizan los cultivos estudiados, y sus extracciones son los volúmenes de demandas de agua calculados para esos fines.

2.4.1.2

Prospectiva demográfica

En este apartado se detalla cómo se obtuvo la proyección demográfica de la CHCP y los corregimientos que extraen el agua de ésta, agrupados por zonas de atención hídrica.

2.4.1.2.1

Población en la Cuenca Hidrográfica del Canal de Panamá - CHCP

La proyección de población de la CHCP se realiza en dos fases, la primera se refiere a la construcción de la línea base, es decir, el cálculo de la población actual (año 2020) y la segunda a la proyección de esta población en cuatro horizontes temporales 2025, 2030, 2040 y 2070.

Para la proyección de la población al año 2020, se utiliza como base la población de la CHCP según el Censo 2010 y se aplica la Tasa de Crecimiento Medio Anual (TCMA) de cada corregimiento obtenida de las proyecciones del INEC (Año 2010 - 2020), y aplicada a cada lugar poblado de la CHCP según su localización dentro del corregimiento respectivo.

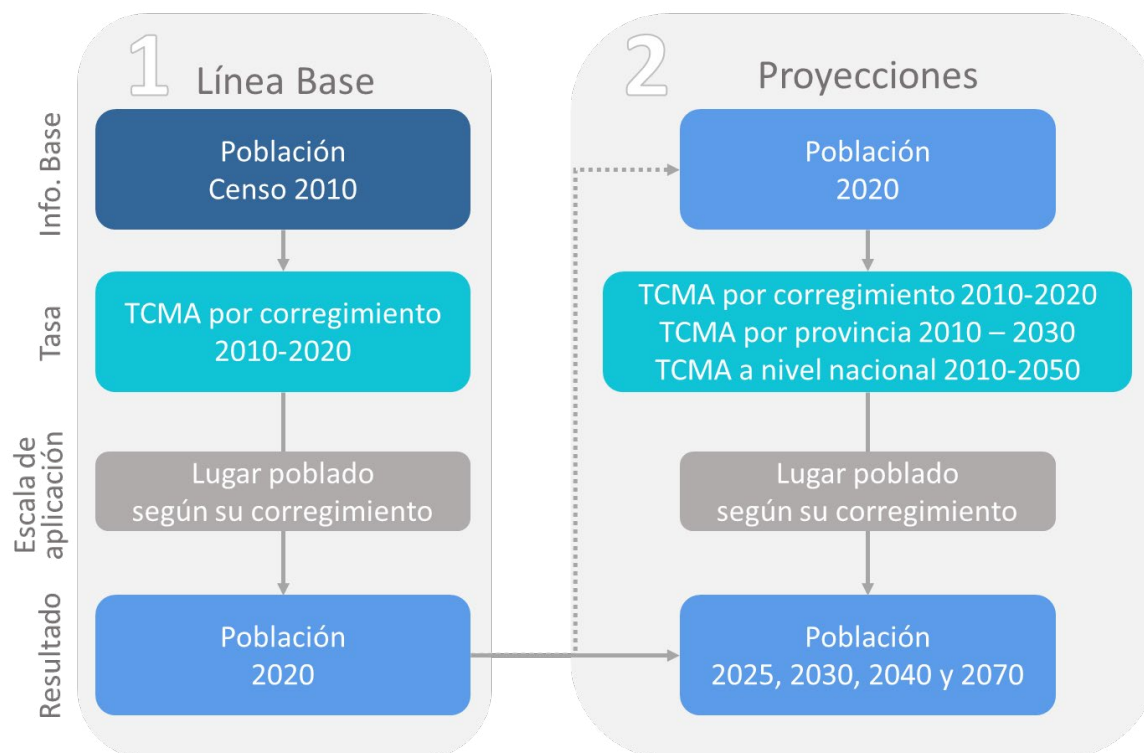
Una vez construida esta línea base, se proyecta la población 2020 a los diferentes horizontes temporales (2025, 2030, 2040 y 2070), aplicando una Tasa de Crecimiento Medio Anual, a razón del promedio de tres tasas oficiales calculadas por el INEC, según nivel de segregación territorial y horizonte temporal. Estas tres tasas de crecimiento permiten obtener la media de desarrollo de la población, teniendo en cuenta diferentes horizontes, y su evolución de cara al futuro:

24. Unidades de consumo: Melguizo B., Samuel. Fundamentos de Hidráulica e Instalaciones de abasto en las edificaciones. Centro de Publicaciones Universidad Nacional Medellín.

25. Mediante el Acuerdo No. 103 de 25 de agosto de 2005, y sus consiguientes modificaciones, se estipula que la ACP es la autoridad responsable de otorgar los permisos de extracción de aguas de la Cuenca Hidrográfica del Canal de Panamá.

- TCMA de cada corregimiento, calculada por el INEC desde el año 2010 hasta el año 2020.
- TCMA de cada provincia, calculada por el INEC desde el año 2010 hasta el año 2030. Teniendo en cuenta que la división política-administrativa vigente al momento de la proyección únicamente incluía la provincia de Panamá y Colón.
- TCMA a nivel nacional, calculada por el INEC desde el año 2010-2050.

Figura 61. Esquema de metodología utilizada para la proyección de población de la CHCP



Fuente: Equipo redactor PIOTA, 2021.

Tal y como se observa en la Tabla 49, la TCMA varía de acuerdo con los patrones de crecimiento de cada corregimiento, lo que permite identificar cuáles son los sectores que se están desarrollando con mayor rapidez y su vinculación con las condiciones territoriales que los representan. Al igual que en la primera fase, cada lugar poblado ha sido proyectado según la TCMA del corregimiento del cual forma parte.

En general, la TCMA tendencial de la CHCP es de 1.77% siendo en promedio para el distrito de Panamá un 2.44%, Arraiján 1.91%, Capira 1.53%, La Chorrera 1.69% y Colón 1.62%. Específicamente, resalta el corregimiento de Ancón, con la mayor TCMA de todos los corregimientos que forman parte de la CHCP con 2,80%, superior a la media distrital, seguido se encuentran los corregimientos 24 de Diciembre, Herrera y Alcalde Díaz, con TCMA en torno a los 2.5%.

Tabla 49. Tasa de Crecimiento Media Anual por corregimiento de la CHCP

Distrito	Corregimiento	Censo 2010	Proyección 2020	Tasa de crecimiento			TCMA
			Total	Corregimiento (2010-2020)	Provincia (2010-2030)	País (2010-2050)	
Panamá							
	Chilibre	53,955	83,877	4.51%	1.55%	1.08%	2.38%
	Ancón	29,761	52,082	5.76%	1.55%	1.08%	2.80%
	Alcalde Díaz	41,292	65,399	4.71%	1.55%	1.08%	2.45%
	Pacora	52,494	75,033	3.64%	1.55%	1.08%	2.09%
	24 de Diciembre	65,404	105,738	4.92%	1.55%	1.08%	2.52%
	Las Cumbres	32,867	51,313	4.56%	1.55%	1.08%	2.40%
Arraiján							
	Nuevo Emperador	3,903	5,283	3.07%	1.55%	1.08%	1.90%
	Santa Clara	2,139	2,780	2.66%	1.55%	1.08%	1.76%
	Arraiján	41,041	57,655	3.46%	1.55%	1.08%	2.03%
	Burunga	39,102	53,691	3.22%	1.55%	1.08%	1.95%
Capira							
	El Cacao	4,951	6,017	1.97%	1.55%	1.08%	1.53%
	La Trinidad	2,572	3,149	2.04%	1.55%	1.08%	1.56%
	Santa Rosa	1,767	2,132	1.90%	1.55%	1.08%	1.51%
	Caimito	1,635	2,045	2.26%	1.55%	1.08%	1.63%
	Cirí de los Sotos	2,288	2,779	1.96%	1.55%	1.08%	1.53%
	Cirí Grande	3,635	4,259	1.60%	1.55%	1.08%	1.41%
La Chorrera							
	Arosemena	426	554	2.66%	1.55%	1.08%	1.77%
	Amador	2,996	3,501	1.57%	1.55%	1.08%	1.40%
	Iturralde	1,354	1,721	2.43%	1.55%	1.08%	1.69%
	La Represa	681	821	1.89%	1.55%	1.08%	1.51%
	Mendoza	1,233	1,508	2.03%	1.55%	1.08%	1.56%
	El Arado	2,715	3,395	2.26%	1.55%	1.08%	1.63%
	Hurtado	1,206	1,516	2.31%	1.55%	1.08%	1.65%
	Herrera	2,552	4,112	4.89%	1.55%	1.08%	2.51%
	Obaldía	549	661	1.87%	1.55%	1.08%	1.50%
Colón							
	Buena Vista	14,285	17,265	1.91%	1.50%	1.08%	1.50%
	Ciricito	2,900	3,597	2.18%	1.50%	1.08%	1.59%
	Cristóbal	49,422	62,033	2.30%	1.50%	1.08%	1.63%
	Escobal	2,388	2,868	1.85%	1.50%	1.08%	1.48%
	Limón	4,665	5,604	1.85%	1.50%	1.08%	1.48%
	Nueva Providencia	5,813	8,171	3.46%	1.50%	1.08%	2.02%
	Salamanca	3,881	4,925	2.41%	1.50%	1.08%	1.66%
	San Juan	17,430	21,844	2.28%	1.50%	1.08%	1.62%
	Santa Rosa	987	1,261	2.48%	1.50%	1.08%	1.69%
	Puerto Pilón	16,517	21,298	2.57%	1.50%	1.08%	1.72%
	Sabanitas	19,052	22,814	1.82%	1.50%	1.08%	1.47%
	Cativá	34,558	43,257	2.27%	1.50%	1.08%	1.62%
Chagres							
	La Encantada	2,561	2,815	0.95%	1.50%	1.08%	1.18%

Fuente: Equipo redactor PIOTA, 2021.

Finalmente, y bajo un escenario tendencial que continúe los patrones de crecimiento establecidos por el INEC, se estima que:

- para el año 2025 la CHCP posee una población de 264,876 habitantes de los cuales el 61% estará concentrado en las regiones del Corredor Transísmico.
- para el año 2030 la población aumenta en 28,897 personas, con un total de 293,773 habitantes.
- posteriormente para el año 2040 la CHCP poseerá una población de 361,802 habitantes, por lo que en 20 años la población actual de la Cuenca (2020) aumentará en un 51%.
- el último horizonte temporal se establece en el año 2070, donde la Cuenca prácticamente triplicará su población actual, con un total de 682,148 habitantes. Las regiones de mayor crecimiento son las del Corredor Transísmico Chilibre y Chilibrillo, Corredor Transísmico Colón, seguido del Lago Miraflores, Lago Gatún y Chagres y Alhajuela.

Tabla 50. Proyección de población de la CHCP por región (2020, 2025, 2030, 2040 y 2070)

Regiones	Censo 2010	Proyecciones				
		Pob. 2020	Pob. 2025	Pob. 2030	Pob. 2040	Pob. 2070
Chagres y Alhajuela	8,664	12,230	13,548	15,014	18,461	34,659
Baila Mono, Cañito, Paja y Pescado	6,815	8,928	9,757	10,664	12,738	21,730
Cirí y Trinidad	11,066	13,407	14,460	15,595	18,141	28,560
Lago Gatún	29,534	41,862	46,413	51,480	63,407	119,576
Lago Miraflores	7,040	10,127	11,253	12,508	15,467	29,458
Los Hules, Tinajones y Caño Quebrado	4,719	6,082	6,639	7,250	8,660	14,945
Corredor Transísmico Chilibre y Chilibrillo	65,443	102,590	115,569	130,191	165,225	337,804
Corredor Transísmico Colón	35,383	43,693	47,238	51,072	59,702	95,416
Total general	168,664	238,917	264,876	293,773	361,802	682,148

Fuente: Equipo redactor PIOTA, 2021.

No obstante, esta población es una estimación aproximada a la tendencia poblacional que experimenta el ámbito de estudio. En fases posteriores, se definirán los escenarios futuros a los que se orientará la planificación territorial y los elementos susceptibles para un cambio en el crecimiento poblacional.

2.4.1.2.2

Proyección de población de las zonas de atención hídrica

Tal y como se ha explicado anteriormente, el desarrollo de los escenarios territoriales, tendrá en consideración todas las zonas que abastecen sus requerimientos de agua con los recursos hídricos de la CHCP, por lo que se han utilizado las ocho zonas delimitadas en el estudio de Stantec²⁶, las cuales están conformadas por 87 corregimientos (algu-

nos exteriores a la CHCP, tal y como se muestra en la Figura 60) pertenecientes a los distritos Chepo, Panamá y San Miguelito de la provincia de Panamá, los distritos de La Chorrera, Arraiján y Capiá, de la provincia de Panamá Oeste, y el distrito Colón de la provincia de Colón.

La metodología aplicada para la proyección de población de estas ocho zonas es muy similar a la aplicada para el cálculo de la proyección de población de la CHCP; con las siguientes dos diferencias:

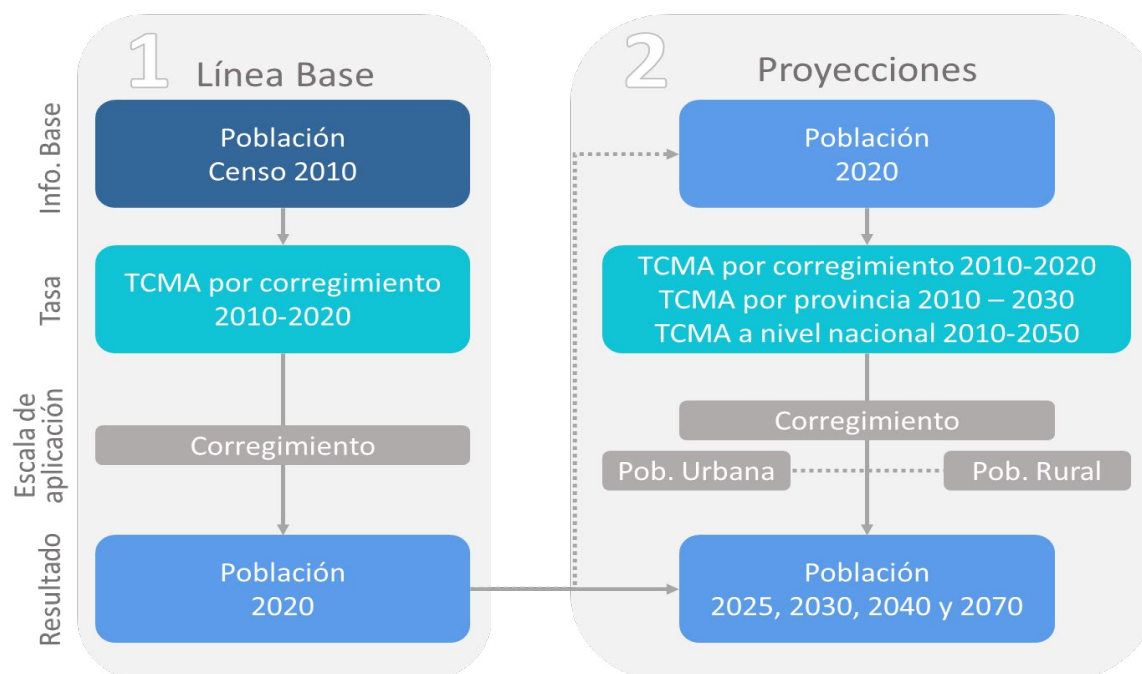
- 1) La TCMA aplicada se refiere directamente al corregimiento, por estar incluido en la totalidad dentro de la zona de requerimiento hídrico, y no es trasladada a cada lugar poblado como se realizó anteriormente.

26. STANTEC. (2019). *Municipal and Industrial Water Demand and Raw Water Consumption Forecast 2020-2050*. Panamá

2) La TCMA podrá variar de acuerdo con el crecimiento de la población rural y urbana. Inicialmente el INEC no diferencia en las proyecciones de población distintas TCMA para cada una; sin embargo, ésta será una variable de cambio

para la construcción de escenarios futuros, respetando la distribución porcentual de cada corregimiento en población urbana y rural según el censo 2010.

Figura 62. Esquema de metodología utilizada para la proyección de las 8 zonas poblacionales



Fuente: Equipo redactor PIOTA, 2021.

En Tabla 51 se puede observar cuáles son las TCMA tendencial de cada zona, con un promedio de 1.69% de crecimiento, resaltando la Zona 2 al este

en el distrito de Chepo y Panamá, como la de mayor TCMA con un 2.02%, seguido de la Zona 3 y 4 con un 1.76%.

Tabla 51. Tasa de Crecimiento Media Anual por zona abastecida de la CHCP

Zonas	Tasa de crecimiento			TCMA
	Corregimiento (2010-2020)	Provincia (2010-2030)	País (2010-2050)	
Zona 1	2.42%	1.54%	1.08%	1.68%
Zona 2	3.41%	1.55%	1.08%	2.02%
Zona 3	2.70%	1.51%	1.08%	1.76%
Zona 4	3.02%	1.55%	1.08%	1.76%
Zona 5	2.25%	1.55%	1.08%	1.63%
Zona 6	2.16%	1.50%	1.08%	1.58%
Zona 7	1.58%	1.55%	1.08%	1.40%
Zona 8	2.86%	1.55%	1.08%	1.37%
Total general	2.44%	1.55%	1.08%	1.69%

Fuente: Equipo redactor PIOTA, 2021.

La construcción de la línea base a 2020 señala que en las ocho zonas que demandan agua de la CHCP se encuentran cerca de 2,5 millones de personas,

siendo la zona 8 la que concentra el 46% de la población total, seguido de la zona 7 con un 15%, y la zona 4 con un 12%. En conjunto, estas tres zonas,

conforman el 74% de la población total de la CHCP y se refieren al núcleo central de la Ciudad de Panamá y sus áreas de crecimiento al este y oeste.

Finalmente, y bajo un escenario tendencial que continúe los patrones de crecimiento establecidos por el INEC, es decir, aplicando las TCMA obtenidas anteriormente (1.69% de promedio total), sin diferenciar a la población urbana y rural, se estima que para el año 2025, la población demandante crecerá a 2,6 millones de habitantes, lo que representa un 10% adicional en tan solo 5 años. En el año 2030 la población alcanza los 2,9 millones de

personas, y es para el año 2040 que supera los 3,5 millones de personas, lo que implica 1 millón de habitantes más en 20 años.

Finalmente, en el horizonte temporal de 50 años, es decir para el año 2070, la población de las zonas supera los 6 millones de personas, es decir, que la población actual (2020) se multiplica por 2,5 veces. De allí la importancia de generar estudios que permitan planificar los patrones de crecimiento urbano, la ocupación del suelo, los consumos de agua, entre otros, para garantizar la disponibilidad del recurso hídrico de la CHCP en los años futuros.

Tabla 52. Proyección de población tendencial de las 8 zonas poblacionales (2020, 2025, 2030, 2040 y 2070)

Zonas	Proyecciones				
	Pob. 2020	Pob. 2025	Pob. 2030	Pob. 2040	Pob. 2070
Zona 1	22,077	24,055	26,220	31,188	52,991
Zona 2	41,352	45,643	50,384	61,418	111,573
Zona 3	142,947	158,401	175,587	215,980	405,193
Zona 4	300,979	331,159	364,377	441,188	783,753
Zona 5	233,583	253,109	274,296	322,245	523,921
Zona 6	191,618	207,380	224,442	262,902	422,661
Zona 7	369,732	399,062	431,009	503,868	821,076
Zona 8	1,127,125	1,242,209	1,369,922	1,669,277	3,065,647
Total general	2,429,413	2,661,018	2,916,238	3,508,066	6,186,814

Fuente: Equipo redactor PIOTA, 2021.

2.4.1.3

Prospectiva económica

Tal y como se concluyó en el diagnóstico integral, las actividades económicas de mayor peso (excluyendo la actividad del Canal de Panamá) en la Cuenca es el comercio (principalmente en las zonas cercanas al Corredor Transistmico) y las actividades agropecuarias (fundamentalmente en la zona oeste de la CHCP). Además de estas actividades, se identificó que los grandes elementos motores de la actividad económica de la Cuenca se encuentran fuera de la misma y son las áreas metropolitanas de las ciudades de Colón y Panamá, cuyas actividades son, básicamente, del sector secundario y terciario.

En cuanto a la actividad comercial, su desarrollo está íntimamente vinculado a la tasa de crecimiento poblacional, por lo que la prospectiva se ha re-

lacionado directamente con ella. Así, el crecimiento poblacional se ha asociado con el crecimiento de las áreas pobladas que, en general, no son zonas monofuncionales, sino que aglutinan usos compatibles con el residencial (como pueden ser los usos comerciales, oficinas, equipamientos, etc.). Es este aspecto, en el modelo de escenarios territoriales planteado, el crecimiento o decrecimiento de la población implica un cambio proporcional en la actividad económica del sector terciario, en general, puesto que, como se indicó anteriormente, la tasa de crecimiento de la población del modelo incluye las áreas exteriores a la CHCP (pero que se abastecen de agua de la Cuenca), también en el aspecto de la actividad terciaria se contemplan esas áreas exteriores.

De un modo similar ocurre con el sector secundario, es decir, la industria. Si bien, a diferencia del sector terciario, este uso sí que tiene un carácter más

de tipo monofuncional, concentrándose este tipo de actividad en áreas muy definidas. También hay que añadir que, en este caso, la actividad industrial es un tanto residual en la Cuenca; sin embargo, de modo análogo a lo que ocurre con la actividad terciaria, la mayor parte de la industria se localiza en las áreas metropolitanas de Colón y Panamá y, también, consumiendo el recurso hídrico de la Cuenca. Aunque, como ya se manifestó, la red de agua potable alimenta (de modo general) tanto a la industria como a las áreas pobladas (usos residenciales, comerciales, oficinas, etc.), el comportamiento de la prospectiva industrial no se considera oportuno vincularla a la tasa de crecimiento poblacional.

Aun cuando, existe cierta vinculación entre el desarrollo poblacional y el industrial, los usos industriales están más relacionados con las decisiones de planificación económica, que se traduce en la implantación de complejos industriales y, consecuentemente, en la reserva de suelo para estos usos. Por ello, en este caso, y como se verá más adelante, se ha realizado un análisis de la evolución del suelo industrial (tanto en las dos áreas metropolitanas como en el interior de la Cuenca) en los últimos años; esto con el objetivo de determinar una tasa de crecimiento del suelo industrial, que estaría directamente relacionado con la evolución de este sector económico.

