



Evaluación del riesgo y desarrollo
de capacidades en Costa Rica

Modelos de amenazas climáticas

Agosto 2025

Preparado para:



Preparado por:



Global Risk Modelling Alliance

InsuResilience Solutions Fund

ISF/GRMA / G.05, BMZ 2021.3683.6

Evaluación del riesgo y desarrollo de capacidades en Costa Rica

Modelos de amenazas climáticas

Producto 4

(Entregables D2.1a, D2.1b, D2.1c, D2.1d, D2.1e, D2.1f, D2.1g, D2.2a, D2.2b,
D2.2c, D2.2d, D2.2e, D2.2f)

Preparado para:



Agosto de 2025

Consultor

INGENIAR CAD/CAE Ltda.
Carrera 19A # 84-14 OF 504
Edificio Torrenova
Bogotá, D.C., Colombia
www.ingeniar-risk.com



Centro Internacional de Métodos
Numéricos en Ingeniería
Edificio C1 Campus Nord UPC
C/ Gran Capità, S/N 08034
Barcelona, España
www.cimne.com



Número de producto: INGENIAR-CIMNE-GRMA-04-v3

Citar como: Cardona, O.D., Bernal, G., Villegas, C., Rincón, D., Molina, J. F., Gonzales, D., Grajales, S., Herrera, S., Acosta, M., Marulanda, P., Marulanda, M., Carreño, M. L., Brenes, A. (2025). Modelos de amenazas climáticas – Evaluación del riesgo y desarrollo de capacidades en Costa Rica. Global Risk Modelling Alliance – SUGESE.

TABLA DE CONTENIDO

TABLA DE CONTENIDO	2
1 INTRODUCCIÓN	5
2 MODELACIÓN DEL FORZAMIENTO METEOROLÓGICO	7
2.1 CATÁLOGO NACIONAL DE ESTACIONES	7
2.2 BASES DE DATOS INTERNACIONALES DE INFORMACIÓN CLIMÁTICA	9
2.2.1 CHIRPS (CLIMATE HAZARDS GROUP INFRARED PRECIPITATION WITH STATIONS)	9
2.2.2 ERA5 – COPERNICUS CLIMATE CHANGE SERVICE	10
2.3 INFORMACIÓN METEOROLÓGICA PARA EL CLIMA BASE	10
2.3.1 VERIFICACIÓN DEL AJUSTE DE LA INFORMACIÓN DE BASES DE DATOS INTERNACIONALES	14
2.4 SIMULACIONES PARA EL CLIMA BASE	32
2.5 INCORPORACIÓN DEL CAMBIO CLIMÁTICO	40
2.6 COMPORTAMIENTO DEL CLIMA EN UNA UBICACIÓN BAJO ESCENARIOS FUTUROS	44
3 AMENAZA DE SEQUÍA	47
3.1 ÍNDICES DE SEQUÍA CONSIDERADOS	47
3.1.1 ÍNDICE DE PRECIPITACIÓN ESTANDARIZADO (SPI)	47
3.1.2 ÍNDICE ESTANDARIZADO DE PRECIPITACIÓN Y EVAPOTRANSPIRACIÓN (SPEI)	48
3.2 SERIES DE INDICADORES DE SEQUÍA	49
3.3 IDENTIFICACIÓN DE EVENTOS DE SEQUÍA	50
4 AMENAZA DE INUNDACIÓN	58
4.1 ALCANCE DEL MODELO DE INUNDACIÓN	58
4.2 INSUMOS PARA LA MODELACIÓN	59
4.2.1 MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN (DEM)	59
4.2.2 COBERTURA DEL SUELO	61
4.2.3 NÚMERO DE CURVA	62
4.2.4 CUENCAS HIDROGRÁFICAS Y RED HÍDRICA	67
4.3 RESPUESTA HIDROLÓGICA DE LAS CUENCAS	68
4.3.1 CUENCA DEL RÍO TEMPISQUE	69
4.3.2 CUENCA DEL RÍO MATINA	70
4.3.3 CUENCA DEL RÍO PACUARE	71
4.3.4 CUENCA DEL RÍO REVENTAZÓN	72
4.4 EVALUACIÓN DE LA AMENAZA A NIVEL NACIONAL	72
4.4.1 COMPARACIÓN DE LA AMENAZA DE INUNDACIÓN CON EL PROYECTO GRAF	80

4.5 AMENAZA DE INUNDACIÓN PARA EL CANTÓN DE HEREDIA	84
4.5.1 INUNDACIÓN PLUVIAL EN EL CANTÓN DE HEREDIA	84
4.5.2 INUNDACIÓN FLUVIAL EN EL CANTÓN DE HEREDIA	87
<u>5 AMENAZA DE INUNDACIÓN COSTERA</u>	<u>97</u>
5.1 INSUMOS PARA LA MODELACIÓN.....	97
5.1.1 TRAYECTORIAS HISTÓRICAS	97
5.1.2 TRAYECTORIAS SIMULADAS PARA CLIMA FUTURO	99
5.1.3 ELEVACIÓN DEL NIVEL DEL MAR	101
5.1.4 BATIMETRÍA Y TOPOGRAFÍA	103
5.2 EVALUACIÓN DE LA AMENAZA DE INUNDACIÓN COSTERA.....	103
5.3 INUNDACIÓN COSTERA POR TSUNAMI.....	107
<u>6 PROGRAMA DE DESARROLLO DE CAPACIDADES</u>	<u>111</u>
6.1 MÓDULO 1 - FUNDAMENTOS	111
6.2 MÓDULO 2 – COMPONENTES DE LA MODELACIÓN DEL RIESGO	111
6.2.1 CICLONES TROPICALES	111
6.2.2 INUNDACIÓN.....	113
6.2.3 SEQUÍA	115
6.3 MÓDULO 3 - APLICACIONES AVANZADAS	117
<u>7 BIBLIOGRAFÍA.....</u>	<u>119</u>
<u>A.1 RELACIÓN DE DATOS FALTANTES DE ESTACIONES METEOROLÓGICAS</u>	<u>124</u>
DATOS DE PRECIPITACIÓN	124
DATOS DE TEMPERATURA	128
<u>A.2 ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO</u>	<u>134</u>
PRECIPITACIÓN SSP2-4.5.....	134
TEMPERATURA SSP2-4.5.....	143
PRECIPITACIÓN SSP3-7.0.....	152
TEMPERATURA SSP3-7.0.....	161
PRECIPITACIÓN SSP5-8.5.....	170
TEMPERATURA SSP5-8.5.....	179
<u>A.3 METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN DE LA AMENAZA POR INUNDACIÓN.....</u>	<u>188</u>

EVENTOS DE PRECIPITACIÓN (AGUACEROS)	188
ESTIMACIÓN DEL VOLUMEN DE ESCORRENTÍA	189
INUNDACIÓN PLUVIAL (ENCHARCAMIENTO).....	191
RESPUESTA HIDROLÓGICA DE CUENCAS	193
INUNDACIÓN FLUVIAL (DESBORDAMIENTO DE RÍOS)	195
<u>A.4 DESCRIPCIÓN DE CUENCAS PRINCIPALES Y PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS</u>	<u>198</u>
DESCRIPCIÓN DE LAS PRINCIPALES CUENCAS	198
<u>A.5 METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN DE LA AMENAZA POR INUNDACIÓN COSTERA.....</u>	<u>203</u>
PERTURBACIÓN DE LAS TRAYECTORIAS DE LOS HURACANES	203
MODELACIÓN DEL CAMPO DE VIENTO	204
MODELACIÓN DE LA MAREA DE TORMENTA.....	208
<u>A.6 METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN DE LA AMENAZA POR TSUNAMI</u>	<u>211</u>
GENERACIÓN.....	211
PROPAGACIÓN.....	212
ARRIBO	214
<u>A.7 CONSIDERACIONES SOBRE LA VALIDACIÓN DE RESULTADOS DE AMENAZA.....</u>	<u>217</u>
LIMITACIONES DEL PROCESO DE VALIDACIÓN	217
INUNDACIÓN FLUVIAL	218
INUNDACIÓN COSTERA	220
SEQUÍA	221
USO DE RESULTADOS DE RIESGO COMO MECANISMO DE VALIDACIÓN	223
<u>A.8 CONJUNTO DE DATOS DE MODELOS DE AMENAZAS CLIMÁTICAS</u>	<u>224</u>

1 INTRODUCCIÓN

El programa Global Risk Modelling Alliance (GRMA), auspiciado por el InsuResilience Solutions Fund (ISF), tiene como objetivo principal fortalecer las capacidades de los países y ciudades en el análisis de riesgos climáticos y de desastres orientados a las finanzas. Esta iniciativa busca llenar vacíos críticos en modelos y datos, mejorando las evaluaciones del riesgo climático y de desastres a nivel nacional y subnacional. Para lograrlo, el GRMA identifica y co-define, junto con socios locales, las necesidades específicas de cada país, ofreciendo herramientas abiertas de gestión de riesgos, datos y acceso a experiencia operativa en financiamiento de riesgos.

El primer componente de la modelación del riesgo es la amenaza, que debe describir todas las maneras como los fenómenos de la naturaleza pueden manifestarse en el territorio. La amenaza se define como una colección de eventos, simulados estocásticamente, que son colectivamente exhaustivos y mutuamente excluyentes; es decir, que cubren todas las posibilidades como la amenaza se puede manifestar asumiendo eventos independientes que tienen una frecuencia de ocurrencia que sigue una ley potencial natural (i.e., equivalente a una curva de recurrencia).

Las amenazas de origen hidrometeorológico consideradas dentro del alcance del proyecto GRMA para Costa Rica son: inundación fluvial, inundación pluvial, inundación costera y sequía. Todas estas amenazas fueron evaluadas a nivel nacional. Adicionalmente, se desarrolló un modelo especial de mayor detalle de inundación fluvial para el cantón de Heredia. La Tabla 1 presenta la relación de los modelos de amenaza hidrometeorológica acá presentados y los cuatro proyectos de GRMA – Costa Rica.

Tabla 1. Relación de modelos de amenazas hidrometeorológicas y proyectos GRMA

Proyecto	Inundación fluvial	Inundación Pluvial	Inundación Costera	Sequía
<i>Proyecto Estratégico: Heredia</i>	■			
<i>Proyecto Operacional 1: Ruta Nacional RN2</i>	■	■		
<i>Proyecto Operacional 2: Agricultura</i>	■	■		■
<i>Proyecto Operacional 3: Fu-Turismo</i>	■	■	■	

Para la evaluación de estas amenazas, se adopta en este trabajo una metodología fundamentada en la modelación del forzamiento meteorológico del cual se derivan los eventos hidrometeorológicos. A partir de los registros históricos de precipitación y temperatura, se construyen series de tiempo de larga duración (mil años equivalentes) de estas variables meteorológicas, mediante un simulador de series sintéticas que estocásticamente genera años completos de datos correlacionados temporal y espacialmente (i.e., con base en estadísticos de primer y segundo orden calculados de las series históricas). Este procedimiento constituye un downscaling estadístico para la posterior incorporación de proyecciones de cambio climático. Sobre las series simuladas es posible identificar condiciones extremas (por ejemplo, de exceso o déficit de lluvias y temperatura extremas) que podrían ocurrir con una baja frecuencia (i.e., no necesariamente vistas en la historia). Estas condiciones extremas derivan en eventos peligrosos como sequías, inundaciones pluviales y fluviales o inundaciones costeras. De esta manera es posible determinar la manera como la amenaza se puede manifestar en el territorio costarricense, de forma probabilista, con el fin de usar estos resultados en posteriores evaluaciones de riesgo catastrófico.

Este informe corresponde al Producto 4 – Modelos de amenazas climáticas, el cual contiene una descripción detallada de los modelos de las amenazas hidrometeorológicas mencionadas, y los resultados correspondientes. Este informe se estructura en diferentes secciones como se detalla a continuación:

Sección 1. Introducción

Sección 2. Modelación del forzamiento meteorológico: presenta el detalle de las simulaciones de series meteorológicas y la incorporación en estas del cambio climático.

Sección 3. Amenaza de sequía: esta sección se enfoca en la caracterización de las sequías desde las series meteorológicas simuladas.

Sección 4. Amenaza de inundación: presenta el modelo nacional de respuesta hidrológica de cuencas y resultados nacionales del modelo hidráulico simplificado. Se incluye también en este capítulo el modelo bidimensional más detallado para Heredia.

Sección 5. Amenaza de inundación costera: incluye los detalles de la modelación de ciclones tropicales y la consideración especial del cambio climático para estos eventos. Se incluye también una sección especial sobre tsunamis.

Sección 6. Presenta un resumen de los contenidos del programa de capacitación en materia de amenazas climáticas, así como un estado de avance.

2 MODELACIÓN DEL FORZAMIENTO METEOROLÓGICO

En este estudio se emplearon registros climáticos históricos de Costa Rica con el propósito de analizar dos variables clave: la precipitación acumulada diariamente y la temperatura (máxima, mínima y media). La base principal de información proviene de la red nacional de estaciones meteorológicas operada por el Instituto Meteorológico Nacional (IMN), ya que sus observaciones directas ofrecen datos depurados y confiables sobre las condiciones atmosféricas en el país. La utilización de esta fuente primaria se considera prioritaria, dado que garantiza mediciones locales con alto nivel de detalle frente a otros productos de carácter indirecto, como los generados por radar o satélite, que suelen presentar limitaciones de resolución espacial y precisión en zonas específicas.

Sin embargo, debido a la distribución heterogénea de las estaciones y a la existencia de vacíos en algunas series históricas, se incorporaron datos obtenidos mediante teledetección como complemento. Los registros satelitales permiten extender la cobertura espacial hacia regiones con escasa instrumentación y mantener la continuidad de las series temporales en los casos en que la información in situ resulta incompleta. De esta forma, la integración de observaciones meteorológicas tradicionales con productos mallados con información recopilada de forma remota ofrece una representación más amplia y coherente del comportamiento climático en el territorio costarricense.

Para la validación y verificación de los registros se recurrió tanto a las bases de datos oficiales del IMN como a repositorios internacionales que ponen a disposición datos estandarizados y de alcance global. Esta combinación de fuentes posibilita contrastar valores y reducir la incertidumbre asociada al uso de un único insumo, y fortalece la calidad de los insumos para conformar una base de información sólida para la evaluación climática y la modelación hidrológica en Costa Rica.

Para este estudio se seleccionó el periodo 1991–2020 como periodo de *Clima Base*. Esta decisión se basa en que dicho intervalo corresponde a la norma climatológica más reciente definida por la Organización Meteorológica Mundial (OMM, 2017), la cual establece promedios de 30 años como referencia estándar para el cálculo de valores normales del clima. El periodo aquí denominado *Clima Base*, corresponde entonces al periodo de *referencia* o de *control* indicado, que se caracteriza por medio de información histórica, y que da cuenta de las condiciones climatológicas actuales. Los valores de variables meteorológicas obtenidas para el clima base, se perturbarán posteriormente para incluir la influencia del cambio climático, como se presenta en la sección 2.5.

2.1 Catálogo nacional de estaciones

El Catálogo Nacional de Estaciones Meteorológicas de Costa Rica constituye una herramienta fundamental para la gestión y el estudio del clima en el país. Este catálogo es administrado por el Instituto Meteorológico Nacional (IMN), entidad creada en 1952 y responsable de la observación, el registro y el análisis de las condiciones atmosféricas y climatológicas. A través de esta plataforma se organiza y presenta información proveniente de la red de estaciones automáticas que el IMN mantiene distribuidas estratégicamente en todo el territorio nacional, abarcando regiones como el Pacífico Norte, Pacífico Central, Pacífico Sur, la Zona Norte, el Valle Central, y los sectores Caribe Norte y Caribe Sur.

Las estaciones meteorológicas automáticas registran en tiempo real variables esenciales como la temperatura del aire, la humedad relativa, la presión atmosférica, la velocidad y dirección del viento, así como la precipitación. Estos datos son indispensables para la elaboración de pronósticos, la emisión de alertas tempranas y el análisis de fenómenos climáticos que puedan afectar a la población y a los ecosistemas. Además, la red de estaciones contribuye al seguimiento histórico y al estudio de la variabilidad climática en Costa Rica, constituyendo una base de datos confiable y de alta resolución espacial.

La información recopilada se encuentra disponible para consulta pública mediante el portal web del IMN <https://www.imn.ac.cr/web/imn/estaciones-automaticas>, que ofrece acceso a las estaciones automáticas en tiempo real (IMN, Estaciones Automáticas) y a un mapa interactivo con datos promedios mensuales de variables como precipitación, temperatura y viento (IMN, Mapa Interactivo). Adicionalmente, el IMN ha desarrollado un visor en la plataforma ArcGIS (Catálogo Nacional de Estaciones) que integra de manera visual la ubicación y características de cada estación. En conjunto, estos recursos constituyen un sistema de información moderno y accesible, indispensable para la investigación científica, la educación y la toma de decisiones en materia de gestión de riesgos y planificación territorial en Costa Rica.

Por parte del IMN se recibieron los datos históricos de estaciones en tierra, para precipitación (222 estaciones), y humedad y temperatura (219 estaciones). Si bien el país cuenta con un número importante de estaciones en tierra, no todas cubren de forma completa y concurrente el periodo de clima base (1991-2020) definido para la normalización climática. La Figura 1 y la Figura 2 presentan histogramas con la distribución de datos faltantes dentro del periodo de control en las estaciones del IMN. Como se observa, existe una alta densidad de datos faltantes para el periodo histórico a caracterizar como clima base, razón por la cual es necesario considerar información proveniente de bases de datos internacionales. La relación completa de datos faltantes, estación por estación, se presenta en el Anexo A.1.

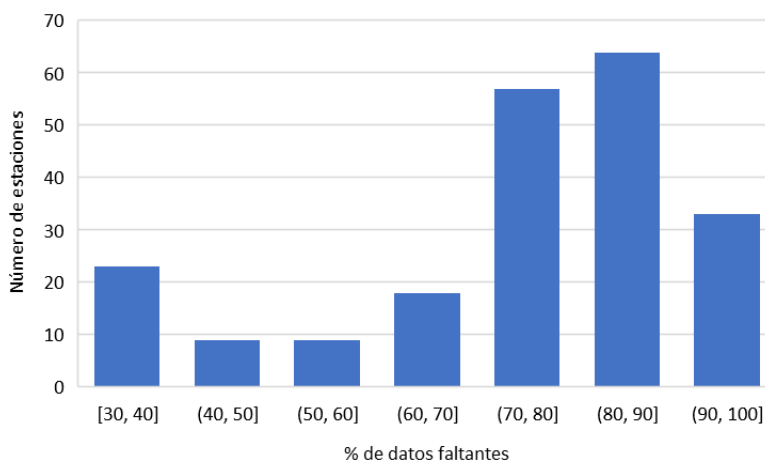


Figura 1. Distribución de datos faltantes de precipitación en las estaciones del IMN dentro del periodo de control (1991-2020)

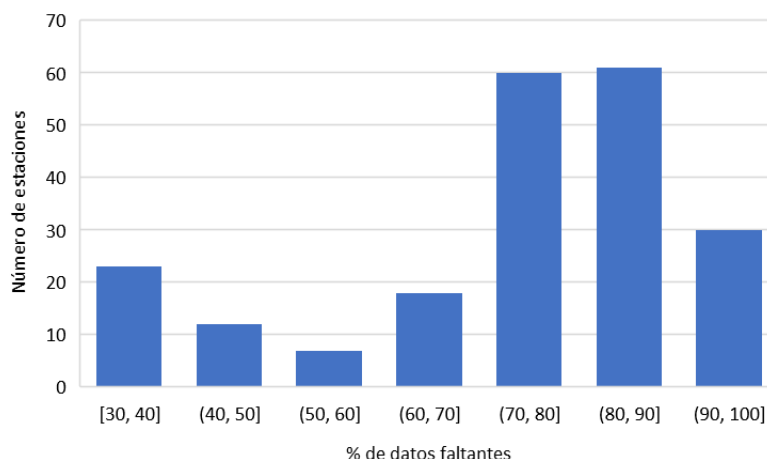


Figura 2. Distribución de datos faltantes de temperatura en las estaciones del IMN dentro del periodo de control (1991-2020)

2.2 Bases de datos internacionales de información climática

Debido a la distribución irregular de las estaciones meteorológicas en tierra y a la falta de datos dentro del periodo de referencia, este estudio propone el uso de bases de datos de variables climáticas derivadas de información satelital, procesadas por agencias internacionales. Entre estas destacan las bases de datos CHIRPS de la Universidad de California en Santa Bárbara y ERA 5 de Copernicus.

La utilización de estas fuentes ofrece varias ventajas: la información está completa tanto en cobertura temporal como espacial, son ampliamente utilizadas por la comunidad científica internacional para el análisis del clima y la evaluación de amenazas hidroclimáticas, y proporcionan múltiples parámetros climáticos necesarios para el cálculo de la evapotranspiración. Además, su resolución espacial es suficiente para realizar evaluaciones de riesgo a escala nacional. A continuación, se describe cada una de ellas.

2.2.1 CHIRPS (Climate Hazards group InfraRed Precipitation with Stations)

CHIRPS es una plataforma altamente valorada para el análisis de precipitación en entornos tropicales como Costa Rica. Entrega series diarias y mensuales desde 1981 hasta la actualidad, con una alta resolución espacial cercana a $0,05^\circ$ (~ 5 km), abarcando latitudes desde 50°S hasta 50°N (Climate Hazards Center, 2025). Esta base de datos utiliza una metodología híbrida que fusiona datos satelitales (duración de nubes frías, CCD), climatologías detalladas (CHPclim) y observaciones de estaciones meteorológicas terrestres, dando como resultado productos confiables que son particularmente útiles para monitorear tendencias climáticas, sequías estacionales y patrones espaciales en amplias regiones (Funk et al., 2015; Climate Hazards Center, 2025).

La versión más reciente, CHIRPS v3, incorpora algoritmos mejorados para capturar eventos de lluvia intensa y corrige sesgos como las pérdidas por subregistro en estaciones pluviométricas. Ofrece productos preliminares con latencia de días y versiones finales mensuales, disponibles en múltiples formatos (GeoTIFF, NetCDF, etc.) y escalas temporales (diario, decadal, mensual y anual) (Climate Hazards Center, 2025).

2.2.2 ERA5 – Copernicus Climate Change Service

ERA5, desarrollado por el European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) y distribuido a través del Servicio de Cambio Climático Copernicus (C3S) de la Unión Europea, constituye una de las bases de datos de reanálisis más completas y utilizadas a nivel global. Este conjunto de datos combina observaciones satelitales, registros de estaciones meteorológicas y modelación numérica atmosférica, lo que permite generar información climática consistente y físicamente robusta (Hersbach et al., 2020, 2023).

ERA5 ofrece series temporales que abarcan desde 1940 hasta el presente, con una actualización constante y un retraso de apenas cinco días respecto a la fecha actual, lo que la convierte en una herramienta útil tanto para estudios históricos como para el monitoreo en tiempo casi real (Copernicus Climate Change Service, 2017). Sus datos están disponibles en resolución horaria y diaria, con una resolución espacial de aproximadamente 0,25° (~31 km), lo que facilita el análisis detallado de la variabilidad climática a diferentes escalas.

Una de sus principales ventajas es la amplia gama de variables climáticas que pone a disposición: precipitación, temperatura (media, máxima y mínima), radiación solar, humedad específica, presión superficial del aire y velocidad del viento, entre otras. Adicionalmente, estas variables están ajustadas a la topografía, lo que incrementa su precisión en regiones con relieve complejo como Costa Rica (Hersbach et al., 2020). Dichas características hacen de ERA5 una fuente particularmente útil para el cálculo de la evapotranspiración, parámetro fundamental en la modelación de sequías agrícolas, la gestión del recurso hídrico y la evaluación de la vulnerabilidad de los cultivos frente a condiciones extremas.

La información de ERA5 se encuentra disponible de manera gratuita en formatos de uso extendido como NetCDF y ráster tipo *grid*, los cuales pueden integrarse fácilmente en sistemas de información geográfica (SIG) y en plataformas de modelación ambiental. Su versatilidad, junto con la consistencia temporal y espacial, ha llevado a que sea ampliamente empleada en investigaciones científicas internacionales, particularmente en estudios de variabilidad climática, tendencias a largo plazo y evaluaciones de riesgo hidroclimático en regiones tropicales (Muñoz-Sabater et al., 2021).

2.3 Información meteorológica para el Clima Base

La información meteorológica del clima base debe corresponder, en cada punto con datos dentro del territorio, con información a escala diaria, completa y concurrente dentro del periodo 1991-2020, para por lo menos 4 variables meteorológicas: precipitación acumulada del día, temperatura promedio, temperatura máxima y temperatura mínima. Adicionalmente, la distribución espacial de los puntos con datos debe ser uniforme y cubrir la totalidad del territorio de Costa Rica.

Si bien es siempre deseable el uso de información obtenida de estaciones en tierra, y así mismo Costa Rica cuenta con una base de información meteorológica importante, el conjunto de estaciones meteorológicas disponible no cumple con la totalidad de los criterios expuestos anteriormente. Por esta razón, la fuente de información de series meteorológicas en el periodo de control corresponde, en este trabajo, a los registros obtenidos de CHIRPS y ERA5. La información disponible del IMN se emplea como datos de control para verificación y ajuste sobre las series obtenidas de CHIRPS y ERA5, como se detalla en la Sección 2.3.1.

Se definieron entonces 111 ubicaciones espaciales que cubren de manera uniforme el territorio costarricense, como puede observarse en la Figura 3. A estas ubicaciones las llamaremos *estaciones virtuales*, pues si bien no corresponden a estaciones meteorológicas reales, si brindan información a escala diaria para todas las variables de interés. La Figura 4 y Figura 5 presentan mapas históricos de medias multianuales calculadas en el periodo base (1991-2020) para precipitación y temperatura a partir de la información de estaciones virtuales.