Por último, en lo que respecta, a la actividad agropecuaria, hay que señalar que es la que mayor extensión presenta dentro de la CHCP. Además, en este caso, el recurso hídrico se obtiene directamente de la Cuenca, por lo que no existen elemen-

tos exteriores que influyan en el análisis. En consecuencia, se ha realizado una vinculación directa entre la tasa de crecimiento del uso de suelo correspondiente (cultivos para la agricultura y pastos para la ganadería) y la actividad agropecuaria; aunque puede existir cierta discrepancia con actividades como las agroindustrias (industrias de transformación directamente ubicadas en el suelo rural), se ha considerado que el error es pequeño, dado el mínimo porcentaje que estas agroindustrias representan en la actividad agropecuaria.

2.4.1.4

Prospectiva de las infraestructuras

En el manejo de los recursos hídricos de la CHCP, la existencia de los embalses Gatún y Alhajuela es fundamental, debido a que representan las infraestructuras de almacenamiento del agua captada dentro de la Cuenca. En la actualidad se estima una capacidad máxima de almacenamiento de 6,138 hm³ y volumen útil de 1,167 hm³ para el embalse Gatún, mientras que para el embalse Alhajuela, una capacidad máxima de almacenamiento de 796 hm³ y volumen útil de 651 hm³.

Por otro lado, es primordial considerar las plantas potabilizadoras que extraen agua cruda de los embalses y ríos de la CHCP, debido a que representan las infraestructuras que producen el agua potable para el consumo humano de más de la mitad de la población nacional. A continuación, se muestran estas potabilizadoras y su capacidad de producción.

Tabla 53. Plantas potabilizadoras

Planta	Fuente	Administración	Capacidad de producción (millones de galones diarios)
Federico Guardia Conte	Embalse Alhajuela	IDAAN	250
Miraflores	Embalse Gatún	ACP	48
Mendoza	Embalse Gatún	ACP	40
Monte Esperanza	Embalse Gatún	ACP	34
Laguna Alta	Embalse Gatún	Aguas de Panamá	20
Antonio Yepes De León	Embalse Gatún	IDAAN	15
Río Gatún	Río Gatún	IDAAN	2
Escobal	Embalse Gatún	IDAAN	0.1

Fuente: ACP e IDAAN.

A pesar de que actualmente se tiene una capacidad de producción de 409.1 MGD de agua potable por parte de las potabilizadoras, para los futuros horizontes será necesario incrementar la capacidad de producción de agua potable, ya sea por ampliación de las actuales potabilizadoras o la construcción de nuevas.

En la actualidad se encuentran en construcción dos nuevas plantas potabilizadoras y la expansión de dos existentes que serán administradas por el IDAAN, y que servirán para garantizar el suministro de la población del área metropolitana de Panamá y Colón. El proyecto que más avances presenta es la construcción de Chilibre 3, el nuevo módulo de la planta Federico Guardia Conte que generará, diariamente, 15 millones de galones de agua adicionales. El otro proyecto de ampliación en ejecución es el nuevo módulo de la planta potabilizadora Antonio Yepes (Sabanitas II), el cual a comienzos de

2020 presentaba un avance físico del 31%, y que tendrá una capacidad de entre 30 y 35 MGD.

Por otro lado, se tiene el proyecto de la nueva planta potabilizadora Gamboa que pretende complementar a la planta de Chilibre, apoyando cuando esta última presente algún problema. En su fase inicial la planta Gamboa producirá 60 millones de galones de agua diarios. También se encuentra en ejecución la construcción de la nueva planta potabilizadora Ing. José Guillermo Rodríguez (Howard), la cual pretende producir en su etapa inicial 40 MGD con una capacidad de ampliación de 60 MGD para abastecer, principalmente, a los habitantes del distrito de Arraiján.

De acuerdo con los resultados obtenidos del escenario tendencial, se prevé un déficit hídrico para abastecer las demandas de agua de los diferentes sectores que usan el agua de la CHCP, para los cuatro horizontes planteados.

Tabla 54. Demandas insatisfechas del escenario tendencial

Horizonte	Volúmenes de demandas insatisfechas (hm ³ /año)
2025	211
2030	383
2040	591
2070	1129

Fuente: Equipo redactor PIOTA, 2021.

Al margen de que se recomienda buscar hacer más eficiente²⁷ el uso del agua de la CHCP, se cree que será necesario la construcción de nueva infraestructura que maximice el almacenamiento del agua dentro de la CHCP y/o añada nuevos recursos hídricos mediante fuentes adicionales de agua.

2.4.1.5

Prospectivas de las variables territoriales

Como fue mencionado previamente, para la construcción de los escenarios de desarrollo territorial se han definido dos grupos de variables. Las primeras se refieren a variables decisivas, de las cuales se definen las hipótesis de cambio (TCA) que establecerán los nuevos requerimientos de suelo. El de-

sarrollo de estas variables afecta a las del segundo grupo, denominadas variables resultantes, las cuales reflejan los cambios en el tiempo a razón del crecimiento o decrecimiento de las variables decisivas (ver Figura 58). Estas variables serán proyectadas a los cuatro horizontes temporales 2025, 2030, 2040 y 2070.

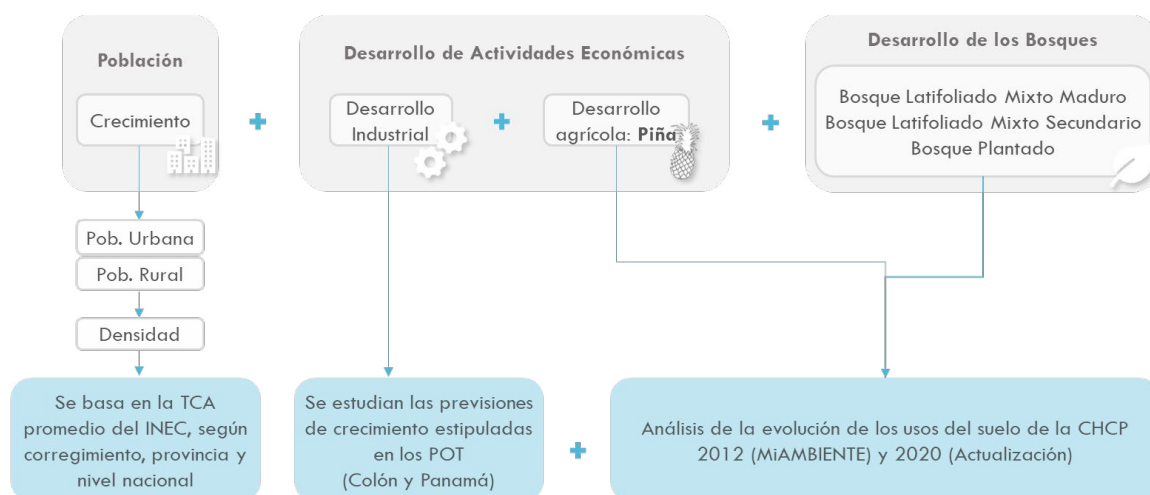
2.4.1.5.1

Variables decisivas

Las variables decisivas se basan en los resultados arrojados en el diagnóstico, las cuales pueden ser observadas en la Figura 63, de acuerdo con el esquema presentado en la Figura 58. A continuación, se explica cada una de estas variables y las fuentes y datos empleados para su determinación.

27. Mediante reducción de pérdidas, campañas de concienciación de ahorro del agua potable y ahorros en los sistemas de esclusaje

Figura 63. Variables decisivas



Fuente: Equipo redactor PIOTA, 2021.

Crecimiento poblacional y densidad

Las proyecciones de población se han desarrollado en el anterior apartado 2.4.1.2.2, donde, a modo de resumen, se definía una Tasa de Crecimiento Medio Anual (TCMA), cuyo análisis tendencial parte del promedio de tres tasas definidas por el INEC, según nivel territorial (corregimiento, provincia y país), de la cual resultaba una TCMA de 1.69% para las 8 zonas.

Sin embargo, en la definición de los escenarios de desarrollo territorial, se hace necesario la conversión de esta variable poblacional numérica a un indicador espacial de superficie, por lo que se añade la densidad poblacional, entendida como el número de personas que residen en un área poblada sobre la superficie de dicha área (residencial y no residencial). Así para la CHCP, se obtiene para el año 2020 una densidad de 22 hab/ha, que se ha considerado como la aplicable al escenario tendencial.

La combinación de la TCMA de la población y la densidad nos dará, como resultado, la necesidad de superficie para los usos de las áreas pobladas.

Superficie industrial

El análisis del desarrollo y evolución de las zonas industriales representa otro de los factores importantes para el cálculo de la demanda de agua; así como el suelo que ocupará dado su crecimiento en los cuatro horizontes temporales. Para obtener la tasa de crecimiento anual del suelo industrial de la

CHCP, se analizó la evolución de las zonas industriales según su localización geográfica:

- Área metropolitana de Panamá: se estudian las previsiones de crecimiento de la huella industrial del Plan de Ordenamiento Territorial (POT) de Panamá en el histórico 2017-2030, obteniendo una tasa de crecimiento anual de 2.1%.
- Área metropolitana de Colón: se determina una tasa de crecimiento anual de 4.1%, la mayor de las tres tasas analizadas, producto del análisis del desarrollo de las áreas industriales del POT de Colón en el horizonte temporal 2010-2025.
- CHCP: se analiza la evolución de la superficie ocupada por actividades industriales en la CHCP del año 2004 al 2020, obteniendo una tasa de crecimiento anual de 3.5%. Se utiliza de base el mapa de usos del suelo de la ACP del año 2004 y se realiza una actualización al año 2020, digitalización de áreas urbanas y suelo intervenido con base a imágenes satélites de Google Earth (2020), e información vectorial referente a cultivos y reforestación de la ACP y el PIEA (2020).

Como resultado, en promedio (es decir, considerando las tres áreas geográficas estudiadas) la tasa de crecimiento anual considerada es de 3.24% para el suelo industrial. Esta tasa es la que se considerará como tasa aplicable en el escenario tendencial.

Superficie de cultivo

Las tasas de crecimiento anual, de las superficies de los cultivos que requieren agua de riego (fundamentalmente la piña en el caso de la CHCP), fueron obtenidas del análisis de la evolución de la superficie que ocupaban en el año 2013 y su actualización al 2020. Específicamente, se utilizó la información de usos del suelo y cobertura vegetal de año 2012 (MiAMBIENTE) y 2013 (ACP), y se realiza una comparativa con los usos del suelo actualizados al año 2020, con información de tres fuentes básicas tal y como se explicó anteriormente (ACP, PIEA e imágenes satélites de Google Earth).

Después del análisis realizado, las tasas de crecimiento anual determinadas son de 0.15% para el cultivo de piña. La tasa obtenida en el análisis en el cambio de superficies (unas 40 ha en 7 años) es muy baja y, dada la superficie total de este cultivo (3,345 ha en 2020 para toda la Cuenca), se ha optado por suponer que este cultivo permanece sin variaciones; es decir, para el escenario tendencial se adoptará una tasa de crecimiento anual del 0.0%.

Desarrollo de los Bosques

La cobertura boscosa de la CHCP se clasifica en cuatro tipos de bosques: latifoliado mixto maduro, latifoliado mixto secundario, plantado de coníferas y plantado de latifoliadas, para los cuales se determinó la tasa de crecimiento anual basada en la comparativa 2004-2020, tal y como se realizó para la superficie industrial y las áreas de cultivo.

Por lo tanto, se calcula una tasa de 0.1% y 0.0% para los bosques latifoliados mixto maduro y secundarios, respectivamente, y de 6.2% para los bosques plantados de latifoliadas (en el caso de bosques plantados de coníferas se ha adoptado una tasa de 0.0%, debido a que su presencia es muy escasa).

Para los bosques plantados, la evolución de programas de reforestación llevados a cabo en la CHCP (como el PIEA por ejemplo), es la que determina, de modo general, el desarrollo de estos bosques, por ello se ha obtenido una tasa de 6.2%, que es elevada en comparación con las otras. Sin embargo, en los parques nacionales, son los planes de manejo los que influyen en la evolución de la cobertura boscosa.

En el caso de los bosques maduros y secundarios, su crecimiento es porcentualmente muy bajo, pero su valor absoluto es grande por la gran superficie que representan en el total de la Cuenca (más del 50% de la superficie total).

2.4.1.5.2

Variables resultantes

En la Figura 58 se pueden observar la dependencia entre las variables decisivas y las variables resultantes, ya que, en función la TCA de las primeras, se afecta al aumento o disminución de las segundas.

Usos del suelo afectados

El desarrollo de las variables decisivas, expuesto anteriormente, repercute en su propia ocupación del suelo (residencial, industrial, cultivos y bosques), pero a su vez modifica la superficie de otros cuatro usos principales:

- Pasto
- Rastrojo y vegetación arbustiva
- Vegetación herbácea
- Vegetación baja inundable

Éstos, disminuirán o aumentarán su superficie a razón del crecimiento o decrecimiento de la superficie de las variables decisivas. De manera ilustrativa, si se estima un elevado crecimiento poblacional con una baja densidad, este se traduciría en una mayor ocupación del suelo, que afectará la superficie que ocupan las variables resultantes, entre ellas, la vegetación arbustiva.

2.4.2

Validación de los escenarios a modelar

2.4.2.1

Escenario tendencial: demandas de agua

Como se ha mencionado en el apartado anterior de prospectiva (ver sección 2.4.1), las consideraciones del escenario tendencial en cuanto a las variables

que afectan a la demanda de agua se realizaron de acuerdo con datos propios del territorio y los diferentes sectores que hacen uso del agua de la CHCP. Es decir, se emplearon los datos obtenidos del análisis de las diferentes variables estudiadas, según la tendencia histórica.

Para la determinación del agua potable, destinada principalmente al consumo humano, se consideraron las zonas poblacionales y dotaciones per cápita del estudio de Stantec²⁸. Este estudio parte de datos proporcionados por el IDAAN y la ACP. Mientras que el número de los habitantes a servir se determinaron con base en las proyecciones del INEC.

En términos del agua para la operación del Canal, se han tomado las proyecciones elaboradas por la ACP que consideran el volumen de agua utilizado observado en los últimos años. En estas proyecciones se plantea un incremento del tránsito de buques.

En cuanto al uso industrial, se emplea la misma red de agua potable destinada al consumo humano, considerando una dotación de agua para el uso industrial de 1 l/s por hectárea²⁹. Para determinar la demanda se analizaron las tasas de crecimiento anual de las áreas industriales que son abastecidas de agua proveniente de la CHCP:

- Área metropolitana de Panamá a través de las previsiones de crecimiento de la huella industrial del POT de Panamá;
- Área metropolitana de Colón producto del análisis del desarrollo de las áreas industriales del POT de Colón;
- La propia CHCP mediante la evolución de la superficie ocupada por actividades industriales del año 2004 al 2020.

Por su parte, las demandas agropecuarias fueron determinadas con base en los consumos y requerimientos propuestos en el *“Reporte de determi-*

*nación del balance hídrico y caudal ambiental de la Cuenca del Río Indio”*³⁰ (contigua a la CHCP), con los datos de superficie de los cultivos (piña) y hato ganadero (en función de la superficie dedicada a Pasto) propios de la CHCP.

2.4.2.2

Aportaciones del taller de escenarios

En el taller *“Escenarios del modelo de balance hídrico de la CHCP”*, llevado a cabo el día 8 de abril de 2021, se dio una presentación de las variables territoriales/poblacionales y demandas consideradas en el escenario tendencial, por el equipo redactor del PIOTA. Como fue indicado anteriormente, este escenario se construyó a partir de los datos obtenidos en el diagnóstico (puede consultarse también la Figura 65 y la Figura 66 para conocer las variables empleadas en este escenario).

En el citado taller, se mostraron (sobre un modelo Excel que incorporaba gráficas dinámicas de los cambios) las tasas de cambio anuales y las superficies cubiertas de cada una de las diferentes categorías de uso de suelo de la Cuenca. Así como también, la tasa de cambio anual de la población urbana y rural. Mientras que, para las proyecciones de las demandas de agua, se indicaron las demandas y coeficientes de pérdidas para cada uno de los usos que extraen el recurso hídrico de la CHCP.

En el taller participaron miembros de diversas organizaciones como: instituciones de la Comisión Interinstitucional de la Cuenca Hidrográfica del Canal de Panamá (CICH); actores del territorio como los Comités Locales; la academia; municipios; el Consejo Nacional del Agua (CONAGUA), entre otros.

A continuación, se destacan los principales aportes de los participantes al taller:

- Se ha visto un gran incremento de la población ubicada en las zonas urbanas y suburbanas en el

28. STANTEC. (2019). *Municipal and Industrial Water Demand and Raw Water Consumption Forecast 2020-2050*. Panamá

29. Dicha dotación es la recomendada por la Norma Mexicana NMX-R-046-SCFI-2015 para parques industriales

30. Este reporte forma parte de los productos elaborados en el marco del Contrato 023-2016, firmado entre el Ministerio de Ambiente y la Autoridad del Canal de Panamá, denominado “Estudio para la elaboración del diseño conceptual del reservorio multipropósito en la Cuenca de Río Indio y proyectos complementarios para el manejo de la cuenca”.

área de influencia de la Cuenca, por lo que considerarán un mayor crecimiento anual de la población, que el estimado por las proyecciones del INEC.

- Los asistentes al taller consideran que la superficie industrial crecerá más que la proyección tendencial (3.24%), y proponen adoptar una tasa de crecimiento anual del 4.86%.
- También suponen que la superficie del cultivo de piña incrementará más del 0.15% de la Tasa de Cambio Anual, considerada en el escenario tendencial.
- Para los asistentes es necesario reducir las pérdidas en la red de distribución del agua potable. Se debería plantear un objetivo de reducir a un 10 o 15% las pérdidas (actualmente se consideran pérdidas del 30%).
- Se estima que las demandas per cápita de agua para consumo humano son muy altas, así como el agua no contabilizada. Se aconseja regularizar el consumo y reducir las dotaciones netas a un ideal de 150 o 200 l/hab./día.
- Según los asistentes, a mediano y largo plazo, será necesario incrementar la disponibilidad de los recursos hídricos para cubrir todas las demandas. La desalinización para el uso de las esclusas puede llegar a ser una opción viable en el futuro.
- En relación con lo anterior, será fundamental conocer e implementar los proyectos que serán priorizados por la Oficina de Proyectos Hídricos de la ACP, que buscan cubrir las demandas de agua para consumo humano y las operaciones del Canal; y contemplan maximizar el almacenaje de agua dentro de la CHCP y fuentes adicionales de agua.

2.4.2.3

Escenario ambicioso

Con base en las aportaciones recibidas de los asistentes al taller, a las propuestas del equipo redactor y los criterios de la ACP, se ha procedido a construir el escenario ambicioso. Las variables empleadas se muestran en la Figura 67 y Figura 68. A modo de resumen, se indican las principales hipótesis:

- Referente al agua potable para consumo humano se espera que la dotación neta de agua per cápita descienda un 35% para la demanda urbana (282 l/hab/día), un 55% para la demanda suburbana (220 l/hab/día), y un 65% para la demanda rural (141 l/hab/día). Lo anterior, conforme a la necesidad de reducir el agua no contabilizada y las dotaciones netas.
- También se plantea el objetivo de reducir hasta un 15% las pérdidas en la red de distribución de agua potable.
- En términos del agua para la operación del Canal, se han tomado las proyecciones elaboradas por la ACP, que consideran que se utilizan menores volúmenes de agua para el tránsito y se cumplen con los estándares de calidad de agua.
- La dotación de agua para el uso industrial plantea una reducción del 10%, respecto del agua utilizada en el escenario tendencial. Es decir, se plantea reducir hasta una demanda anual de 28,382 m3 por cada hectárea de suelo industrial. Por su parte, también se plantea una mejora en los sistemas de distribución al reducir las pérdidas a un 15%.
- En cuanto a la superficie industrial, en este escenario, se espera que la tasa de crecimiento anual sea de 2.50%. Es decir, inferior a la supuesta de 3.24% del escenario tendencial, puesto que se asume que habrá una contención en la expansión de suelo industrial.
- Para el uso agrícola se considera el mismo requerimiento anual neto de agua (en cuanto a cultivos y ganadería) que en el escenario tendencial. Sin embargo, se plantea una reducción en las pérdidas a un valor del 25%.
- Respecto a la superficie del cultivo de piña se considera que no crecerá más, limitándose a la superficie que actualmente ocupa en la CHCP.
- En cuanto a los bosques maduros y secundarios, se estima que su crecimiento se verá favorecido (por la consolidación del PIEA y de los Planes de Manejo de los Parques Nacionales), adoptando un valor de un 1% de tasa de crecimiento medio anual. La razón de tomar un valor que, a primera

vista puede parecer muy bajo, se justifica en que este tipo de bosques (maduros y/o secundarios) son muy abundantes en la Cuenca; por lo que un pequeño incremento porcentual significa ocupar una gran extensión (y esto supone restar superficie para otros usos y, en casos como la región de Chagres, no existe esa posibilidad, puesto que el 98% está ocupado por bosques de este tipo). Además, la generación de bosques maduros y/o secundarios es de largo plazo (es decir, la creación de este tipo de bosque requiere de varios años de crecimiento), por lo que su incorporación no es inmediata, sino que resulta de la evolución de los bosques plantados.

- Relacionado con lo anterior, también el bosque plantado de latifoliadas se presume que será potenciado, en este caso con un valor del 5.50%. El valor adoptado es inferior al del escenario tendencial, puesto que se considera que el valor tendencial es muy elevado por el gran esfuerzo que se ha hecho en los últimos años en la implantación del PIEA.

2.4.2.4

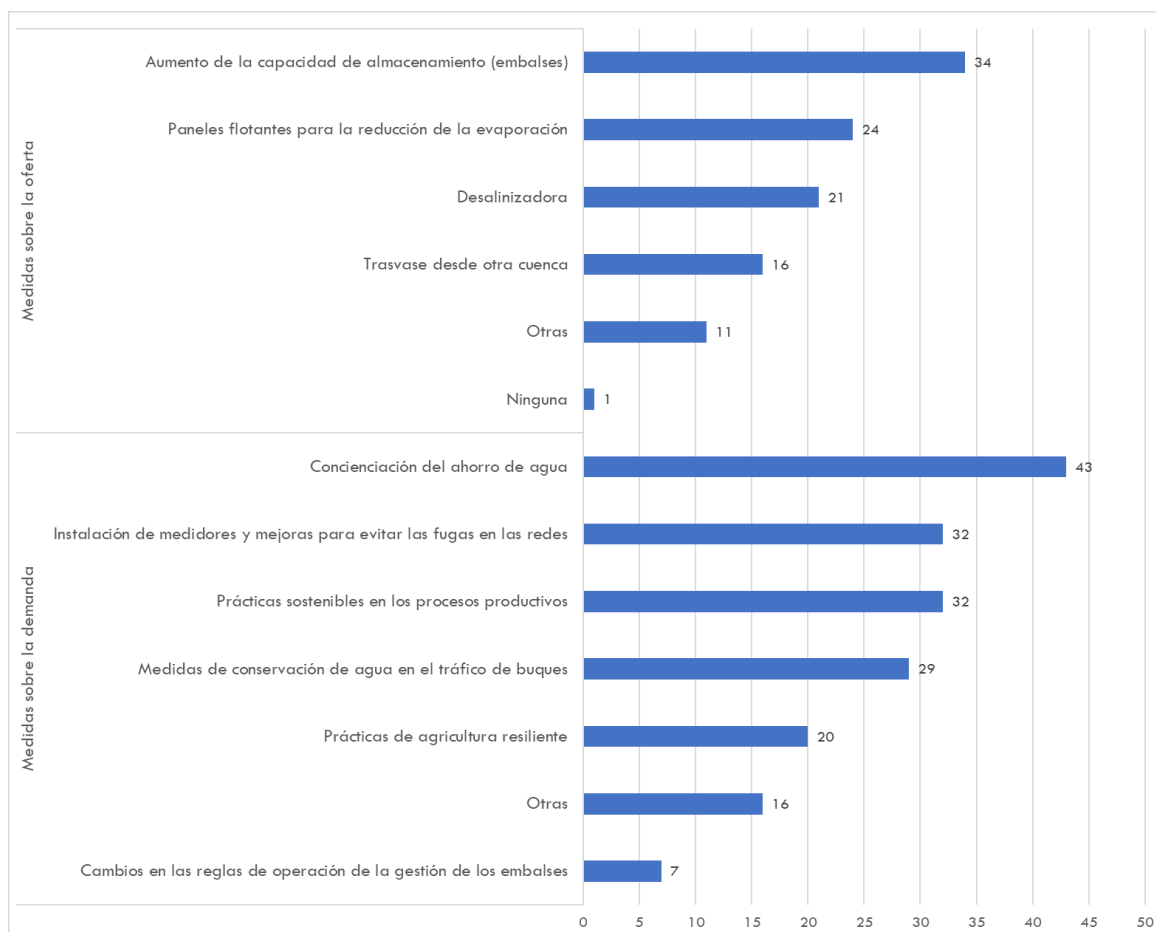
Aportaciones del taller de presentación de resultados

En el taller de “*Presentación de resultados de la modelación WEAP*”, llevado a cabo el día 18 de mayo de 2021, se hizo una presentación con los resultados de la modelación del escenario tendencial y ambicioso, por el equipo redactor del PIOTA. Asimismo, se adelantó una propuesta de escenario consensuado y una batería de medidas para ser debatidas con los asistentes al taller.

Participaron miembros de diversas organizaciones como: instituciones de la Comisión Interinstitucional de la Cuenca Hidrográfica del Canal de Panamá (CICH); actores del territorio como los Comités Locales; la academia; municipios; empresas privadas, entre otros.

Terminada la presentación de los resultados, sobre el mismo modelo Excel, empleado en el taller de escenarios, se implementaron diferentes medidas de adaptación para variar tanto la demanda de agua (por ejemplo, las dotaciones unitarias por habitante y día) o la oferta de agua (con diferentes medidas como, por ejemplo, la implantación de paneles fotovoltaicos para reducir la evaporación). En cuanto a las medidas, se realizó una votación, cuyos resultados fueron los siguientes:

Figura 64. Resultados de la votación sobre medidas de adaptación



Fuente: Equipo redactor PIOTA, 2021.

Como se observa en la anterior figura, sobre 52 respuestas recibidas, acerca de las medidas de la demanda, la que tiene mayor aceptación es la concienciación en el ahorro del agua (es decir, la reducción de las dotaciones de consumo por habitante y día). En cuanto a las medidas que actúan sobre la oferta, la mayoría opta por el aumento de la capacidad de los embalses. En este punto de medidas que actúan sobre la oferta, hay que indicar que la mayoría son medidas “grises”, es decir, que implican la construcción de infraestructuras, donde solo una persona ha indicado que no se requieren medidas de este tipo.

Por otro lado, se han recibido 27 respuestas de “otras medidas” (sumando las correspondientes a la oferta y a la demanda) que sugerían medidas distintas a las propuestas por el equipo redactor. Estas nuevas medidas se pueden agrupar bajo las siguientes categorías:

- Gobernanza socioambiental del agua.
- Conservación y mejora de los bosques de galería.
- Aumento de la cobertura boscosa en las fuentes de agua.
- A continuación, se destacan otros aportes de los participantes al taller:
- Se indica que existe un problema en el embalse Alhajuela por los sedimentos arrastrados (se supone que se trata de un proceso de sedimentación natural). La estimación es que se ha perdido una capacidad de embalse en un 30%, por lo que se considera es necesario dragar el embalse. A este respecto se señaló que la ACP realiza batimetrías periódicas y se debería constatar en qué situación se encuentra. Posteriormente al taller, se consultó con la la Sección de Topogra-

fía, Hidrografía y Cartografía de la ACP, la cuál informó que se han realizado batimetrías en el lago Alhajuela con el propósito de monitorear la sedimentación: en 1983, 1997, 2008, 2012 y 2018 (se ha tratado de mantener una frecuencia de cada 10 años). Así, desde la creación del embalse Alhajuela en 1935 hasta el 2012 (77 años), el embalse ha perdido el 12.5% de su volumen útil original. En términos generales, son tasas de sedimentación bajas en este tipo de embalses y esperadas según las proyecciones (según un estudio realizado en 2013, se espera que se alcance el 15% de pérdida del volumen útil alrededor de 2027).

- Se considera que las medidas en materia de la gestión de la demanda es la más acertada y eficiente. En este sentido, también se añade que la reducción de las pérdidas en la red de agua potable es también de gran importancia.
- La medida de cambio en las reglas de operación (subir el nivel de los embalses) no parece adecuado, puesto que supone riesgo de inundación para la población.
- La medida de la desalinización de agua es un tanto controvertida. Por un lado, se considera que es una tecnología muy cara y, por tanto, es descartable; mientras que, por otro lado, el agua marina es un recurso prácticamente ilimitado y, en este sentido, sería deseable adoptar esta medida por no afectar al agua dulce.
- Se plantea una opción para evitar la desalinización a través de embalses costeros.

2.4.2.5

Escenario consensuado

A partir de las aportaciones del taller de presentación de resultados y de sesiones de trabajo internas del Equipo redactor y la ACP, se ha definido el escenario consensuado. Las variables empleadas se muestran en la Figura 69 y Figura 70. A modo de resumen, se indican las principales hipótesis:

- En cuanto al agua potable para consumo humano, se espera que la dotación neta de agua per cápita descienda un 20% (348 l/hab/día) para la

demanda urbana, un 40% (330 l/hab/día) para la demanda suburbana y un 35% (251 l/hab/día) para la demanda rural. Lo anterior, conforme a la necesidad de reducir el agua no contabilizada (se considera regularizar la mitad de las conexiones domésticas no contabilizadas) y las dotaciones netas (comentado por los asistentes al taller).

- Relacionado con lo anterior, se plantea el objetivo de reducir hasta un 25% las pérdidas en la distribución de agua potable.
- Las demandas de agua empleadas para la operación del Canal se corresponden con las proyecciones elaboradas por la ACP, que consideran la aplicación de medidas optimizadas para el tránsito y mantener la calidad de agua del sistema de embalses (aunque se consideraron valores de demanda de agua superiores a los empleados en el escenario ambicioso; es decir, con medidas de ahorro de agua menos eficientes).
- La dotación de agua para el uso industrial considerada en este escenario es la misma que la utilizada en el escenario tendencial. Es decir, se plantea una demanda anual de 31,536 m3 por cada hectárea de suelo industrial. Por su parte, se plantea una mejora en los sistemas de distribución al reducir las pérdidas a un 25%.
- Relativo a la superficie industrial, en este escenario se espera que la tasa de crecimiento anual sea de 4.00%. Esta tasa es superior a la del escenario tendencial (3.24%), ya que en los comentarios recibidos todos los actores han coincidido en que las previsiones de nuevas instalaciones de tipo industrial (incluyendo las actividades portuarias) están en proceso de expansión.
- En el uso agrícola se considera el mismo requerimiento anual neto de agua (en cuanto a cultivos y ganadería) que el empleado en el escenario tendencial. Sin embargo, se plantea una reducción en las pérdidas a un valor del 30%. Respecto a la superficie del cultivo de piña se considera que no crecerá más, limitándose hasta la superficie que actualmente ocupa.
- Se estima que el crecimiento de los bosques maduros y secundarios tendrá una tasa de cre-

cimiento medio anual de un 0.5% en ambos casos, debido a la consolidación del PIEA y de los Planes de Manejo de los Parques Nacionales. Esta tasa se sitúa en un punto intermedio entre la del escenario ambicioso (1.0%) y la del tendencial (0.1% para los bosques maduros y 0.0% para los secundarios).

- En el caso del bosque plantado de latifoliadas la hipótesis de la tasa de crecimiento es del 3.0%. El valor adoptado es inferior al del escenario tendencial y del ambicioso: en el caso del ambicioso se redujo esa tasa (respecto al tendencial) puesto que el mayor crecimiento se ha dado por el fuerte impulso del PIEA; en este caso, también se ha considerado prudente reducirla aún más, también en la consideración de que la tasa se aplica en el plazo de 50 años.

2.4.3

Consideración de escenarios en términos de demanda

En este apartado se pretende mostrar las consideraciones para cuantificar las demandas de agua, que son servidas de los recursos hídricos de la CHCP para los diferentes escenarios planteados.

2.4.3.1

Consideraciones del escenario tendencial

Agua potable para consumo humano

En términos del agua para consumo humano, se diferencia a la población por abastecer en tres categorías. Las primeras dos categorías son la población urbana y suburbana, a las cuales se les asocia un consumo medio de 434 y 473 l/hab./día, respectivamente. La consideración es que estas poblaciones aledañas a la CHCP son servidas por los acueductos públicos del IDAAN, y, por ende, el origen de sus aguas son los embalses Gatún y Alhajuela. Por otro lado, la población rural es abastecida por los acueductos rurales que tienen como fuente los cuerpos de agua de las subcuencas donde se localizan los corregimientos rurales. La dota-

ción per cápita de agua potable considerada para la población rural es de 391 l/hab./día.

Para el escenario tendencial se considera que las pérdidas de los sistemas de distribución de agua potable son de un 30%.

Como se ha visto en los apartados de la prospectiva de los recursos hídricos y prospectiva demográfica, la población por abastecer se localiza en las 8 zonas poblacionales delimitadas en el estudio de Stantec³¹. De acuerdo con las proyecciones del INEC, en promedio, estas zonas tienen una tasa de crecimiento medio anual de 1.69 %.

Agua para la operación del Canal (transportación)

Se han considerado las proyecciones de las demandas de agua para la operación del Canal determinadas por la ACP. En el escenario tendencial se considera el volumen de agua utilizado observado en los últimos años e implica que el uso se irá incrementando proporcionalmente al tránsito de buques (proyección de demanda de tránsito), si no se aplican medidas diferentes.

Agua para uso industrial

La dotación de agua para el uso industrial considerada para el escenario tendencial es la equivalente a un gasto máximo horario de 1 litro por hectárea³². Es decir, que cada hectárea de área industrial demandará 31,536 m³/año.

De acuerdo con la información recabada, la gran mayoría de las industrias están conectadas al suministro municipal. Por ello, en la modelación se considerará que las demandas industriales serán abastecidas por las redes de distribución y, por ende, se estimarán las mismas pérdidas (30%) que las consideradas para el consumo humano.

En cuanto a la superficie industrial la tendencia de la tasa de crecimiento anual para el suelo industrial de la CHCP, área metropolitana de Panamá y área metropolitana de Colón es de 3.5%, 2.1% y 4.1%, respectivamente. La tasa de crecimiento anual consi-

31. STANTEC. (2019). *Municipal and Industrial Water Demand and Raw Water Consumption Forecast 2020-2050*. Panamá

32. Dicha dotación es la recomendada por la Norma Mexicana NMX-R-046-SCFI-2015 para parques industriales

derada en el escenario tendencial es de 3.24% para el suelo industrial.

Agua para uso agropecuario

Para el uso agrícola se considera un requerimiento anual neto de agua de 7,700 m³/ha para el cultivo de piña. En el escenario tendencial se estima una eficiencia de riego del 65% o, lo que es lo mismo, unas pérdidas del 35%. Lo anterior, se traduce a una demanda brutal anual de 11,845 m³/ha para la piña.

De los valores del hato ganadero, dado por el consumo medio de agua del ganado vacuno, consumo de agua asociado a los establos y la superficie de suelo pecuario (pasto), se considera que se demanda anual es de 46.47 m³ por hectárea de pasto.

Variables territoriales del escenario tendencial

A continuación, se muestra el resumen de las tasas de cambio anual de las variables territoriales consideradas para el escenario tendencial de la CHCP:

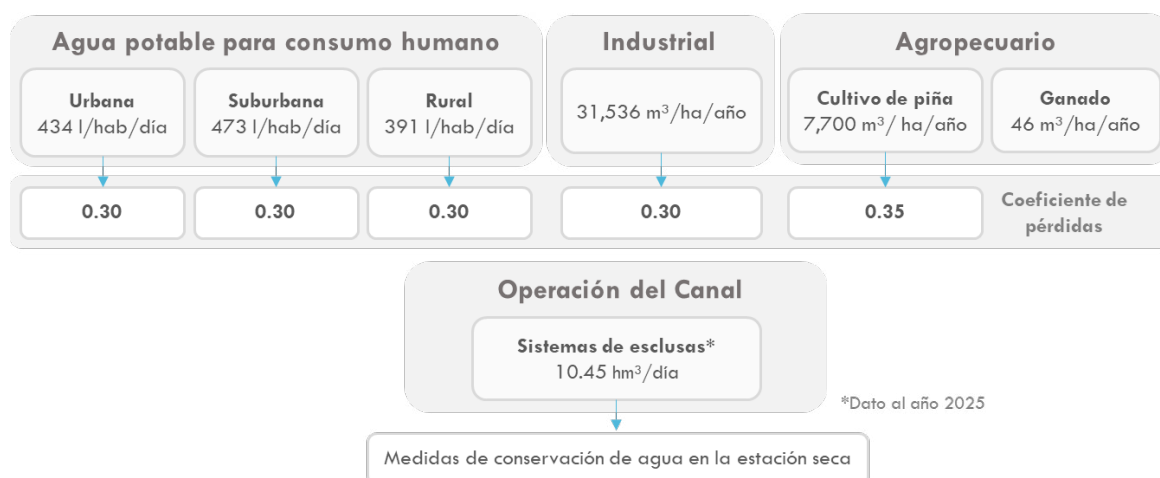
Figura 65. Variables territoriales del escenario tendencial

Población		Actividad económica		Desarrollo de bosques		
TCA Urbana +1.69%	TCA Rural +1.69%	TCA Piña 0.00%	TCA suelo industrial +3.24%	TCA Lat. Maduro +0.10%	TCA Lat. Secund. 0.00%	TCA Lat. Plantado +6.20%

Fuente: Equipo redactor PIOTA, 2021.

De igual manera, se muestran las demandas de agua y coeficientes de pérdidas para cada uno de los usos que extraen el recurso hídrico de la CHCP.

Figura 66. Demandas de agua del escenario tendencial



Fuente: Equipo redactor PIOTA, 2021.

2.4.3.2

Consideraciones del escenario ambicioso

Agua potable para consumo humano

En el escenario ambicioso se espera que la dotación neta de agua per cápita descienda hasta 282 l/hab./día para la demanda urbana, 220 l/hab./día para la

demanda suburbana y 141 l/hab./día para la demanda rural. Se cree que para llegar a los anteriores valores se tendrán que realizar campañas de concienciación de ahorro del agua y la regularización de todas las conexiones domésticas. A su vez, para dicho escenario se plantea reducir hasta un 15% las pérdidas en la distribución del agua potable.

Agua para la operación del Canal (transportación)

Se han considerado las proyecciones de las demandas de agua para la operación del Canal determinadas por la ACP. En el escenario ambicioso se utilizan menores volúmenes de agua para el tránsito, a la vez que se cumplen con los estándares de calidad de agua. Lo anterior, mediante el uso de diferentes medidas como las tinajas de ahorro, tránsitos cruzados, y otras en estudio para conservar la calidad del agua.

Agua para uso industrial

La dotación de agua para el uso industrial considerada para el escenario ambicioso es equivalente al 90% utilizado en el escenario tendencial. Es decir, se plantea reducir hasta una demanda anual de 28,382 m³ por cada hectárea de suelo industrial.

Por su parte, también se plantea una mejora en los sistemas de distribución al reducir las pérdidas a un 15%.

En cuanto a la superficie industrial en este escenario se espera que la tasa de crecimiento anual sea

de 2.50%. Es decir, inferior a la supuesta de 3.24% del escenario tendencial.

Agua para uso agropecuario

Para el uso agrícola se considera un requerimiento anual neto de agua de 7,700 m³/ha para el cultivo de piña. En el escenario ambicioso se estima una eficiencia de riego del 75% o, lo que es lo mismo, unas pérdidas del 25%.

Respecto a la superficie del cultivo de piña se considera, para el escenario ambicioso, que se limite su crecimiento hasta la superficie que actualmente cubre en la CHCP.

Para el uso del agua del sector pecuario se considera la misma demanda por hectárea de pasto utilizada para el escenario tendencial.

Variables territoriales del escenario ambicioso

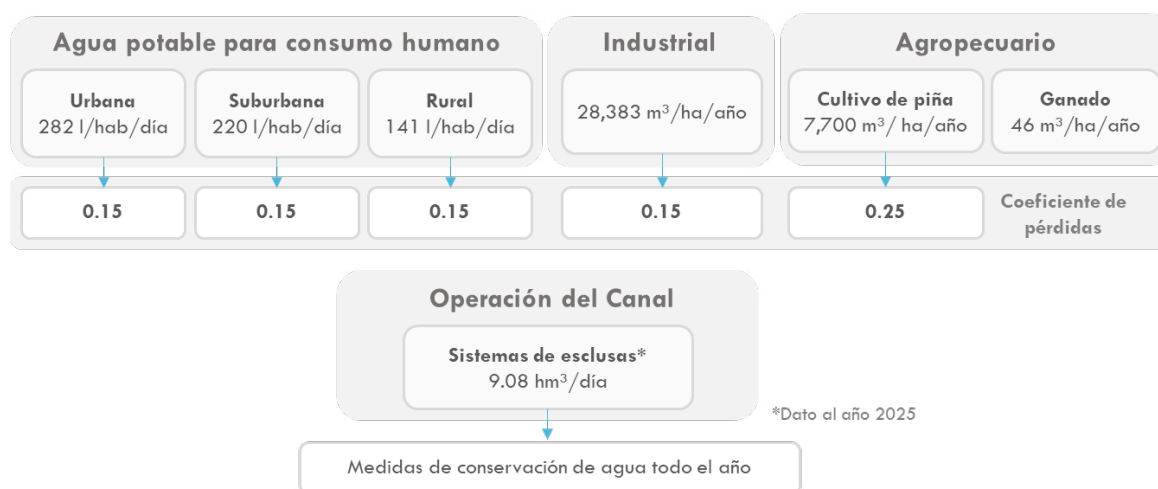
Figura 67. Variables territoriales del escenario ambicioso

Población		Actividad económica		Desarrollo de bosques		
TCA Urbana +1.80%	TCA Rural +1.70%	TCA Piña 0.00%	TCA suelo industrial +2.50%	TCA Lat. Maduro +1.00%	TCA Lat. Secund. +1.00%	TCA Lat. Plantado +5.50%

Fuente: Equipo redactor PIOTA, 2021.

De igual manera, se muestran las demandas de agua y coeficientes de pérdidas para cada uno de los usos que extraen el recurso hídrico de la CHCP.

Figura 68. Demandas de agua del escenario ambicioso



Fuente: Equipo redactor PIOTA, 2021.

2.4.3.3

Consideraciones del escenario consensuado

Agua potable para consumo humano

En el escenario consensuado se espera que la dotación neta de agua per cápita descienda hasta 348 l/hab./día para la demanda urbana, 333 l/hab./día para la demanda suburbana y 251 l/hab./día para la demanda rural. Se cree que para llegar a los anteriores valores se tendrán que realizar campañas de concienciación de ahorro del agua y la regularización de la mitad de las conexiones domésticas no contabilizadas.

A su vez, para dicho escenario se plantea reducir hasta un 25% las pérdidas en la distribución del agua potable.

Agua para la operación del Canal (transportación)

Se han considerado las proyecciones de las demandas de agua para la operación del Canal determinadas por la ACP. El escenario consensuado implica la aplicación de medidas optimizadas para el tránsito y mantener la calidad de agua del sistema de embalses.

Agua para uso industrial

La dotación de agua para el uso industrial considerada para el escenario consensuado es la misma que la del escenario tendencial equivalente a una demanda neta de 31,536 m³/año por cada hectárea de suelo industrial.

Por su parte, se plantea una mejora en los sistemas de distribución al reducir las pérdidas a un 25%.

En cuanto a la superficie industrial en este escenario se espera que la tasa de crecimiento anual sea de 4.0%. Es decir, superior a la supuesta de 3.24% del escenario tendencial. Lo anterior, conforme a lo comentado por los actores asistentes al taller de escenarios del pasado 8 de abril de 2021.

Agua para uso agropecuario

Para el uso agrícola se considera un requerimiento anual neto de agua de 7,700 m³/ha para el cultivo de piña. En el escenario consensuado se estima una eficiencia de riego del 70% o, lo que es lo mismo, unas pérdidas del 30%.

Respecto a la superficie del cultivo de piña se considera, para el escenario consensuado, que se limite su crecimiento hasta la superficie que actualmente cubre en la CHCP.

Para el uso del agua del sector pecuario se considera la misma demanda por hectárea de pasto utilizada para el escenario tendencial.