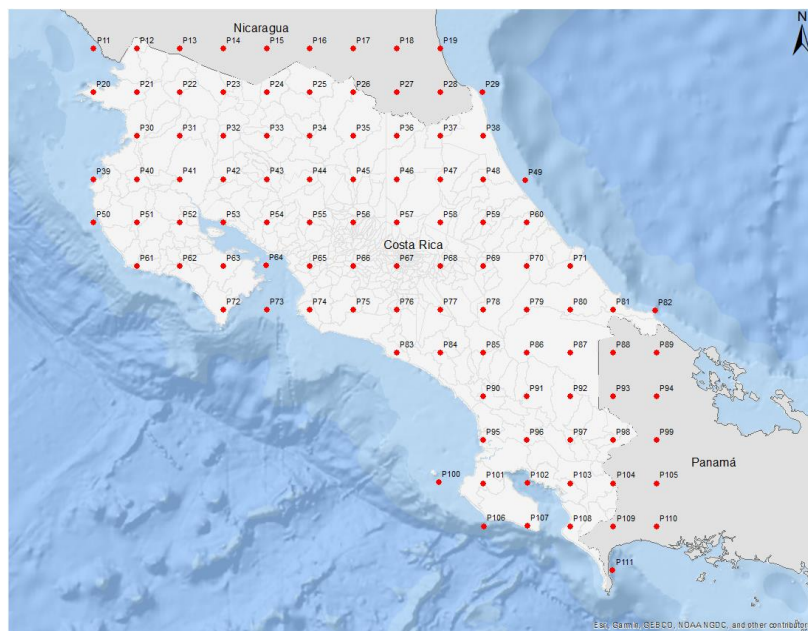


Figura 3. Puntos de estaciones virtuales seleccionadas

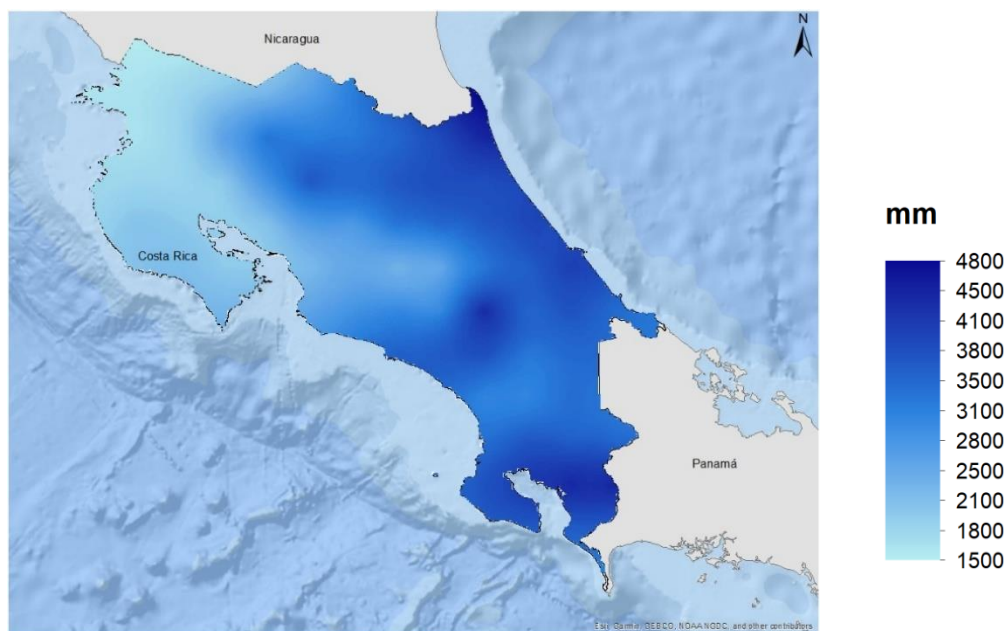


Figura 4. Precipitación promedio acumulada multianual para el periodo 1991-2020

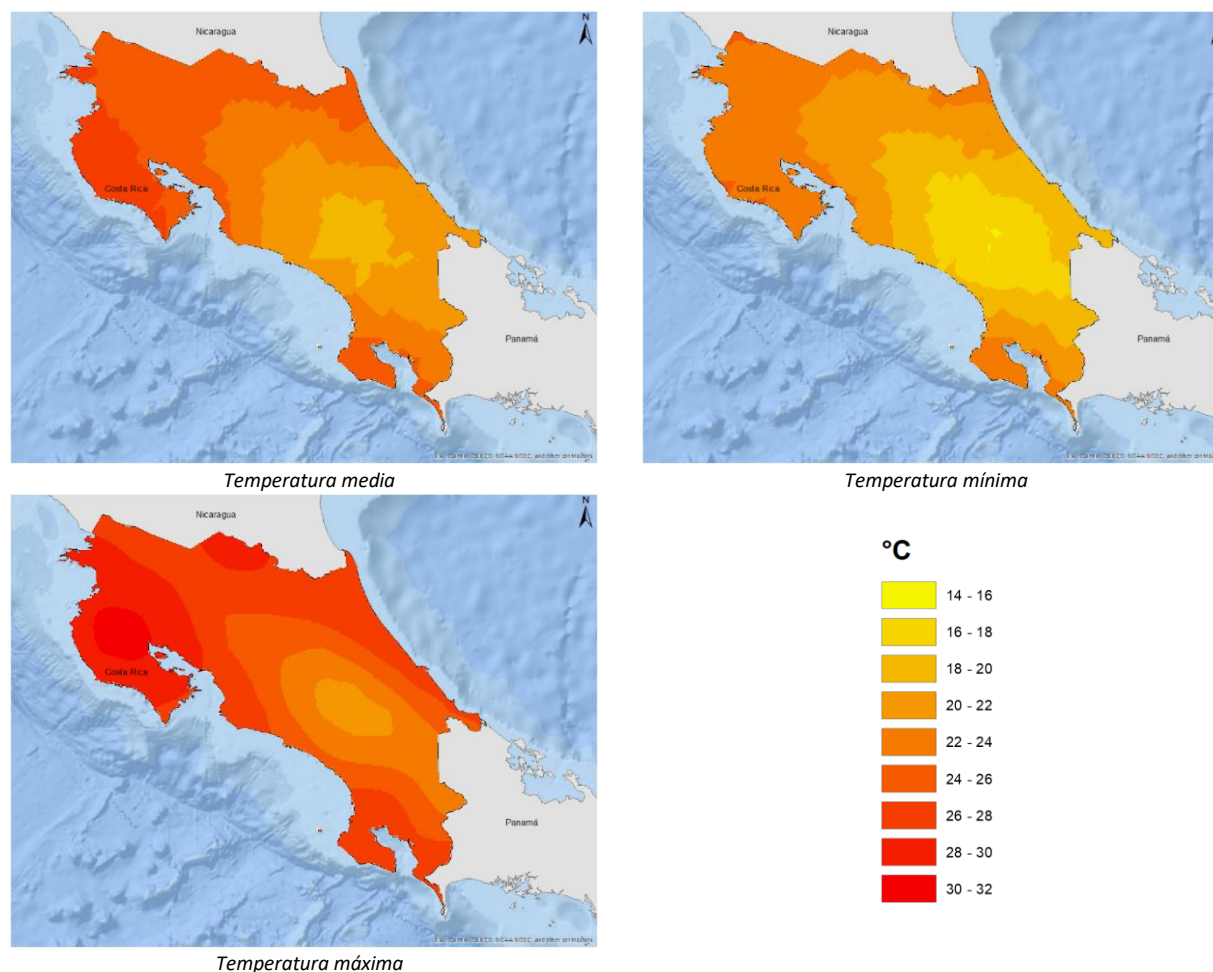


Figura 5. Temperatura multianual para el periodo 1991-2020

La evapotranspiración de referencia (ET_o) se calculó siguiendo la ecuación de Penman-Monteith (ver detalles en el *Informe de inicio* de esta consultoría; INGENIAR-CIMNE 2025 para GRMA), en donde participan otras variables meteorológicas, específicamente la humedad relativa, presión atmosférica, radiación solar y velocidad del viento. Los valores de estas variables fueron obtenidos también de la base de datos ERA5. En cada ubicación de cálculo se obtienen series de ET_o a escala diaria y completas en el periodo de control. La Figura 6 presenta, a modo de ejemplo, las series para las 5 variables, incluyendo ET_o, para una ubicación arbitrariamente escogida dentro de las 111 estaciones virtuales del modelo para Costa Rica. La Figura 7, muestra la distribución espacial de la ET_o promedio diaria histórica, mientras que la Figura 8 muestra la ET_o promedio anual histórica para Costa Rica, en el periodo 1991–2020.

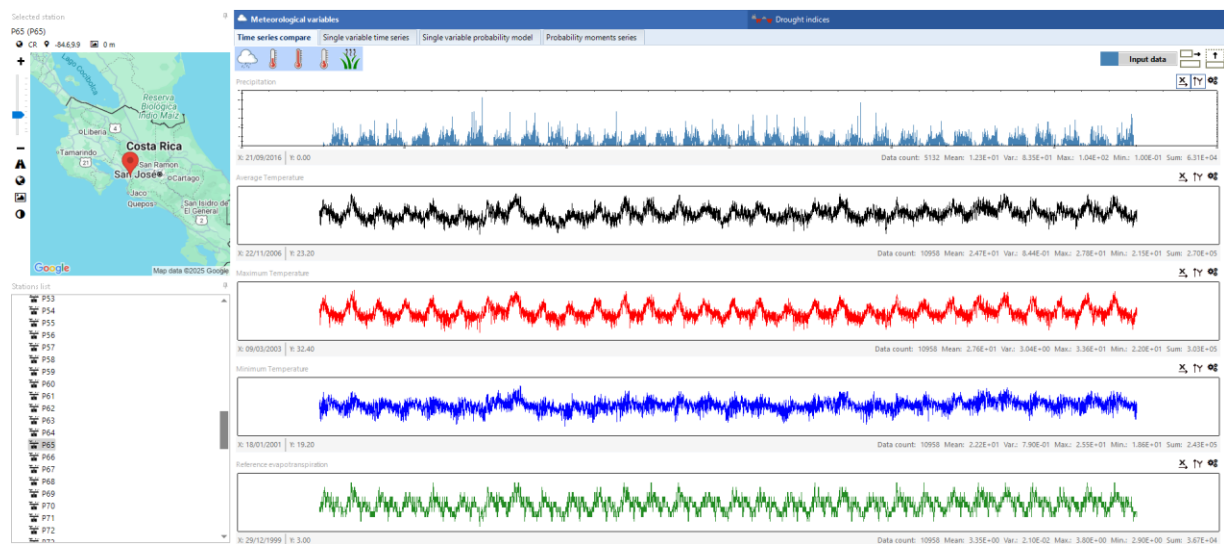


Figura 6. Resumen de clima histórico en un punto de la malla de estaciones. Tomado del software DroughtPro

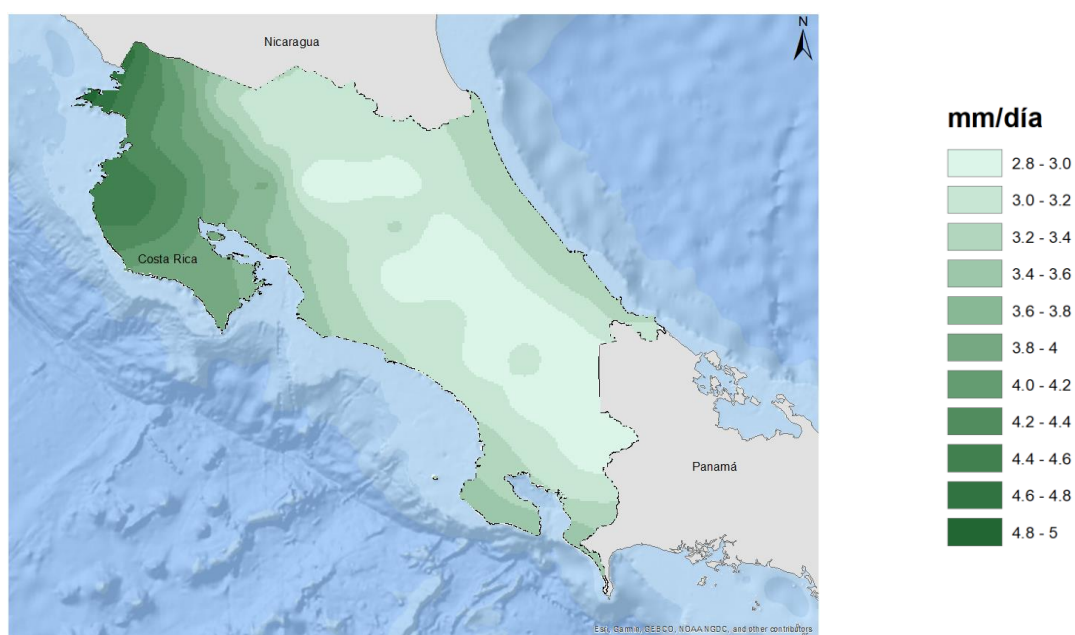


Figura 7. Evapotranspiración promedio diaria para el periodo 1991-2020

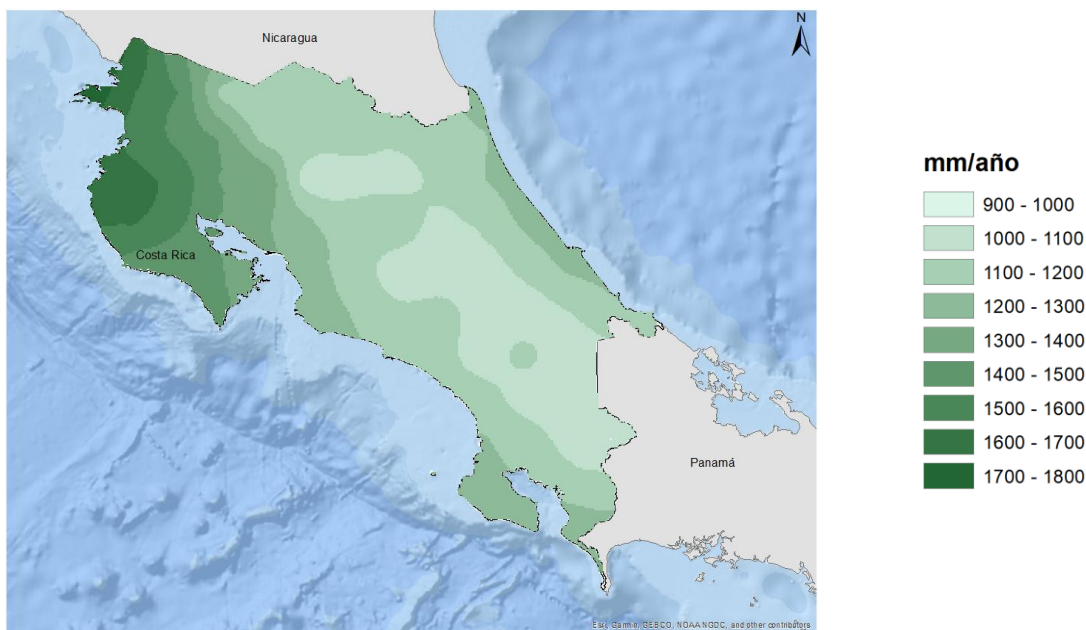


Figura 8. Evapotranspiración promedio anual para el periodo 1991-2020

2.3.1 Verificación del ajuste de la información de bases de datos internacionales

Con el fin de garantizar la confiabilidad de la información derivada de las bases de datos internacionales en relación con los registros obtenidos en estaciones meteorológicas terrestres, se lleva a cabo una validación del grado de correspondencia entre ambas fuentes de información.

Se utilizaron los registros históricos proporcionados por el IMN, seleccionando 22 estaciones en tierra con series completas para periodos superiores a 20 años de información (ver Figura 9). La información de cada estación en tierra se compara con el punto o estación virtual más cercano, con el fin de detectar diferencias significativas. A modo de ejemplo, se presentan a continuación los resultados únicamente para tres estaciones. No obstante, en el Dataset del proyecto se incluye el análisis completo de las 22 estaciones seleccionadas.

La Figura 10 muestra la localización geográfica de las estaciones meteorológicas de ejemplo utilizadas para la comparación entre los registros en tierra y los datos del producto satelital en Costa Rica. Se incluyen tres estaciones representativas de regiones climáticamente contrastantes: el Aeropuerto Internacional Juan Santamaría, ubicado en el Valle Central; el Aeropuerto de Liberia, localizado en el Pacífico norte; y la estación Altamira, situada en el Pacífico sur del país, en una zona de influencia orográfica. Estas ubicaciones permiten evaluar el desempeño del dataset satelital en contextos climáticos diversos, que abarcan desde áreas de mayor altitud y condiciones térmicas moderadas hasta regiones de baja altitud caracterizadas por temperaturas más altas y una marcada estacionalidad de la precipitación.

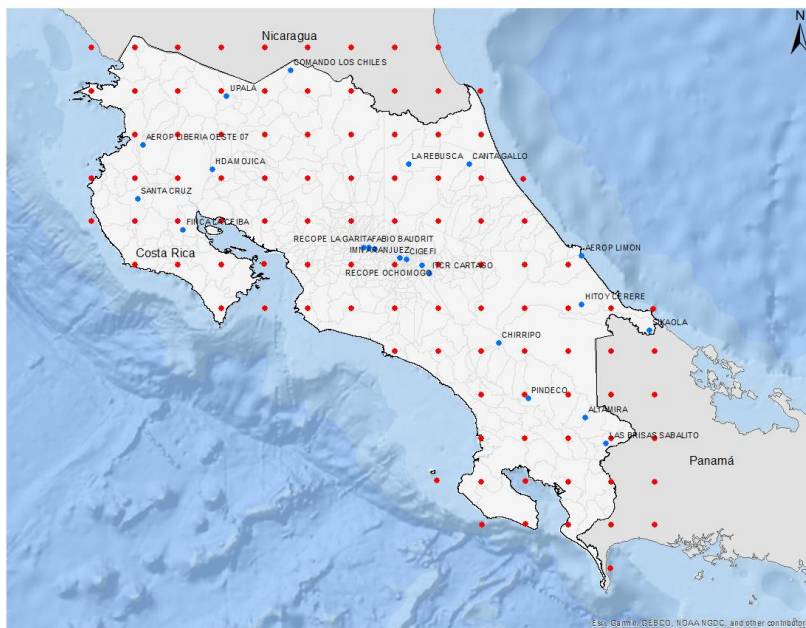


Figura 9. Estaciones satelitales (rojo) y estaciones en tierra (azul)



Figura 10. Ubicación de los pares de estaciones (tierra-satélite) comparados.

2.3.1.1 Precipitación

Se presenta la comparación de los datos de precipitación entre la estación terrestre Aeropuerto Juan Santamaría y su estación virtual más cercana, identificada como P66, así como para la estación Aeropuerto Liberia Oeste con el punto P30, y la estación Altamira con el punto P97. La selección de estas estaciones se basa en su proximidad con la estación virtual de CHIRPS – ERA5 y a la baja proporción de datos faltantes en su serie histórica¹.

Se llevaron a cabo diversas pruebas estadísticas sobre los valores diarios presentadas de la Tabla 2 a la Tabla 7. Se observan coincidencias significativas en los días sin lluvia en la estación Aeropuerto Liberia Oeste con 64%, en comparación con el 65% de la estación P30, en contraste, en la estación Aeropuerto Juan Santamaría se reporta un 36% frente al 54% de la estación P66, y la estación Altamira 15% frente a 46% del punto P97. Por parte de las medias, los datos muestran una gran similitud: en Aeropuerto Juan Santamaría es de 4.57 mm/día, en contraste con 5.09 mm/día en P66; en Aeropuerto Liberia Oeste es de 4.31 mm/día, frente a 4.33 mm/día en P30, y en Altamira 10.30 mm/día respecto a 8.92 mm/día del punto P97.

Tabla 2. Análisis estadístico diario de precipitación – correlaciones entre estaciones Aeropuerto Juan Santamaría y P66

Métrica		Valor	Valor óptimo
Coeficiente de Correlación	CC	0.23	1
Error Cuadrático medio	RMSE [mm/d]	8.39	0
Sesgo	BIAS	6.13	0
Error Medio	ME [mm/d]	0.28	0
Probabilidad de detección	POD	0.86	1
Relación de falsa alarma	FAR	0.27	0
Índice de éxito	CSI	0.65	1

Tabla 3. Análisis estadístico diario de precipitación – estaciones individuales Aeropuerto Juan Santamaría y P66

Métrica		AEROP JUAN SANTAMARIA	P66
Registros en blanco	[-]	27.7%	0.0%
Máximo	[mm/día]	146	115
Media	[mm/día]	4.57	5.09
Percentil 90	[mm/día]	15.70	15.61
Percentil 75	[mm/día]	4.20	8.00
Ceros	[-]	36%	54%

Tabla 4. Análisis estadístico diario de precipitación – correlaciones entre estaciones Aeropuerto Liberia Oeste y P30

Métrica		Valor	Valor óptimo
Coeficiente de Correlación	CC	0.31	1
Error Cuadrático medio	RMSE [mm/d]	9.67	0
Sesgo	BIAS	-1.92	0
Error Medio	ME [mm/d]	-0.08	0
Probabilidad de detección	POD	0.91	1
Relación de falsa alarma	FAR	0.19	0
Índice de éxito	CSI	0.74	1

¹ La proporción de datos faltantes se refiere al número de días sin dato en la estación dentro del periodo de control 1990-2020.

Tabla 5. Análisis estadístico diario de precipitación – estaciones individuales Aeropuerto Liberia Oeste y P30

Métrica		AEROP LIBERIA OESTE 07	P30
Registros en blanco	[-]	25.9%	0.0%
Máximo	[mm/día]	253	112
Media	[mm/día]	4.31	4.33
Percentil 90	[mm/día]	13.98	14.73
Percentil 75	[mm/día]	1.20	6.19
Ceros	[-]	64%	65%

Tabla 6. Análisis estadístico diario de precipitación – correlaciones entre estaciones Altamira y P97

Métrica		Valor	Valor óptimo
Coeficiente de Correlación	CC	0.22	1
Error Cuadrático medio	RMSE [mm/d]	13.95	0
Sesgo	BIAS	-12.35	0
Error Medio	ME [mm/d]	-1.27	0
Probabilidad de detección	POD	0.77	1
Relación de falsa alarma	FAR	0.26	0
Índice de éxito	CSI	0.61	1

Tabla 7. Análisis estadístico diario de precipitación – estaciones individuales Altamira y P97

Métrica		Altamira	P97
Registros en blanco	[-]	27.7%	0.0%
Máximo	[mm/día]	232	116
Media	[mm/día]	10.30	8.92
Percentil 90	[mm/día]	31.20	24.60
Percentil 75	[mm/día]	13.90	13.97
Ceros	[-]	15%	46%

Al examinar los datos a escalas anual y mensual (Figura 11, Figura 12 y Figura 13) se observa que tanto las estaciones terrestres del IMN como los productos satelitales presentan una evolución temporal y una estacionalidad coherentes a lo largo del período de estudio, lo que indica que la precipitación promedio multianual reproduce adecuadamente la variabilidad climática característica de la región.

En el caso de la estación Aeropuerto Juan Santamaría, los valores estimados por el producto satelital P66 tienden a ubicarse de forma consistente por encima de los registros de la estación en tierra, tanto en la precipitación anual como en las medias mensuales multianuales, lo cual podría estar asociado, al menos en parte, a la presencia de datos faltantes en la serie observada. A pesar de este sesgo positivo, el producto satelital logra capturar de manera adecuada el ciclo estacional, reproduciendo los mínimos durante la estación seca y los máximos asociados a los meses más lluviosos.

Un comportamiento similar se observa en la estación Aeropuerto Liberia Oeste, donde el producto P30 muestra magnitudes de precipitación muy cercanas a las observadas en la estación en tierra, manteniendo una alta consistencia tanto en la variabilidad interanual como en la estacionalidad mensual.

Para la estación Altamira, la comparación con el producto satelital P97 evidencia una buena correspondencia general, tanto en la precipitación acumulada anual como en la precipitación mensual media multianual. Si bien en algunos años la estación en tierra presenta valores máximos más elevados que los estimados por el satélite, estas diferencias se concentran en años específicos y no alteran el comportamiento general de la serie temporal. Este tipo de discrepancias es esperable, dado que los productos satelitales pueden suavizar los extremos asociados a eventos intensos y localizados de precipitación que son captados de manera puntual por las estaciones terrestres.

A pesar de que la magnitud relativa de la precipitación difiere entre estaciones, con subestimaciones o sobreestimaciones locales según el sitio analizado, las medias mensuales multianuales resultan notablemente similares entre las estaciones terrestres y los productos satelitales. Esto indica que, más allá de los sesgos sistemáticos en los valores absolutos, ambas fuentes de información representan de manera consistente el régimen climático medio y el patrón estacional de la precipitación en la región.

En conjunto, estos resultados constituyen una validación preliminar del uso de productos satelitales de precipitación, al demostrar su capacidad para reproducir los patrones temporales y estacionales observados en las estaciones locales, aunque con la presencia de sesgos sistemáticos que varían según la ubicación y el producto considerado.

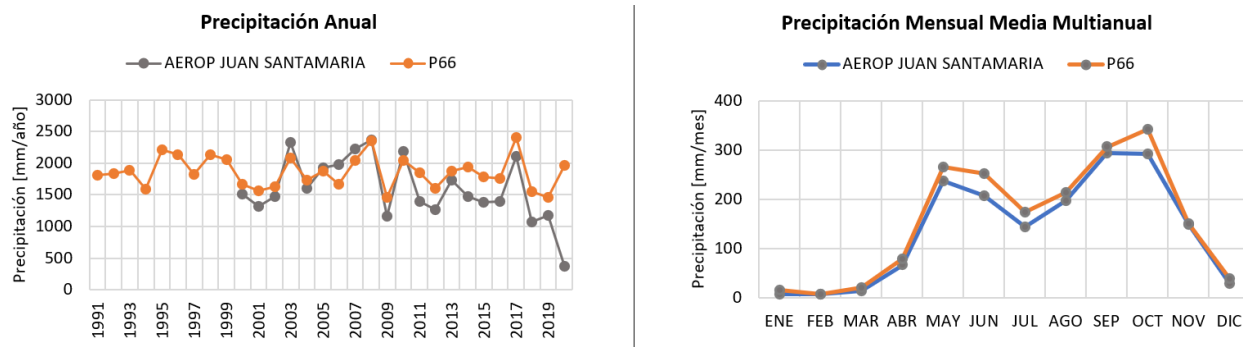


Figura 11. Comparación de valores anuales y medias mensuales de precipitación. Estaciones Aeropuerto Juan Santamaría y P66.

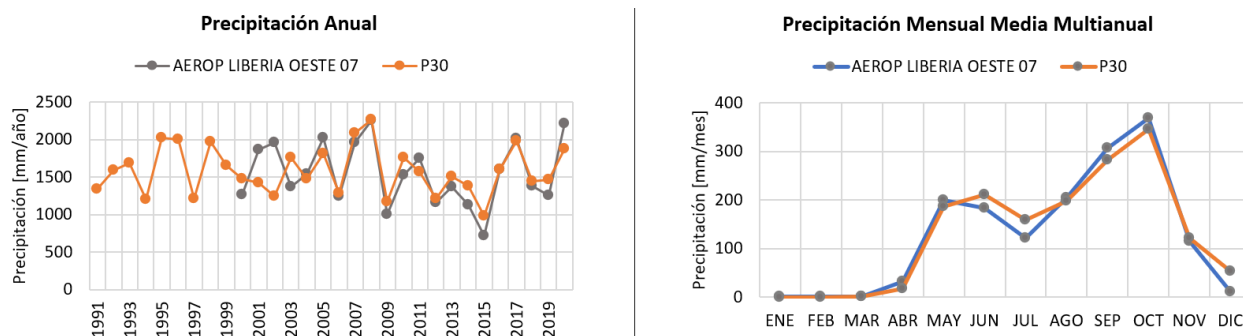


Figura 12. Comparación de valores anuales y medias mensuales de precipitación. Estaciones Aeropuerto Liberia Oeste y P30.

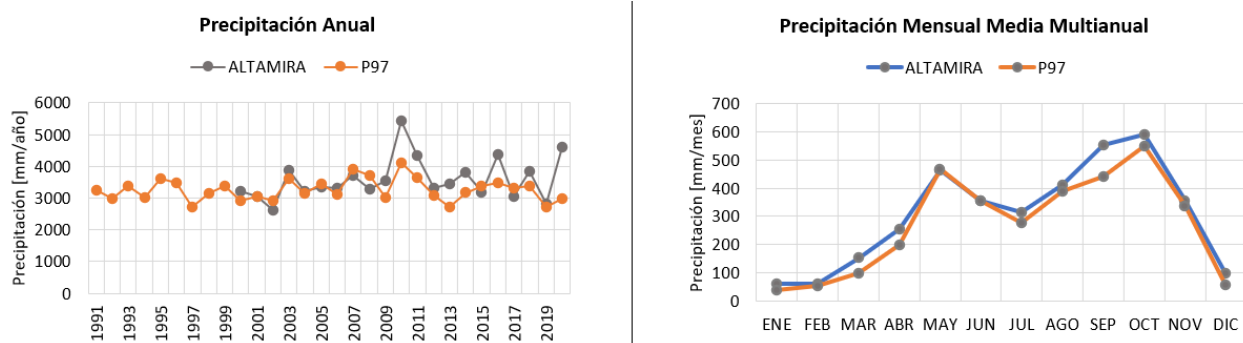


Figura 13. Comparación de valores anuales y medias mensuales de precipitación. Estaciones Altamira y P97.