Variables territoriales del escenario consensuado

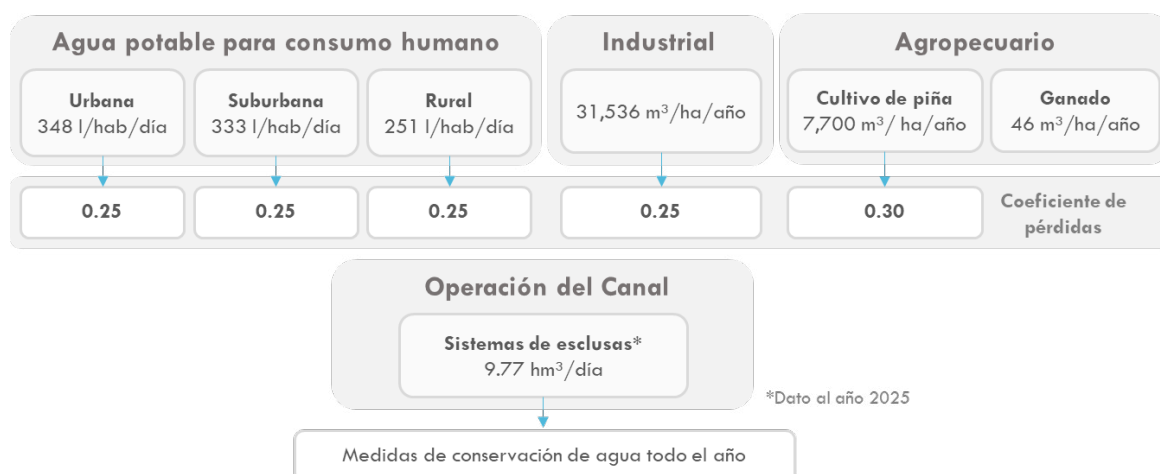
Figura 69. Variables territoriales del escenario consensuado



Fuente: Equipo redactor PIOTA, 2021.

De igual manera, se muestran las demandas de agua y coeficientes de pérdidas para cada uno de los usos que extraen el recurso hídrico de la CHCP.

Figura 70. Demandas de agua del escenario consensuado



Fuente: Equipo redactor PIOTA, 2021.

2.4.4

Modelo territorial futuro

En la construcción del modelo territorial futuro, entendiéndose como la imagen objetivo y realizable de la Cuenca, se parte del desarrollo de las variables territoriales establecidas en el escenario consensuado. Es importante recordar que la definición de este escenario fue el resultado de los procesos participativos llevados a lo largo del desarrollo del PIOTA. A su vez, este escenario consensuado / modelo territorial futuro es el escenario o modelo base sobre el que se estructura toda la propuesta de desarrollo territorial y, por tanto, la que se emplea en la modelación WEAP para determinar las

rutas de adaptación en los siguientes puntos del presente documento.

Como fue mencionado, en el apartado de prospectivas de las variables territoriales, se definieron dos grupos de variables: las decisivas, de las cuales se definieron unas hipótesis de cambio (TCA), y las resultantes, que se ven afectadas por las primeras. A continuación, a manera de recapitulación, en la Tabla 55 se muestran las variables territoriales decisivas consideradas para los escenarios tendencial y consensuado, de modo que se sean fácilmente identificables las diferencias entre la tendencia y el modelo territorial futuro.

Tabla 55. Variables territoriales de los escenarios tendencial y consensuado

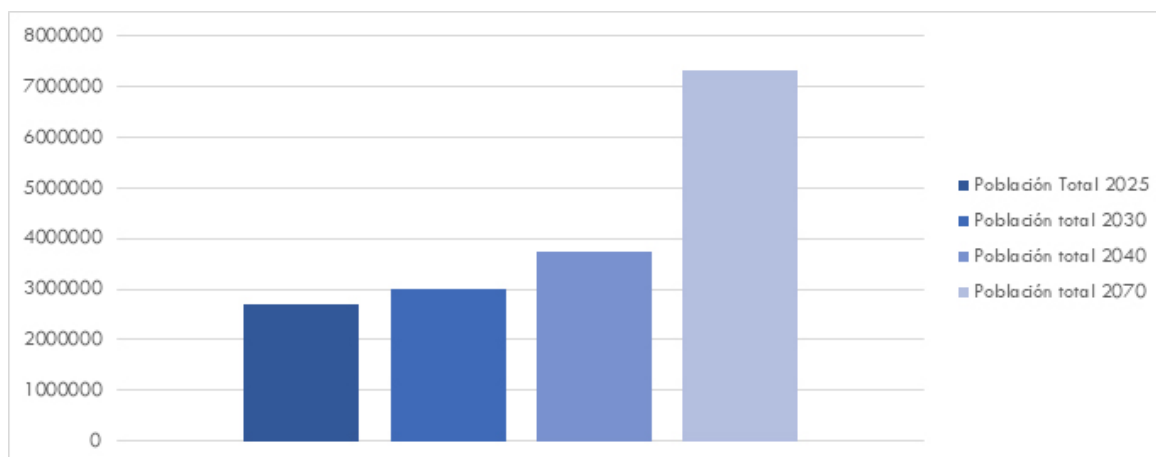
Variable	Tasa de cambio anual (Tendencial)	Tasa de cambio anual (Consensuado)
Poblacional urbana	1.69%	2.00%
Poblacional rural	1.69%	1.80%
Superficie industrial	3.24%	4.00%
Superficie cultivo piña (cultivo permanente)	0.00%	0.00%
Superficie cultivo café (cultivo permanente)	1.96%	1.00%
Bosque Latifoliado Mixto Maduro	0.1%	0.50%
Bosque Latifoliado Mixto Secundario	0.0%	0.50%
Bosque Plantado de Coníferas	0.0%	0.00%
Bosque Plantado de Latifoliadas	6.2%	3.00%

Fuente: Equipo redactor PIOTA, 2021.

Es importante recordar que las TCA correspondientes a la población (urbana y rural) contemplan toda la población que se abastece desde la Cuenca (que incluye áreas urbanas exteriores a la CHCP,

como las áreas metropolitanas de Colón y Panamá). Así, la población total que sería abastecida sería la que se refleja en la Figura 71.

Figura 71. Población estimada para abastecimiento de agua en los horizontes del PIOTA



Fuente: Equipo redactor PIOTA, 2021.

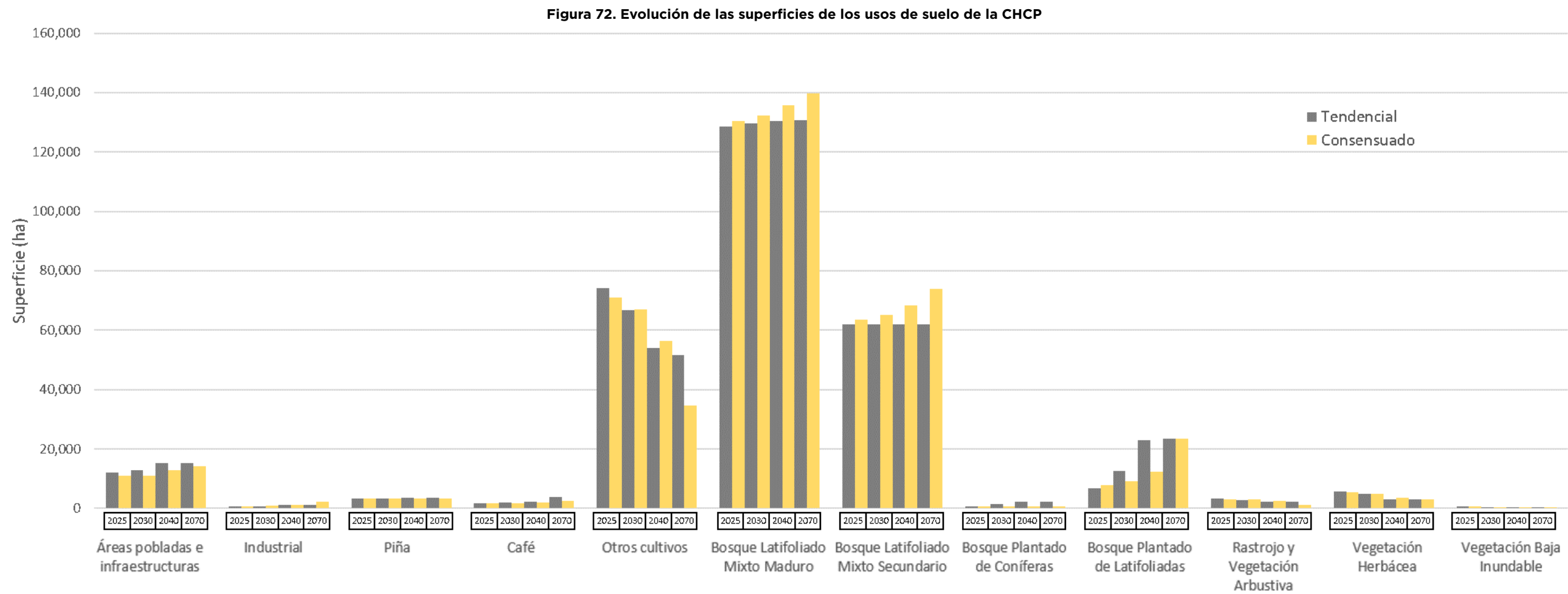
De igual modo, la TCA de la superficie industrial mostradas son el promedio de las áreas industriales que hacen uso de agua de la CHCP (la propia CHCP, el área metropolitana de Colón y el área metropolitana de Panamá).

En cuanto a los usos de agua demandados para la operación del Canal, serán los mismos que se emplearon en la determinación del escenario consensuado, es decir, 9.77 hm³/día en el año 2025 (este volumen se irá incrementando hasta el valor máximo de 11.38 hm³/día en el año 2040).

Los resultados obtenidos de los valores y Tasas de Crecimiento Anual (TCA) de las superficies de los

diferentes usos de suelo que se localizan en la Cuenca sirven como base para estructurar la propuesta de desarrollo territorial que se detallará de forma precisa en la Estrategia de Desarrollo Sostenible y Descarbonización de la Cuenca (Ruta Verde 2050) y en la instrumentación normativa del PIOTA.

A continuación, en la Figura 72, se muestra un gráfico que resume e ilustra los cambios de la superficie de los diferentes usos de suelo presentes en la Cuenca. En el gráfico se han representado los valores correspondientes al modelo territorial futuro (escenario consensuado) y al escenario tendencial.



Fuente: Equipo redactor PIOTA, 2021.

2.5

PROSPECTIVA: TENDENCIAS Y ESCENARIO

Análisis de Balance Hídrico y Robustez Climática

5





2.5

Análisis de balance hídrico y robustez climática

2.5.1

Medidas de adaptación

En la construcción de escenarios a modelar, es fundamental la formulación de una serie de medidas de adaptación, con el propósito de garantizar la disponibilidad de recursos hídricos para todos los usos que se abastecen del agua de la CHCP.

En el apartado 2.4.3 se han nombrado algunas de las medidas de adaptación propuestas, que están encaminadas a una reducción de la demanda del recurso hídrico mediante una gestión eficiente, que se componen de las siguientes actuaciones:

- Reducción de la dotación neta de agua. Esta medida tiene por objeto alcanzar unos valores de dotación neta de agua menores a los actuales, gracias a campañas de concienciación de ahorro del agua y la regularización de las conexiones domésticas (todas en el caso del escenario ambicioso y la mitad en el caso del consensuado).
- Para el escenario ambicioso, se ha considerado una reducción de la dotación neta de

agua hasta 282 l/hab./día para la demanda urbana, 220 l/hab./día para la demanda suburbana y 141 l/hab./día para la demanda rural.

- Para el escenario consensuado, se determinó una dotación neta de agua de 348 l/hab./día para la demanda urbana, 333 l/hab./día para la demanda suburbana y 251 l/hab./día para la demanda rural.
- Reducción en las pérdidas del sistema de distribución.
 - Para el escenario ambicioso se plantea reducir hasta un 15% las pérdidas en la distribución del agua potable.
 - Para el escenario consensuado, se plantea reducir hasta un 25% las pérdidas en la distribución del agua potable.
- Para el agua dedicada a uso industrial se adoptaron dos tipos de medidas:
 - Reducción de la demanda anual por superficie. En el escenario ambicioso se propuso una demanda anual equivalente al 90% de la demanda actual, mientras que, en el escenario

rio consensuado, no se consideró ninguna reducción en este aspecto.

- Reducción en las pérdidas en la distribución. En el escenario ambicioso se propuso una reducción del 30% al 15% de las pérdidas en la distribución, mientras que, en el escenario consensuado, se consideró una disminución de las pérdidas en la distribución a un 25%.
- Referente al uso agrícola, se consideró una mejora en la eficiencia de riego del cultivo de piña, pasando de un valor del 65% (tendencial) a uno de 75% y 70% para los escenarios ambicioso y consensuado, respectivamente.

- Por último, en lo que respecta a las medidas de gestión eficiente de la demanda, se consideraron diferentes volúmenes demandados de agua para la operación del Canal. Los anteriores fueron determinados por la ACP, gracias a las proyecciones que han realizado considerando el paso de buques de manera irrestricta, la disponibilidad de agua y la conservación de la calidad del agua del sistema de embalses del Canal.

A manera de resumen, se presenta la Figura 73, que muestra las medidas, demandas y coeficientes de pérdidas de los sistemas.

Figura 73. Medidas de adaptación de gestión eficiente de la demanda

		Valor y Coeficientes de Pérdidas							
Medidas	Sector	Demanda	Unidad	Tendencial		Ambicioso		Consensuado	
	Concienciación del ahorro de agua	Urbana	l/hab./día	434	0.30	282	0.15	348	0.25
		Suburbana	l/hab./día	473	0.30	220	0.15	333	0.25
		Rural	l/hab./día	391	0.30	141	0.15	251	0.25
	Prácticas sostenibles en los procesos productivos	Industrial	m³/ha/año	31,536	0.30	28,382	0.15	31,536	0.25
	Prácticas de agricultura resiliente	Cultivo de piña	m³/ha/año	7,700	0.35	7,700	0.25	7,700	0.30
		Ganado	m³/ha/año	46	-	46	-	46	-
	Medidas de conservación de agua	Operación del Canal	hm³/diario	10.45*	-	9.08*	-	9.77*	-

* Dato año 2025

Fuente: Equipo redactor PIOTA, 2021.

Además de las anteriores medidas, fueron propuestas otras enfocadas a aumentar la oferta de agua, para los diferentes usos que demandan el recurso hídrico de la CHCP. Entre estas se propusieron algunas enfocadas a disponer más recurso dentro de la CHCP:

- Embalse al Oeste de la CHCP. Se propone la construcción de una nueva presa que eleve la capacidad de la parte Oeste del embalse Gatún a un volumen útil adicional de 798 hm³.
- Cambio en la regla de operación³³. Se proyecta incrementar los niveles de operación en 1.5 pies³⁴ para el embalse Gatún y de 3 pies para

33. Como ya se mencionó anteriormente, esta medida no es adecuada puesto que supone un riesgo de inundación. La elevación del nivel de operación del embalse Gatún conllevaría un riesgo de inundación en las esclusas, mientras que el aumento del nivel del embalse Alhajuela supondría problemas de inundación de vías de comunicación aguas arriba del embalse.

34. Este valor fue propuesto en el "Proyecto de Elevación del Nivel Operativo del Lago Gatún (IAPG-ENO)", del año 2013, el cual sugirió la elevación de 87.5 pies a 89 pies.

el embalse Alhajuela. Lo anterior supone una capacidad útil adicional de cerca de 11 hm³ y 47 hm³ para los embalses Gatún y Alhajuela, respectivamente³⁵.

- Paneles flotantes fotovoltaicos. Esta medida contempla la instalación de paneles solares fotovoltaicos en las superficies de los embalses de la Cuenca, contribuyendo a la disminución del volumen evaporado y generando, además, energía eléctrica. Se estima que los paneles contribuyen a reducir hasta un 75%³⁶ la evaporación directa de la superficie cubierta. En este ejercicio se simula una instalación escalonada, siendo del 1% de la superficie de Alhajuela en 2030; 2% de Alhajuela y 1% de Gatún en 2040; y del 2% de Alhajuela y 2% de Gatún en 2070.

Por otro lado, se plantean otras medidas que adicionan recurso hídrico desde fuentes externas a la CHCP:

- Trasvase de otras cuencas. Esta medida supone el trasvase desde otras cuencas hacia el embalse Gatún. En el escenario ambicioso se determinó un volumen anual trasvasado de 1,400 hm³, mientras que para el escenario consensuado uno de 800 hm³.
- Desalinizadora. Se valora la instalación de una planta desalinizadora en la Cuenca que aporte agua desalinizada al sistema. Se considera la puesta en funcionamiento de una planta con una capacidad de desalación a 2040 de 70 hm³ y de 100 hm³ a 2070.

A manera de resumen, se presenta Figura 74, que muestra las medidas enfocadas al aumento de la oferta a disponer en la CHCP. Se trata de todas las medidas disponibles, para cada escenario, a estudiar en la modelación WEAP y que servirán para definir las rutas de adaptación.

Figura 74. Medidas de adaptación de aumento de la oferta

Medidas sobre la gestión de la oferta		Tendencial	Ambicioso	Consensuado
	Desalinizadora: Entrada de agua dulce al sistema por desalación.	-	+ 70 hm ³ /año (2040) + 100 hm ³ /año (2070)	+ 70 hm ³ /año (2040) + 100 hm ³ /año (2070)
	Aumento de la capacidad de almacenamiento: Alternativas de aumento. Cambios en las reglas de operación de embalses existentes.	-	+798 hm ³ (2040)	+798 hm ³ (2070)
	Trasvase de otras cuencas: Entrada de agua dulce al sistema por trasvases desde otras cuencas.	-	Aumento de los niveles	-
	Reducción de la evaporación directa: Cubrir el espejo de agua con paneles solares flotantes.	-	+1400 hm ³ /año (2030)	+800 hm ³ /año (2030)
			El 1% Alhajuela (2030)	El 1% Alhajuela (2030)
			El 2% Alhajuela (2040)	El 2% Alhajuela (2040)
			El 1% Gatún (2040)	El 1% Gatún (2040)
			El 2% Gatún (2070)	El 2% Gatún (2070)

Entre paréntesis () año de implementación

Fuente: Equipo redactor PIOTA, 2021.

2.5.2

Descripción escenarios a simular

Como se ha descrito en la sección 2.1.3.1 Aspectos generales del modelo WEAP-CHCP se ha analizado la condición de línea de base, más tres escenarios

de desarrollo territorial adicionales (tendencial, ambicioso y consensuado), que se han proyectado a cuatro horizontes temporales (2025, 2030, 2040 y 2070). Para cada uno de estos escenarios se ha configurado una parametrización básica que no incluiría la adopción de medidas de adaptación.

35. STANTEC. (2019). *Municipal and Industrial Water Demand and Raw Water Consumption Forecast 2020-2050*. Panamá

36. Reducción de evaporación directa estimada de la tecnología de paneles solares flotantes según información consultada en: Qasem Abdelal (2021). *Floating PV; an assessment of water quality and evaporation reduction in semi-arid regions*. International Journal of Low-Carbon Technologies

A partir de cada escenario base, se han construido diferentes variantes que pueden incluir la adopción, de manera aislada o combinada en portafolios, de aquellas medidas evaluadas en el marco del proyecto PIOTA. La lista de medidas contempladas en el modelo WEAP-CHCP se recogen en la Tabla 56. En la sección anterior se ofreció una caracterización detallada de las medidas y en qué horizonte temporal se han considerado operativas a efectos de la simulación en WEAP. La generación de los escenarios de adaptación puede resultar de la adopción de medidas aisladas o combinadas en forma de portafolios. En total se han configurado 15 posibles escenarios (3 escenarios base + 12 escenarios de adaptación) que han sido convenientemente parametrizados (Tabla 57).

Ha de advertirse que todos los escenarios simulados se han ejecutado bajo el supuesto de no limitación de capacidad de potabilización y distribución de agua para cubrir la demanda de agua urbano-industrial. Esto implica que, en condiciones de no limitación en la disponibilidad de recursos, la capacidad nominal de la infraestructura potabilización ha de ser igual al requerimiento de suministro de agua (demanda + volumen de pérdidas) de cada nodo.

Todas las variantes de los escenarios ambicioso y consensuado se han modelado asumiendo la adopción de las medidas D5 y D6.

Tabla 56. Listado de medidas consideradas para la simulación de escenarios

Bloque	ID Medida	Medida	Aplica sobre
Gestión de Demanda	D1	Reducción de dotación poblacional	Demanda Urbana-Industrial
	D2	Reducción de dotación industrial	
	D3	Reducción de pérdidas en red de abastecimiento y distribución	
	D4	Reducción de pérdidas en sector agropecuario	Demanda Agropecuaria
	D5	Ahorro y conservación de la calidad del agua	Demanda para operaciones del Canal de Panamá
	D6	Reducción de pérdidas de evaporación directa en embalses (proyectos fotovoltaicos)	Embalses de Gatún y Alhajuela
Aumento de recursos y mejora de infraestructuras	O1	Construcción de embalse	Subsistema Gatún
	O2a	Trasvase de otras cuencas 1400 hm ³ /año	Subsistema Gatún
	O2b	Trasvase de otras cuencas 800 hm ³ /año	Subsistema Gatún
	O3	Construcción de planta desalinizadora Subsistema Gatún	Subsistema Gatún
	O4	Aumento de capacidad de potabilización y suministro (supuesto capacidad ilimitada)	Subsistema Gatún y Alhajuela

Fuente: Equipo redactor PIOTA, 2021.