Además de la concordancia general entre los datos provenientes de estaciones terrestres y los datos satelitales, la variabilidad interanual de la precipitación refleja la influencia de forzantes climáticos de gran escala, como el fenómeno de El Niño–Oscilación del Sur (ENSO), así como la contribución de eventos extremos locales y regionales. Los periodos de precipitación reducida, como 1997–1998 y 2015–2016, son consistentes con condiciones de El Niño, las cuales típicamente se asocian con condiciones más secas de lo normal en la región del Pacífico de Costa Rica. De manera similar, las condiciones más húmedas observadas alrededor de 2008 y 2010–2011 coinciden con eventos de La Niña, que tienden a intensificar la precipitación en la región.

Además de estos patrones asociados al ENSO, algunos picos pronunciados de precipitación, como los observados alrededor de 2003 y 2017, no están directamente vinculados con fases fuertes de ENSO, sino con procesos atmosféricos de corto plazo, incluyendo actividad convectiva intensa y la influencia de ciclones tropicales (por ejemplo, el huracán Nate en 2017). De igual forma, las condiciones relativamente secas alrededor de 2001 pueden reflejar estados de transición o condiciones neutras del ENSO combinadas con la variabilidad climática natural.

Al comparar los histogramas entre estaciones, Figura 14, Figura 15 y Figura 16, se aprecia que la distribución de la precipitación diaria registrada en las estaciones presenta una alta frecuencia de días sin lluvia, así como una disminución progresiva en el número de registros conforme aumenta la magnitud de la precipitación. Sin embargo, se evidencian algunas diferencias en los valores bajos de precipitación (menores a 5 mm/día), donde la estación virtual tiende a registrar una mayor cantidad de eventos en comparación con la estación terrestre. En contraste, para los valores de precipitación más altos, ambas fuentes presentan un comportamiento muy similar, lo que indica que la estación virtual logra capturar con precisión los eventos extremos de lluvia. En conjunto, estos resultados sugieren que, aunque existen limitaciones en la representación de precipitaciones ligeras, la información de la estación virtual ofrece un desempeño consistente y adecuado para el estudio.

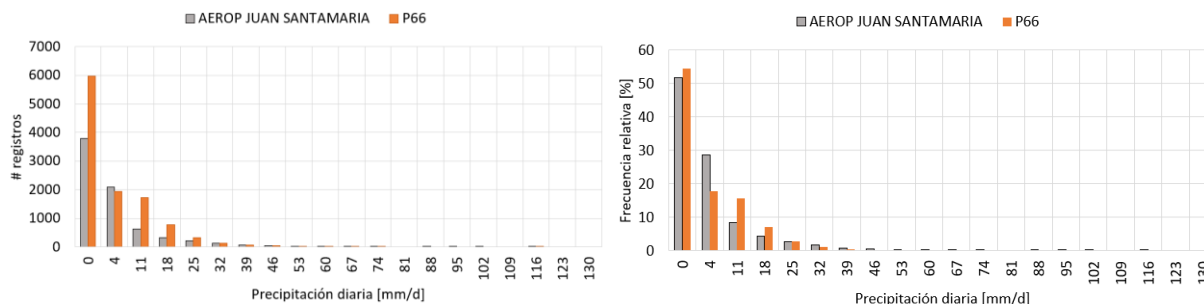


Figura 14. Comparación de histogramas de precipitación diaria. Estaciones Aeropuerto Juan Santamaría y P66.

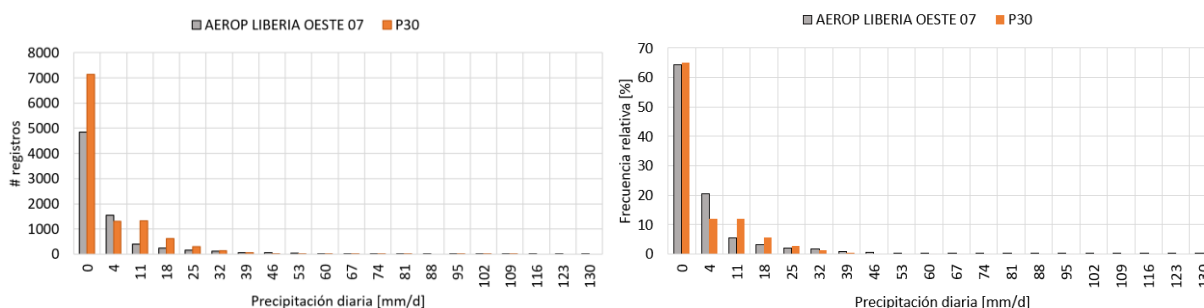


Figura 15. Comparación de histogramas de precipitación diaria. Estaciones Aeropuerto Liberia Oeste y P30.

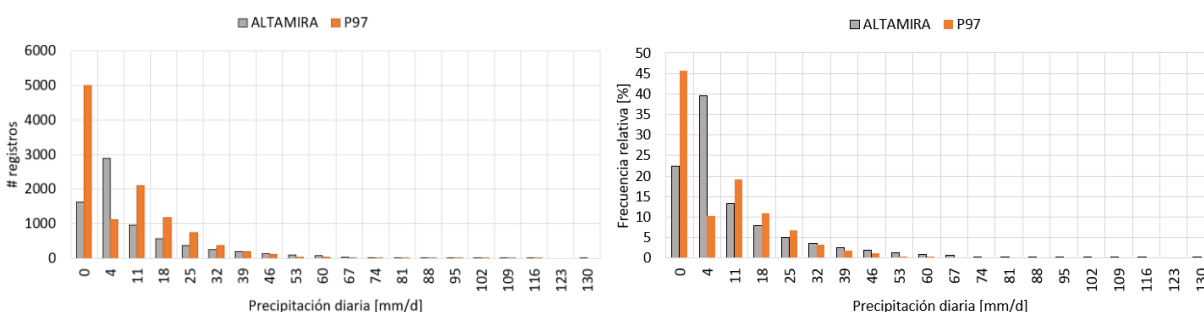


Figura 16. Comparación de histogramas de precipitación diaria. Estaciones Altamira y P97.

Al analizar la precipitación en escalas anuales, se identificó un comportamiento consistente entre las estaciones evaluadas. Si bien se presentan ligeras variaciones en los valores extremos a lo largo del periodo, las series de las estaciones satelitales se mantienen en un rango aceptable en comparación con las estaciones terrestres, reproduciendo adecuadamente los periodos de mayor y menor precipitación. Esta correspondencia general puede apreciarse en la Figura 17, Figura 18 y Figura 19.

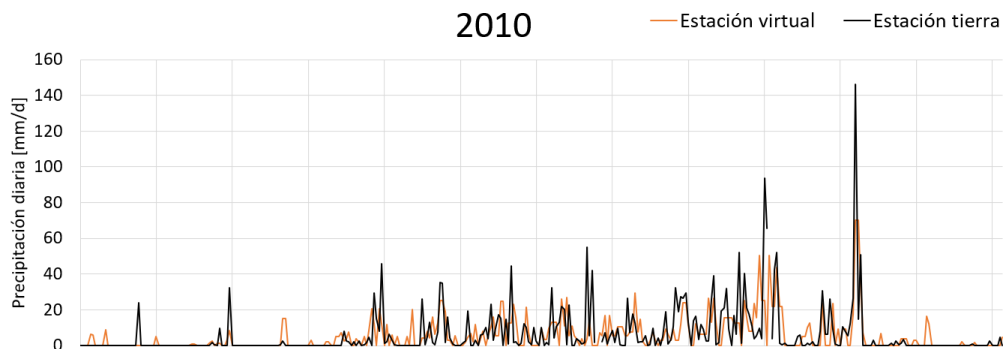


Figura 17. Comparación de los valores diarios entre las estaciones Aeropuerto Juan Santamaría y P66, para el año 2010.

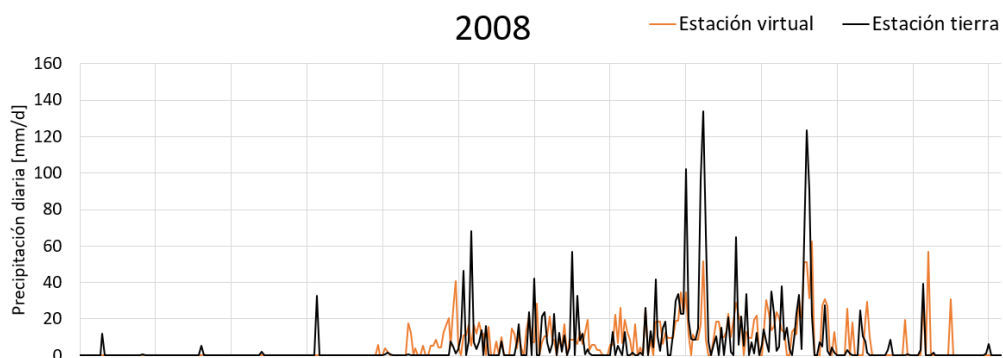


Figura 18. Comparación de los valores diarios entre las estaciones Aeropuerto Liberia Oeste y P30, para el año 2008.

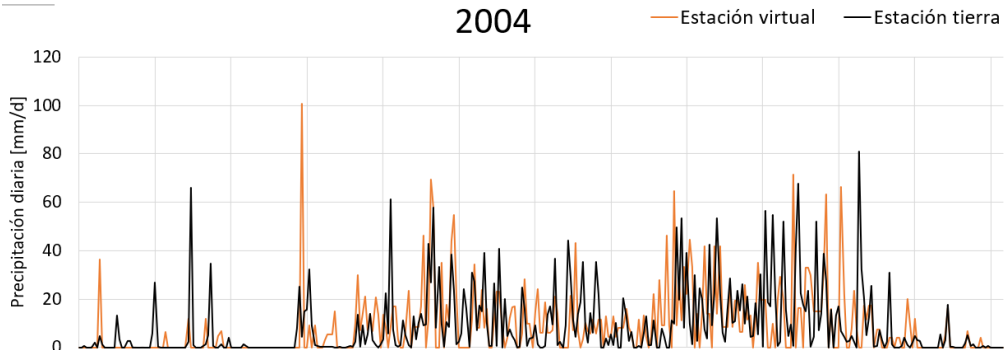


Figura 19. Comparación de los valores diarios entre las estaciones Altamira y P97, para el año 2004.

El gráfico de dispersión de la Figura 20 y Figura 21, muestra la relación entre los registros de precipitación de las estaciones terrestres y los datos provenientes del dataset CHIRPS. Cada color representa un mes distinto del año, lo cual permite observar el comportamiento de la correspondencia en diferentes épocas climáticas. En general, los puntos se alinean alrededor de la línea de tendencia, indicando una buena concordancia entre ambas fuentes de información. Se aprecia que, para la mayoría de los meses, las estimaciones satelitales reproducen de manera adecuada los valores registrados por las estaciones, especialmente en rangos intermedios de precipitación. Sin embargo, la dispersión alrededor de la línea de tendencia no es homogénea a lo largo de todo el rango de precipitación. En particular, para valores mayores a 100 mm/mes, se observa una mayor variabilidad, lo que sugiere una mayor incertidumbre en la representación de eventos de precipitación moderada a intensa.

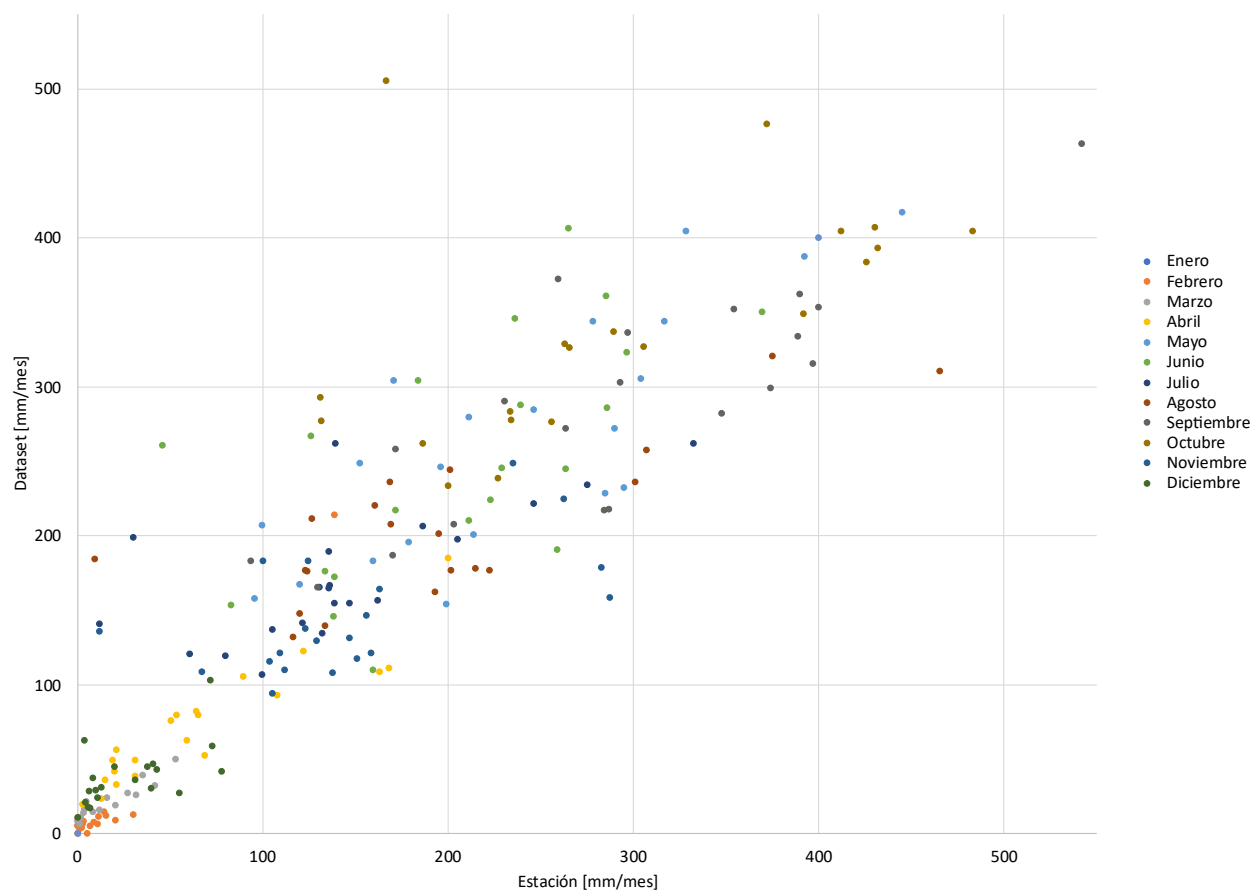


Figura 20. Gráfico de dispersión de los valores acumulados mensuales de precipitación. Aeropuerto Juan Santamaría y P66.

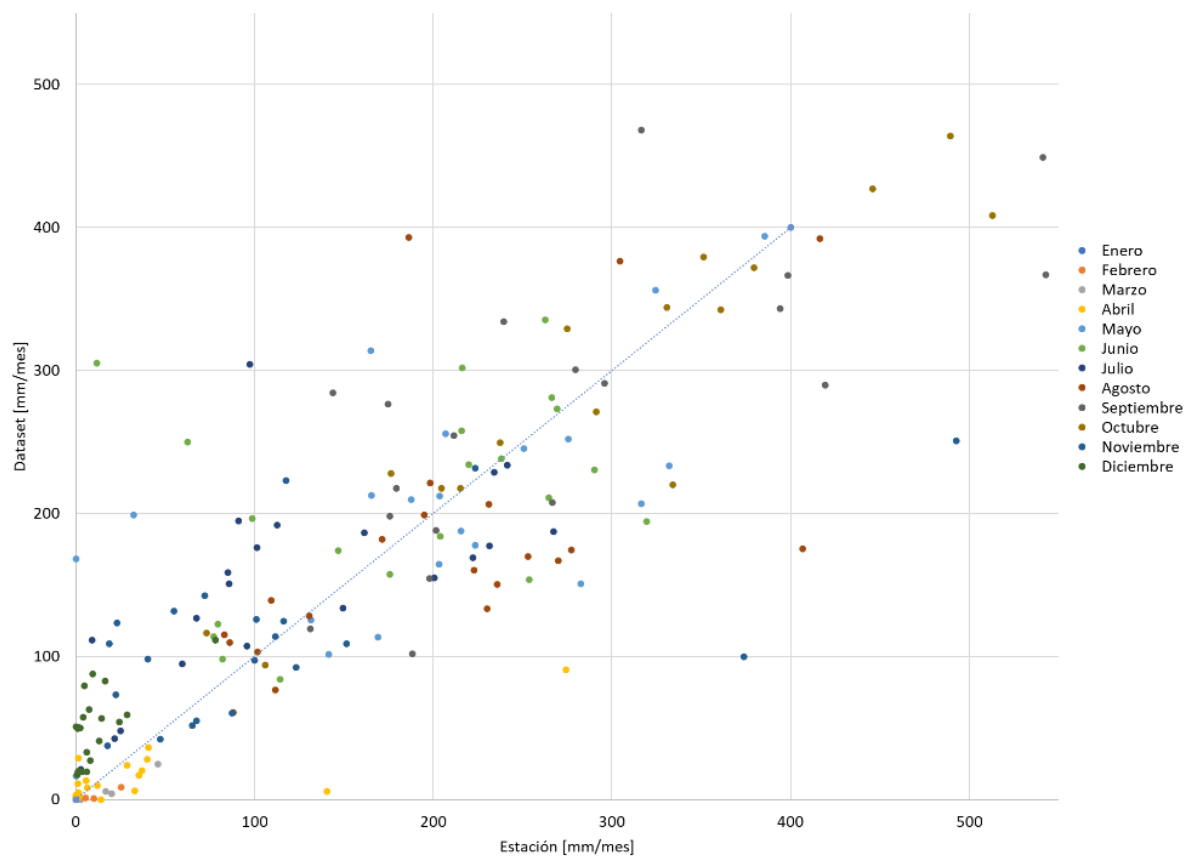


Figura 21. Gráfico de dispersión de los valores acumulados mensuales de precipitación. Aeropuerto Liberia Oeste y P30.

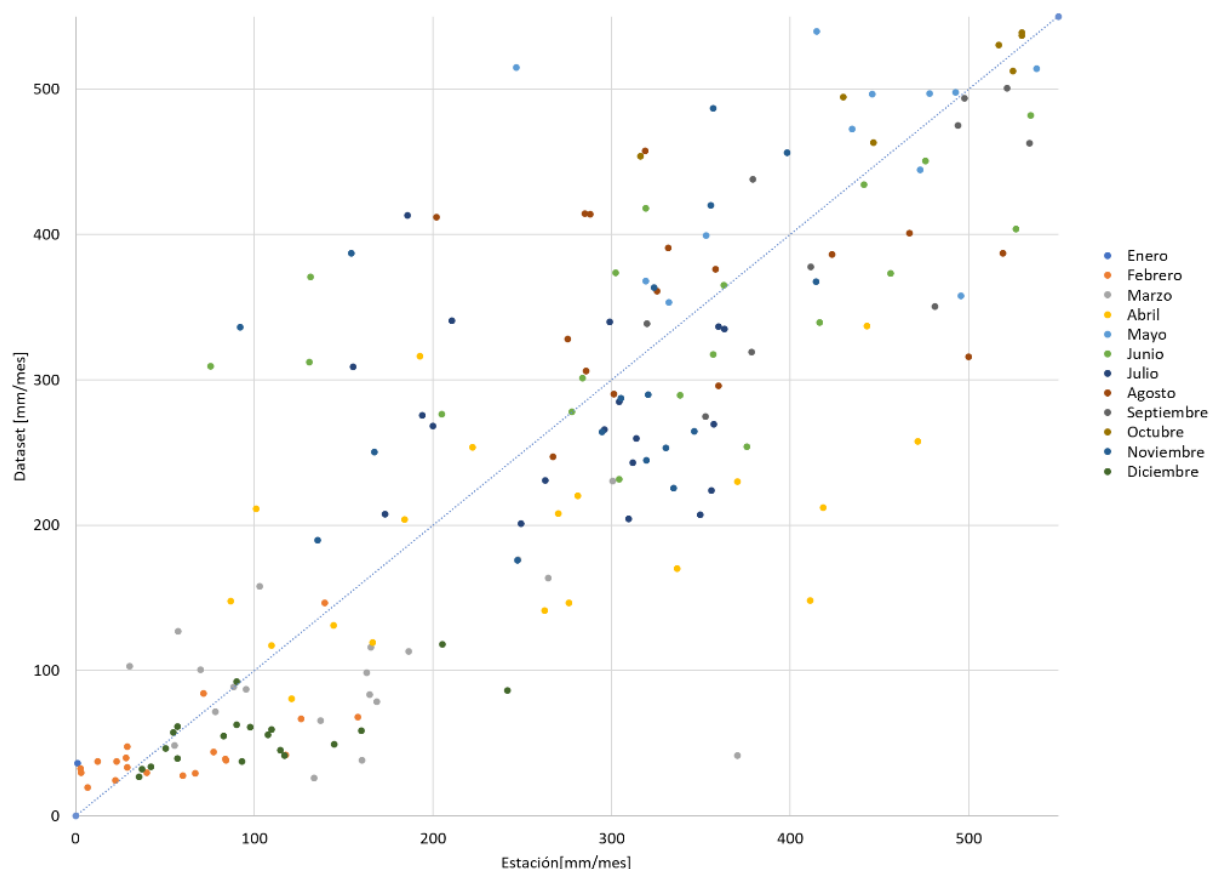


Figura 22. Gráfico de dispersión de los valores acumulados mensuales de precipitación. Altamira y P97.

Desde una perspectiva estacional, los meses secos (principalmente enero, febrero y marzo) se concentran cerca del origen del gráfico (0–100 mm/mes), mostrando una buena concordancia entre ambas fuentes en condiciones de baja precipitación. En contraste, los meses más lluviosos (como septiembre y octubre) concentran los valores más altos de precipitación, donde se observa una mayor dispersión y desviaciones respecto a la línea de tendencia.

Aunque no se identifica un sesgo estacional sistemático claramente diferenciado por mes, las figuras sugieren que las discrepancias entre el producto satelital y las observaciones en estación aumentan durante los periodos lluviosos y de transición, lo que podría estar asociado a la alta variabilidad espacial y a la naturaleza convectiva de las precipitaciones en estos periodos. En conjunto, los resultados indican una concordancia global aceptable entre ambas fuentes, con un desempeño más consistente en condiciones secas y una mayor incertidumbre en rangos intermedios y altos de precipitación.

2.3.1.2 Temperatura

Para el caso de la temperatura, las estaciones terrestres presentan porcentajes de datos faltantes de 27% (Aeropuerto Juan Santamaría), 26% (Aeropuerto Liberia) y 28% (Altamira). Se observa que las variaciones

mensuales, incluyendo los meses más cálidos, se mantuvieron consistentes entre las estaciones analizadas con una diferencia mínima entre el rango de valores.

Tabla 8. Análisis estadístico diario de temperatura – correlaciones entre estaciones Aeropuerto Juan Santamaría y P66

Métrica		Valor	Valor óptimo
Coeficiente de Correlación	CC	2.35	1
Error Cuadrático medio	RMSE [°C]	0.58	0
Sesgo	BIAS	0.96	0
Error Medio	ME [°C]	0.00	0

Tabla 9. Análisis estadístico diario de temperatura – estaciones individuales Aeropuerto Juan Santamaría y P66

Métrica		AEROP JUAN SANTA MARIA	P66
Máximo	[°C]	26.3	25.3
Media	[°C]	22.4	22.5
Mediana	[°C]	22.4	22.5
Percentil 90	[°C]	23.9	23.6
Percentil 75	[°C]	23.2	23.1
Registros en blanco	[-]	27%	0%

Tabla 10. Análisis estadístico diario de temperatura – correlaciones entre estaciones Aeropuerto Liberia Oeste y P30

Métrica		Valor	Valor óptimo
Coeficiente de Correlación	CC	1.41	1
Error Cuadrático medio	RMSE [°C]	0.80	0
Sesgo	BIAS	-1.32	0
Error Medio	ME [°C]	0.00	0

Tabla 11. Análisis estadístico diario de temperatura – estaciones individuales Aeropuerto Liberia Oeste y P30

Métrica		AEROP LIBERIA OESTE	P66
Máximo	[°C]	31.4	30.1
Media	[°C]	26.9	26.4
Mediana	[°C]	26.8	26.3
Percentil 90	[°C]	29.0	28.0
Percentil 75	[°C]	28.0	27.2
Registros en blanco	[-]	26%	0%

Tabla 12. Análisis estadístico diario de temperatura – correlaciones entre estaciones Altamira y P97.

Métrica		Valor	Valor óptimo
Coeficiente de Correlación	CC	2.16	1
Error Cuadrático medio	RMSE [°C]	0.56	0
Sesgo	BIAS	-0.18	0
Error Medio	ME [°C]	0.00	0

Tabla 13. Análisis estadístico diario de temperatura – estaciones individuales Altamira y P97.

Métrica		Altamira	P97
Máximo	[°C]	22.5	21.1
Media	[°C]	18.4	18.3

Mediana	[°C]	18.3	18.2
Percentil 90	[°C]	19.6	19.3
Percentil 75	[°C]	19.0	18.8
Registros en blanco	[-]	28%	0%

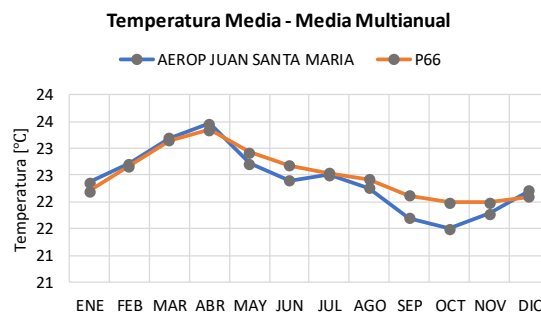
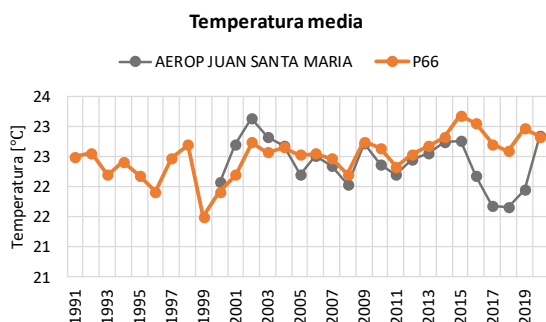


Figura 23. Comparación de valores anuales y mensuales de temperatura. Estaciones Aeropuerto Juan Santamaría y P66.

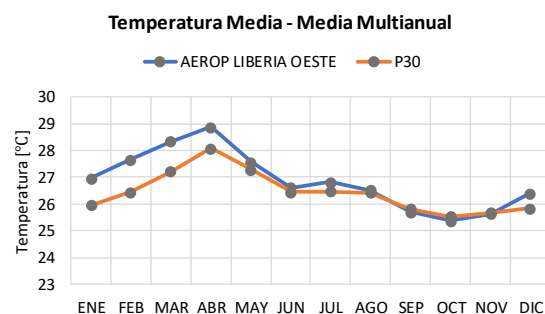
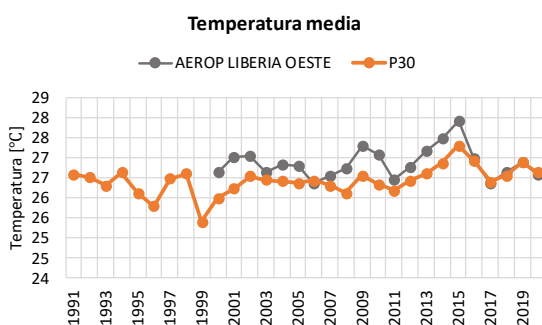


Figura 24. Comparación de valores anuales y mensuales de temperatura. Estaciones Aeropuerto Liberia Oeste y P30.