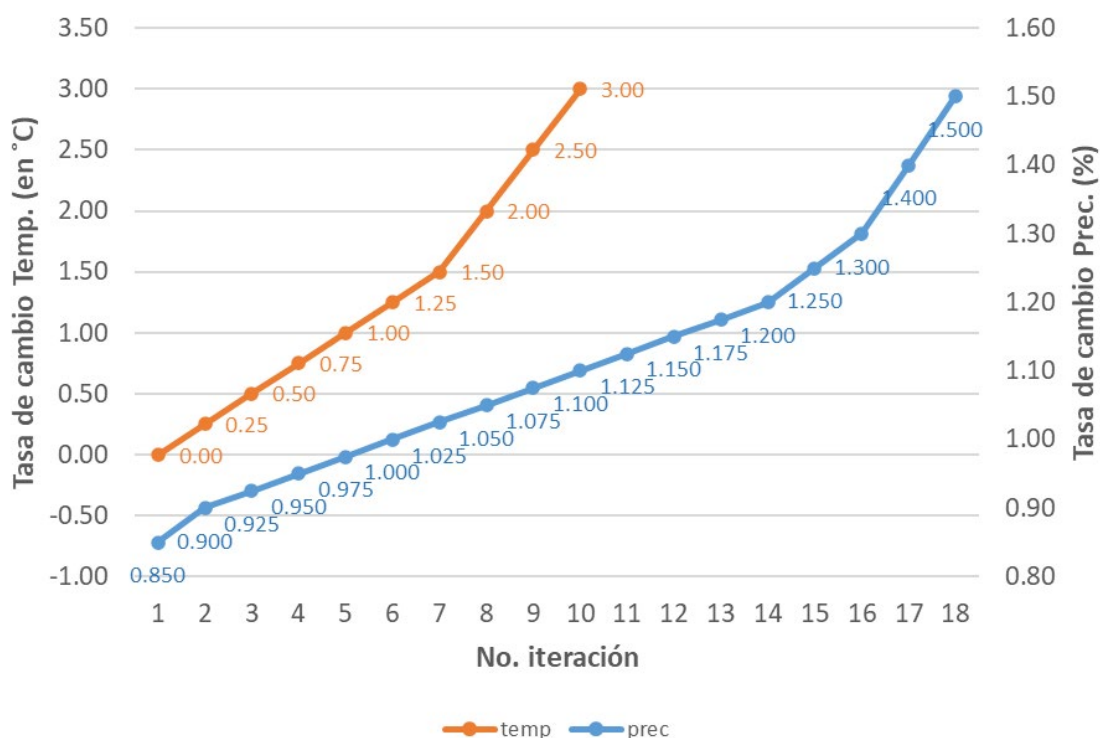
Tabla 57. Listado y caracterización de escenarios simulados en el modelo WEAP-CHCP.

Escenario (código WEAP)	Descripción	D1	D2	D3	D4	D5	D6	O1	O2a	O2b	O3	O4
Sc01. TTT	Tendencial-Base											X
Sc02. A00	Ambicioso-Base					X	X					X
Sc03. AGG	Ambicioso-Gestión	X	X	X	X	X	X					X
Sc04. AO1	Ambicioso-Trasvase					X	X		X			X
Sc05. AO2	Ambicioso-Embalse					X	X	X				X
Sc06. AO3	Ambicioso-Desalación					X	X				X	X
Sc07. AX1	Ambicioso-Combinado	X	X	X	X	X	X		X			X
Sc10. C00	Consensuado-Base					X	X					X
Sc11. CGG	Consensuado-Gestión	X	X	X	X	X	X					X
Sc12. CO3	Consensuado-Trasvase					X	X			X		X
Sc13. CO4	Consensuado-Embalse&Des					X	X	X			X	X
Sc14. CX3	Consensuado-Combinado1	X	X	X	X	X	X			X		X
Sc15. CX4	Consensuado-Combinado2	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X

Fuente: Equipo redactor PIOTA, 2021.

Para cada escenario y proyección climática, el modelo WEAP-CHCP se ha ejecutado para el continuo de variación climática (cambio porcentual de precipitación, y absoluto de temperatura) predicho por los modelos regionales de cambio climático. El rango plausible de variación de la precipitación anual va entre una reducción del 15% y un aumento del 50%,

mientras que la temperatura se predice podrá variar entre 0 y 3 °C. Para la generación de las Superficies de Respuesta Climática, para cada uno de los horizontes temporales contemplados por escenario territorial, se ha generado un continuo de variación de cambios de precipitación-temperatura consistente en 198 posibles combinaciones (Figura 75).

Figura 75. Rango de variación de cambios multiplicativos de precipitación y aditivos de temperatura simulados en el modelo WEAP-CHCP.


Fuente: Equipo redactor PIOTA, 2021.

Parametrización de la condición de línea de base

En la sección 2.1.3.1 se introdujeron los principales elementos de demanda que constituyen el modelo WEAP-CHCP. A través de las siguientes tablas, se presenta la parametrización adoptada para repre-

sentar la condición de línea de base, disgregado en cada uno de los nodos de demanda representados en el modelo. La parametrización de los escenarios territoriales, con y sin medidas de adaptación, se han descrito en la sección 2.4 Escenarios de desarrollo territorial.

Demanda Urbano-Industrial

Tabla 58. Parametrización de la demanda urbana para la condición de línea de base.

Subsistema (WEAP ID)	Subcategoría demanda	Subnivel Nodo	Unidades de demanda (ud)	Dotación (l/ud/año)	Pérdidas (%)
Gatún (PUI.GAT)	Población Urbana (PU.GAT)	Z3	122,986	473	30
		Z4	292,916	473	
		Z5	194,411	473	
		Z6	191,618	438	
		TOTAL PU.GAT (hab.)	801,931	-	
	Industrial (I.GAT)	Ciudad Colón	1,450	86,400	
		Cuenca_GAT	383	86,400	
		TOTAL I.GAT (ha)	1,833	-	
Alhajuela (PUI.MAD)	Población Urbana (PU.MAD)	Z7	369,732	440	
		Z8	1,127,125	473	
		TOTAL PU.MAD (hab.)	1,496,857	-	
	Industrial (I.MAD)	Ciudad_Panamá	282	86,400	
		Cuenca_MAD	161	86,400	
		TOTAL I.MAD (ha)	444		

Fuente: Equipo redactor PIOTA, 2021.

Demanda Rural

Tabla 59. Parametrización de la demanda rural para la condición de línea de base.

Subsistema (WEAP ID)	Subcategoría demanda	Subnivel Nodo	Unidades de demanda (ud)	Dotación (l/ud/año)	Pérdidas (%)
Gatún (PR.GAT)	Población Rural	GatS	30,801	391	30
		GatN	19,961		
		Trini	11,211		
		Cirí	9,170		
		TOTAL PR.GAT (hab.)	71,143		
Alhajuela (PR.MAD)	Población Rural	Subcuenca Chagres	6,939		
		TOTAL PR.MAD (hab.)	6.939		

Fuente: Equipo redactor PIOTA, 2021.

Demanda Agropecuaria

Tabla 60. Parametrización de la demanda agropecuaria para la condición de línea de base.

Subsistema (WEAP ID)	Subcategoría demanda	Subnivel Nodo	Unidades de demanda (ud)	Dotación (m3/unid./año)	Pérdidas
Gatún	Agrícola	PIÑA	3345	7,700	35
(A.GAT)	Pecuario		67,677*	46.5	
Alhajuela	Pecuario		7,287*	46.5	
(A.MAD)					

*En superficie equivalente de pasto (ha). En WEAP-CHCP codificado como PASTO.

Fuente: Equipo redactor PIOTA, 2021.

Demanda de agua para operaciones del Canal de Panamá

Tabla 61. Parametrización de la demanda para la operación del Canal de Panamá para la condición de línea de base.

Subsistema	Subcategoría demanda	Subnivel Nodo	Unidades de esclusaje equivalente (unid./día)	Dotación (hm3/unid./año)
Gatún	Operaciones Canal de Panamá		43.9	0.2082*
(T.GAT)				

* Equivalente a 55 Mgal/día.

Fuente: Equipo redactor PIOTA, 2021.

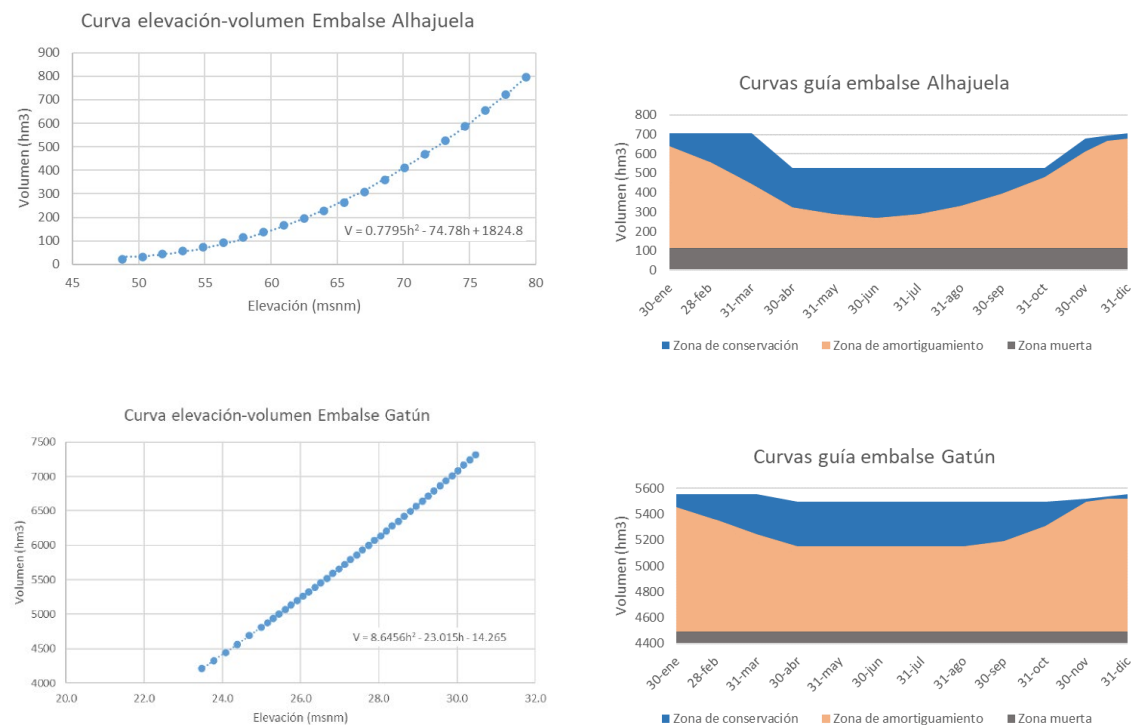
Los parámetros adoptados para los embalses se muestran en la siguiente Tabla 62:

Tabla 62. Principales parámetros utilizados para caracterizar los embalses en el modelo WEAP-CH-CP.

Parámetro	Embalse Alhajuela	Embalse Gatún
Capacidad de almacenamiento (hm3)	795.95	6,138.72
Almacenamiento al inicio del periodo de simulación (hm3)	600	5450
Curva de elevación-volumen	Figura 76	Figura 76
Máximo efluente hidráulico (m3/s)	6242	7268
Filtraciones y fugas(m3/s)	0.980	3.795
Nivel superior de conservación (hm3)	Figura 76	Figura 76
Nivel superior de amortiguamiento (hm3)	Figura 76	Figura 76
Volumen muerto (hm3)	114.8	4288.8
Coefficiente de amortiguamiento (%)	0.15	0.20
Máximo caudal de turbinado (m3/s)	108.5	150.4
Nivel de turbinado (m)	25	60
Prioridad de llenado (adimensional)	50	40

Fuente: Equipo redactor PIOTA, 2021.

Figura 76. Curvas elevación-volumen (izqda.) y guía (dcha.) para los embalses de Alhajuela (panel superior) y Gatún (panel inferior)



Fuente: Equipo redactor PIOTA, 2021.

2.5.2.2

Parametrización de escenario tendencial, ambicioso y consensuado

Cada uno de los tres escenarios planteados en el PIOTA se ha parametrizado bajo una configuración básica o “base”, la cual queda definida por un juego de parámetros cuyos valores cambian según el escenario y el horizonte temporal proyectado (Tabla 63 -columna “Base” y Tabla 64). A partir de la configuración “base”, se han parametrizado diferentes variantes que incluirían cambios en los valores de algunos de estos parámetros. Algunas de estas variantes suponen la adopción de un portafolio de medidas orientadas a reducir la demanda de agua de los principales usos, mediante la reducción de las dotaciones, de las pérdidas a lo largo de la red de abastecimiento y distribución de agua, o de las pérdidas de aplicación de riego. En la Tabla 63 (columnas “Gestión”) se presentan el cambio de valor de estos parámetros para los escenarios ambicioso y consensuado.

Tabla 63. Principales parámetros utilizados para caracterizar los embalses en el modelo WEAP-CHCP.

Parámetro (WEAP ID)	Subnivel	Tendencial, Ambicioso y Consensuado (Base*)	Escenarios Gestión**	
			Ambicioso	Consensuado
Dotación (l/hab/día)	LPCD_PU.Z3	473	220	333
	LPCD_PU.Z4			
	LPCD_PU.Z5			
	LPCD_PU.Z6	438	275	347
	LPCD_PU.Z7	440	273	346
	LPCD_PU.Z8	473	220	333
	LPCD_PR	391	141	251
Dotación industrial (l/ha/día)		86,400	77,760	77,760
Coef. de pérdidas abastecimiento y distribución (%)		30	15	25
Coef. de pérdidas agropecuario (%)		35	25	30

Fuente: Equipo redactor PIOTA, 2021.

Tabla 64. Parametrización adoptada para la configuración “base” de cada uno de los escenarios tendencial, ambicioso y consensuado considerados en el proyecto PIOTA.

Parámetro	Subnivel	Tendencial (base)				Ambicioso (base)				Consensuado (base)			
		2025	2030	2040	2070	2025	2030	2040	2070	2025	2030	2040	2070
Tasa de Creci- miento Anual	TCA_PU.Z3	2.140				2.246				2.464			
	TCA_PU.Z4	1.933				2.058				2.279			
	TCA_PU.Z5	1.637				1.742				1.929			
	TCA_PU.Z6	1.594				1.698				1.880			
	TCA_PU.Z7	1.574				1.678				1.864			
	TCA_PU.Z8	1.992				2.127				2.362			
	TCA_PR.GatS	1.772				1.792				1.910			
	TCA_PR.GatN	1.764				1.773				1.880			
	TCA_PR.Chag	2.424				2.435				2.582			
	TCA_PR.Trini	1.560				1.569				1.662			
	TCA_PR.Ciri	1.470				1.478				1.577			
Superficie indus- trial (ha)	Cuenca_MAD	455	540	734		431	486	604		473	571	808	
	Ciudad_Panamá	1712	1900	2339		1649	1787	2099	3401	1780	2023	2613	5633
	Cuenca_GAT	191	227	320		184	210	274		199	246	374	1321
	Ciudad_Colón	346	423	635		330	387	529	1359	362	465	765	3407
Superficie de rie- go (ha)	Piña_GAT	3,345											
Superficie hato equivalente (ha)	Pasto_GAT	66,822	61,027	50,301	48,283	61,679	54,949	38,563	31,339	64,677	61,232	52,405	30,616
	Pasto_MAD	7,195	6,016	4,903	4,700	5,882	4,361	1,788		6,430	5,697	4,006	
Unidades de esclusaje equivalente (ud. eq/día)		50.2	55.3	58.6		43.6	48.0	50.7		46.9	51.6	54.7	

Fuente: Equipo redactor PIOTA, 2021.

Resultados para condiciones de línea base

De acuerdo con los resultados obtenidos, el valor total de agua requerida para cubrir todas las demandas de la Cuenca, incluyendo las pérdidas que no retornan al sistema, asciende a 4053 hm³/año, presentando un valor de demanda no cubierta y cobertura promedio de 185 hm³/año y 95% (Tabla 65; punto rojo en el panel izquierdo), respectivamente. En el año más deficitario de la serie de simulación (30 años), la demanda no cubierta ascendió hasta los 800 hm³/año y una cobertura de 80% (Tabla 65; punto rojo en el panel derecho).

En la Figura 77 se presentan las Superficies de Respuesta Climática (SRC) obtenidas para el indicador de cobertura anual promedio y mínima en un intento de evaluar cómo se comportaría el sistema actual bajo los escenarios climáticos proyectados para la región. Bajo este supuesto de prueba de estrés, la robustez global del actual sistema sería del 75% en caso de considerarse la cobertura promedio y un umbral de garantía del 95%, y de un 47% para la cobertura mínima y umbral de garantía del 85%. Estos resultados nos advierten de la actual vulnerabilidad del sistema frente a la incertidumbre impuesta por el cambio climático.

Tabla 65. Valores de demanda no cubierta, cobertura y robustez climática predichos por el modelo WEAP-CHCP para la condición de línea de base actual.

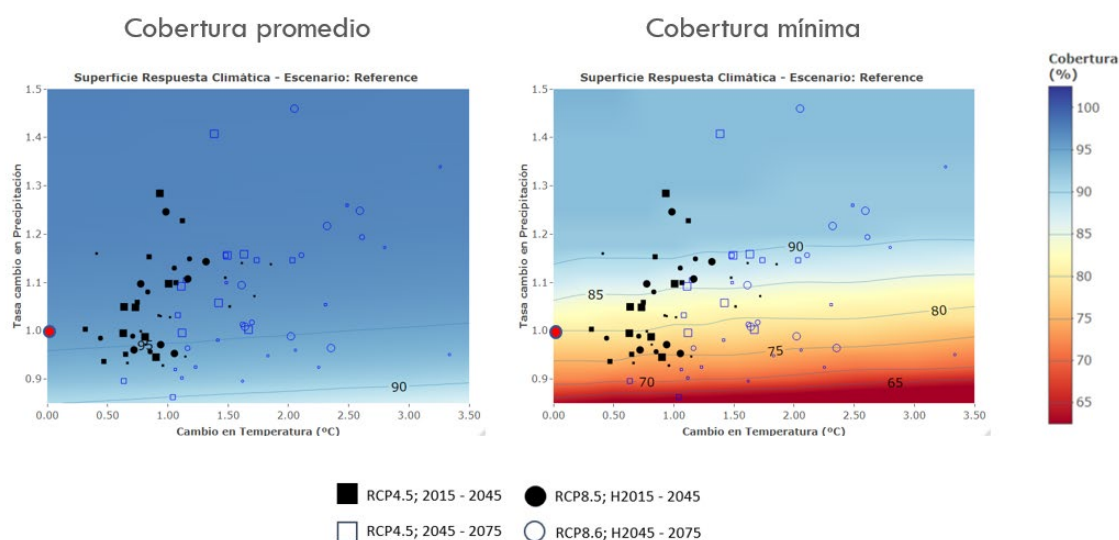
	Estadístico	Requerimiento de suministro (hm ³ /año)	Demanda no cubierta (hm ³ /año)	Cobertura (%)	Robustez climática (%)
Línea de base	Promedio interanual	4053	185	95	75*
	Máximo (mínimo) absoluto		799	85	47**

* para un umbral de garantía del 95%

** para un umbral de garantía del 85%

Fuente: Equipo redactor PIOTA, 2021.

Figura 77. SRC para la condición de línea de base y la cobertura anual promedio de la Cuenca (panel izqdo.), y la cobertura mínima (panel dcho.). Los símbolos en negro y azul representan las tasas de cambio proyectadas por los diferentes modelos regionales del ensamble NEX-GDDP para diferentes trayectorias de emisión (RCP 4.5 y 8.5) y horizontes temporales (H2015-2045, H2045-2075).



Fuente: Equipo redactor PIOTA, 2021.

Resultados del escenario tendencial

Se analizó el escenario tendencial, mediante la aproximación metodológica anteriormente expuesta. En la Figura 78 se muestran las SRC para ambos indicadores de cobertura (promedio interanual -panel superior- y mínimo -panel inferior) y cada uno de los cuatro horizontes temporales proyectados para el escenario tendencial (2025, 2030, 2040 y 2070). El escenario tendencial viene caracterizado por un incremento de la demanda total de agua necesaria para cubrir las necesidades de uso proyectadas, siguiendo una trayectoria de desarrollo territorial como la observada en la Cuenca durante los últimos años (ver Sección 2.4 para una descripción detallada de los cambios proyectados en la Cuenca para el escenario tendencial). Los aumentos en el requerimiento de suministro de agua se incrementan en un 14%, 25%, 36% y 56%, respec-

to de la condición actual, para los horizontes 2025, 2030, 2045 y 2070.

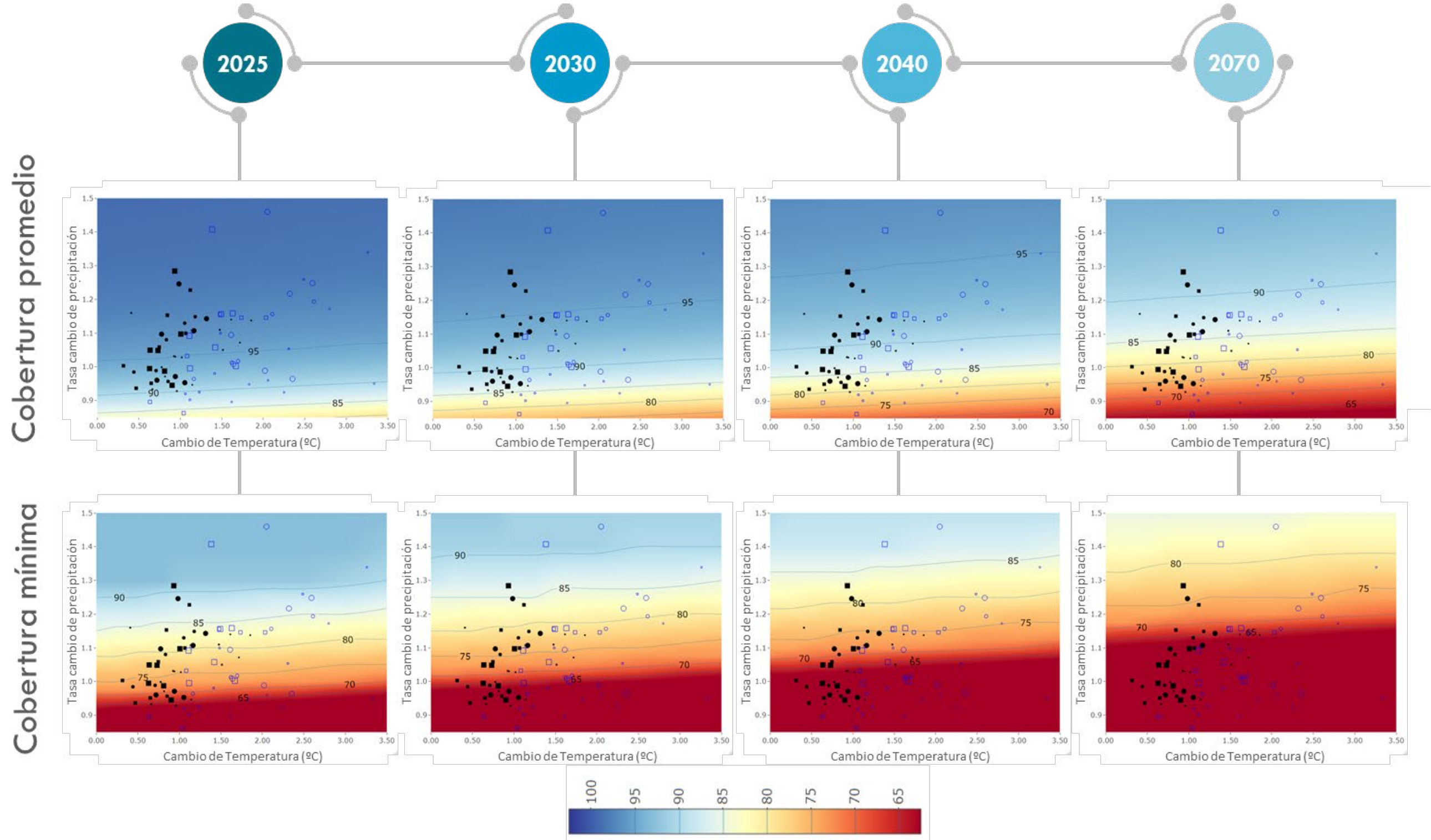
De acuerdo con las SRC obtenidos, el análisis de robustez climática y los umbrales de garantía del 95% para el indicador de cobertura promedio, y del 85% para la cobertura mínima, se concluye que el sistema no es lo suficientemente robusto para cubrir las demandas con el nivel de garantía exigido (Tabla 66). Ha de advertirse que el valor de robustez es muy sensible a la elección del umbral de garantía (ver Sección 2.5.6). Únicamente, el escenario proyectado para el horizonte 2025, sería mínimamente robusto de tomarse la cobertura promedio como indicador de referencia. A partir de entonces, la robustez climática para cubrir el mínimo del 95% de la demanda total del sistema quedaría fuertemente comprometida, lo que advierte sobre la necesidad de revisar y adaptar la actual trayectoria de desarrollo territorial a las incertidumbres climáticas proyectadas para la Cuenca.

Tabla 66. Robustez climática calculada en función de las superficies de la respuesta para cada horizonte del escenario tendencial

Horizonte	Robustez Climática Cobertura Promedio 95%	Robustez Climática Cobertura Mínima 85%
H2025	58%	18%
H2030	19%	11%
H2040	6%	6%
H2070	2%	2%

Fuente: Equipo redactor PIOTA, 2021.

Figura 78. Superficie de Respuesta Climática del escenario tendencial sobre los cuatro horizontes analizados (2025, 2030, 2040 y 2070)



Fuente: Equipo redactor PIOTA, 2021.

Resultado de los escenarios de posible intervención territorial

En un primer ejercicio de sensibilidad, se ha evaluado el comportamiento del sistema para cada uno de cuatro horizontes temporales y para el conjunto de los escenarios y variantes de adaptación definidos en la Tabla 57. En este caso, el modelo WE-AP-CHCP se ha forzado con un escenario climático que simula el promedio de los cambios de temperatura y precipitación predichos por los diferentes modelos del ensamble NEX-GDDP. Este escenario climático viene caracterizado por un aumento de precipitación del 5% (proyectado desde 2025 a 2070), y un aumento de 1 °C para los horizontes 2025/2030/2040, y aumento de 2 °C para el horizonte 2070.

Los resultados del análisis para las variables de demanda no cubierta (promedio interanual y máximo estimado) y de cobertura (promedio interanual y mínima estimada) se muestran en las Tabla 67 (configuración base sin adaptación), Tabla 68 (escenarios con únicamente portafolio de gestión), Tabla 69 (escenarios con adopción de medidas de aumento del recurso) y Tabla 70 (escenarios con combinación de portafolio de gestión de demanda y aumento de recursos).

Como era de esperar, se observa que el uso de valores promedio interanuales para los indicadores de desempeño (demanda no cubierta o cobertura) enmascaran el impacto que pueden tener periodos de sequía. Además, el hecho de que se parta de una situación de base con elevados valores de cobertura, superiores al 90% y próximas al 100% en ocasiones, hace aún más difícil el poder cuantificar la efectividad neta de las medidas de adaptación. Se concluye que el indicador de cobertura mínima es más apropiado para caracterizar la robustez del sistema frente a las impuestas por los cambios ocasionados por el desarrollo territorial y el clima.

La demanda no cubierta máxima estimada para el escenario ambicioso (configuración base sin medidas de adaptación) se cuantificó entre 703 hm³/año (horizonte 2025) y 2256 hm³/año (horizonte 2070). Esto equivale a valores de coberturas entre el 83% y 60% por debajo del umbral del 85%,

utilizado en este análisis como el nivel de garantía mínimo que debe de alcanzarse para considerar el sistema como “apto”. Estos valores para el escenario de desarrollo consensuado son incluso peores, entre 885 hm³/año y 80% para el horizonte 2025, y >3000 hm³/año y 50% para el horizonte 2070, respectivamente.

De entre las opciones de adaptación evaluadas, el portafolio de “Gestión” integrado por las medidas orientadas a la gestión de la demanda (reducción de dotaciones y de pérdidas) aumentaría el nivel de cobertura entre:

- el 8-12% (25% en 2070), para el escenario ambicioso. Los valores de cobertura quedarían por encima del umbral del 85% en los horizontes 2025 y 2030.
- el 3-6% (16% en 2070), para el escenario consensuado. Para ninguno de los horizontes temporales proyectados se alcanzaría el 85%.

El ingreso regular de 1400 hm³/año al subsistema Gatún, a partir de 2030, y a través de un trasvase de otras cuencas, considerado en escenario ambicioso, sería suficiente para garantizar las demandas de toda la Cuenca, sin necesidad de tener que recurrir a otras medidas. La ganancia de cobertura brindada por el trasvase en relación con el escenario base sería de entre 15-20 puntos porcentuales para los horizontes de 2030 y 2040, y de 28 puntos para el 2070.

En el caso del escenario consensuado, se consideró una aportación regular por trasvase de 800 hm³/año. En este caso, los aumentos de cobertura también serían superiores en comparación con los brindados por el portafolio de “Gestión”, pero aún insuficientes para cubrir las demandas con un nivel de garantía adecuado. Para el escenario consensuado se concluye la necesidad de combinar diferentes actuaciones para cubrir las demandas futuras.

El aumento de la capacidad de almacenamiento y de regulación de agua, mediante la construcción de un embalse de 800 hm³, no aumenta significativamente el nivel de cobertura en el caso del escenario ambicioso, (entre 2-5 puntos porcentuales

sobre los valores de base, y siempre por debajo del umbral del 85%). En el caso del escenario consensuado, los aumentos son similares a los proyectados con un trasvase regular de 800 hm³/año.

El proyecto de desalinización se ha simulado, únicamente, para el escenario ambicioso. Este proyecto junto con las cantidades entregadas, las cuales empezarían a ser operativas a partir de 2040, no aportaría una mejora significativa del indicador de cobertura mínimo, respecto a la situación base.

A partir del análisis de sensibilidad, se han seleccionado un total de 8 escenarios (Tabla 67) para simular el desempeño del sistema en todo el rango de incertidumbre climática predicha para la región. Este segundo análisis permite la obtención de las

Superficies de Respuesta Climática (SRC) asociadas a cada escenario, así como la cuantificación de la robustez climática para los indicadores de cobertura promedio interanual con un umbral de garantía del 95%, y de cobertura mínima, con un umbral de garantía del 85%. Estos valores de robustez sirven de base para evaluar la efectividad de cada opción de adaptación y delinear las posibles rutas de adaptación (Sección 2.6).

En las Figura 79 y Figura 80 se representan las SRC para los escenarios tendencial, las configuraciones “base” de los escenarios ambicioso y consensuado, y las dos principales variantes de adaptación para ambos escenarios. En la Tabla 67 se representan los valores de robustez climática para el subconjunto de escenarios.

Tabla 67. Escenarios seleccionados y valores de robustez climática para cobertura promedio (umbral de garantía del 95%) y cobertura mínima (umbral de garantía del 85%). Rojo (<35%), Naranja (35-50%), Verde (>50%).

Escenario	Descripción	Robustez Climática Cobertura Promedio 95%				Robustez Climática Cobertura Mínima 85%			
		2025	2030	2040	2070	2025	2030	2040	2070
Sc01. TTT	Tendencial-Base	58%	19%	6%	2%	18%	11%	6%	2%
Sc02. A00	Ambicioso-Base	93%	74%	41%	6%	47%	27%	14%	6%
Sc03. AGG	Ambicioso-Gestión	99%	97%	93%	60%	74%	56%	47%	18%
Sc07. AX1	Ambicioso-Combinado	99%	100%	100%	100%	74%	100%	100%	99%
Sc10. C00	Consensuado-Base	74%	47%	14%	2%	33%	14%	9%	2%
Sc11. CGG	Consensuado-Gestión	92%	59%	36%	6%	46%	18%	11%	6%
Sc14. CX3	Consensuado-Combinado1	92%	99%	94%	47%	46%	79%	55%	16%
Sc15. CX4	Consensuado-Combinado2	92%	99%	97%	58%	46%	81%	58%	25%

Fuente: Equipo redactor PIOTA, 2021.

Tabla 68. Demanda no cubierta y cobertura (valores promedio y max/min en año con más déficit) para la configuración base de los escenarios ambicioso y consensuado.

	AMBICIOSO-BASE (A00)				CONSENSUADO-BASE (C00)			
	Demanda No Cubierta_AVG (hm3/año)	Demanda No Cubierta_MAX (hm3/año)	Cobertura_AVG (%)	Cobertura_MIN (%)	Demanda No Cubierta_AVG (hm3/año)	Demanda No Cubierta_MAX (hm3/año)	Cobertura_AVG (%)	Cobertura_MIN (%)
H2025	91	703	98	83	144	885	97	80
H2030	150	986	97	78	276	1201	94	75
H2040	299	1261	94	74	476	1595	91	70
H2070	731	2256	87	60	1217	3160	81	51

Fuente: Equipo redactor PIOTA, 2021.

Tabla 69. Demanda no cubierta y cobertura (valores promedio y max/min en año con más déficit) para los de los escenarios ambicioso y consensuado con portafolio de adaptación “Gestión”.

	AMBICIOSO-GESTIÓN (AGG)				CONSENSUADO-GESTIÓN (CGG)			
	Demanda No Cubierta_AVG (hm3/año)	Demanda No Cubierta_MAX (hm3/año)	Cobertura_AVG (%)	Cobertura_MIN (%)	Demanda No Cubierta_AVG (hm3/año)	Demanda No Cubierta_MAX (hm3/año)	Cobertura_AVG (%)	Cobertura_MIN (%)
H2025	22	282	99	92	90	727	98	82
H2030	49	570	99	86	180	1035	96	77
H2040	102	846	98	81	312	1289	94	74
H2070	185	1147	96	76	768	2368	87	59

Fuente: Equipo redactor PIOTA, 2021.

Tabla 70. Demanda no cubierta y cobertura (valores promedio y max/min en año con más déficit) para los de los escenarios ambicioso y consensuado con medidas aisladas orientadas a incrementar la disponibilidad de recursos.

	AMBICIOSO-TRASVASE (AO1)				CONSENSUADO-TRASVASE (CO3)			
	Demanda No Cubierta_AVG (hm3/año)	Demanda No Cubierta_MAX (hm3/año)	Cobertura_AVG (%)	Cobertura_MIN (%)	Demanda No Cubierta_AVG (hm3/año)	Demanda No Cubierta_MAX (hm3/año)	Cobertura_AVG (%)	Cobertura_MIN (%)
H2025	Idem Ambicioso-Base				Idem Consensuado-Base			
H2030	1	20	100	100	75	641	98	87
H2040	2	56	100	99	167	974	97	82
H2070	80	667	99	88	686	2164	89	66

	AMBICIOSO-EMBALSE (AO2)				CONSENSUADO-EMBALSE-DES (CO4)			
	Demanda No Cubierta_AVG (hm3/año)	Demanda No Cubierta_MAX (hm3/año)	Cobertura_AVG (%)	Cobertura_MIN (%)	Demanda No Cubierta_AVG (hm3/año)	Demanda No Cubierta_MAX (hm3/año)	Cobertura_AVG (%)	Cobertura_MIN (%)
H2025	Idem Ambicioso-Base				Idem Consensuado-Base			
H2030	123	901	97	80	54	581	99	88
H2040	169	1158	97	76	119	853	98	84
H2070	602	2223	89	61	590	2027	91	68

	AMBICIOSO-DESALACION (AO3)			
	Demanda No Cubierta_AVG (hm3/año)	Demanda No Cubierta_MAX (hm3/año)	Cobertura_AVG (%)	Cobertura_MIN (%)
H2025	Idem Ambicioso-Base			
H2030				
H2040	272	1217	94	75
H2070	787	2052	86	64

Fuente: Equipo redactor PIOTA, 2021.

Tabla 71. Demanda no cubierta y cobertura (valores promedio y max/min en año con más déficit) para los de los escenarios ambicioso y consensuado con diferentes portafolios consistentes en la combinación de medidas orientadas a la reducción de las demandas y el aumento de la disponibilidad de recursos.

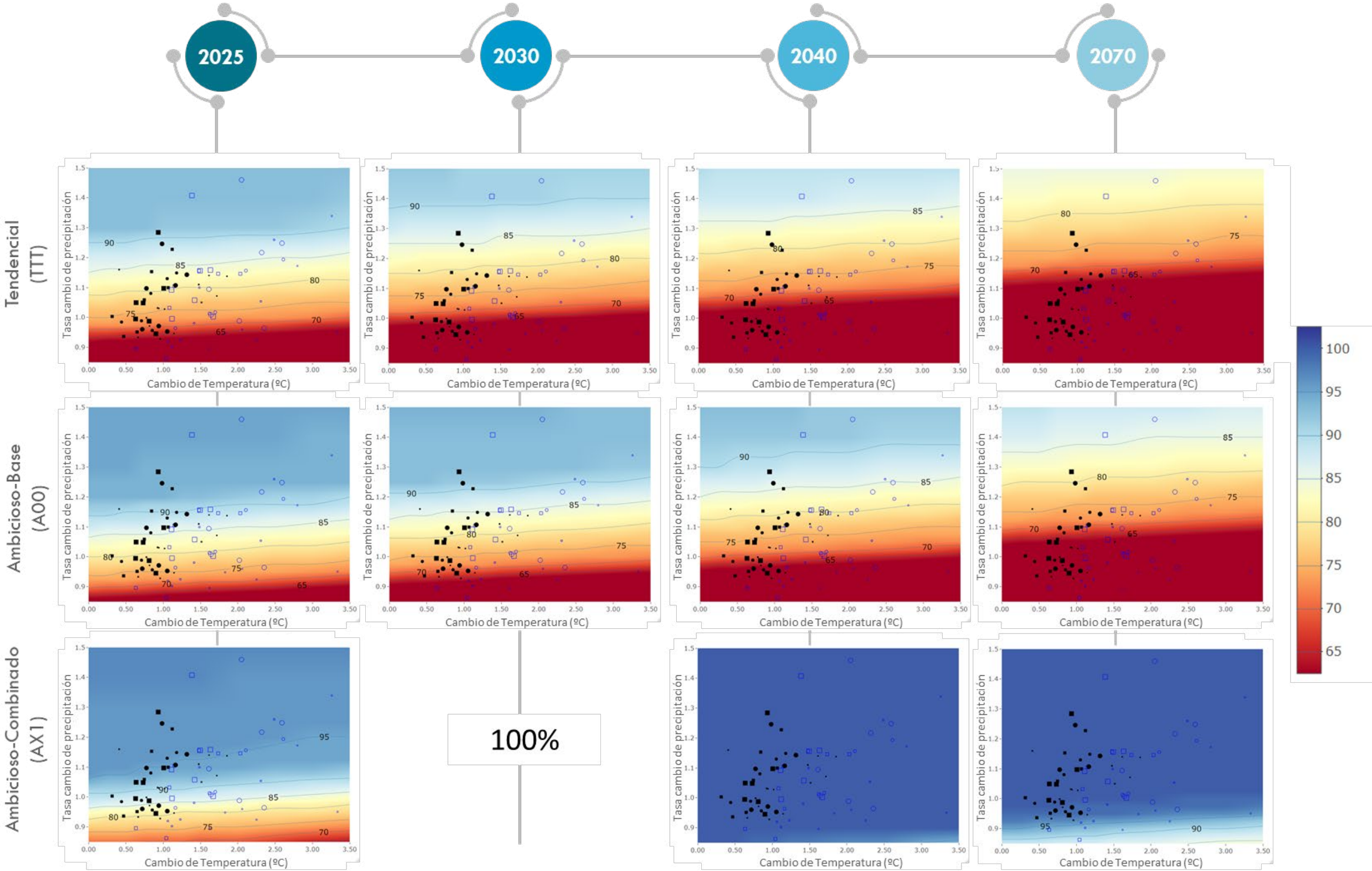
	AMBICIOSO-COMBINADO (AX1)				CONSENSUADO-COMBINADO1 (CX3)			
	Demanda No Cubierta_AVG (hm3/año)	Demanda No Cubierta_MAX (hm3/año)	Cobertura_AVG (%)	Cobertura_MIN (%)	Demanda No Cubierta_AVG (hm3/año)	Demanda No Cubierta_MAX (hm3/año)	Cobertura_AVG (%)	Cobertura_MIN (%)
H2025	22	282	99	92	90	727	98	82
H2030	0	0	100	100	37	450	99	90
H2040	0	0	100	100	90	732	98	85
H2070	0	0	100	100	343	1343	94	77

H2025
H2030
H2040
H2070

CONSENSUADO-COMBINADO2 (CX4)			
Demanda No Cubierta_AVG (hm3/año)	Demanda No Cubierta_MAX (hm3/año)	Cobertura_AVG (%)	Cobertura_MIN (%)
90	727	98	82
24	299	99	93
60	649	99	87
260	1250	95	78

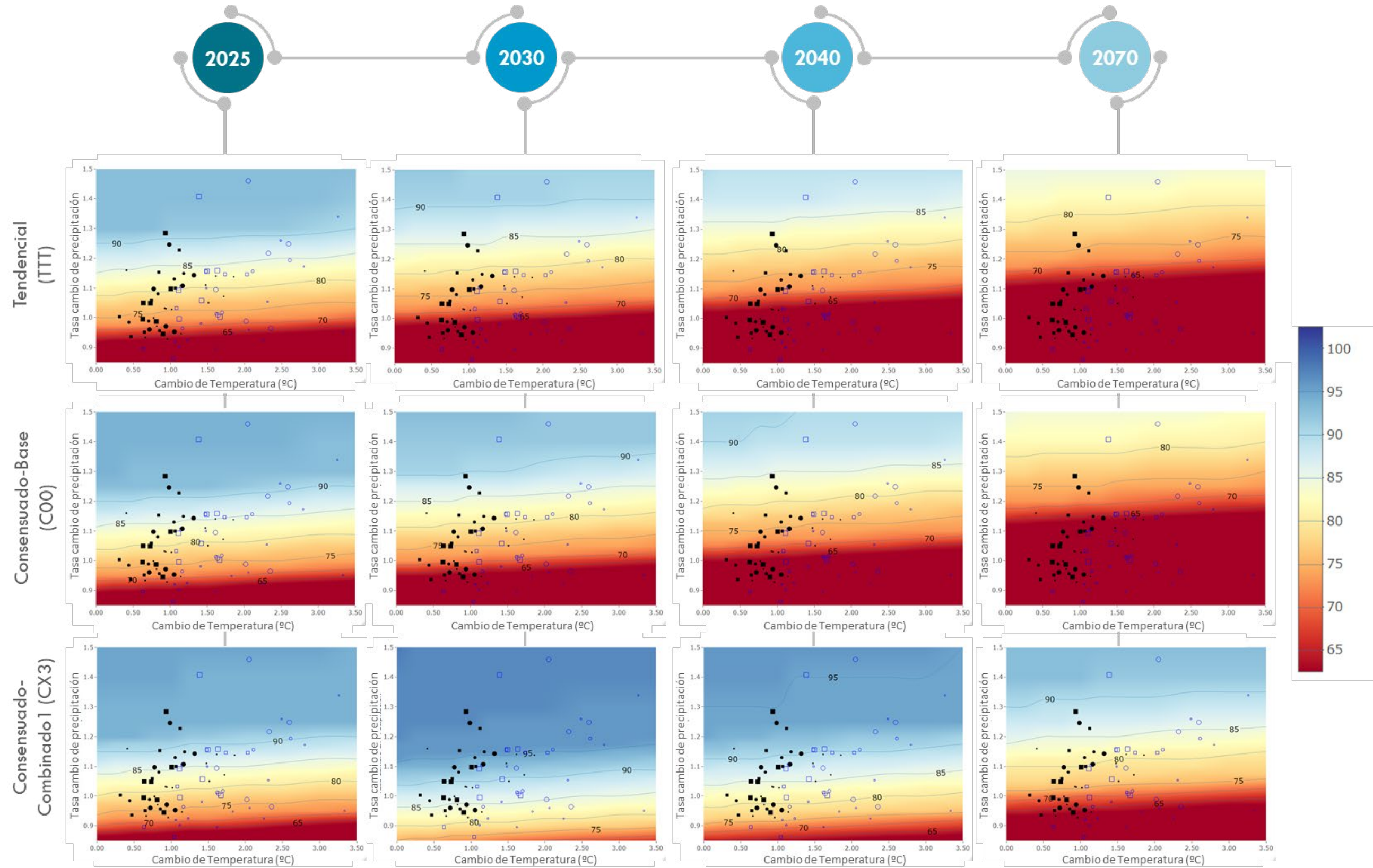
Fuente: Equipo redactor PIOTA, 2021.

Figura 79. Superficies de Respuesta Climática para los escenarios tendencial (TTT), ambicioso-base (A00) y ambicioso-combinado (AX1)



Fuente: Equipo redactor PIOTA, 2021.

Figura 80. Superficies de Respuesta Climática para los escenarios tendencial (TTT), consensuado-base (C00) y consensuado-combinado1 (CX3)



Fuente: Equipo redactor PIOTA, 2021.

Análisis de sensibilidad

Como se ha señalado a lo largo del documento, el concepto de robustez climática es dependiente y muy sensible al indicador de desempeño y al umbral de garantía que se establece. Esto es más crítico en situaciones donde el rango de incertidumbre en la proyección de cambio climático es elevado. Como se ha demostrado, los indicadores que informan sobre el comportamiento promedio de un sistema suelen enmascarar los impactos de periodos de sequía si el umbral de garantía fijado es bajo (igual o inferior al 85% para el caso de la cobertura). En cambio, no tendría sentido mantener umbrales de garantía elevados (superiores al 90%) cuando lo que se quiere es evaluar el desempeño del sistema en periodos de sequía. Debido a la falta de linealidad que caracteriza a los sistemas hidrológicos y de explotación de recursos, en ocasiones resulta prudente, tal cual se ha hecho en el presente estudio, utilizar una combinación de indicadores y umbrales de garantía para tener una mejor estimación de los impactos del cambio climático y el desarrollo territorial en la satisfacción de las demandas.