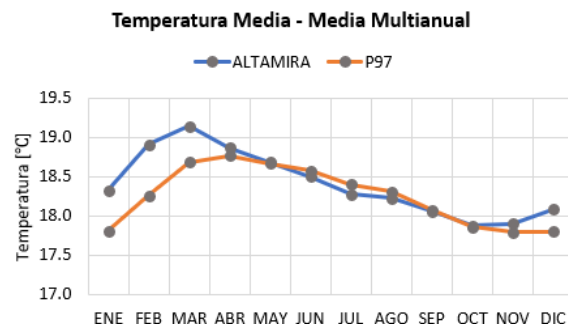
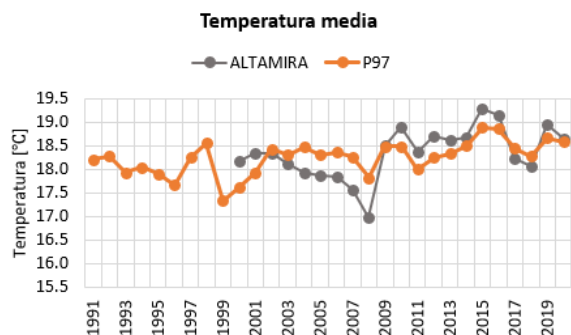


Figura 25. Comparación de valores anuales y mensuales de temperatura. Estaciones Altamira y P97.

La variabilidad interanual de la temperatura) muestra un comportamiento relativamente estable en comparación con la precipitación, con solo fluctuaciones moderadas a lo largo del periodo de estudio. No obstante, se puede identificar una influencia secundaria de la variabilidad climática de gran escala asociada

al fenómeno de El Niño–Oscilación del Sur (ENSO). Se observan ligeros incrementos en la temperatura media durante los periodos de El Niño, particularmente alrededor de 1997–1998, 2009–2010 y 2015–2016, lo cual es consistente con las condiciones más cálidas y secas típicamente asociadas a estos eventos en Costa Rica.

Por el contrario, se pueden observar leves disminuciones de temperatura durante los periodos de La Niña, como en 1998–2000 y 2007–2008. En particular, la disminución observada alrededor de 2008 coincide con un evento de La Niña bien definido, durante el cual el aumento de la nubosidad y la precipitación probablemente contribuyó a una menor acumulación de calor en superficie. De manera similar, aunque más prolongada, esta condición puede asociarse con el periodo de La Niña 1998–2000, el cual también refleja valores de temperatura ligeramente moderados.

El histograma de temperatura diaria, Figura 26, Figura 27 y Figura 28, muestra la distribución de frecuencias de los valores registrados entre las estaciones. Se observa que las series presentan un comportamiento muy similar, con la mayor concentración de registros alrededor de los 22 °C, 26 °C y 18 °C. La estación satelital reproduce de forma adecuada el patrón observado en la estación terrestre, aunque con ligeras diferencias en la frecuencia de algunos intervalos: por ejemplo, P66 tiende a concentrar un mayor número de registros en torno a los 22 °C, mientras que la estación terrestre muestra una distribución algo más uniforme en ese rango. En general, la coherencia en la forma de la distribución indica una buena correspondencia entre ambas fuentes de información.

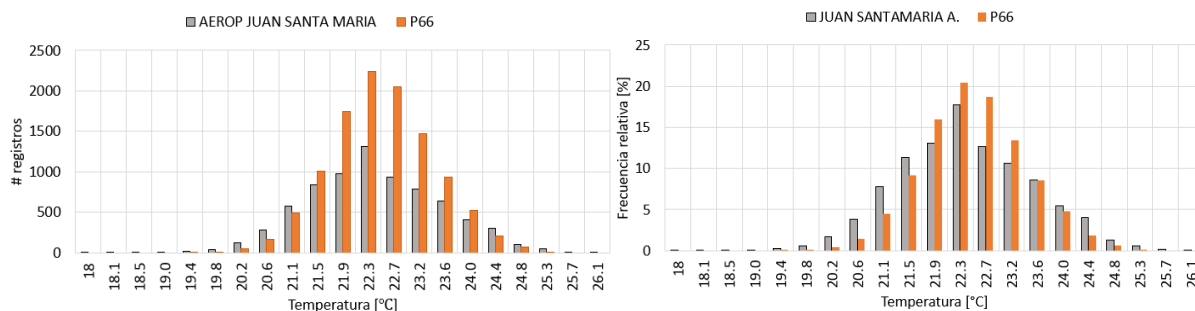


Figura 26. Comparación de histogramas de temperatura diaria. Estaciones Aeropuerto Juan Santamaría y P66.

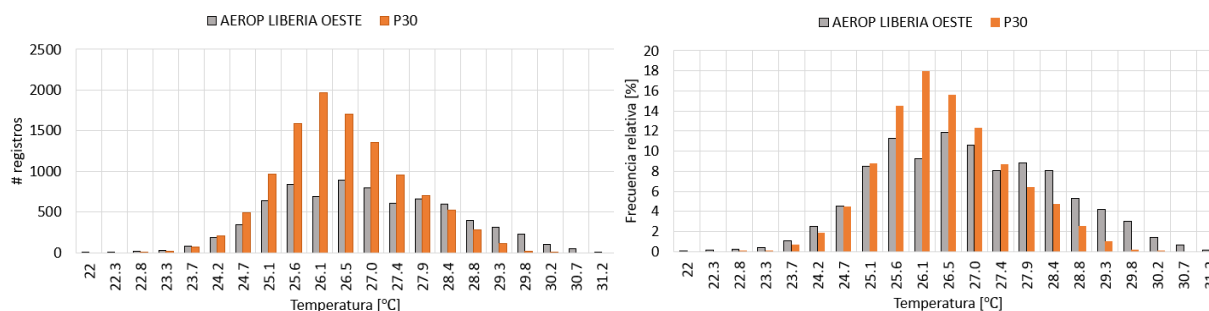


Figura 27. Comparación de histogramas de temperatura diaria. Estaciones Aeropuerto Liberia Oeste y P30.

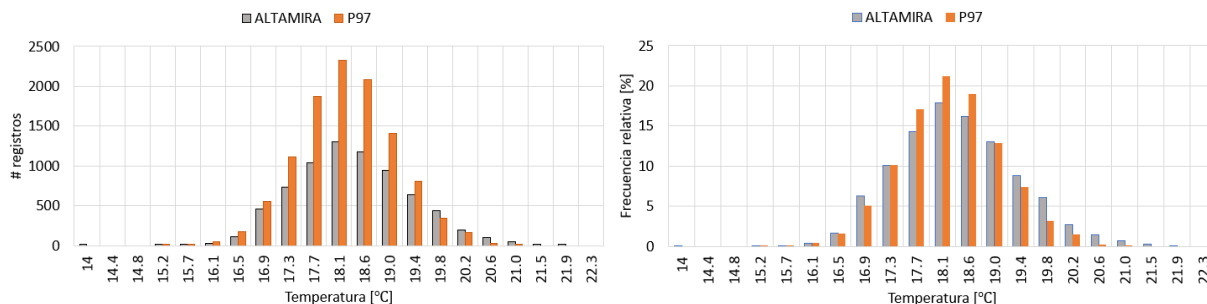


Figura 28. Comparación de histogramas de temperatura diaria. Estaciones Altamira y P97.

En los gráficos anuales, Figura 29, Figura 30 y Figura 31, se observa como las tendencias de picos y variaciones diarias se mantienen consistentes entre las estaciones en tierra y las virtuales, y las fluctuaciones entre los periodos de mayor y menor temperatura son coincidentes. Las series tienden a subir y bajar sincrónicamente en el tiempo.

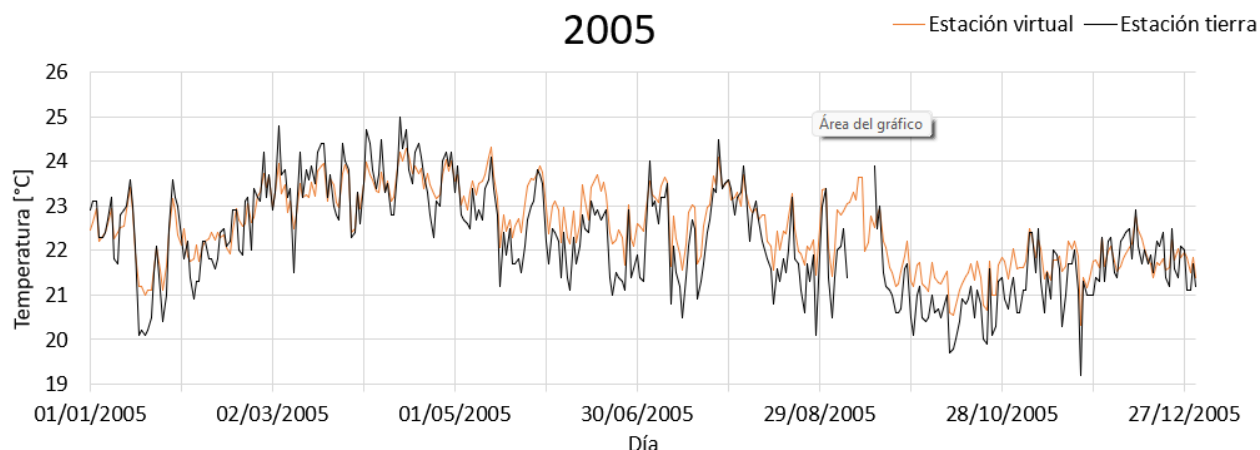


Figura 29. Comparación de los valores diarios entre las estaciones Aeropuerto Juan Santamaría y P66, para el año 2005.

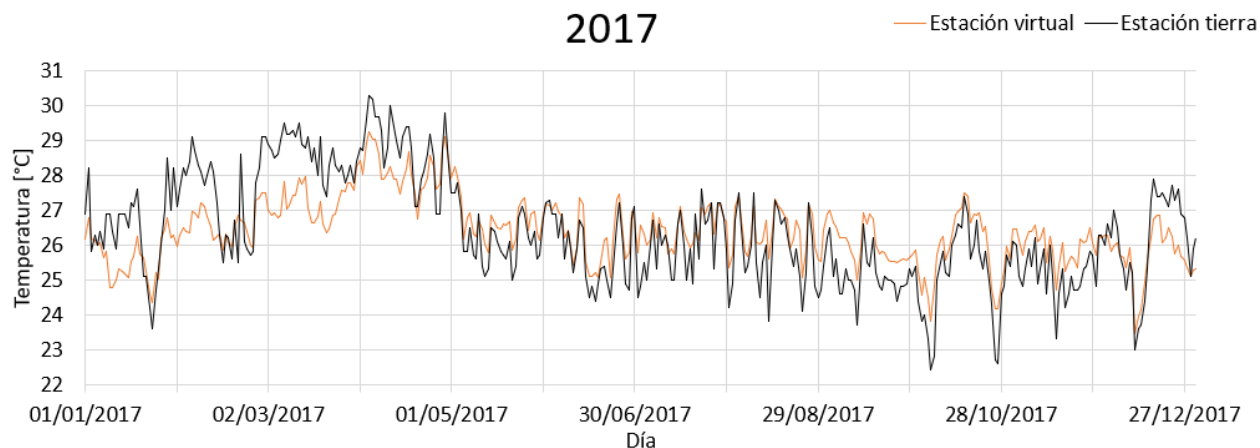


Figura 30. Comparación de los valores diarios entre las estaciones Aeropuerto Liberia Oeste y P30, para el año 2017.

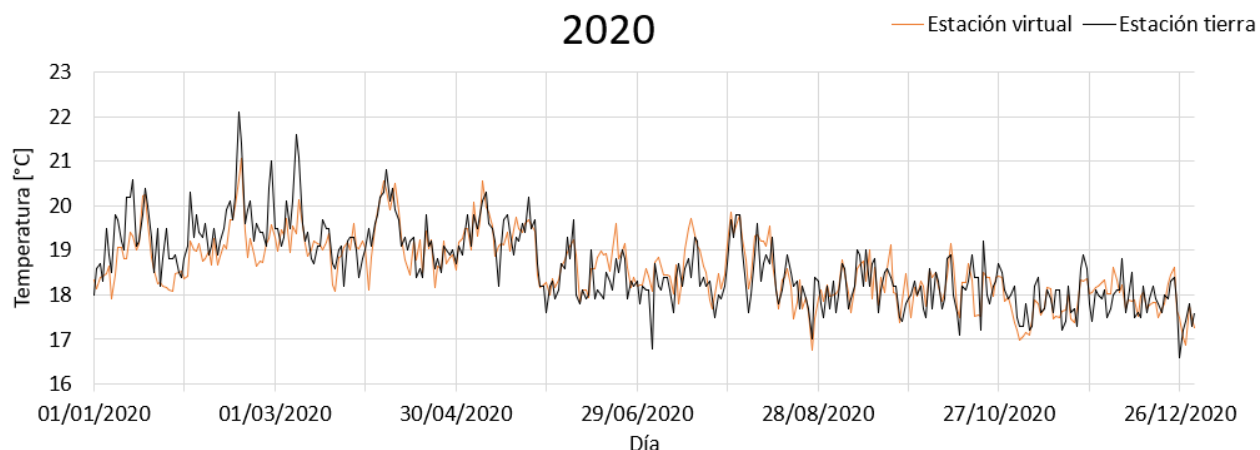


Figura 31. Comparación de los valores diarios entre las estaciones Altamira y P97, para el año 2020.

Los gráficos de dispersión presentados en la Figura 32, Figura 33 y Figura 34, corresponden a la comparación de la temperatura media mensual entre las estaciones meteorológicas y los respectivos productos satelitales. En términos generales, se observa una relación lineal clara entre ambas fuentes de información, con la mayoría de los puntos distribuidos en torno a la línea 1:1, lo que indica una adecuada capacidad del dataset satelital para reproducir la temperatura media mensual observada en las estaciones terrestres.

En el caso del Aeropuerto Juan Santamaría (Figura 32), la concentración principal de los datos se sitúa en el rango aproximado de 21 a 24 °C, consistente con las condiciones térmicas características del Valle Central. Para el Aeropuerto de Liberia Oeste (Figura 33), se observa igualmente una relación lineal bien definida, aunque con una dispersión ligeramente mayor, particularmente en los valores más altos de temperatura, lo cual es esperable en regiones de clima más cálido y responde a la mayor variabilidad térmica propia de las zonas bajas del Pacífico norte.

En la estación Altamira (Figura 34), las temperaturas medias mensuales se presentan en un rango inferior, acorde con su mayor altitud y condiciones climáticas más frescas. En este caso, si bien se mantiene una relación consistente entre los registros de la estación y el producto satelital, se observa una mayor dispersión de los datos, lo que sugiere una mayor variabilidad en la representación de la temperatura mensual en comparación con las estaciones de menor altitud.

En las tres estaciones analizadas, los valores más bajos de temperatura media mensual se concentran principalmente durante los meses de mayor influencia de la estación lluviosa, mientras que a partir de marzo y abril se evidencia un incremento progresivo de la temperatura, asociado a condiciones más secas y a un aumento de la radiación solar.

Estos diagramas evidencian que los productos satelitales reproducen de manera adecuada el patrón estacional y la variabilidad climática de la temperatura media mensual en estaciones terrestres ubicadas en regiones climáticamente contrastantes, aunque con diferencias en el grado de dispersión según las condiciones locales y la altitud de cada sitio. .

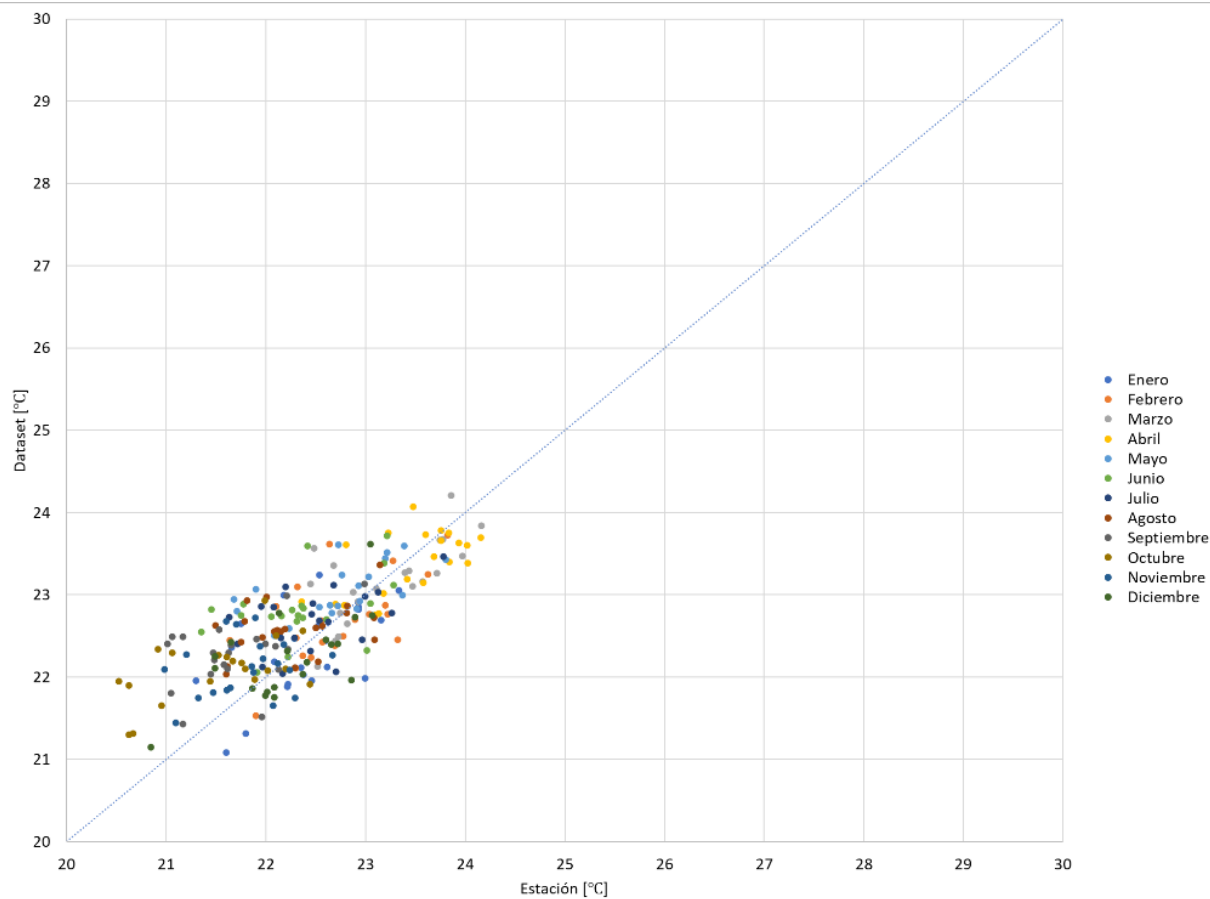


Figura 32. Gráfico de dispersión de los valores promedio mensuales de temperatura. Aeropuerto Juan Santamaría y P66.

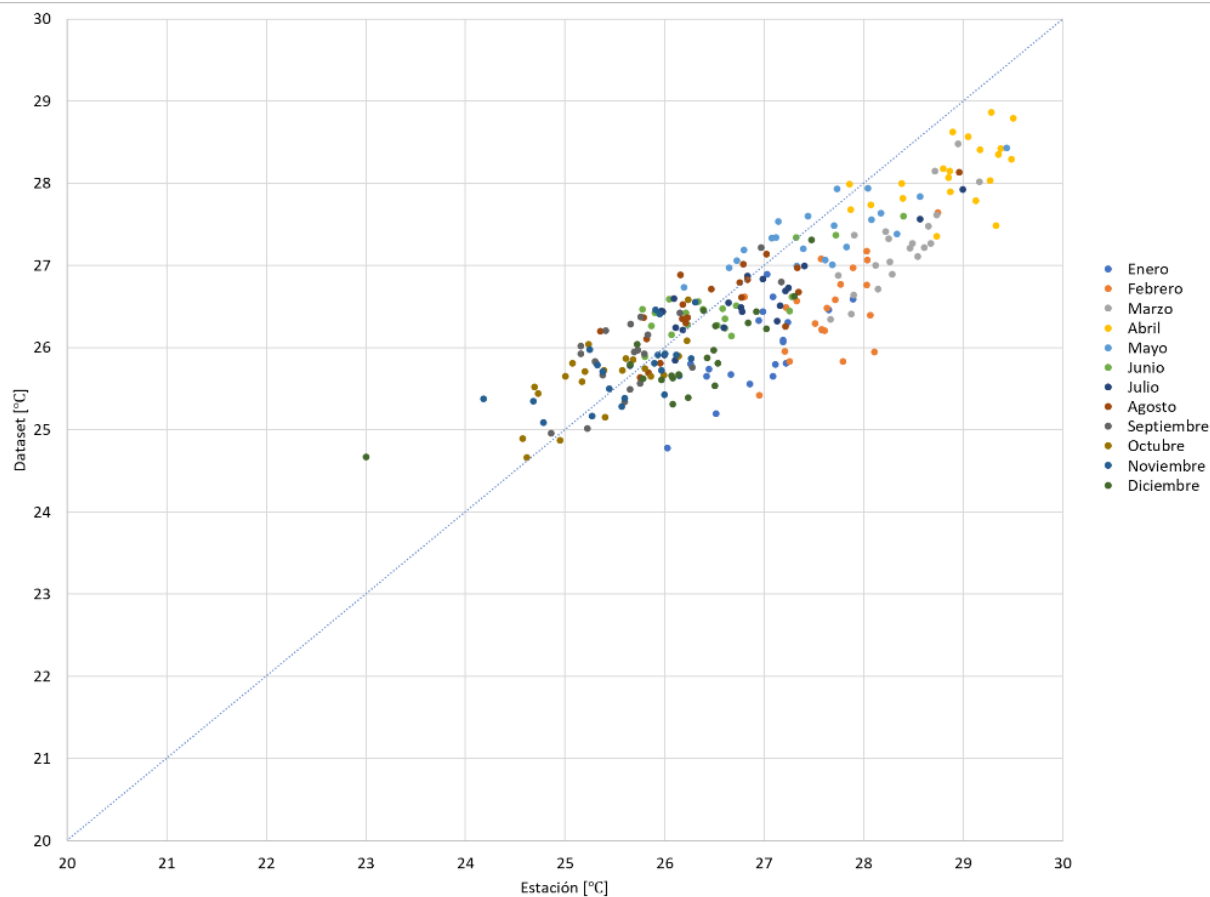


Figura 33. Gráfico de dispersión de los valores promedio mensuales de temperatura. Aeropuerto Liberia Oeste y P30.

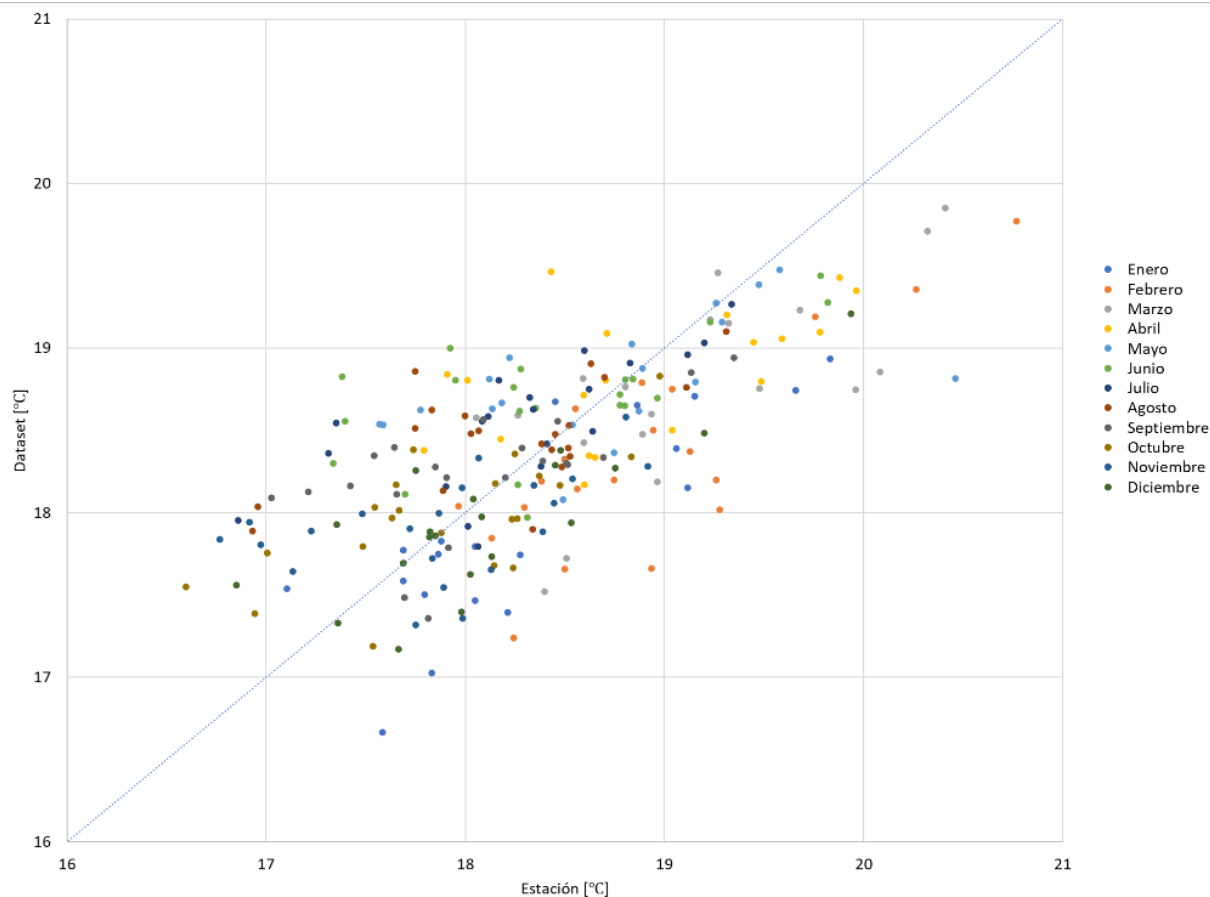


Figura 34. Gráfico de dispersión de los valores promedio mensuales de temperatura. Altamira y P97.

De los análisis presentados se concluye que la información de las bases de datos CHIRPS y ERA5 reproduce suficientemente bien la información registrada en las estaciones en tierra. Las diferencias existentes están dentro de lo razonable y, por lo tanto, no se consideran críticas para las evaluaciones de amenaza y riesgo que se realizan en esta consultoría. En consecuencia, no se ve la necesidad de aplicar factores de corrección a la información de las estaciones virtuales.

Si bien en esta sección se presenta este análisis para solamente 3 puntos en el territorio, en el Dataset del proyecto se incluye el análisis para 22 estaciones en tierra.

2.4 Simulaciones para el Clima Base

Para las 111 estaciones virtuales definidas en Costa Rica, se aplicó el procedimiento descrito en el Informe de inicio de esta consultoría para generar series simuladas que representan posibles variaciones de la precipitación y la temperatura en el tiempo, bajo condiciones climáticas correspondientes al periodo de control o *clima base*. En total se realizaron 1,000 simulaciones, cada una de las cuales corresponde a un año calendario completo, obteniéndose así series diarias de precipitación y de temperatura mínima, promedio y máxima. Estas simulaciones se desarrollaron con dos objetivos principales: capturar variaciones propias del clima base costarricense que no hayan sido registradas en los datos meteorológicos

históricos, con el fin de incorporarlas en la simulación de eventos peligrosos; y constituir una base sólida para el proceso de reducción de escala de los cambios proyectados por los Modelos de Circulación Global, considerando diferentes escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero.

Las simulaciones fueron generadas con el programa Drought Pro (Bernal et al., 2018), el cual implementa la metodología presentada a continuación, y documentada en el Informe de Inicio (sección 6.1.1) (Cardona et al., 2025). Esta metodología ha sido probada en diversos países y contextos climáticos, mostrando resultados adecuados y suficientes para la evaluación del riesgo (ver, por ejemplo, Bernal et al., 2017; Maskrey et al., 2019; Cardona et al., 2020).