Para ilustrar el efecto de la elección del umbral de garantía para el sistema de estudio, se ha hecho un análisis de sensibilidad con el conjunto de escenarios seleccionados y listados en la Tabla 67. En la Figura 81 se muestra un ejemplo para el caso del escenario tendencial. Como es de esperar, la robustez del sistema se ve incrementada conforme disminuye el umbral de garantía (o aumenta el nivel de tolerancia hacia la aceptación de situaciones con déficit hídrico o “fallos” del sistema).

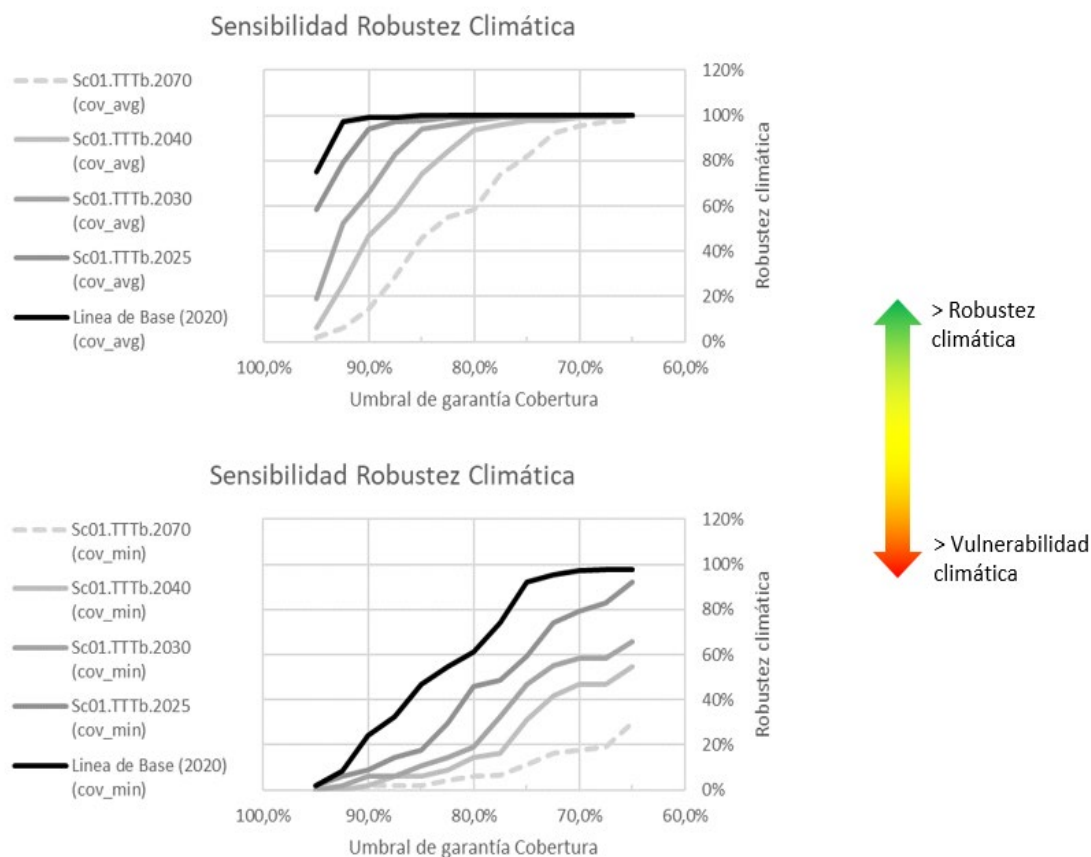
Estas diferencias en cómo cambia la robustez de un sistema respecto a la selección del indicador

de desempeño y el umbral de garantía son especialmente relevantes en regiones donde la incertidumbre y heterogeneidad en las proyecciones climáticas resulta elevada. Así se comprueba para el caso de la Cuenca Hidrográfica del Canal de Panamá donde el umbral de garantía necesario para alcanzar el mismo valor de robustez es muy superior cuando se trabaja con el indicador de cobertura mínima que cuando se hace con la cobertura promedio. Asumiendo razonable un valor de robustez del 60% para el sistema, este se alcanzaría para la condición promedio y todos los horizontes temporales simulados fijando un umbral de garantía del 80%.

Sin embargo, este criterio 80-60 solo garantiza la satisfacción de la demanda para el año más seco del periodo de simulación base, referente a las condiciones climáticas y territoriales actuales. De mantener la robustez en el 60%, solo podría cubrirse el 70% de la demanda de agua en el año más seco del horizonte de simulación 2030, el 65% en el más seco del horizonte 2040, o muy por debajo del 60% para el más seco del periodo de simulación centrado en 2070.

Los resultados del análisis de sensibilidad refuerzan la idea de caracterizar el comportamiento del sistema no solamente en condiciones promedio de disponibilidad de recursos, sino también, y más importante, en condiciones extremas de sequía. La evaluación del comportamiento del sistema en condiciones promedio y extremas de disponibilidad, también obliga a alcanzar un compromiso entre los niveles de tolerancia asumidos para garantizar la demanda de agua, y los objetivos de robustez climática que debe alcanzarse para el sistema de abastecimiento.

Figura 81. Valores de robustez climática para diferentes umbrales de garantía e indicadores de desempeño (cobertura promedio interanual, panel superior; cobertura mínima, panel inferior)



Fuente: Equipo redactor PIOTA, 2021.

2.6

PROSPECTIVA: TENDENCIAS Y ESCENARIO

Rutas de Adaptación

6





2.6

Rutas de adaptación

2.6.1

Concepto

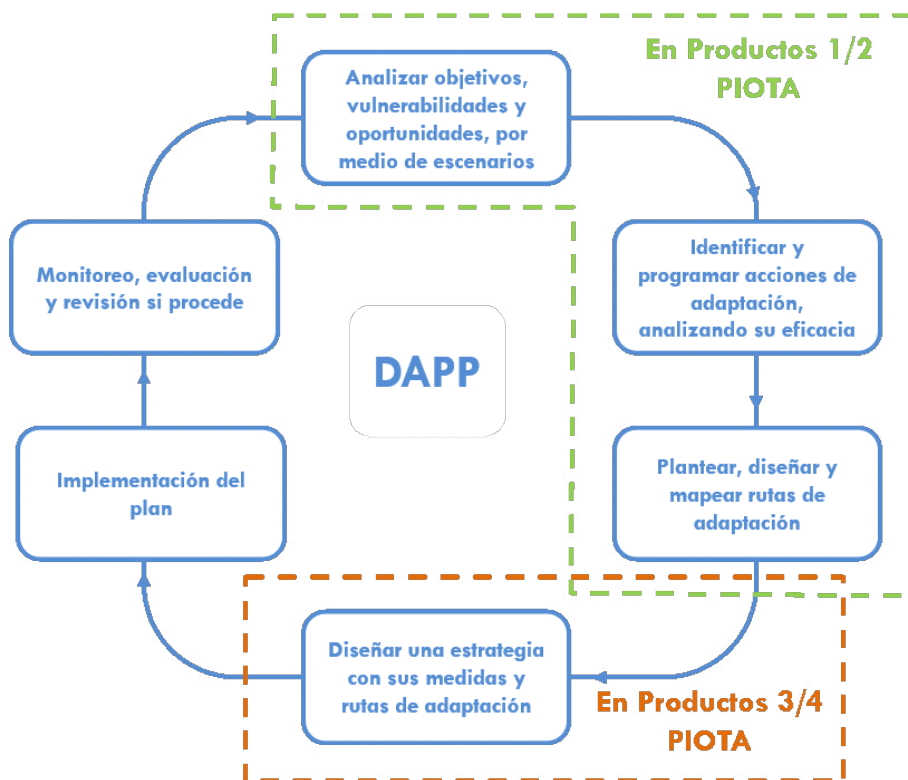
La definición de rutas de adaptación para la CHCP es una forma de sistematizar el conjunto de contenidos y análisis presentados a lo largo de este documento, definiendo un marco dinámico para el establecimiento y la adopción práctica de políticas para garantizar la disponibilidad de recursos hídricos; de tal modo que la toma de decisiones, a la hora de intervenir en el territorio, se puedan ir ajustando los resultados de un desarrollo manifiestamente diferente al planificado, o bien a la disponibilidad de informaciones actualizadas (por ejemplo, en relación a pronósticos de cambio climático).

Por tanto, en adición a la Estrategia de Desarrollo Sostenible y Descarbonización (Producto 3) y un instrumento de planificación territorial (Producto 4) para la CHCP, las rutas de adaptación proporcionan un insumo estratégico adicional, con un interesante componente de flexibilidad frente a un futuro que presenta incertidumbres, a nivel global y local.

En este contexto, la adopción de políticas dinámicas de gestión adaptativa (*Dynamic Adaptive Policy Pathways*, DAPP, por sus siglas en inglés)³⁷, proporciona a las autoridades responsables de la gestión de los recursos hídricos una herramienta capaz de apoyar la toma de decisiones.

37. Haasnoot, M. et al (2013). Dynamic adaptive policy pathways: A method for crafting robust decisions for a deeply uncertain world

Figura 82. Esquema conceptual DAPP e integración con el proceso de elaboración del PIOTA



Fuente: Equipo redactor PIOTA, 2021, en base a Haasnoot et al. 2013.

En definitiva, se trata de apoyar la formulación del PIOTA, planteando y programando un conjunto concreto de medidas de adaptación que puedan ser puestas en práctica cuando se prevea que el sistema lo va a requerir. Esta puesta en marcha puede ser de forma individualizada, combinada o concatenada en el tiempo, en forma de “rutas” capaces de garantizar que se cumplen los objetivos de gestión establecidos inicialmente. En este caso, los objetivos están asociados a una garantía volumétrica, para satisfacer los usos y demandas previstas bajo diferentes escenarios de desarrollo territorial. Además, la toma de decisiones se verá apoyada por criterios semicuantitativos de costo/eficiencia e implicaciones socioambientales asociadas.

2.6.2

Diseño y formulación

2.6.2.1

Políticas consideradas

El primer elemento fundamental, para la definición de rutas de adaptación, son las propias políticas; es decir, el conjunto de medidas o actuaciones que es posible poner en práctica para evitar potenciales impactos en el balance hídrico de la Cuenca.

A continuación, se retoman contenidos mostrados a lo largo de este documento para presentar, ordenadamente, el conjunto de políticas que pueden desarrollarse para adaptar la Cuenca a una posible situación de déficit hídrico (Tabla 72). Es importante reseñar que, cada uno de estos portafolios de actuaciones, ha sido modelado en WEAP para evaluar cuál será el comportamiento de la Cuenca, una vez, completamente implementadas.

Tabla 72. Políticas de adaptación y medidas consideradas

Política	Medidas consideradas	Horizonte temporal ³⁸	Relación costo/beneficio	Implicaciones socioambientales	Nivel de aceptación
Gestión eficiente de la demanda	Campañas de concienciación para el ahorro	Desde H2025	Alto	Bajo	Alto
	Regularización del servicio de suministro	Desde H2025	Alto	Bajo	Alto
	Reducción de pérdidas de distribución	Desde H2025	Alto	Bajo	Alto
	Modernización de procesos industriales	Desde H2025	Alto	Bajo	Medio
	Modernización de regadíos	Desde H2025	Alto	Bajo	Bajo
Aumento de la oferta en la Cuenca	Nuevo embalse	Desde 2040	Medio	Alto	Alto
	Desalinizadora	Gradual desde 2040	Bajo	Medio	Medio
Aumento de la oferta desde otras cuencas	Trasvase	Desde H2030	Medio	Alto	Bajo

Fuente: Equipo redactor PIOTA, 2021.

El nivel de aceptación social de las medidas fue recogido en los talleres participativos desarrollados con los diferentes agentes sociales identificados en la Cuenca, cuyos resultados se recogen en el apartado 2.4.2. Los costos económicos de las medidas analizadas se basan en los valores referidos en el Informe de Stantec (2018), ajustados al año 2021 con un incremento anual del 3%.

Gestión eficiente de la demanda

Las medidas consideradas en este ámbito incluyen: campañas de concienciación para el ahorro; regularización del servicio de suministro; reducción de pérdidas en el sistema de distribución; modernización de procesos industriales; prácticas sostenibles en los procesos productivos; así como la modernización de regadíos o prácticas de agricultura resiliente.

Bajo esta política se enmarcan un conjunto de medidas encaminadas a obtener una reducción de la demanda del recurso hídrico mediante una gestión eficiente, a un costo relativamente modesto por no requerir de la construcción de grandes infraestruc-

turas. Algunas medidas como la de reducción de pérdidas podrían requerir de reparaciones importantes en vías o áreas de alto tráfico, donde si no se tienen trabajos expeditos o bien planificados podrían suponer alteraciones temporales en las vías de comunicación. Sin embargo, poseen una buena relación costo/beneficio y mínimas implicaciones socioambientales, además de un nivel de aceptación considerable tal y como se muestra en los insumos generados del proceso participativo desarrollado como parte de la metodología de trabajo seguida para completar este informe.

Al 2025 se estima necesaria la instalación de aproximadamente 140 mil medidores y la ejecución de medidas de conservación con un costo cercano a \$117 millones para el escenario “consensuado”, y de aproximadamente 280 mil medidores y la ejecución de medidas de conservación con un costo cercano a \$190 millones para el escenario “ambicioso”. El aumento en la productividad del agua debido a la inversión en medidas de ahorro de agua de riego se estima en \$0.15/m³, con una inversión de \$140 millones³⁹.

38. Estos horizontes temporales indican el momento desde que la medida empieza a ser efectiva; es decir, que las medidas deberán ser diseñadas e implementadas con anterioridad a la fecha señalada.

39. Borrego-Marín, M. M., & Berbel, J. (2019). Cost-benefit analysis of irrigation modernization in Guadalquivir River Basin. *Agricultural Water Management*, 212, 416-423.

Aumento de la oferta en la Cuenca

En esta política se incluye un conjunto de medidas encaminadas a obtener mayor disponibilidad del recurso hídrico dentro de la propia Cuenca. Requieren la construcción de grandes infraestructuras o instalaciones, por lo que llevan asociados elevados costos directos, lo que se traduce en una modesta relación costo/beneficio; así como considerables implicaciones socioambientales, pero cuentan con un buen grado de aceptación.

En la simulación de estas medidas se ha considerado el tiempo de construcción y su puesta en funcionamiento. Las medidas bajo esta política incluyen:

- Aumento de la capacidad de almacenaje mediante la construcción de un nuevo embalse. Se ha simulado la construcción de un nuevo embalse en la Cuenca con un volumen útil de 798 hm³ constante a partir de 2040. El costo de esta infraestructura ascendería a unos \$1,400 millones y conlleva impactos ambientales a determinar en el correspondiente Estudio de Impacto Ambiental. Las posibles afectaciones incluirían, entre otras, alteraciones del flujo natural, caudales ecológicos y dinámicas de erosión de los cauces, aguas arriba del embalse, además de la pérdida de tierras de cultivo o forestales, así como el desplazamiento de viviendas e infraestructuras afectadas por el nivel del embalse.
- Desalinizadora. Se valora la instalación de una planta desalinizadora en la Cuenca, que aporte agua desalinizada al sistema. El sistema requiere, no solo de la construcción de la planta de tratamiento, sino del sistema de conducciones de toma, suministro y vertidos. Así mismo, cuenta con elevados costos de mantenimiento, y requiere de una gran potencia de suministro eléctrico. Se ha considerado la puesta en funcionamiento de una planta con una capacidad de desalación de 70 hm³ al año 2040 y de 100 hm³ al año 2070. De acuerdo al estudio de Stantec (2018), los costos estimados de tratamiento rondarían los \$1-1.5/m³ (en comparación con \$0.5/m³ del tratamiento convencional de agua dulce) y los de construcción de la planta correspondiente oscilaría entre los \$400-1,000 millones. Los impactos ambientales asociados a este tratamiento se deben principalmente a la ele-

vada concentración de sales de los residuos del tratamiento (salmueras), pudiendo afectar localmente al equilibrio del ecosistema donde sean vertidos. A la hora de garantizar la viabilidad ambiental de esta propuesta, además de analizar la rentabilidad del proceso en términos energéticos, será necesario prestar especial atención a los impactos ambientales que pudieran generarse en el proceso de desalación.

Aumento de la oferta desde otras cuencas

Este conjunto de medidas requiere la construcción de diversas infraestructuras, lo que se traduce en un posible elevado costo. Están encaminadas a obtener recursos y transferirlos desde otras áreas al sistema de embalses del Canal. Así mismo, a pesar de la buena relación costo/beneficio que pueden aportar estas medidas, conllevan implicaciones socioambientales a considerar en cada caso y la forma en que se desarrollen. La principal medida que se contempla en estas políticas es la construcción de un trasvase desde otras cuencas.

- Traslase. Se simula la puesta en funcionamiento de un trasvase de otras cuencas con un caudal promedio de 800 hm³ para el escenario “consensuado”, y de 1,400 hm³ para el escenario “ambicioso”. Se estima un costo económico asociado de aproximadamente \$450 millones, incluyendo las infraestructuras de desvío y canales, lo cual variará considerando el punto de trasvase y otros detalles técnicos. De igual forma, la puesta en funcionamiento de un trasvase de otras cuencas conlleva asociadas, implicaciones ambientales derivadas de la afectación de ecosistemas y regímenes naturales, indemnizaciones, así como alteraciones en la calidad de las aguas (características físico-químicas de aguas procedentes de diferentes fuentes con diferentes sustratos).

2.6.2.2

Puntos de inflexión (Tipping points)

El segundo elemento interesante que integra la práctica de DAAP, y que es necesario considerar para establecer rutas de adaptación, es el de los puntos de inflexión (*Adaptive Tipping Points*, ATPs, por sus siglas en inglés), que representan aquellas condiciones bajo las cuales el desempeño del siste-

ma no es el esperado y una estrategia determinada debe ser reforzada o reemplazada.

Existen diferentes aproximaciones teóricas para la identificación de ATPs. En este caso, tal y como se ha mostrado anteriormente en el presente documento, se ha seguido una estrategia tipo “*bottom-up*”, basada en la modelación del balance hídrico de la Cuenca con WEAP, con un importante componente participativo, implicando en el proceso a agentes interesados y/o afectados en el proceso de construcción conjunta del PIOTA. Cabe recordar que el indicador tomado en este caso ha sido la demanda no satisfecha, debiendo ésta encontrarse por debajo del 5% en los periodos “secos” del ciclo hidrológico. Este requerimiento de demanda se podría ver comprometido por dos causas principales:

- Una obedece al aumento de las necesidades para los diferentes usos en la Cuenca (consumo residencial, esclusaje, generación eléctrica, riego, etc.), respecto a la situación actual.
- La otra se asocia a la variabilidad climática, pudiendo registrarse periodos con ausencia de precipitaciones más frecuentes y severos.

Tal y como se ha indicado anteriormente en el presente documento, los pronósticos climáticos regionalizados no apuntan sensibles variaciones en las condiciones sinópticas de precipitación anual o estacional en la CHCP. Por el contrario, sí cabe esperar algún tipo de incidencia asociada a los aumentos de temperatura proyectados a causa de aumentos en la tasa de evaporación en los embalses. Si bien serán, en todo caso, de mucha menor magnitud que las previsiones de incremento de la demanda pronosticadas, especialmente para el año 2030, tal y como se ha analizado con detalle, anteriormente, en este documento.

2.6.2.3

Escenarios de desarrollo territorial

Finalmente, para mapear rutas de adaptación, resulta preciso establecer escenarios de desarrollo territorial, ya que éstos determinan la demanda. Cabe recordar que han sido establecidos, anterior-

mente en este documento, dos diferentes escenarios, denominados “consensuado” y “ambicioso”, cada uno construido en base a diferentes hipótesis de crecimiento poblacional, usos del suelo (incluyendo la evolución de suelos forestales y agrícolas, lo que implícitamente conlleva beneficios en términos de adaptación) y desarrollo socioeconómico en la Cuenca, todo ello con clara incidencia en el total de demanda hídrica a satisfacer en cada supuesto. Ambos escenarios de demanda fueron procesados en WEAP, considerando el componente de cambio climático para diferentes escenarios RCP y horizontes temporales, lo que proporcionó información sobre el comportamiento del balance oferta-demanda asociado.

2.6.2.4

Resultados obtenidos

La consideración conjunta de los tres elementos arriba presentados, vinculada con los resultados de la modelación de escenarios realizada (ver detalle en 2.5), permite estructurar las rutas de adaptación que a continuación se muestran. La contribución de cada política de adaptación presentada se mide en función del porcentaje promedio de reducción del déficit hídrico (con respecto a la garantía del 95%) que se consigue en cada caso, bajo el supuesto de no limitación de la capacidad de potabilización del recurso disponible en la Cuenca. También se consideran, dos escalas temporales, asociadas a los dos escenarios de desarrollo socioeconómico previstos (“consensuado” y “ambicioso”), y dos condiciones de disponibilidad de recursos hídricos en la Cuenca:

- La primera se trata de una situación conservadora, dado que ha sido construido bajo condiciones de escasez y estrés hídrico en la Cuenca.
- La segunda, correspondiente a un año hidrológico promedio, situación lógicamente menos conservadora y que obvia, en cierta medida, periodos de ausencia prolongada de precipitaciones, como los que se han podido experimentar en el pasado reciente (años 2013 - 2015).