La metodología propuesta utiliza un generador de clima sintético a partir de distribuciones paramétricas de probabilidad para definir conjuntos de datos climáticos históricos y estimar la probabilidad de ocurrencia de un determinado valor de precipitación o temperatura, incluso fuera del rango de observaciones históricas. La metodología toma cada día del año en un análisis separado, y encuentra la distribución de probabilidad que se ajusta mejor a los registros históricos. Posteriormente, se generan números aleatorios para la precipitación y la temperatura diaria para un determinado número de años de simulación, usando los parámetros de las distribuciones seleccionadas.

Para evaluar el ajuste de las distribuciones de probabilidad se utilizó la prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov. Para definir si la muestra sigue una cierta distribución, se establece un nivel de significancia de 0.05, que implica que la probabilidad de concluir que los datos no siguen una distribución de probabilidad definida, cuando sí siguen esa distribución, es de solo el 5%. Al obtener valores de *p-value* por encima del nivel de significancia, no se puede rechazar la hipótesis nula ni concluir que los datos no se ajustan a la distribución considerada.

Para el caso específico de la precipitación, dado que debe diferenciarse entre días con y sin lluvia, la función de densidad de probabilidad se define como una distribución discreta que indica la probabilidad de lluvia, acoplada con una distribución continua que determina su intensidad en caso de lluvia (ver Figura 35). La probabilidad de ocurrencia de un día sin lluvia (P_0) se define como la relación de días secos sobre número de días totales en la muestra.

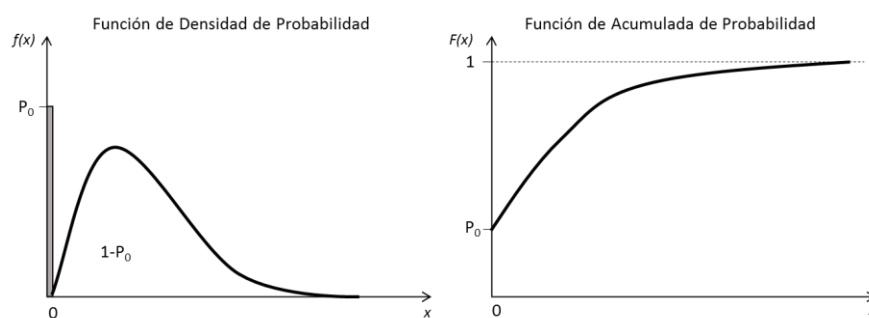


Figura 35. Ilustración de funciones acopladas de densidad de probabilidad y probabilidad acumulada para la precipitación

Luego de definir la distribución de probabilidad más apropiada para la precipitación y la temperatura (media, máxima y mínima), para cada uno de los 365 días del año, se generan números aleatorios para un determinado número de años de simulación (del orden de 1000 años). Así, se producen series aleatorias de datos climáticos para cada una de las estaciones dentro del territorio costarricense. En seguida, con el

fin de incluir la correlación existente entre valores de precipitación y temperatura en periodos de tiempo sucesivos, se calcula la matriz de autocorrelación para cada una de las series aleatorias generadas. La autocorrelación temporal indica la correlación de una variable con sus valores pasados y futuros (Wilks, 2006). Además, se incluyen los efectos de la correlación espacial, que representan la aparición de datos simultáneos en múltiples estaciones del área de estudio, utilizando la matriz de autocorrelación espacial entre valores de las diferentes estaciones de registro. De esta manera, se evitan cambios abruptos poco realistas en los valores de precipitación, temperatura, etc.

Una de las ventajas de la metodología de generación estocástica de series climáticas es la obtención de valores atípicos extremos, que hacen referencia a valores de precipitación por encima de los máximos de los registros históricos, y valores de temperatura por fuera del rango medio registrado en las estaciones. Esto quiere decir que las series modeladas incluyen valores de precipitación y temperatura que no se han presentado, pero que pueden ocurrir así sea con una baja probabilidad en el futuro. Por consiguiente, la variabilidad climática estaría implícita dentro de la generación de estas series sintéticas al encontrarse correlacionadas con sus valores pasados y futuros (correlación temporal), y con las demás estaciones del área de estudio (correlación espacial). La Figura 36 presenta un diagrama de flujo del proceso de generación estocástica de series meteorológicas, específicamente para precipitación y temperatura.

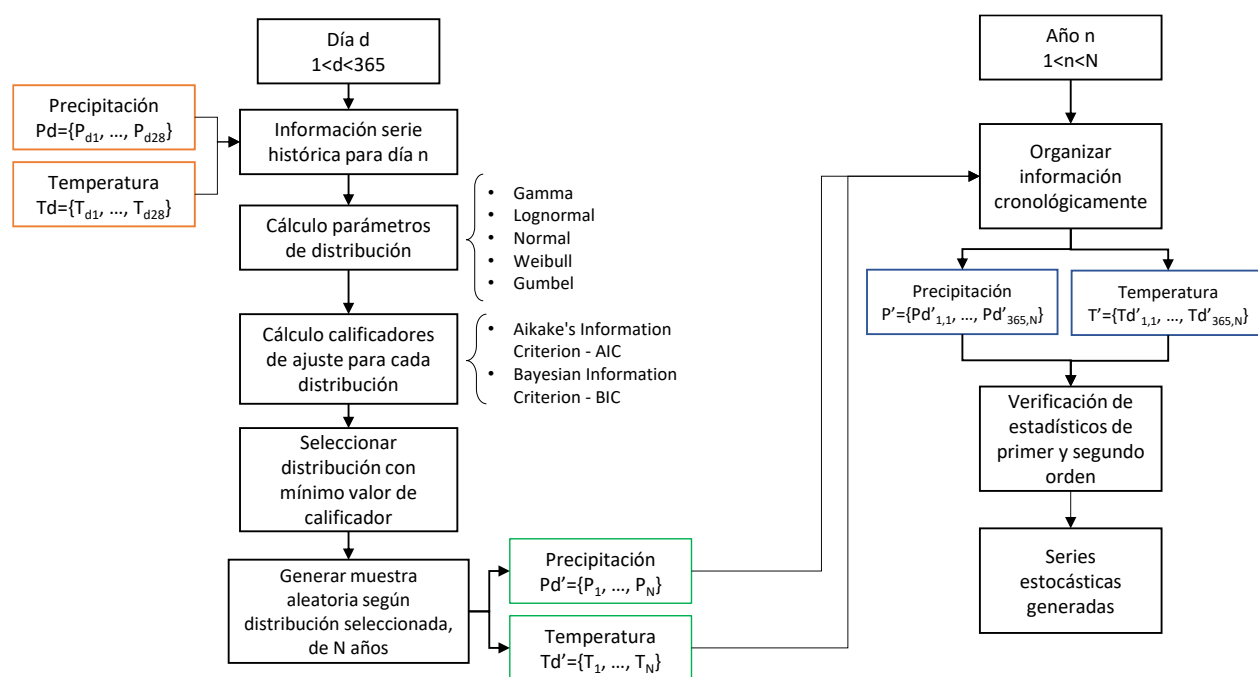


Figura 36. Diagrama de flujo del proceso de generación de series sintéticas.

Las simulaciones para el clima base constituyen un conjunto de datos extenso que no puede ser ilustrado en su totalidad en este informe. La totalidad de las simulaciones se encuentran en el Dataset del proyecto. No obstante, con el fin de ilustrar el resultado, se presentan a continuación las simulaciones obtenidas en 4 ubicaciones seleccionadas arbitrariamente. Para cada una de estas ubicaciones se presenta la serie diaria de precipitación y temperatura media. Así mismo, se incluyen mapas de precipitación y temperatura para un día seleccionado arbitrariamente dentro de esa misma simulación. Esto con el fin de ilustrar el resultado

en toda su dimensión, pues las simulaciones entregan distribuciones tanto temporales como espaciales de las variables meteorológicas. De la Figura 37 a la Figura 40 se presentan las ilustraciones mencionadas.

En la Figura 41 a Figura 44 se muestra la comparación de los valores de media multianual de precipitación anual acumulada y temperatura media del aire, tanto de la información histórica como de las simulaciones. Esto con el fin de ilustrar el ajuste entre los valores históricos y las simulaciones realizadas. De esta manera es posible afirmar que las simulaciones son efectivamente representativas del clima base y pueden ser usadas como forzamiento meteorológico para la modelación de la amenaza.

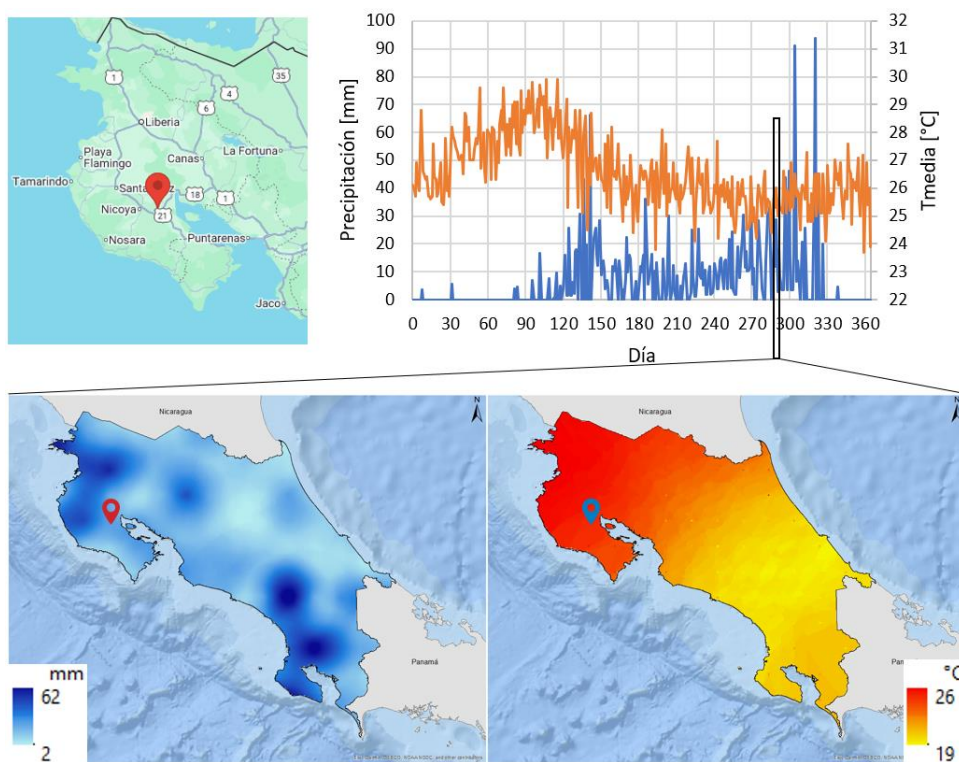


Figura 37. Simulación 737 en el punto P52. Anual (arriba), día 288 (abajo).

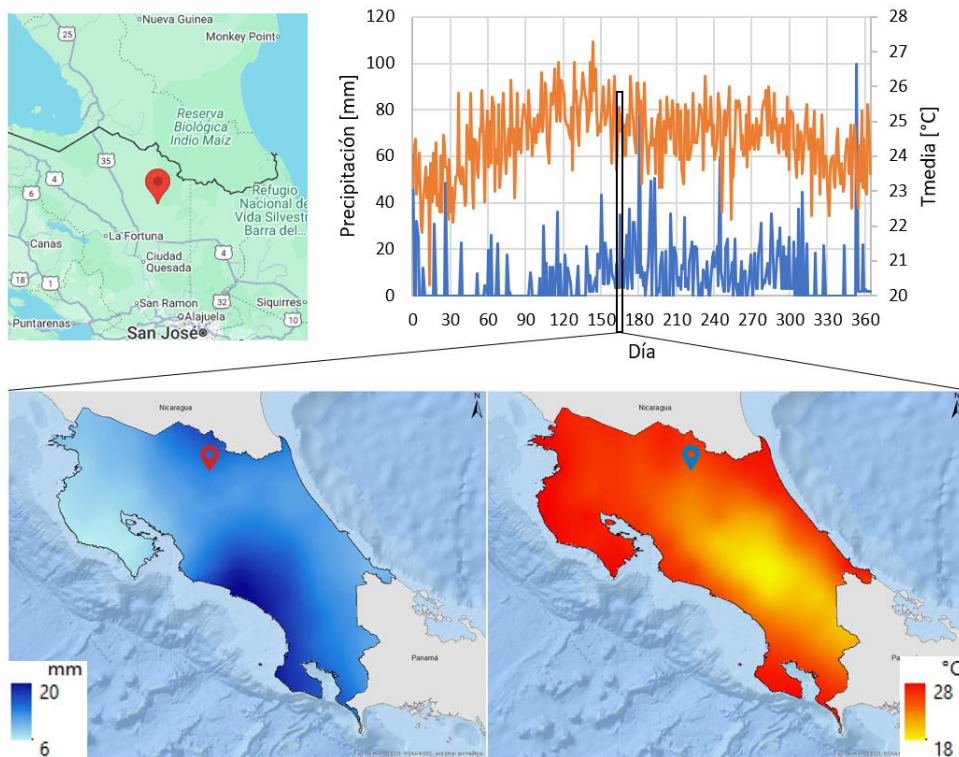


Figura 38. Simulación 222 en el punto P35. Anual (arriba), día 163 (abajo).

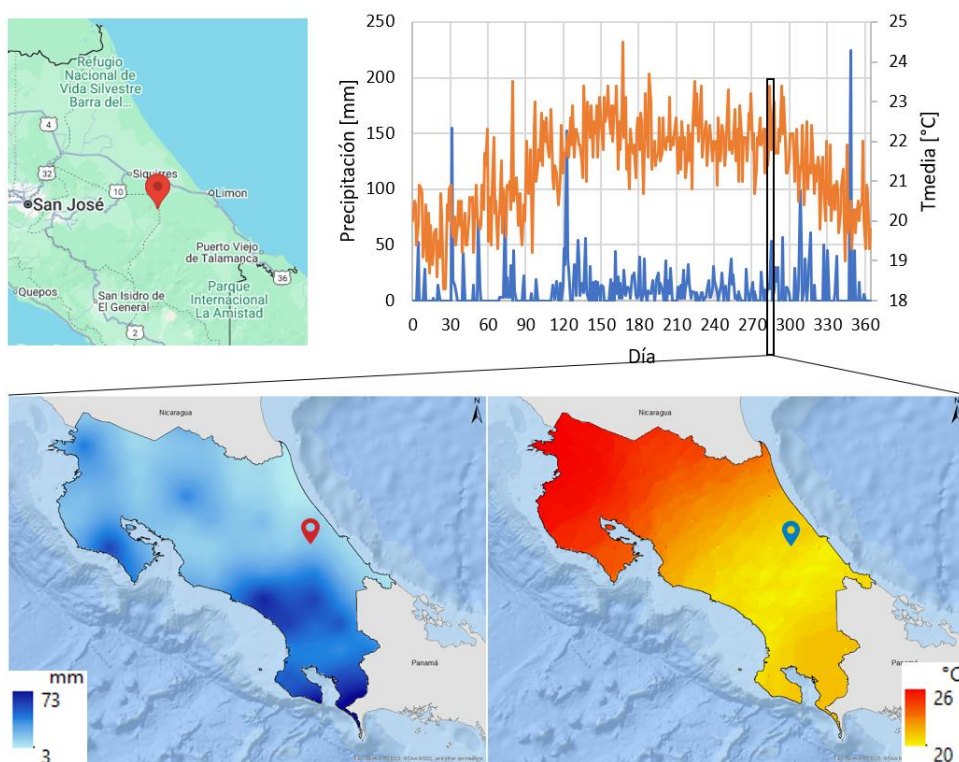


Figura 39. Simulación 286 en el punto P70. Anual (arriba), día 285 (abajo).

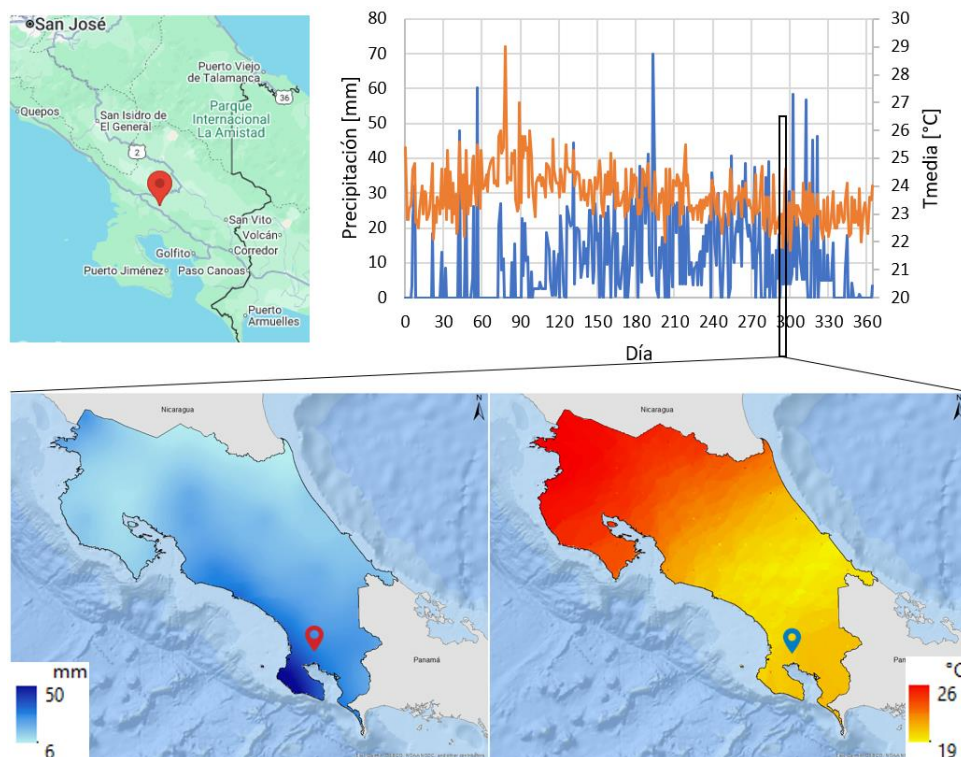
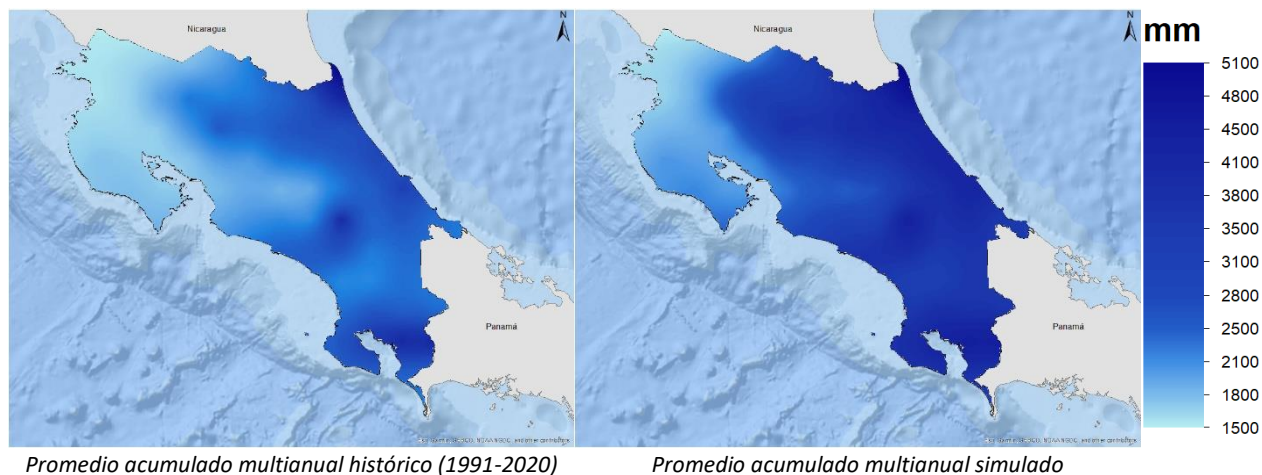
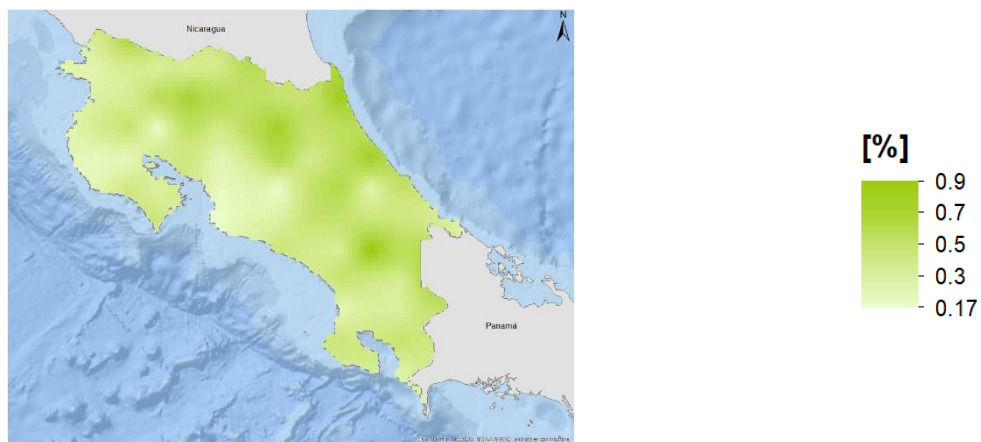


Figura 40. Simulación 15 en el punto P96. Anual (arriba), día 291 (abajo).



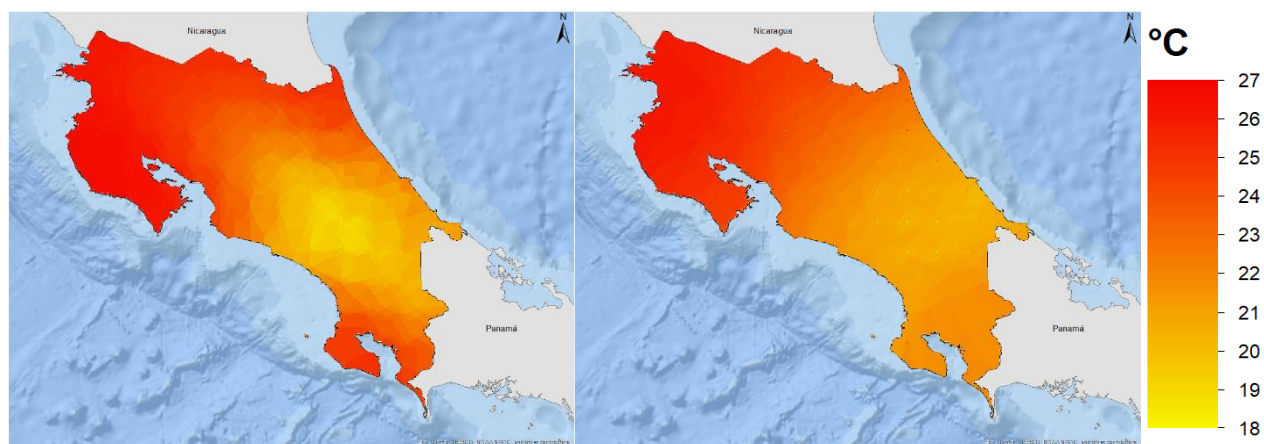
Promedio acumulado multianual histórico (1991-2020)

Promedio acumulado multianual simulado



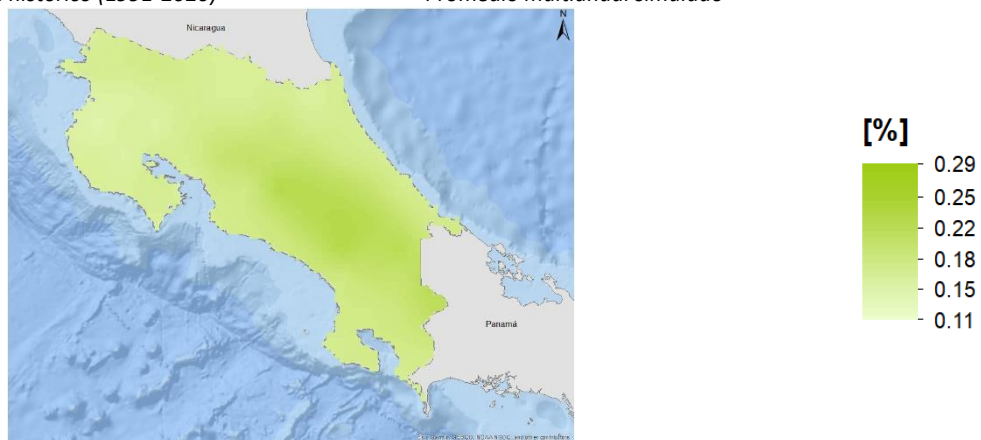
Diferencia porcentual entre la información simulada y el histórico

Figura 41. Comparación de medias multianuales de precipitación anual acumulada entre información histórica y simulaciones.



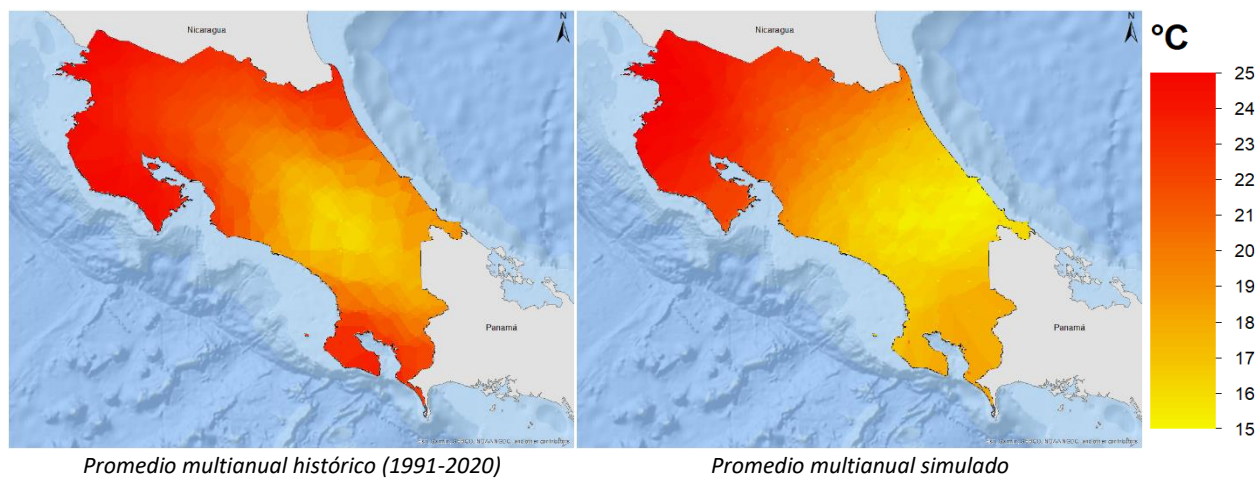
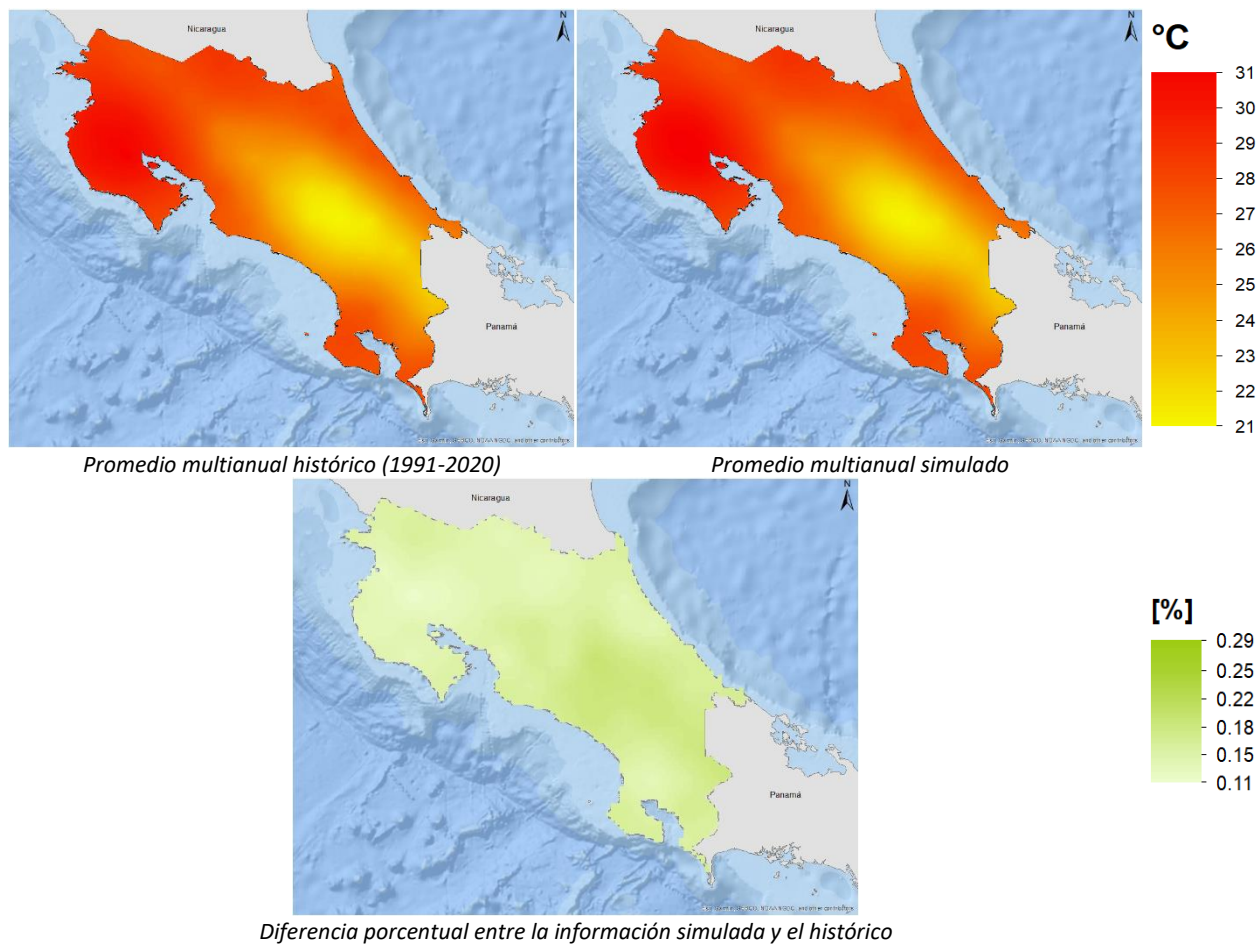
Promedio multianual histórico (1991-2020)

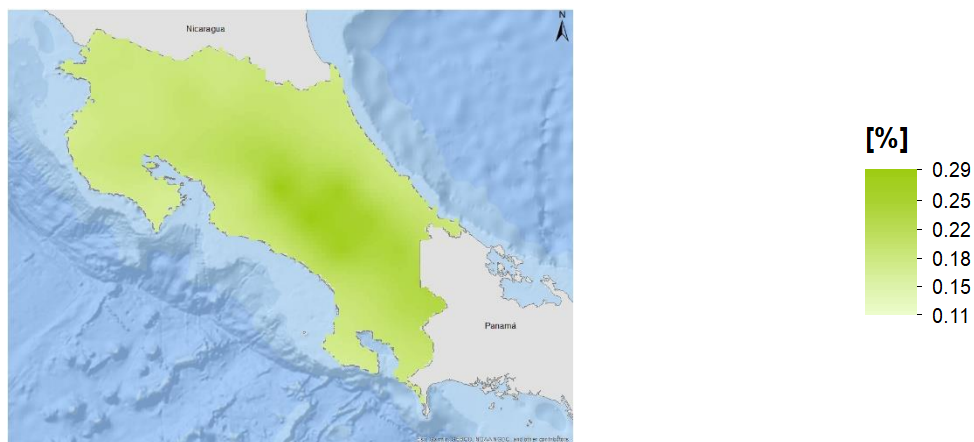
Promedio multianual simulado



Diferencia porcentual entre la información simulada y el histórico

Figura 42. Comparación de medias multianuales de temperatura media entre información histórica y simulaciones.





Diferencia porcentual entre la información simulada y el histórico

Figura 44. Comparación de medias multianuales de temperatura mínima entre información histórica y simulaciones.

2.5 Incorporación del cambio climático

El cambio climático se incorpora por medio del método delta, aplicando las variaciones proyectadas en Modelos de Circulación Global (GCM) directamente sobre las simulaciones del clima base. Esto constituye un método de reducción de escala estadístico que permite simular los cambios climatológicos proyectados en el futuro a nivel meteorológico, manteniendo la variabilidad propia del periodo histórico de control.

La incorporación del cambio climático en las series simuladas constituye un procedimiento de reducción de escala (*downscaling*) estadístico, basado en la generación estocástico de series meteorológicas descrita anteriormente, en la cual la variabilidad temporal y varianza propia de las variables meteorológicas se asumen como suficientemente bien definidas por el clima histórico, modificando así únicamente los valores medios de las series simuladas con el fin de incorporar las variaciones proyectadas por Modelos de Circulación Global atmosférica (GCM).

Para incorporar el cambio climático en la generación de las series climáticas se analizan las proyecciones dadas en GCM seleccionados y preexistentes en el CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 6), para múltiples cuatro de emisiones: SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP5-8.5.

Para este trabajo, se emplean tres GCMs incluidos en el CMIP6: EC-Earth3, GFDL-ESM4 y MPI-ESM1-2-LR. Se seleccionaron estos modelos siguiendo la recomendación dada en estudios previamente existentes para Costa Rica (Rojas-Soto et al., 2022; Rojas-Soto et al., 2024), en donde los autores seleccionan estos tres modelos como los más representativos para el país con base en criterios de desempeño, representatividad climática regional y diversidad de respuestas ante forzamientos de altas emisiones (escenario SSP5-8.5).

En términos de desempeño, el conjunto reproduce razonablemente el ciclo anual y la distribución de temperatura y precipitación sobre toda Centroamérica, con sesgos moderados y una señal proyectada coherente entre modelos. De acuerdo con análisis comparativos de desempeño de CMIP6 (Almazroui et al., 2021), después de evaluar la habilidad de cada GCM para simular temperaturas medias, máximas y mínimas, así como patrones espaciales y temporales de precipitación, se puede concluir que estos tres modelos presentan resultados consistentes con observaciones históricas, con una baja desviación.

Los tres modelos han sido previamente empleados para modelación de amenazas hidrológicas en Costa Rica (ver Rojas-Soto et al., 2022 y Rojas-Soto et al., 2024). Como se explicó anteriormente, el procedimiento de reducción de escala aplicado en esta consultoría consiste en alterar las series climáticas por los cambios proyectados por los modelos de circulación GCM seleccionados. Esto permite contar con series en escala meteorológica consistentes con el clima proyectado en los años futuros de interés. El resultado de la reducción de escala es, por lo tanto, series en escala temporal de 1 día, ubicadas espacialmente en los puntos con datos del modelo meteorológico (ver Figura 9), es decir, con resolución espacial de 0.25 grados (aproximadamente 30 Km). Dado que las series simuladas se modifican por los cambios proyectados, no es necesario, dentro del enfoque acá propuesto, corregir el sesgo propio de los GCM seleccionados.

GFDL-ESM4, desarrollado por el NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, es un sistema acoplado atmósfera-océano-biosfera de última generación con mejoras en física de nubes, dinámica oceánica y biogeoquímica; su configuración CMIP6 ha mostrado buena capacidad para representar la variabilidad tropical y extremos hidrológicos, por lo que es útil para explorar escenarios de mayor impacto (Dunne et al., 2020).

EC-Earth3, resultado de un consorcio europeo, incorpora mejoras en el acoplamiento atmósfera-océano y en la representación de aerosoles y nubes; suele ofrecer respuestas intermedias y consistentes para variables hidrometeorológicas, lo que lo convierte en un “pivote” útil dentro del conjunto (Döscher et al., 2022).

MPI-ESM1-2-LR, del Max Planck Institute for Meteorology, se caracteriza por un acoplamiento estable atmósfera-océano y desarrollos recientes en microfísica de nubes y mezcla oceánica; sus proyecciones tienden a ser más moderadas, aportando el extremo “bajo” del rango plausible y ayudando a balancear el conjunto (Mauritsen et al., 2019).

Esta combinación de modelos—uno típicamente de alto impacto (GFDL-ESM4), uno intermedio (EC-Earth3) y uno más conservador (MPI-ESM1-2-LR)—brinda diversidad física y estadística, lo que reduce el sesgo de depender de un único esquema de nubes o circulación y mejora la robustez de los resultados (Dunne et al., 2020; Döscher et al., 2022; Mauritsen et al., 2019).

Como se mencionó, las trayectorias de forzamiento consideradas corresponden a los escenarios ilustrativos de CMIP6 basados en las Vías Socioeconómicas Compartidas (SSP): SSP1-2.6 (mitigación rápida con forzamiento bajo), SSP2-4.5 (intermedio), SSP3-7.0 (alto, con grandes obstáculos al desarrollo sostenible) y SSP5-8.5 (muy alto, dependiente de combustibles fósiles). Estos escenarios combinan narrativas socioeconómicas con concentraciones y forzamientos radiativos consistentes, y constituyen el marco estándar para comparar la sensibilidad del clima futuro a distintas trayectorias de emisiones (Riahi et al., 2017; Meinshausen et al., 2020; O’Neill et al., 2016). Emplear el mismo conjunto de SSP en todos los modelos facilita la comparación entre respuestas.

Para los horizontes temporales se adoptaron tres años de referencia: 2035, 2050 y 2100, representativos de los periodos cercano, medio y final de siglo, respectivamente. Esta selección sigue la práctica del IPCC AR6, que evalúa cambios en ventanas 2021–2040 (corto plazo), 2041–2060 (plazo medio) y 2081–2100 (fin de siglo). Trabajar con estos hitos permite articular resultados con escalas de decisión relevantes en Costa Rica: planificación de infraestructura y gestión del agua a 2035, inversiones sectoriales y

ordenamiento territorial a 2050, y políticas de largo plazo y resiliencia ecosistémica hacia 2100 (IPCC, 2021, cap. 4; SPM).

En síntesis, el uso conjunto de GFDL-ESM4, EC-Earth3 y MPI-ESM1-2-LR bajo las trayectorias SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 y SSP5-8.5, y evaluado en 2035, 2050 y 2100, ofrece un marco equilibrado para estimar impactos climáticos en Costa Rica. Esta configuración combina modelos bien documentados y contrastados, diversidad física suficiente para abarcar un rango de respuestas hidroclimáticas, y escenarios estandarizados por el IPCC que permiten vincular los resultados con decisiones de política pública y gestión del riesgo.

La combinación de los 3 modelos, trayectorias de emisiones y años objetivo, adicional al clima base, resulta en 37 escenarios climáticos distintos. Estos escenarios son fundamentales para calcular las amenazas y riesgos asociados al cambio climático en el contexto de esta consultoría. La Tabla 14 resume los escenarios considerados, proporcionando una visión integral de las posibles variaciones climáticas para Costa Rica. Los climas presentados en la Tabla 14, son aplicables a la modelación de inundaciones y sequías, más no para la modelación de ciclones tropicales. Esto debido a que los GCM que permiten simular trayectorias de ciclones tropicales, no son necesariamente los mismos aquí seleccionados. Por lo tanto, para la modelación de ciclones tropicales se emplean definiciones diferentes sobre el clima futuro, como se presenta con mayor detalle en la sección 5.1.2.

Tabla 14. Climas futuros considerados en esta consultoría

GCM	Trayectoria	Año objetivo	GCM	Trayectoria	Año objetivo
EC-Earth3	SSP1-2.6	2035	GFDL-ESM4	SSP3-7.0	2050
EC-Earth3	SSP2-4.5	2035	GFDL-ESM4	SSP5-8.5	2050
EC-Earth3	SSP3-7.0	2035	GFDL-ESM4	SSP1-2.6	2100
EC-Earth3	SSP5-8.5	2035	GFDL-ESM4	SSP2-4.5	2100
EC-Earth3	SSP1-2.6	2050	GFDL-ESM4	SSP3-7.0	2100
EC-Earth3	SSP2-4.5	2050	GFDL-ESM4	SSP5-8.5	2100
EC-Earth3	SSP3-7.0	2050	MPI-ESM1-2-LR	SSP1-2.6	2035
EC-Earth3	SSP5-8.5	2050	MPI-ESM1-2-LR	SSP2-4.5	2035
EC-Earth3	SSP1-2.6	2100	MPI-ESM1-2-LR	SSP3-7.0	2035
EC-Earth3	SSP2-4.5	2100	MPI-ESM1-2-LR	SSP5-8.5	2035
EC-Earth3	SSP3-7.0	2100	MPI-ESM1-2-LR	SSP1-2.6	2050
EC-Earth3	SSP5-8.5	2100	MPI-ESM1-2-LR	SSP2-4.5	2050
GFDL-ESM4	SSP1-2.6	2035	MPI-ESM1-2-LR	SSP3-7.0	2050
GFDL-ESM4	SSP2-4.5	2035	MPI-ESM1-2-LR	SSP5-8.5	2050
GFDL-ESM4	SSP3-7.0	2035	MPI-ESM1-2-LR	SSP1-2.6	2100
GFDL-ESM4	SSP5-8.5	2035	MPI-ESM1-2-LR	SSP2-4.5	2100
GFDL-ESM4	SSP1-2.6	2050	MPI-ESM1-2-LR	SSP3-7.0	2100
GFDL-ESM4	SSP2-4.5	2050	MPI-ESM1-2-LR	SSP5-8.5	2100

A continuación, se presenta un ejemplo de los cambios proyectados para el año objetivo 2035, para la trayectoria de emisiones SSP1 y uno de los modelos GCM seleccionados, tanto para la precipitación como para la temperatura. En el Anexo A.2 se presentan los mapas de cambio proyectado para todos los demás climas.

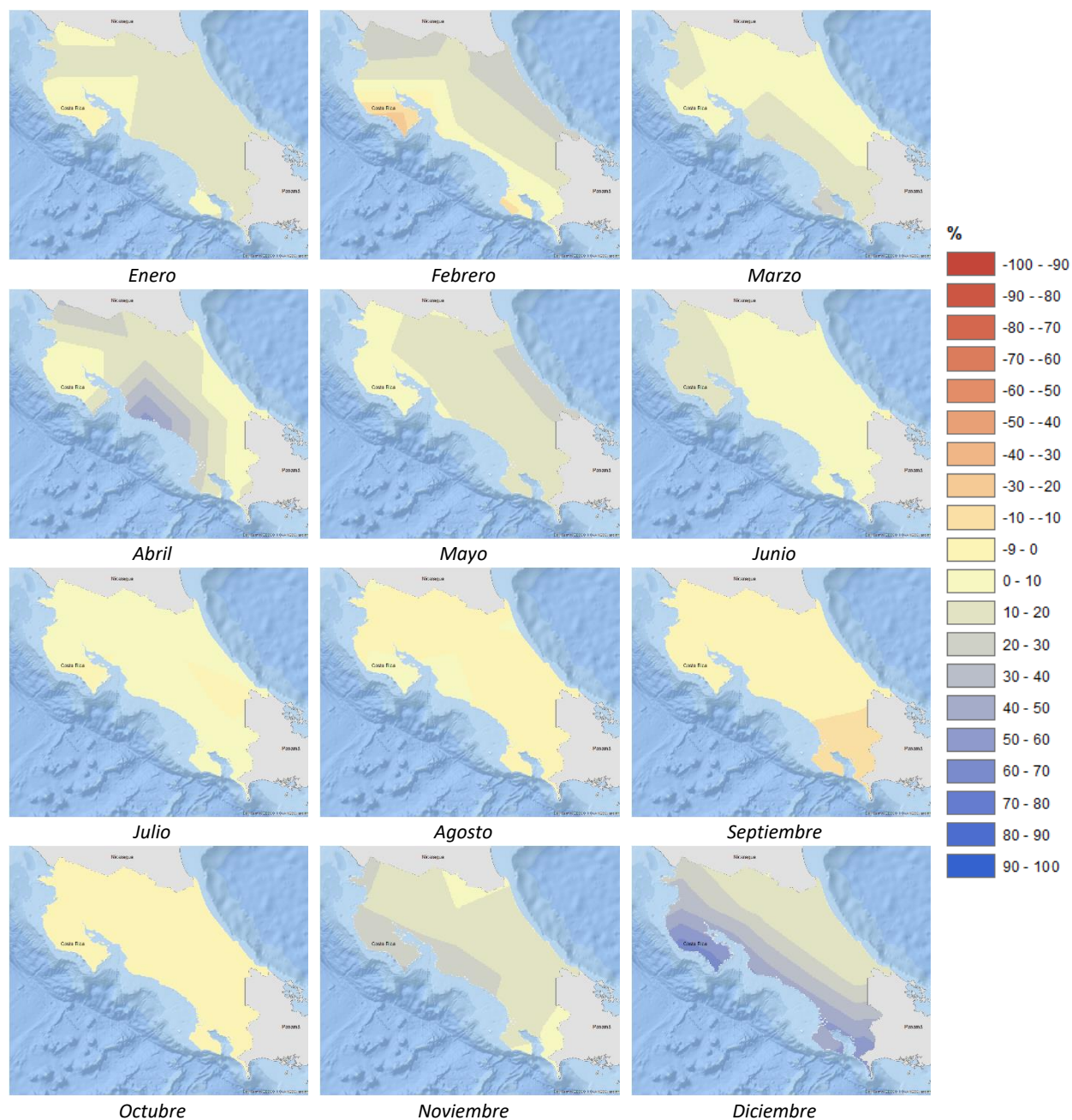


Figura 45. Cambio porcentual de precipitación Modelo: GFDL-ESM4 SSP1-2.6 Año futuro 2035

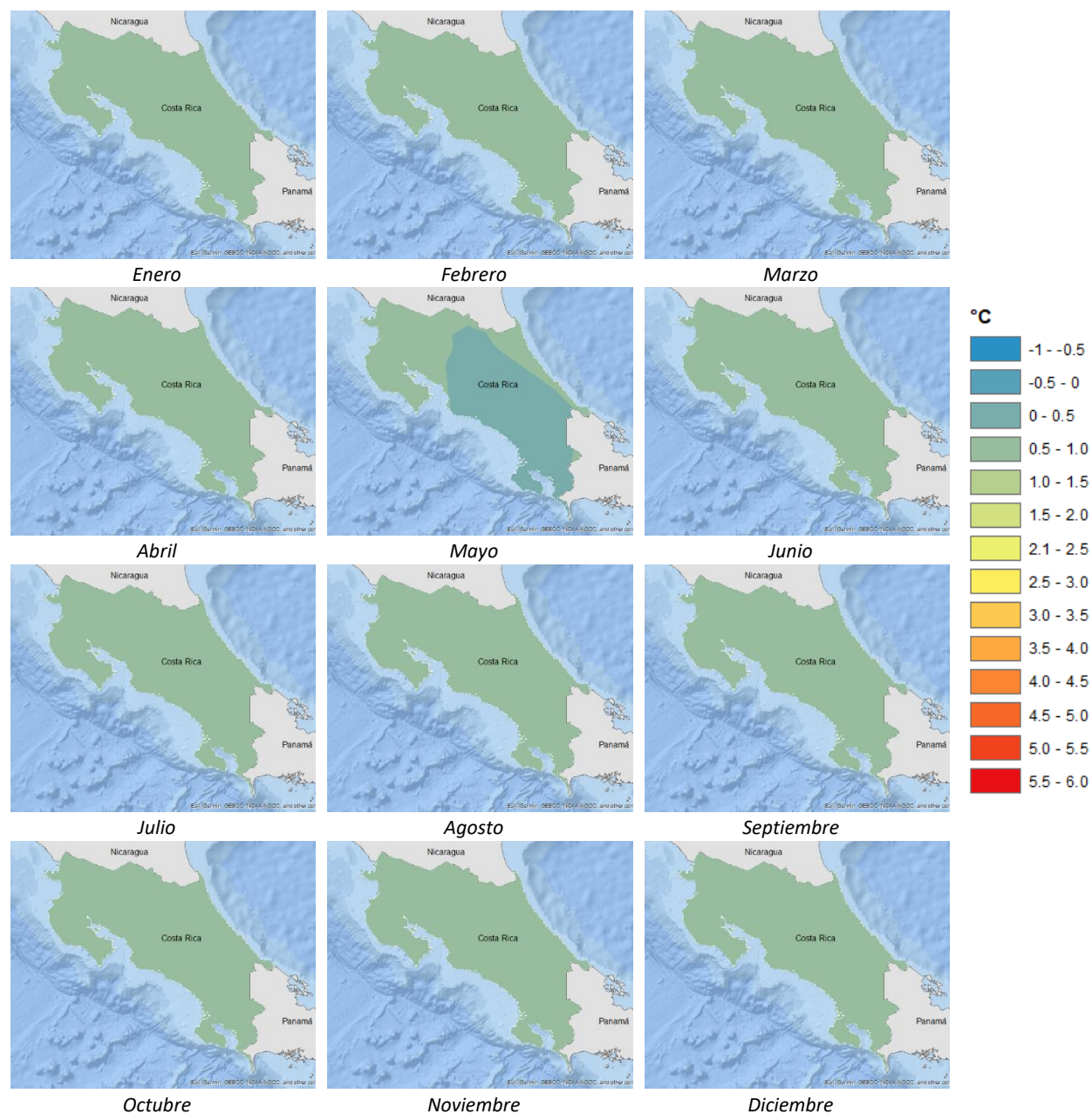


Figura 46. Cambio en °C de temperatura Modelo: GFDL-ESM4 SSP1-2.6 Año futuro 2035

2.6 Comportamiento del clima en una ubicación bajo escenarios futuros

Además de los cambios proyectados presentados espacialmente, resulta útil ilustrar cómo se manifiestan las proyecciones climáticas en un punto específico del territorio. Para ello, se seleccionó una estación de referencia (P57), en la cual se evaluaron los cambios en precipitación y temperatura simulados por el

conjunto de GCMs seleccionados, bajo las trayectorias de emisiones (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 y SSP5-8.5) y para los años objetivo (2035, 2050 y 2100). Este ejercicio puntual permite observar con mayor claridad la dispersión entre modelos, así como la magnitud de las variaciones en comparación con el clima base. La Figura 48 y Figura 49, sintetizan los resultados para la estación seleccionada, funcionando como un ejemplo representativo de cómo las condiciones futuras pueden variar localmente dependiendo del modelo y del escenario de emisiones considerado. En las gráficas se observan valores de precipitación y temperatura de un día seleccionado arbitrariamente, para una de las simulaciones, en una ubicación también arbitraria.



Figura 47. Ubicación de la estación P57.

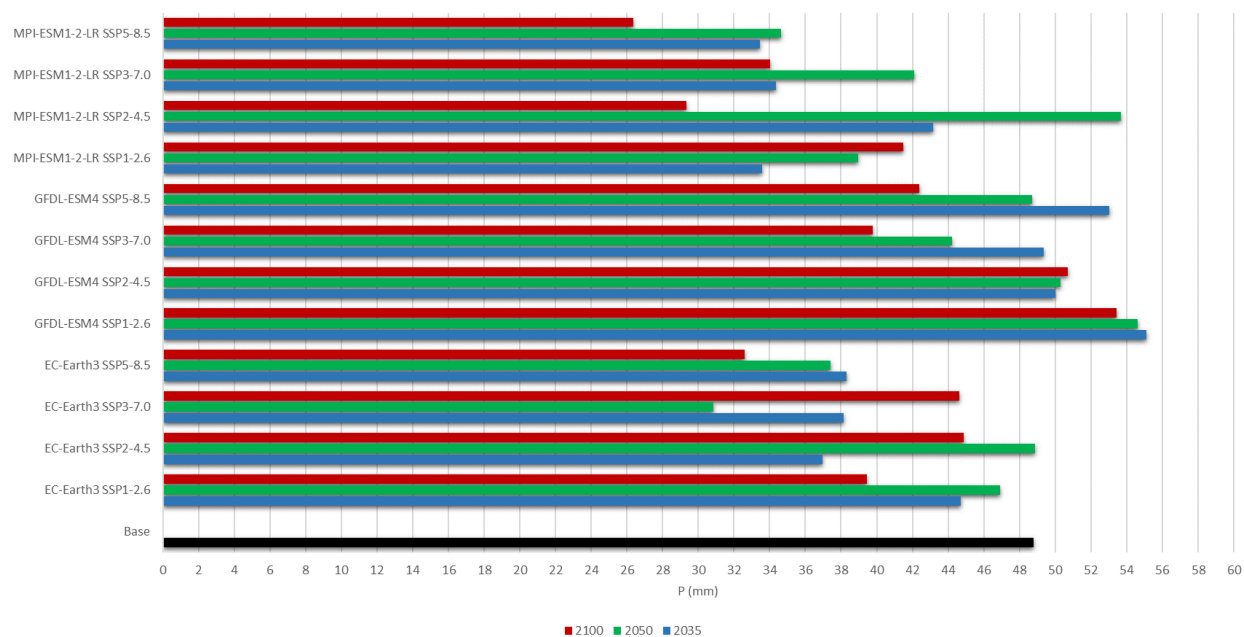


Figura 48. Precipitación en el punto P57 de la malla de estaciones virtuales, para el día 5 de la simulación 1, modificado con cada clima futuro considerado.

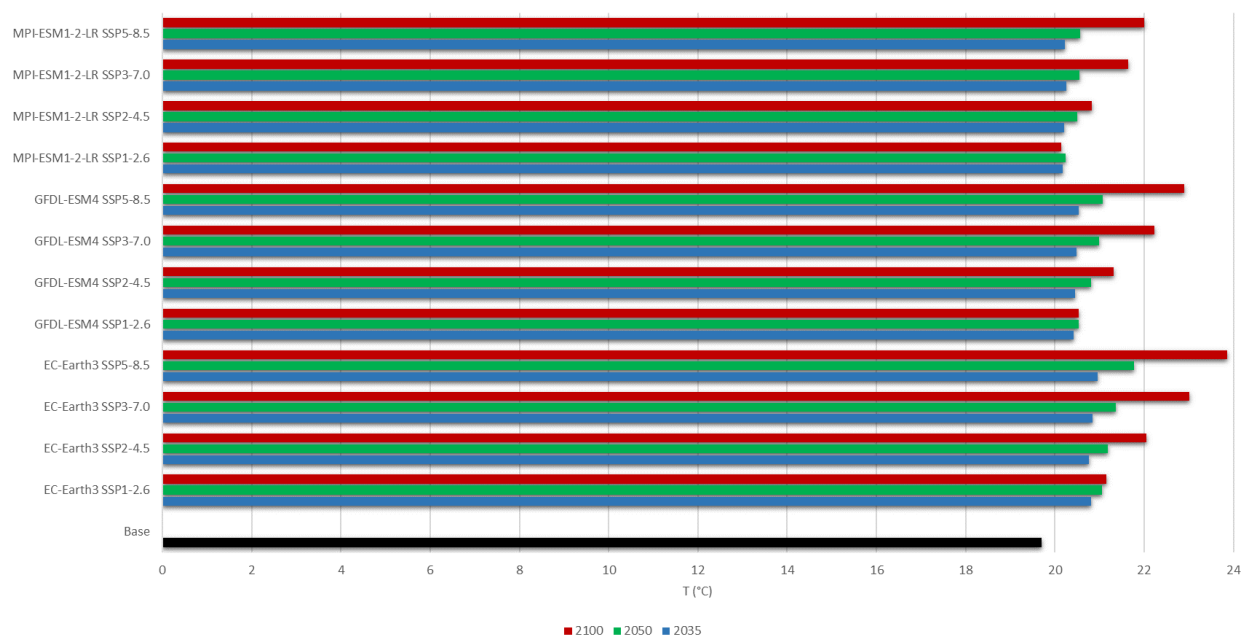


Figura 49. Temperatura en un punto P57 de la malla de estaciones virtuales, para el día 1 de la simulación 1, modificada con cada clima futuro considerado.