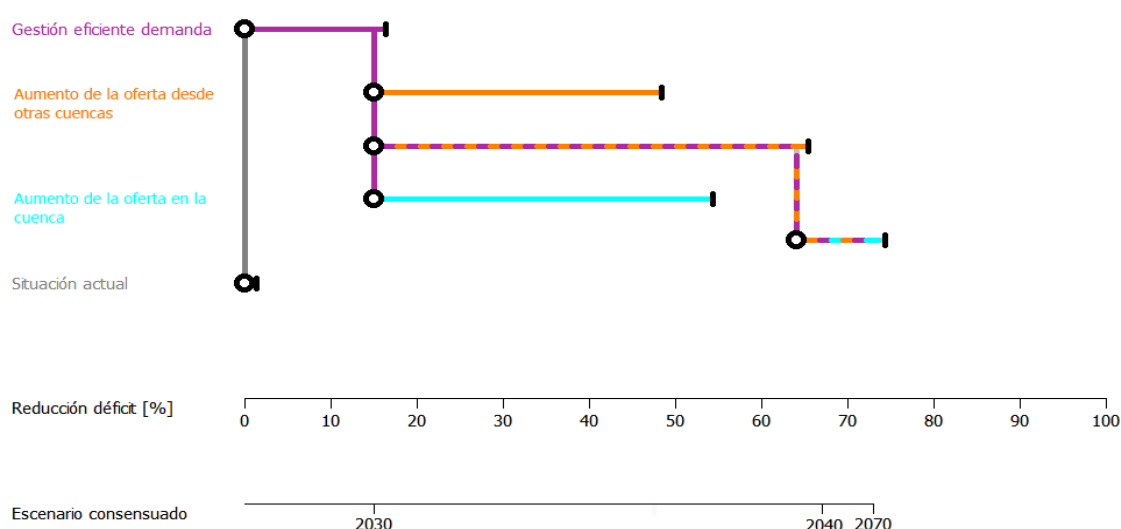
Cabe mencionar que el grado de implementación de las políticas difiere para cada escenario de desarrollo, y a su vez, supone una reducción del dé-

ficit de orden de magnitud distinta. Todas las rutas tienen en común, de partida, la situación actual de la Cuenca, con un déficit estructural que alcanza hasta el 15% en periodos secos. De manera lógica, se establece una priorización en cuanto a la implementación de las políticas descritas, desarrollándose en primer orden aquellas que no suponen la construcción de infraestructura nueva, como las medidas que contempla la gestión eficiente de la demanda. Las figuras que se muestran a continuación representan de manera esquemática los posibles mapas de rutas correspondientes.

La Figura 83 representa las rutas de adaptación para la CHCP bajo condiciones de estrés hídrico en un escenario “consensuado”. Partiendo de una situación actual, e implementando de manera gradual el portafolio de medidas de gestión eficiente de la demanda, se consigue una reducción del déficit ligeramente superior al 10%. Es por ello que, a partir del horizonte temporal 2030, deben im-

plementarse políticas encaminadas a aumentar la reducción del déficit, y que suponen, por tanto, la construcción de nuevas infraestructuras. Por un lado, la construcción de un trasvase, que suministre agua al sistema desde otras cuencas supondría una reducción del déficit (de hasta el 50%) que, en combinación con la gestión eficiente de la demanda, alcanzaría una reducción superior al 60%. Por otra parte, la construcción de infraestructuras, encaminadas a aumentar la oferta del recurso en la propia Cuenca (embalse + desalinizadora), a partir de 2030, conseguiría una reducción del déficit superior al 50%. La combinación de todas las políticas y medidas asociadas consigue una reducción del déficit de hasta un 70%, de manera promedio, aunque su implementación tiene un mejor resultado en los primeros horizontes temporales, donde las demandas son menores que en los horizontes temporales de largo plazo, donde el aumento de las demandas condiciona el déficit de la Cuenca.

Figura 83. Rutas de adaptación para la CHCP para condiciones de estrés hídrico. Escenario “consensuado”.



Map generated with Pathways Generator, ©2015, Deltares, Carthago Consultancy

Fuente: Equipo redactor PIOTA, 2021.

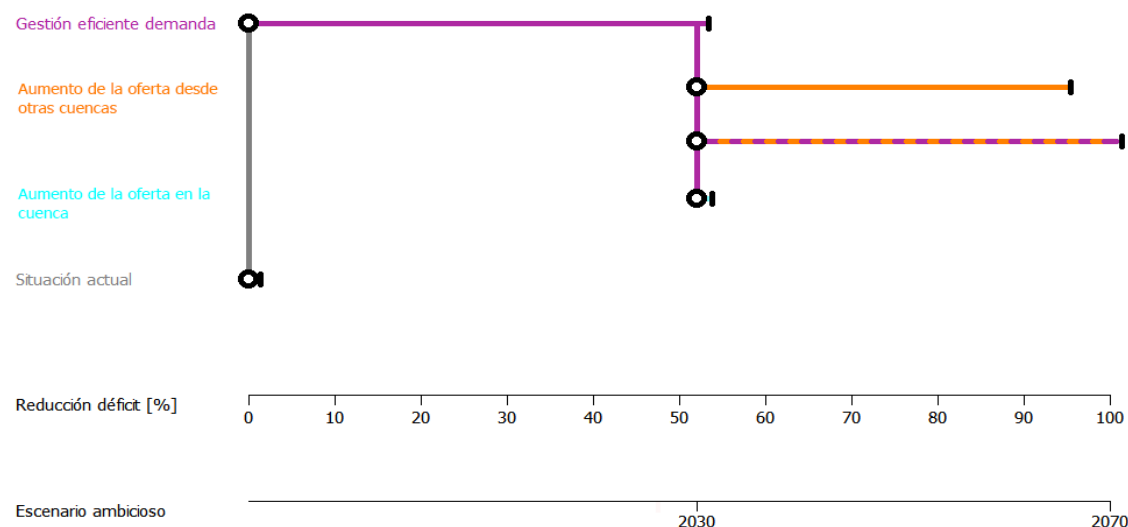
Por otro lado, la Figura 84 representa las rutas de adaptación para la CHCP bajo condiciones de estrés hídrico en un escenario “ambicioso”. Existen claras diferencias con respecto al grado de reducción del déficit que supone la implementación de políticas en comparación con el escenario “consensuado”. El desarrollo socioeconómico establecido

para este escenario condiciona una mejor situación actual de partida, con un déficit menor en la Cuenca. Tanto es así, que la sola aplicación de medidas de gestión eficiente de la demanda, supone una reducción del déficit de hasta el 50%. Aplicando la misma secuencia anteriormente descrita, la puesta en funcionamiento de un trasvase de otras cuen-

cas, a partir de 2030, reduciría el déficit hasta más de un 90%. Como también muestra la Figura 85, la construcción de un nuevo embalse en la Cuenca o la puesta en funcionamiento de una desalinizadora, no supondrían una reducción significativa del déficit (inferior al 5%). Es por ello por lo que, para este escenario ambicioso, se descarta la adopción de

medidas de aumento de la oferta en la propia cuenca (nuevo embalse ubicado en la CHCP⁴⁰, desalinizadora) ya que, como muestra la figura, la combinación de las medidas de gestión eficiente de la demanda en combinación con el trasvase alcanzaría una reducción del déficit del 100%.

Figura 84. Rutas de adaptación para la CHCP para condiciones de estrés hídrico. Escenario “ambicioso”



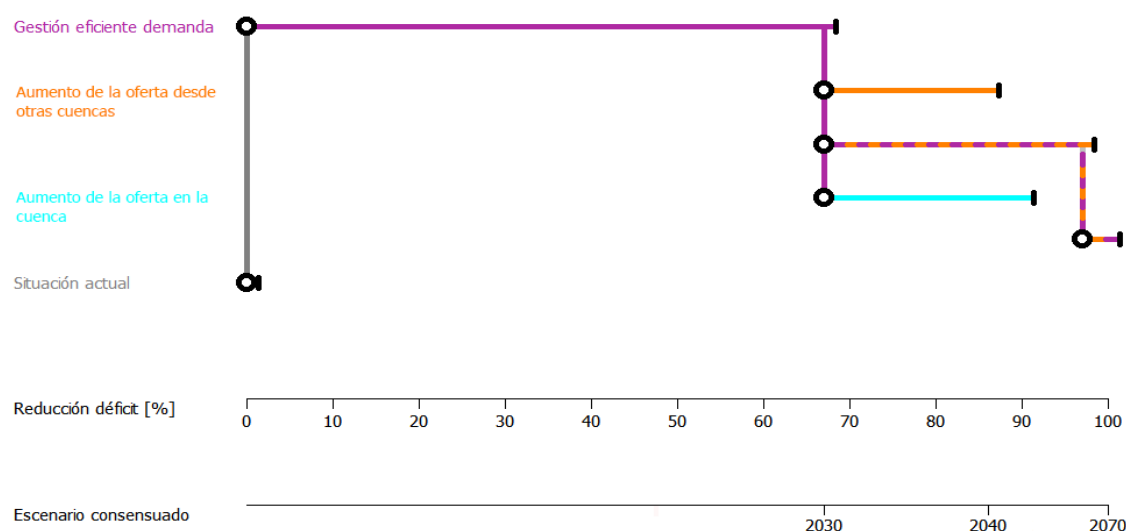
Fuente: Equipo redactor PIOTA, 2021.

Así mismo, la Figura 85 muestra las rutas de adaptación para la CHCP para un año hidrológico promedio en un escenario “consensuado”. Al tratarse de un año hidrológico promedio, el déficit de partida es nulo en la situación actual, aunque se va incrementando a lo largo de los horizontes temporales, lo que implica la adopción de medidas de adaptación. Así, la implementación de medidas de

gestión eficiente de la demanda supone una reducción del déficit superior al 60%, el trasvase casi del 90% y un nuevo embalse, junto con una desalinizadora, ligeramente superior al 90%. La combinación de medidas de gestión de demanda junto con el trasvase alcanzaría una reducción superior al 95%, alcanzando el 100% en combinación con el embalse y la desalinizadora.

40. Cabe señalar que la modelación únicamente considera el nuevo embalse dentro de la Cuenca para el almacenamiento de agua proveniente de la misma CHCP. Sin embargo, será fundamental la realización de estudios que midan la necesidad de construir un nuevo embalse (o aumentar la capacidad de los existentes) para almacenar el recurso hídrico del trasvase de otras cuencas, siendo así, posiblemente, necesaria la combinación de estas dos nuevas infraestructuras (trasvase y embalse).

Figura 85. Rutas de adaptación para la CHCP para un año hidrológico promedio. Escenario “consensuado”



Fuente: Equipo redactor PIOTA, 2021.

Finalmente, el mapa de rutas de adaptación para la CHCP para un año hidrológico promedio en un escenario “ambicioso”. La situación actual de partida que establece el desarrollo socioeconómico del escenario es tan favorable, en cuanto al déficit, que la sola aplicación de medidas encaminadas hacia la gestión eficiente de la demanda consigue una reducción completa del déficit para todos los horizontes temporales. Por este motivo, se ha desestimado la representación gráfica, además de la valoración de otras rutas de adaptación, para este caso particular.

El análisis de los mapas de rutas de adaptación arroja algunas conclusiones interesantes, que en gran parte ya fueron formuladas en otros términos en anteriores secciones del presente documento.

En primer lugar, resulta interesante señalar las diferencias entre escenarios de desarrollo territorial en términos de déficit. Tanto en situaciones promedio como de escasez, los escenarios “ambicioso” base y “consensuado” base (sin adopción de medidas de adaptación), suponen una mejora con respecto a un escenario de no intervención con tasas de desarrollo tendenciales; siendo mayor, en términos generales, la reducción del déficit para el escenario “ambicioso” por la propia definición de sus tasas de crecimiento. Esto condiciona no solo la situación de partida, sino también el efecto reductor

del déficit que tiene la aplicación de medidas en los diferentes horizontes temporales. De esta manera se explica cómo es posible alcanzar una plena reducción del déficit en situaciones de escasez para el escenario “ambicioso” combinando medidas de gestión eficiente de la demanda y la puesta en funcionamiento de un trasvase de otras cuencas, frente al 70% alcanzado en el escenario “consensuado” combinando todas las medidas planteadas.

Por otro lado, se observa como la aplicación de la misma política no tiene igual repercusión en la reducción del déficit para cada escenario, por su dependencia de las demandas asociadas al desarrollo socioeconómico correspondiente. Así, las medidas de gestión eficiente de la demanda suponen una reducción del 10% para el escenario “consensuado” en comparación con el 50% para el escenario “ambicioso” en condiciones de estrés. De manera similar ocurre con la puesta en funcionamiento de un trasvase de otras cuencas, siendo mayor la reducción del déficit en el escenario “ambicioso” en comparación con el “consensuado” en condiciones de estrés. No obstante, como se ha comentado anteriormente, el volumen trasvasado también varía en función del escenario (1,400 hm³ para el “ambicioso” y 800 hm³ para el “consensuado”).

En segundo lugar, procede destacar que existen diferentes vías de actuación, cada una con sus res-

pectivas implicaciones en términos de efectividad, costos e implicaciones socioambientales. La Tabla 73 pone en común estos términos de una manera relativa y cualitativa, permitiendo comparar la aplicación de una política o combinación de políticas respecto a otras, para el conjunto de situaciones analizados en el escenario “consensuado”:

- Por su parte, la gestión eficiente de la demanda alcanza una efectividad considerable, a relativamente bajo costo, sin llevar asociadas destacables implicaciones socioambientales, en comparación con el resto de rutas en conjunto. No obstante, el éxito de estas medidas estará condicionado al nivel de implicación social y a los recursos públicos destinados a promoverlas.
- El aumento de la oferta desde otras cuencas, como la construcción de un trasvase, supone una efectividad mayor que la gestión de la demanda, pero a un costo comparativamente más elevado. Además, esta infraestructura lleva asociados implicaciones socioambientales, como se ha indicado anteriormente.
- De igual manera, el aumento de la oferta en la CHCP, como la construcción de un nuevo embalse en la Cuenca y la puesta en funciona-

miento de una desalinizadora, presenta una efectividad mayor a base de un costo también mayor, con sus correspondientes implicaciones socioambientales.

- Sobre esta base, la combinación de unas políticas con otras pone de manifiesto la anterior valoración. De esta forma, la combinación de medidas de gestión de la demanda con el aumento de la oferta desde otras cuencas (trasvase) consigue una mayor efectividad que el resto de las medidas por sí solas, con un costo similar al del aumento de la oferta en la CHCP (nuevo embalse, desalinizadora), pese a las relativas implicaciones socioambientales.
- Por último, mediante la combinación de todas las políticas se obtiene una elevada efectividad, a cambio de un elevado costo, y en detrimento de implicaciones socioambientales.

Esta valoración pone de manifiesto el carácter acumulativo de los costos directos asociados a la implementación de unas políticas u otras, así como el de los costos indirectos o impactos ambientales, no siendo siempre de igual manera reflejados en la efectividad de estas.

Tabla 73. Valoración comparada de rutas de adaptación para el escenario “consensuado”

	Ruta de adaptación	Efectividad	Costo	Implicaciones socioambientales
	Gestión eficiente de la demanda	+	\$	-
	Aumento de la oferta desde otras cuencas	++	\$\$\$	----
	Aumento de la oferta en la CHCP	+++	\$\$\$\$	---
	Gestión eficiente de la demanda + Aumento de la oferta desde otras cuencas	++++	\$\$\$\$	----
	Gestión eficiente de la demanda + Aumento de la oferta en la CHCP + Aumento de la oferta desde otras cuencas	+++++	\$\$\$\$\$	-----

Fuente: Equipo redactor PIOTA, 2021.

En este apartado se ha realizado el ejercicio de representar la repercusión que, las mismas políticas de adaptación aplicadas a condiciones hidrológicas distintas, supondrían sobre la reducción del déficit en la CHCP, bajo diferentes escenarios de desarro-

llo territorial. El análisis pone de manifiesto que, bajo una perspectiva conservadora, en situaciones de estrés hídrico, el déficit total de la CHCP no se vería reducido por completo, a pesar de la adopción del conjunto de políticas planteadas, aunque

sí podría verse en gran medida reducido. La elección de unas u otras dependerá del delicado equilibrio que subyace entre sus costos, directos e indirectos, en relación con los beneficios obtenidos, siendo evidente que la satisfacción de las necesidades de la CHCP lleva asociados unos costos no solo económicos sino también socioambientales.

De los resultados se evidencia que, aunado a las intervenciones para lograr el escenario de desarrollo territorial consensuado, es necesario implementar de forma combinada políticas de adaptación relacionadas con la gestión eficiente de la demanda y aumento de oferta.

Es importante mencionar que, para la implementación de políticas centradas en aumentar la oferta de agua en la CHCP (embalses, trasvases y desalinizadoras), es fundamental realizar todos los estudios técnicos, económicos, sociales y ambientales, considerando la normativa aplicable.

2.6.3

No-arrepentimiento, co-beneficios y sinergias

El proceso de análisis de tendencias y escenarios para la CHCP ha tenido como elemento estructurador el balance hídrico de la CHCP, aspecto de particular interés y relevancia para el desarrollo territorial en un contexto muy concreto y acotado. No obstante, en este documento también se han analizado otros posibles efectos asociados a la variabilidad climática sobre el territorio, como inundaciones, deslizamientos y periodos de altas temperaturas, proponiendo igualmente un conjunto de medidas de adaptación y una serie de criterios estratégicos para priorizar su implementación.

Entre estos criterios se encuentra el de “no-arrepentimiento”⁴¹, haciendo referencia a la recomendación de adoptar, preferentemente, medidas cuya realización sea plenamente efectiva ante cualquier posible escenario futuro, incluso, si eventualmente no llegasen a producirse cambios significativos en las condiciones del sistema.

De igual modo, procede destacar otro criterio fundamental para la priorización de medidas de adaptación. Se trata de los co-beneficios y sinergias que la implementación de determinadas acciones pueda generar. Este elemento es especialmente relevante de cara a diseñar la Estrategia de Desarrollo Sostenible y Descarbonización (Producto 3) para la CHCP, cuando las acciones de mitigación (reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero), también entrarán en juego para componer un modelo de desarrollo sostenible coherente en este territorio. En este caso se debe plantear el mayor número de estrategias “SAM” (generadoras de sinergias entre adaptación y mitigación) y evitar la mal entendida adaptación o los denominados “*trade-offs*”, es decir, que la una acción de adaptación concreta derive en costos adicionales de mitigación, o viceversa, para cumplir con los objetivos establecidos.

Entre el conjunto de medidas identificados en las rutas de adaptación, la política de gestión eficiente de la demanda es una de las estrategias a priorizar y sobre la que resulta recomendable invertir en mejorar las hipótesis técnicas y tecnológicas consideradas para construir este análisis. Toda aquella iniciativa en este sentido podría reducir costos financieros, ambientales y sociales asociados a la necesidad de acudir a iniciativas basadas en intervenciones en el territorio, además de generar otros impactos positivos en términos de reducción de emisiones. Cabría, en este sentido, plantear la posibilidad de evaluar alternativas en el mercado financiero/asegurador que eventualmente pudiesen devolver un costo global equivalente o inferior, incluyendo bienes no de mercado (intangibles ambientales y sociales) en la evaluación.

En relación con las medidas, identificadas en el capítulo 2.3, para reducir el riesgo climático asociado a otros eventos naturales como inundaciones, deslizamientos y episodios de temperaturas extremas, la gran mayoría de las propuestas son en realidad opciones de no-arrepentimiento que, además, generan impactos favorables en el territorio y forman parte de la propuesta del PIOTA. La

41. La definición adoptada por el Banco Mundial (*Work Bank*) del concepto “no-arrepentimiento” es la siguiente: opciones (o medidas) de adaptación que se justificarían en todos los escenarios futuros plausibles, incluida la ausencia del cambio climático provocado por el ser humano. (Eales et al., 2006).

única recomendación adicional, en este sentido, es dar prioridad a las soluciones basadas en la naturaleza, frente a intervenciones estructurales, ya que estas últimas presentan un mayor impacto ambiental en similares condiciones de eficacia a la hora de reducir los riesgos. No obstante, la dificultad para ejecutar plenamente las medidas de gestión genera incertidumbre sobre el grado de eficacia de las mismas, haciendo necesario complementar éstas con medidas estructurales adicionales que aseguren el éxito de la adaptación, considerando los aspectos sociales y ambientales para reducir o mitigar los impactos asociados a las mismas.

2.6.4

Vulnerabilidades residuales

En determinadas ocasiones, la consecución de la estrategia más ambiciosa de adaptación no tiene la capacidad de garantizar, con certeza aceptable, las condiciones de resiliencia deseadas para un territorio o sistema concreto. En otros casos, las incertidumbres asociadas a la variabilidad climática, e incluso al propio método de evaluación de riesgos desplegado, no permite descartar por completo la manifestación de impactos climáticos. Resulta por tanto conveniente, como corolario de este tipo de análisis, sondear la posible existencia de vulnerabilidades residuales.

En este caso, el ejercicio se hace distinguiendo, por un lado, todo lo relativo a la evolución del balance hídrico de la CHCP ya que, debido a la naturaleza del apoyo técnico dispuesto, ha concentrado gran parte del esfuerzo empleado en el análisis. Por otro lado, se considera el resto de las amenazas climáticas analizadas también (inundaciones, deslizamientos y altas temperaturas), aunque con algo menos de profundidad.

En relación con la disponibilidad de recursos para satisfacer las demandas actuales y previstas, bajo diferentes escenarios, tras haber desarrollado un método de toma de decisiones robusta, se llega a la conclusión de que podrá ciertamente haber periodos concretos y acotados de escasez en los que podrán no ser alcanzados los umbrales de garantía establecidos. Esto obligará a habilitar políticas de adaptación como las ya mencionadas (gestión eficiente de la demanda y aumento de la oferta). Pro-

cede destacar que, atendiendo a los resultados del análisis realizado, el componente climático no ha sido identificada como el principal agente estresor del sistema, sino más bien los aumentos en la demanda indicados para los próximos años, en base a los cuales se han construido los escenarios prospectivos analizados en el presente documento.

Por su parte, en lo relativo a eventos extremos, aunque siempre existe la probabilidad de padecer daños (como los recientemente acusados tras el paso del Huracán Eta en Panamá y otros países de la región), resulta factible prever que, la adecuada puesta en práctica de las medidas de adaptación planteadas, podrán contribuir a minimizar de manera efectiva la vulnerabilidad climática de los diferentes receptores sensibles (población, hábitat urbano, actividades socioeconómicas, infraestructuras y servicios, valores ambientales) identificados en el territorio de la CHCP.

Bibliografía

Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Binger, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885-900.

ANAM (2011). *Atlas Ambiental de la República de Panamá 2010*. ANAM-BID. Panamá: Autoridad Nacional del Ambiente.

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56*. Fao, Rome, 300(9), D05109.

Amato, C. C., McKinney, D. C., Ingol-Blanco, E., & Teasley, R. L. (2006). *WEAP hydrology model applied: the Rio Conchos Basin*. Center for Research in Water Resources, University of Texas at Austin.

Yates, D., Sieber, J., Purkey, D., & Huber-Lee, A. (2005). *WEAP21—A demand-, priority-, and preference-driven water planning model: part 1: model characteristics*. *Water International*, 30(4), 487-500.

Escobar, M., and Sandoval, G.L. (2014). *Modelación del recurso hídrico en la cuenca del río La Vieja en Colombia*. USAID and SEI fact sheet.

STANTEC. (2019). *Municipal and Industrial Water Demand and Raw Water Consumption Forecast 2020-2050*. Panamá.

**Catalogación en la fuente proporcionada por la Biblioteca
Felipe Herrera del Banco Interamericano de Desarrollo**

DATOS PENDIENTES