3 AMENAZA DE SEQUÍA

La sequía es uno de los fenómenos climáticos más complejos y recurrentes, caracterizado por la reducción temporal de la disponibilidad de agua en un territorio, ya sea por déficit de precipitación, exceso de evapotranspiración o una combinación de ambos factores. A diferencia de otros eventos hidrometeorológicos, como las inundaciones o tormentas, la sequía no se manifiesta de forma abrupta ni inmediata, sino que se desarrolla de manera progresiva y sus impactos se acumulan con el tiempo, afectando la agricultura, la disponibilidad de agua potable, la generación hidroeléctrica y los ecosistemas.

3.1 Índices de sequía considerados

Dada la dificultad de definir y cuantificar la sequía con un único parámetro, se han desarrollado diversos índices de sequía, que son herramientas estadísticas diseñadas para sintetizar información climática y convertirla en valores comparables que permitan identificar, monitorear y evaluar la intensidad, duración y extensión espacial de estos eventos. Estos índices se basan principalmente en variables como la precipitación y la evapotranspiración, y permiten distinguir principalmente sequías meteorológicas, aunque existen algunos índices con alguna capacidad de revelar sequías agrícolas o hidrológicas. En este trabajo se emplean índices de sequía meteorológica, debido a que el impacto sobre los sistemas productivos, es decir, la manifestación o no de una sequía agrícola, es un paso de modelación posterior que conlleva la evaluación del riesgo.

El uso de índices de sequía resulta fundamental para la gestión del riesgo climático y la toma de decisiones en múltiples sectores. Debido a su carácter estandarizado, permiten comparar situaciones en diferentes escalas temporales y geográficas, así como evaluar los impactos potenciales bajo condiciones de variabilidad climática y cambio climático. Entre los más utilizados a nivel internacional se destacan el Índice de Precipitación Estandarizado (SPI), que se basa exclusivamente en anomalías de precipitación, y el Índice Estandarizado de Precipitación y Evapotranspiración (SPEI), que incorpora también el efecto de la temperatura sobre la demanda atmosférica de agua.

3.1.1 Índice de Precipitación Estandarizado (SPI)

El Índice de Precipitación Estandarizado (SPI, por sus siglas en inglés: Standardized Precipitation Index) es uno de los indicadores más utilizados a nivel internacional para la evaluación y el monitoreo de la sequía meteorológica. Fue propuesto por McKee et al. (1993) con el objetivo de disponer de una medida cuantitativa y comparable de los déficits o excesos de precipitación en distintas escalas temporales y regiones climáticas.

El SPI mide las anomalías de precipitación con respecto a la distribución histórica en un lugar determinado. Para su cálculo, se ajusta la serie de precipitación acumulada (mensual, trimestral, anual, etc.) a una distribución de probabilidad, generalmente la distribución Gamma, y posteriormente se transforma a una distribución normal estándar. El resultado es un índice con media cero y desviación estándar igual a uno, lo que permite identificar si un periodo es más húmedo o más seco de lo normal en relación con las condiciones climáticas típicas del sitio (JSCEDO, 2020).

Su principal ventaja es la flexibilidad temporal: puede calcularse en diferentes escalas (por ejemplo, 1, 3, 6, 12 o 24 meses), lo que permite capturar distintos tipos de sequías (McKee et al., 1993):

- A escala corta (1–3 meses), el SPI refleja condiciones que afectan la agricultura de secano y la disponibilidad inmediata de agua para la vegetación.
- A escalas medias (6–12 meses), representa el impacto en la disponibilidad de agua para ríos, embalses y acuíferos.
- A escalas largas (24 meses o más), se asocia con sequías hidrológicas de gran magnitud.

En el SPI, valores positivos indican condiciones más húmedas de lo normal, mientras que valores negativos señalan condiciones más secas. En general, un SPI menor a -1 indica sequía moderada, menor a -1.5 sequía severa y menor a -2 sequía extrema. Por su estandarización, el SPI es comparable entre diferentes regiones y climas, lo cual lo ha convertido en un estándar recomendado por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) para el monitoreo de sequías.

3.1.2 Índice Estandarizado de Precipitación y Evapotranspiración (SPEI)

El Índice Estandarizado de Precipitación y Evapotranspiración (SPEI, por sus siglas en inglés: Standardized Precipitation Evapotranspiration Index) es un indicador diseñado para complementar y ampliar la información que proporciona el SPI, incorporando no solo las anomalías de precipitación, sino también el efecto de la temperatura y, en consecuencia, de la demanda atmosférica de agua. Fue desarrollado por Vicente-Serrano et al. (2010) como respuesta a la necesidad de contar con un índice sensible a las condiciones de cambio climático, en las cuales el aumento de la temperatura global intensifica los procesos de evapotranspiración y, por tanto, modifica el balance hídrico.

El SPEI se basa en la serie de precipitación acumulada menos la evapotranspiración potencial (ET_o). Esta diferencia ($P - ET_o$) representa el balance climático entre la oferta y la demanda de agua. Posteriormente, al igual que en el SPI, la serie resultante se ajusta a una distribución de probabilidad (log-logística) y se estandariza para obtener un índice comparable en el tiempo y entre regiones (Vicente-Serrano et al., 2010).

La principal fortaleza del SPEI es que permite evaluar no solo sequías meteorológicas (déficit de precipitación), sino también sequías agrícolas e hidrológicas asociadas al aumento de la evapotranspiración por temperaturas elevadas. Esto lo hace especialmente útil en contextos de calentamiento global, donde la reducción de la humedad del suelo y el estrés hídrico en cultivos puede ocurrir incluso con precipitaciones cercanas a lo normal, debido a una mayor evaporación (Vicente-Serrano et al., 2010).

Al igual que el SPI, el SPEI puede calcularse en múltiples escalas temporales, lo que lo convierte en una herramienta versátil para diferentes sectores. Sus valores se interpretan de manera similar: negativos indican déficit hídrico y sequía, mientras que positivos reflejan condiciones húmedas. Por ejemplo, un SPEI menor a -1 indica sequía moderada, menor a -1.5 sequía severa y menor a -2 sequía extrema.

3.2 Series de indicadores de sequía

Las series de indicadores de sequía deben evaluarse para ventanas temporales móviles que recorren toda la longitud de la serie simulada. Esas ventanas se definen típicamente en meses. Es usual usar ventanas de 3, 6 o 12 meses para caracterizar las variables cuya estadística produce un determinado valor del indicador de sequía seleccionado. En la Figura 50, se presentan las series temporales del SPI-12 (arriba) y del SPEI-12 (abajo) calculados a partir de la información climática del clima base en un punto de la malla de estaciones virtuales, con ventanas temporales móviles de 12 meses. Ambos índices muestran una evolución similar, con oscilaciones entre condiciones húmedas (valores positivos) y secas (valores negativos). Sin embargo, se observa que el SPEI presenta una mayor amplitud en los eventos extremos, alcanzando valores cercanos a ± 4 , mientras que el SPI raramente supera ± 3 . Esto refleja la influencia de la evapotranspiración potencial en el cálculo del SPEI, lo que intensifica la señal de sequía bajo condiciones de mayor demanda atmosférica de agua. En términos generales, las sequías de mayor intensidad se concentraron en episodios específicos dentro de la serie, mientras que en otros periodos predominaron condiciones húmedas, evidenciando la marcada variabilidad climática de la región.

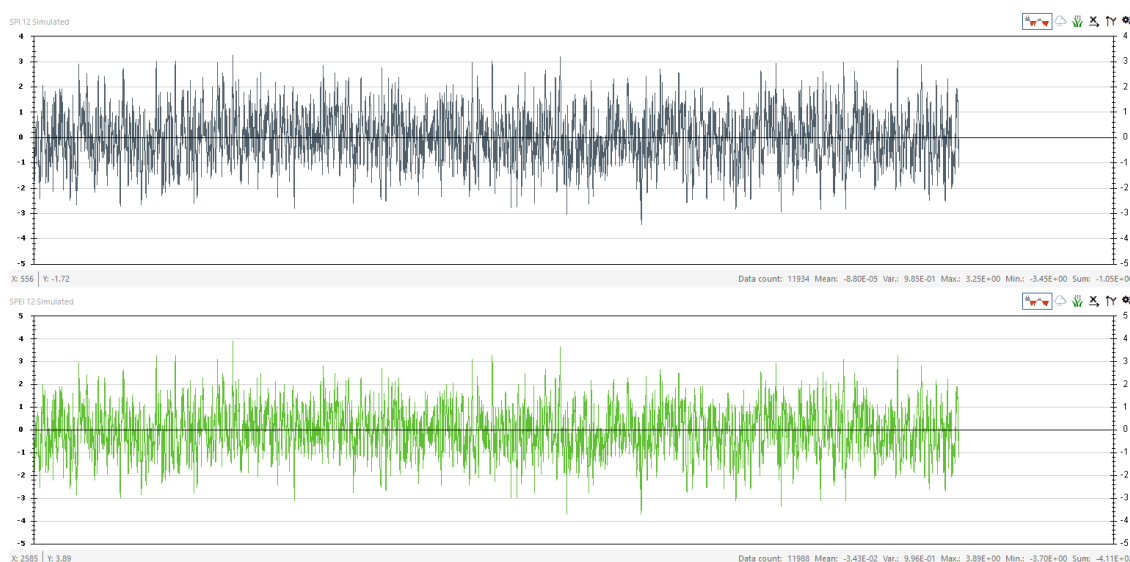


Figura 50. Índice SPI calculado a 12 meses (arriba), y SPEI calculado a 12 meses (abajo) para una ubicación arbitraria. Clima base. Tomado del programa DroughtPro.

En la Figura 51 se presentan las curvas de severidad acumulada de sequía para los mismos índices SPI-12 (arriba) y SPEI-12 (abajo). Estas curvas representan la integración de las series de los indicadores, permitiendo visualizar el efecto acumulado en el tiempo de la persistencia o no de condiciones húmedas o secas. Se observa que, aunque ambos índices muestran patrones similares, el SPEI tiende a reflejar descensos más pronunciados y prolongados, lo que evidencia una mayor severidad de las sequías cuando se incorpora el efecto de la evapotranspiración potencial. Esto resalta la utilidad del SPEI frente al SPI para identificar condiciones de sequía bajo escenarios de cambio climático, en los que las temperaturas más altas intensifican el déficit de humedad disponible en el suelo.



Figura 51. Curva de severidad acumulada para SPI-12 (arriba) y SPEI-12 (abajo) para una ubicación arbitraria. Clima base. Tomado del programa DroughtPro.

3.3 Identificación de eventos de sequía

Los indicadores de sequía meteorológica son ampliamente utilizados para identificar eventos, al detectar condiciones de humedad por debajo de la media. Los indicadores pueden definir la *duración* y la *severidad* de los eventos de sequía. Las fechas de inicio y terminación establecen el período de duración en el que un indicador de sequía está continuamente por debajo de un nivel crítico predefinido (a menor valor del indicador, más intensa la sequía). La severidad de una sequía denota la deficiencia acumulativa de un parámetro de sequía por debajo de un umbral entre las fechas de iniciación y terminación. La relación entre severidad y duración es la *intensidad* de la sequía (Mishra & Singh, 2010). Estos conceptos se muestran de forma esquemática en la Figura 52.

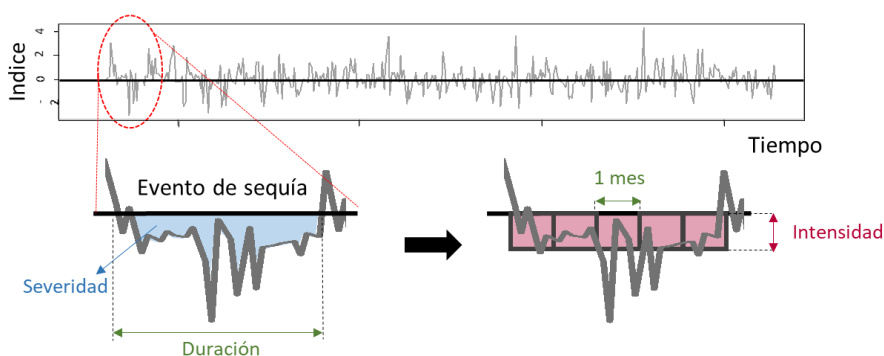


Figura 52. Esquema de indicadores de sequía y conceptos de severidad, duración e intensidad de eventos en la serie.

La detección de eventos de sequía sobre una serie de indicador es un proceso relativamente simple que consiste en identificar los momentos en el tiempo, a lo largo de la serie, en que el índice se encuentra por

debajo de un valor umbral de referencia. Los indicadores estandarizados de sequía, como el SPI y el SPEI, pueden compararse entre sí. La sequía caracterizada aplicando estos indicadores, se puede clasificar de acuerdo con lo presentado en la Tabla 15.

Tabla 15. Clasificación de sequías de acuerdo con el valor de indicadores estandarizados.

Clase de sequía	Valor del Indicador
No ocurre sequía	Mayor a 0
Leve	Entre -1 y 0
Moderada	Entre -1.5 y -1
Severa	Menor a -1.5
Extrema	Menor a -2

La Figura 53 a Figura 56 muestran listados de eventos de sequía identificados en puntos arbitrariamente seleccionados dentro del modelo para Costa Rica. Cada uno de los eventos tiene un momento de inicio y de fin (que son meses en la serie, dado que el indicador se evalúa siempre en escala mensual), una duración y una severidad. En cada imagen, se presenta también el diagrama Severidad-Duración, el cual relaciona estas dos medidas para la totalidad de eventos encontrados en la serie, en cada sitio. En todos los casos, los eventos fueron seleccionados para un umbral de -2.

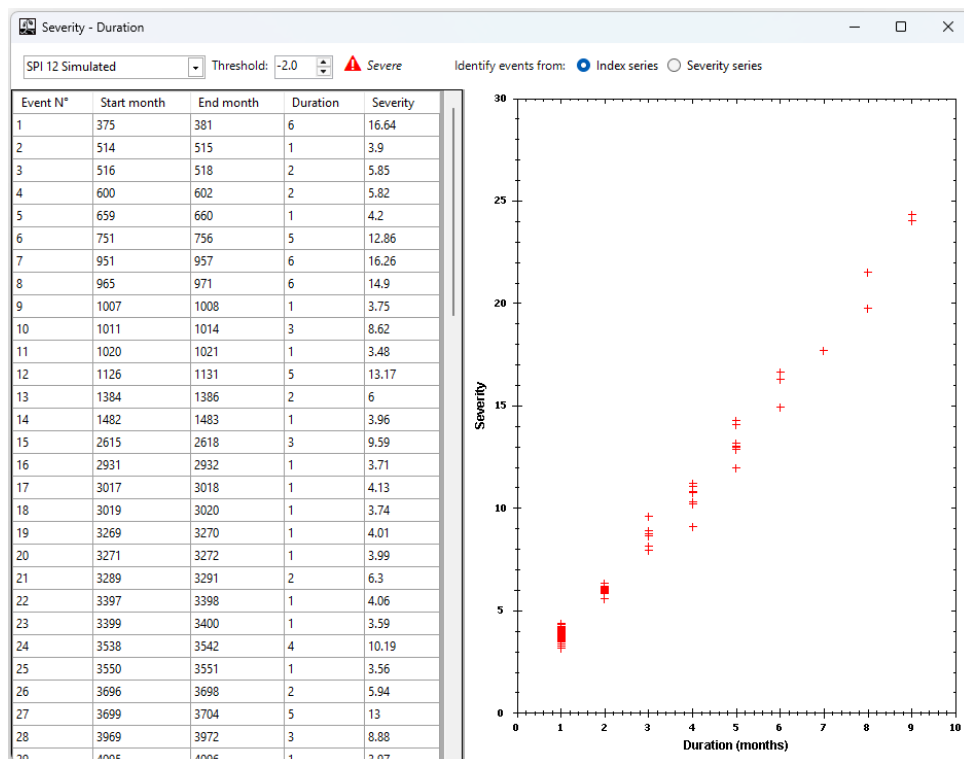


Figura 53. Listado de eventos y diagrama Severidad-Duración para sequías en el punto P70, para SPI-12. Tomado del software DroughtPro.

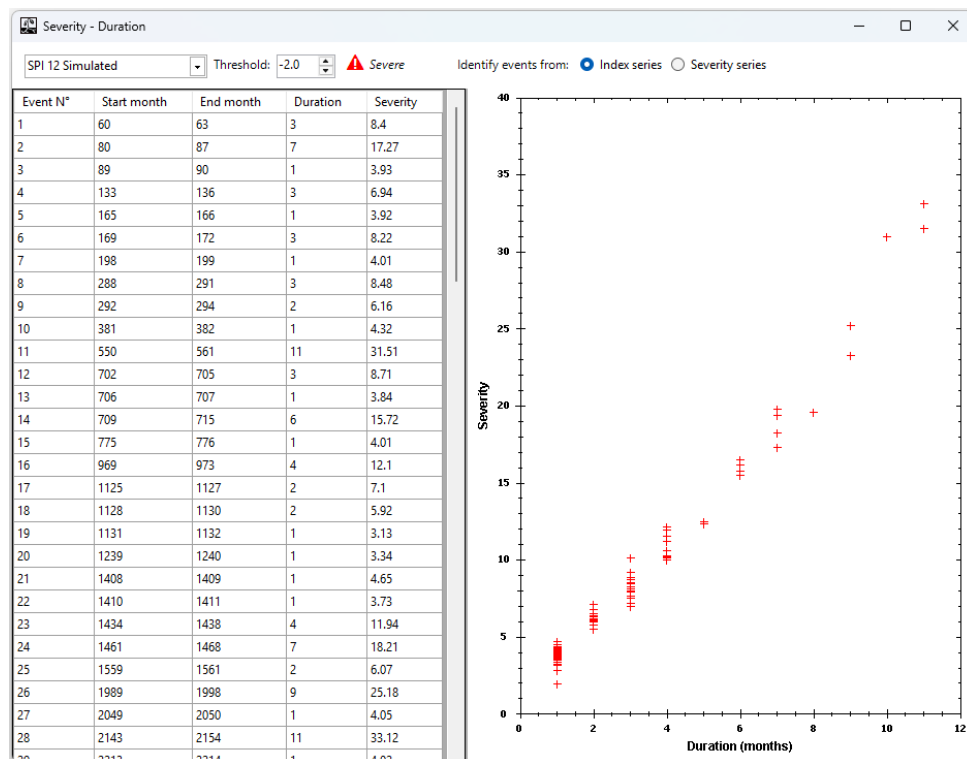


Figura 54. Listado de eventos y diagrama Severidad-Duración para sequías en el punto P96, para SPI-12. Tomado del software DroughtPro.

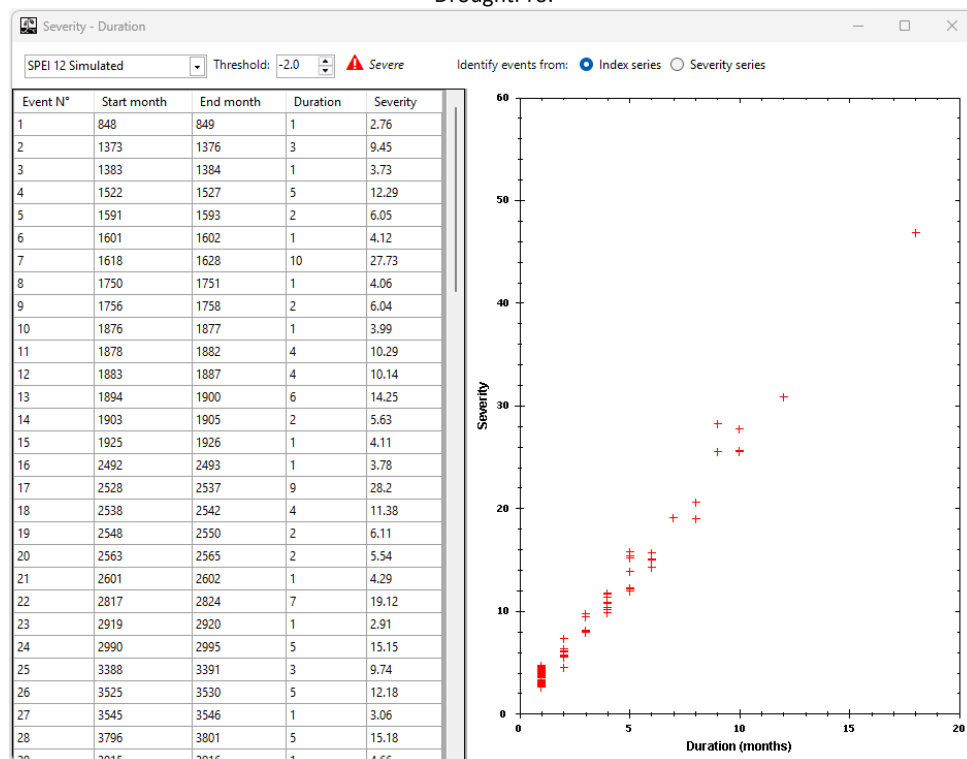


Figura 55. Listado de eventos y diagrama Severidad-Duración para sequías en el punto P52, para SPEI-12. Tomado del software DroughtPro.

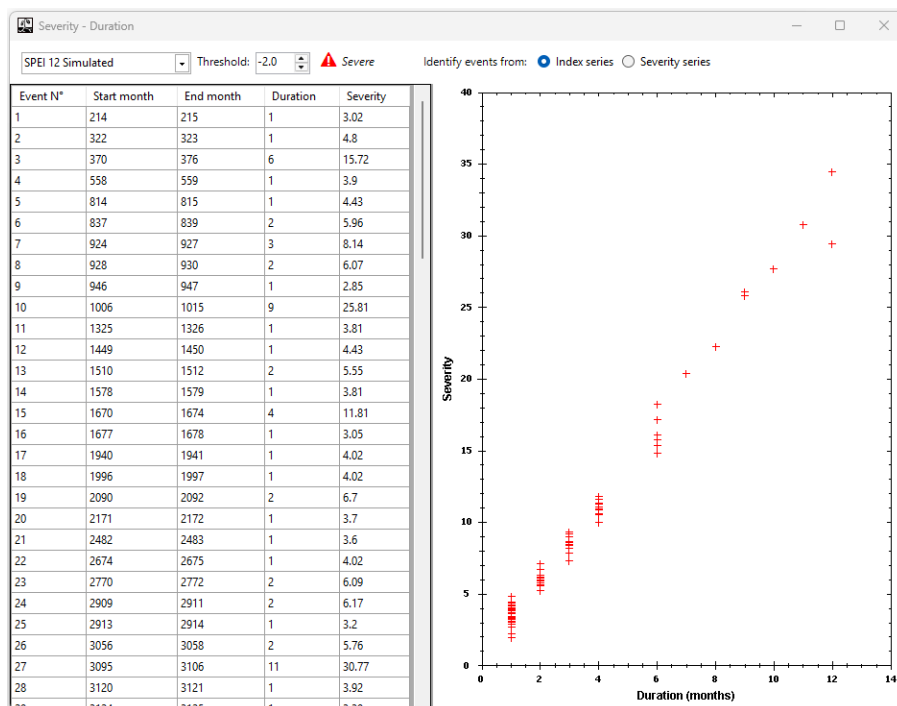


Figura 56. Listado de eventos y diagrama Severidad-Duración para sequías en el punto P35, para SPEI-12. Tomado del software DroughtPro.

Las series y diagramas Severidad-Duración presentados son para una ubicación en el modelo. Evidentemente, esta misma información está disponible para todas las ubicaciones del modelo, con lo cual es posible visualizar los valores de un indicador en momentos específicos del tiempo, en todo el país.

Las series simuladas se pueden resumir en curvas de amenaza y mapas de amenaza uniforme, los cuales dan cuenta de la tasa de excedencia de valores de los indicadores de sequía, bajo el supuesto que la ocurrencia de estos eventos en el tiempo sigue un proceso estocástico de renovación. La tasa de excedencia del valor del indicador puede evaluarse puntualmente desde la serie correspondiente, como se indica a continuación:

$$v(I) = \frac{N - 1}{t} \quad \text{Ecuación 1}$$

En donde $v(I)$ es la tasa anual de excedencia de un indicador con valor I , N es el número de veces que el valor del indicador se excede, y t es el tiempo total de la serie simulada. La tasa de excedencia es el inverso multiplicativo del periodo de retorno (i.e. $v(I) = 1/T_R$). Dado que los indicadores toman valores negativos para condiciones de sequía, y valores positivos para condiciones de exceso de humedad, es necesario multiplicar toda la serie de indicador por -1 antes de aplicar la Ecuación 1.

Como ejemplo, en la Figura 57 a la Figura 60 se presentan curvas de amenaza, en formato de *periodo de retorno vs. indicador*, para cuatro ubicaciones escogidas arbitrariamente en Costa Rica. Así mismo, la Figura 61 y Figura 62 muestran mapas de amenaza uniforme para 2, 5, 10, 25, 50, 100, 250, 500 y 1000 años de periodo de retorno, para SPI-12 y SPEI-12, respectivamente.

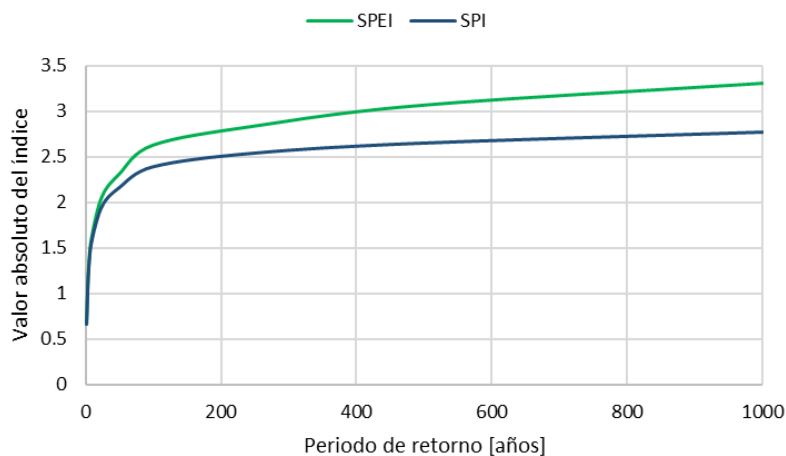


Figura 57. Curvas de amenaza en el punto P70.

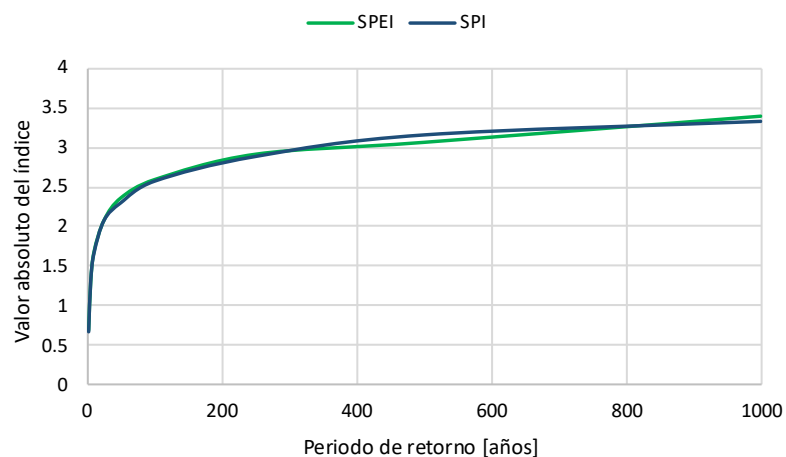


Figura 58. Curvas de amenaza en el punto P96.

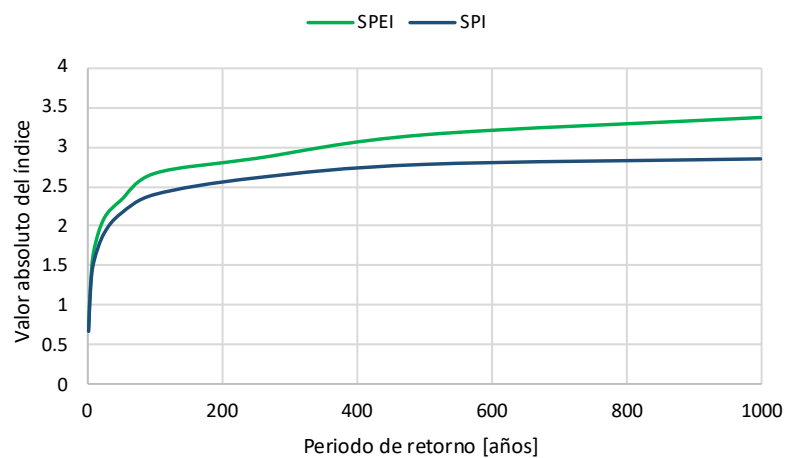
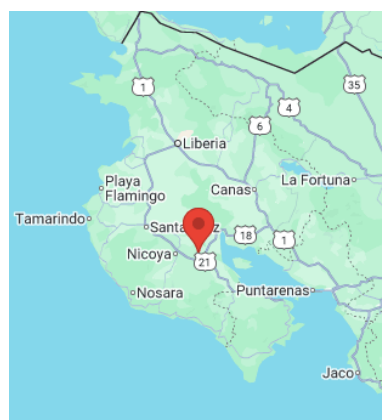


Figura 59. Curvas de amenaza en el punto P52.

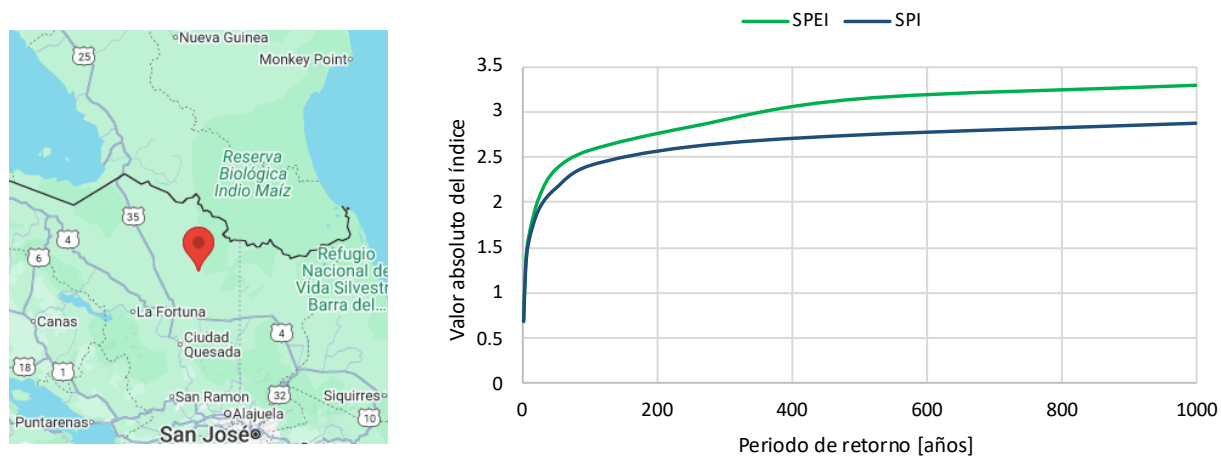


Figura 60. Curvas de amenaza en el punto P35.

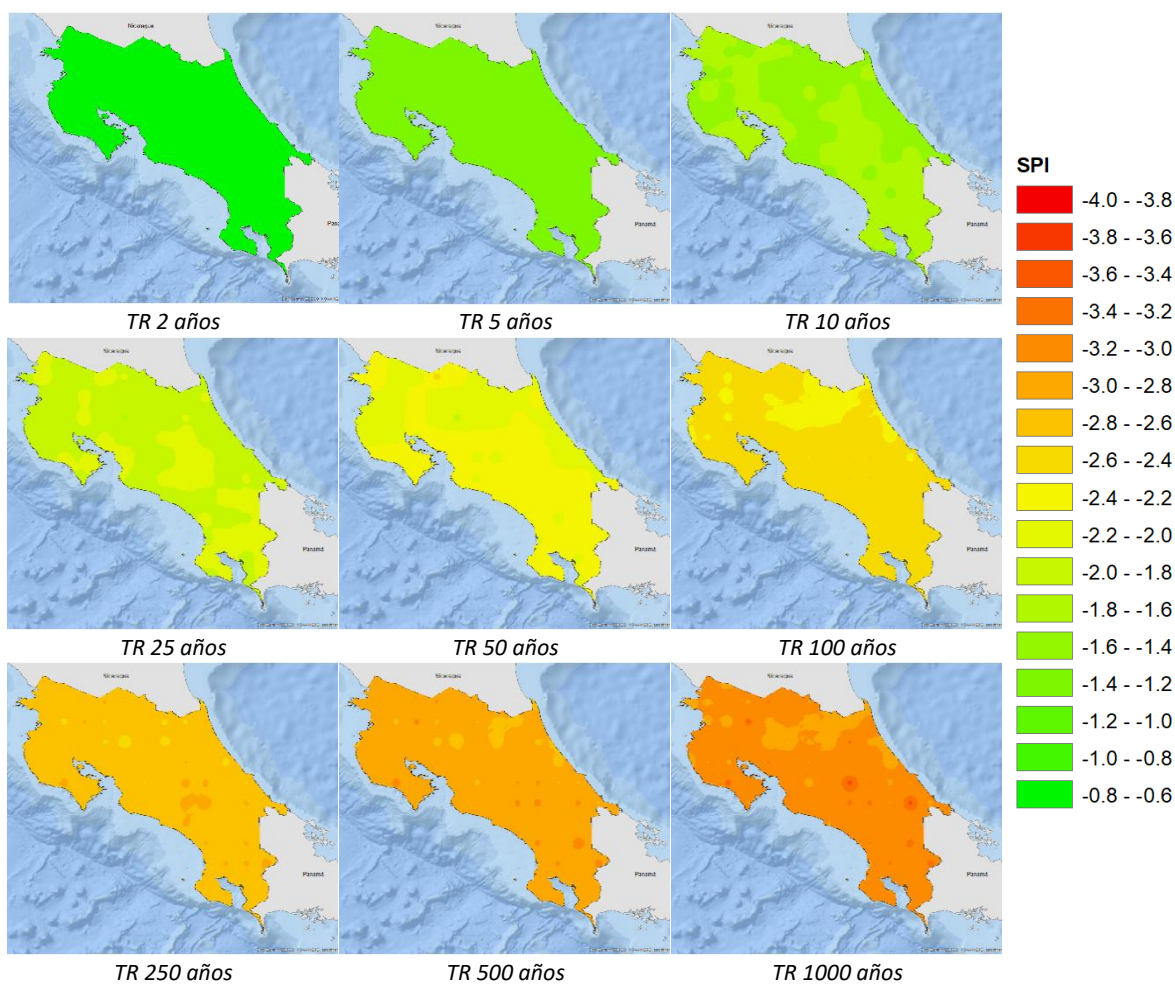


Figura 61. Mapas de amenaza uniforme para SPI-12. Clima base.

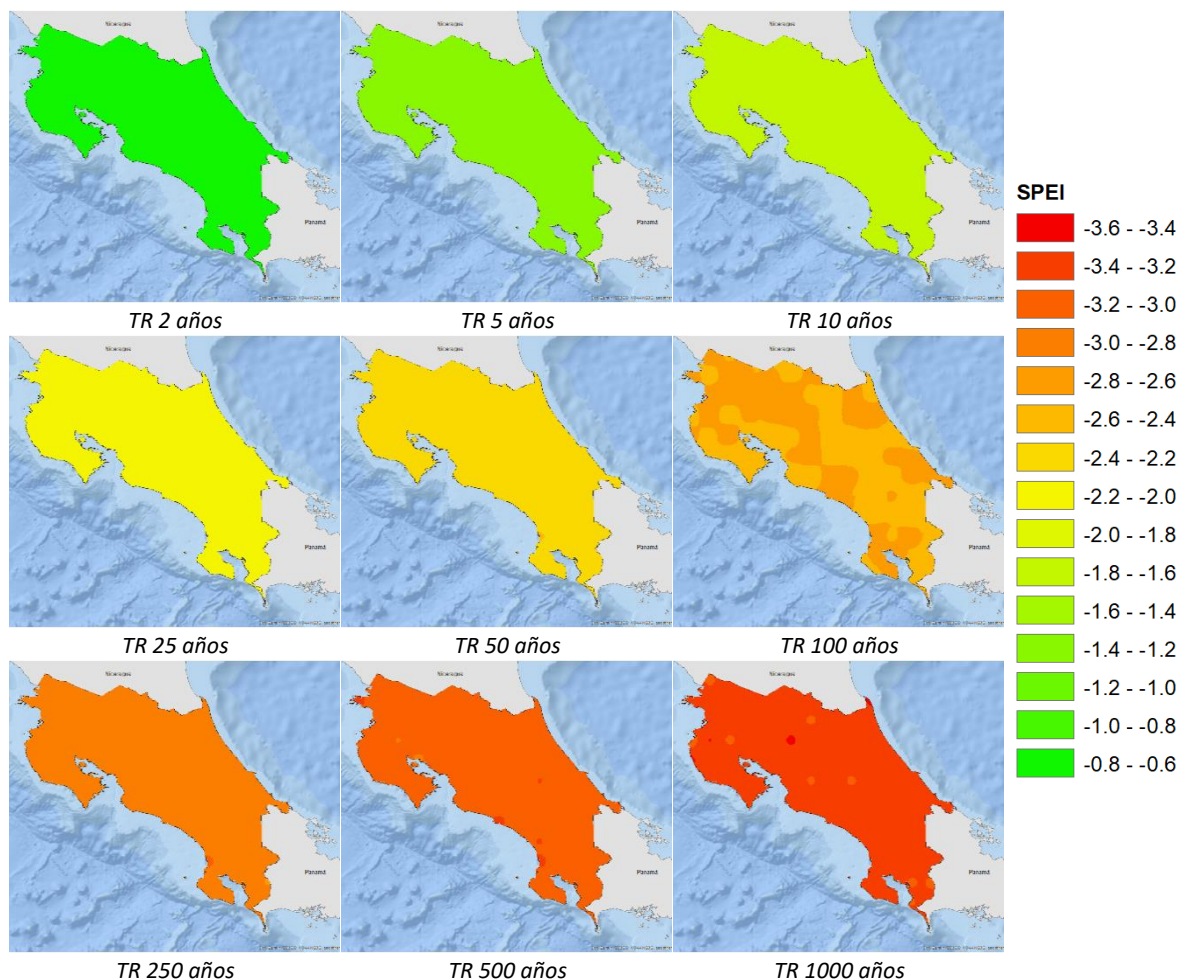


Figura 62. Mapas de amenaza uniforme para SPEI-12. Clima base.

Los mapas presentados en la Figura 61 y Figura 62 fueron calculados en condición de clima base. Esto significa que es posible encontrar este mismo tipo de resultados considerando climas futuros. Como parte de este trabajo se han definido 36 diferentes versiones del clima futuro, como se resume en la Tabla 14, considerando diferentes modelos GCM, trayectorias de emisiones y años objetivo en el futuro. La totalidad de los resultados de amenaza por sequía, para todos estos climas, se incluyen en el Dataset del proyecto. No se incluyen en este informe para no hacerlo excesivamente extenso. No obstante, con el fin de ilustrar estos resultados, la Figura 63 presenta los mapas de amenaza uniforme para SPEI-12 en Costa Rica, considerando el clima definido como: *modelo EC-Earth3 SSP5-8.5 año 2050*.

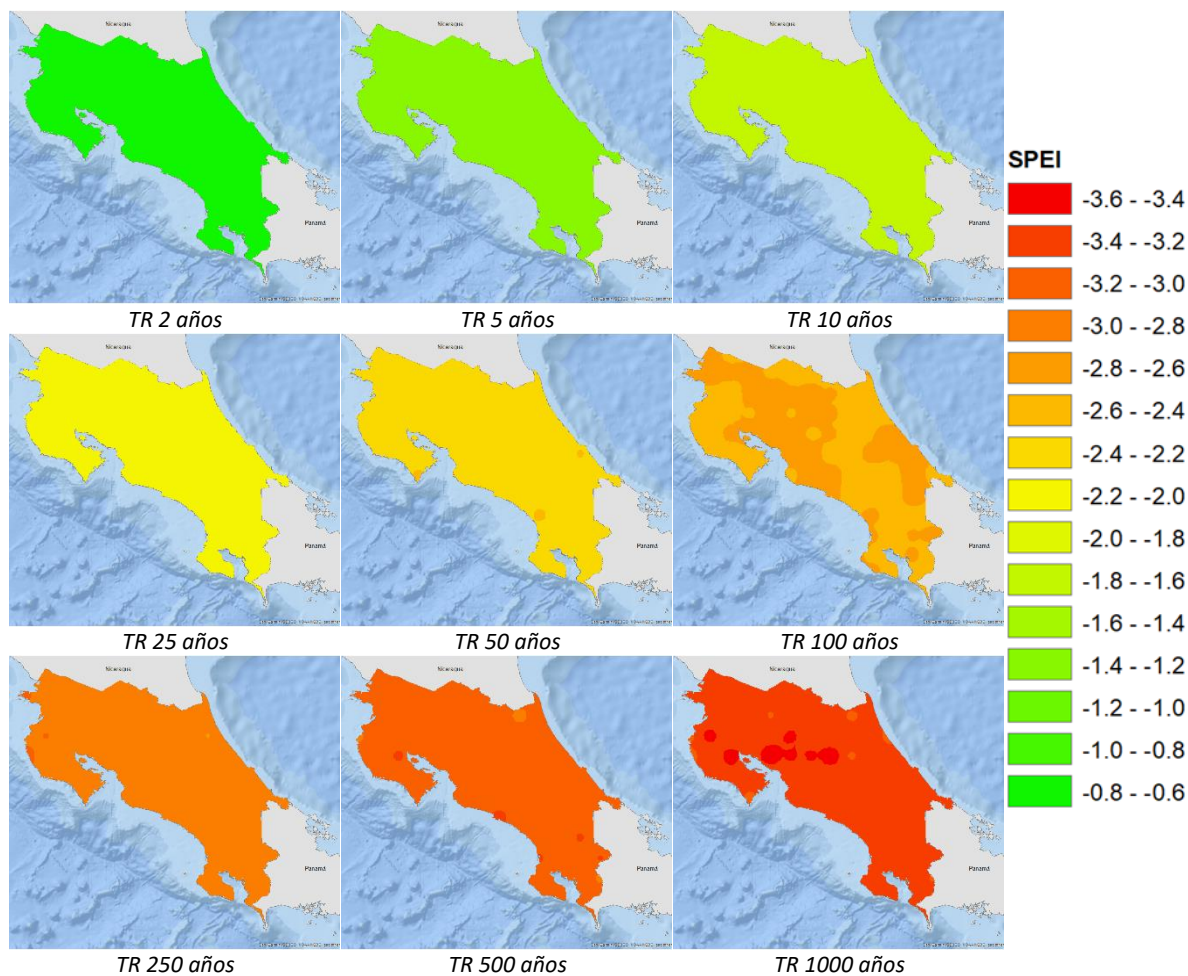


Figura 63. Mapas de amenaza uniforme para SPEI-12. Modelo EC-Earth3 SSP5-8.5 año 2050.

4 AMENAZA DE INUNDACIÓN

La amenaza de inundación se desarrolla como resultado de un exceso de precipitación, lo cual puede derivar, por una parte, en una sobresaturación del suelo, generando condiciones de anegamiento del terreno (inundación pluvial), así como un forzamiento excesivo sobre los cauces de ríos y quebradas que conlleve su desbordamiento (inundación fluvial). Otros fenómenos relacionados, como las avenidas torrenciales, o la socavación de los cauces de los ríos, no están incluidos dentro del alcance de este trabajo. La inundación costera es un fenómeno con un enfoque de modelación diferente que se presenta en la sección 5. Los detalles metodológicos de la evaluación de la amenaza por inundación se incluyen en el Anexo A.3.

En este capítulo se incluye adicionalmente un modelo hidráulico especial para el río Pirro, en el cantón de Heredia, que se presenta en la sección 4.5. Esto debido a que, dadas las características y resolución propias del Proyecto Estratégico, se requiere de un modelo de inundación a mayor escala. Se seleccionó el río Pirro, cuyo cauce transita a través del cantón de Heredia, de manera conjunta con el Grupo Técnico de Trabajo, quienes manifestaron su interés de conocer la modelación en este cause en particular y su importancia para la municipalidad. El co-desarrollo del modelo, desde su definición, permitió modificar el alcance, inicialmente planteado por el consultor para el río Virilla, al río Pirro, de mayor relevancia para Heredia.

4.1 Alcance del modelo de inundación

Como se menciona en el Informe de Inicio de esta consultoría, el alcance de la modelación de inundación cubre inundación pluvial e inundación fluvial, tanto a nivel nacional con el fin de servir como insumo para la evaluación del riesgo en los proyectos Operacionales 1, 2 y 3, así como a nivel del cantón de Heredia para el proyecto Estratégico. Si bien los fenómenos de inundación cubiertos permiten describir de forma amplia el riesgo, existen limitaciones sobre las que conviene hacer claridad.

En el caso particular de las inundaciones fluviales, se incluye dentro del alcance del proyecto GRMA Costa Rica únicamente lo relacionado con inundación lenta por desbordamiento de ríos. Es decir, que otros fenómenos, y en particular los flujos torrenciales, no están incluidos en el alcance de este trabajo. La modelación de flujos torrenciales requiere de elementos adicionales de modelación, no incluidos en el enfoque metodológico presentado en el Informe de Inicio y en el Anexo A.3, y que tienen que ver con aspectos como el caudal de mezcla causado por lluvias torrenciales en cuencas, la reología de ese caudal de mezcla y su hidráulica, así como su impacto en estructuras fundamentales como los puentes, en donde, por ejemplo, el fenómeno de socavación local de pilas contribuye de forma significativa al impacto final causado. Abordar un fenómeno de esta naturaleza requiere de un enfoque metodológico especial y muy diferente al adoptado en este trabajo.

Por otra parte, también como se indicó en el Informe de Inicio de esta consultoría, el abordaje metodológico de la inundación fluvial por desbordamiento de ríos es diferente para el modelo nacional (aplicable a los proyectos Operacionales 1, 2 y 3) comparado con el modelo de Heredia (aplicable al proyecto Estratégico). La razón es esencialmente la escala del modelo. En el caso del modelo nacional, se busca cubrir todo el territorio de Costa Rica, lo cual implica modelar 34 cuencas hidrográficas y sus principales redes de drenaje. Lograr esto en los tiempos previstos para la ejecución de estos trabajos,

implica concesiones y simplificaciones sin las cuales no sería posible. Por lo tanto, la modelación a nivel nacional se realiza aplicando modelos unidimensionales de los tramos de los cauces considerados, los cuales involucran la geometría de los ríos por medio de secciones transversales, resolviendo de forma aproximada ecuaciones de balance de energía para aproximar niveles dentro de los cauces. Si bien este es un enfoque simplificado desde el punto de vista hidráulico, su alta eficiencia computacional viabiliza su uso de cara a lograr los resultados de modelación esperados.

Por su parte, el modelo de inundación para el cantón de Heredia, dada la escala geográfica reducida, permite dar un salto cualitativo localmente a un modelo bidimensional, el cual describe de mejor manera la hidráulica del desbordamiento fuera del canal. Este es un modelo mucho más demandante computacionalmente, pero que, ante la escala geográfica reducida del cantón, permite una descripción adecuada de la inundación en un tiempo razonable.

4.2 Insumos para la modelación

El principal insumo para la modelación de la amenaza por inundación son las series meteorológicas simuladas que se presentan en la sección 2. Estas constituyen el forzamiento meteorológico tanto del clima base como de los posibles climas futuros considerando el efecto modificador del cambio climático. La evaluación de la amenaza por inundación involucra además otras capas de información, que permiten conformar los modelos de evaluación, de acuerdo con las metodologías presentadas en la sección 6.3 del Informe de inicio.

El Modelo Digital de Elevación (DEM) permite definir rutas de escorrentía y zonas bajas susceptibles a inundarse. La cobertura del suelo se vincula de manera directa con la generación de escorrentía, la infiltración y la evapotranspiración; esta relación se cuantifica mediante el Número de Curva (CN) (*Soil Conservation Service*), que establece la respuesta hidrológica potencial de la superficie ante eventos de lluvia intensa.

Las cuencas hidrográficas, así como la red hídrica, constituyen los canales naturales por donde fluye el agua hacia los puntos de descarga, y su delineación es esencial para modelar la concentración del flujo y el potencial de acumulación en zonas bajas. Los datos geomorfométricos proporcionan información clave sobre pendientes, curvaturas y órdenes de red, lo que permite estimar la velocidad del flujo, el tiempo de concentración y el potencial de erosión o inundación.

4.2.1 Modelo Digital de Elevación (DEM)

El modelo digital de elevación (DEM) utilizado en este estudio se obtuvo del producto ALOS PALSAR Terrain Corrected (RTC) de alta resolución, con un tamaño de píxel de 12,5 metros (Alaska Satellite Facility, 2014; Gis & Beers, 2018). Este DEM forma parte del conjunto de datos procesados por el Alaska Satellite Facility (ASF) mediante la aplicación de Radiometric Terrain Correction (RTC) a escenas SAR (Synthetic Aperture Radar) del satélite ALOS de la Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial (JAXA), recopiladas entre los años 2006 y 2011. La Figura 64 presenta el DEM de toda Costa Rica. Su relativa alta resolución facilita el análisis de pendientes, redes de drenaje y otras características geomorfológicas esenciales para la modelación.

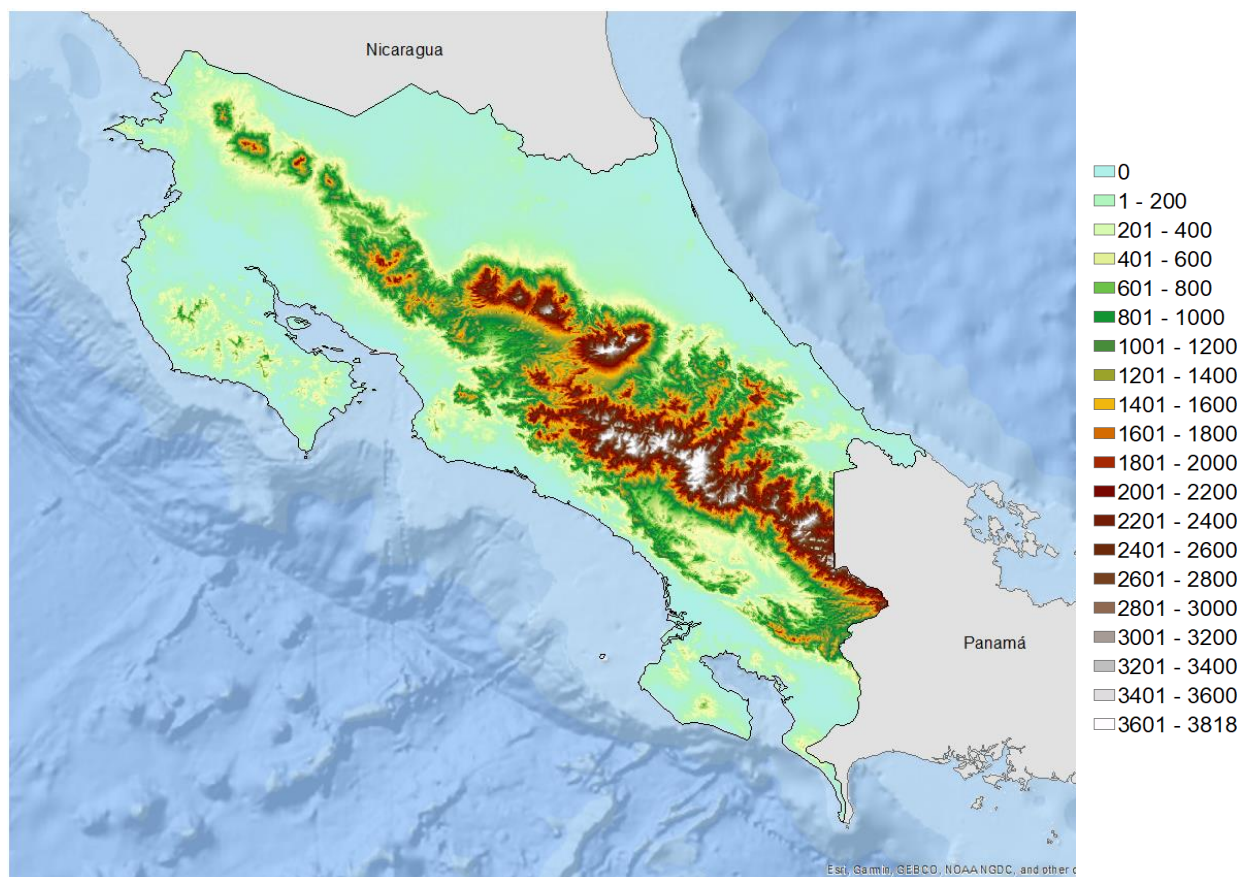


Figura 64. Modelo digital de elevación del terreno (DEM). La escala muestra altitud en metros sobre el nivel del mar.

El DEM es un insumo importante para la definición de cuencas, red hídrica y parámetros geomorfométricos. En otras palabras, establece las condiciones de drenaje necesarias para la modelación de la inundación fluvial. Así mismo, permite definir zonas susceptibles de anegamiento del terreno, de acuerdo con la clasificación de tipos de terreno incluida en el Anexo A.3. La Figura 65 muestra la clasificación del Potencial de Acumulación Topográfica (PAT) obtenido a nivel nacional.

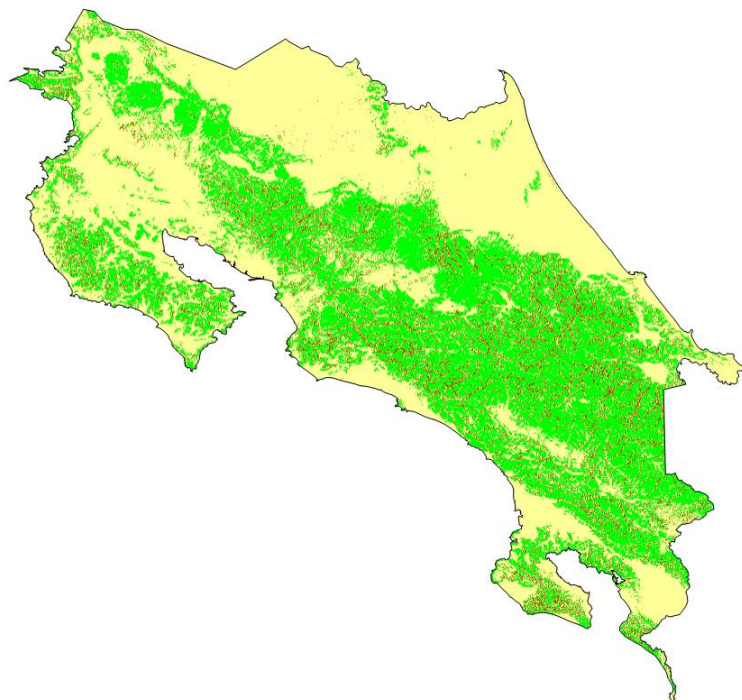


Figura 65. Potencial de Acumulación Topográfica (PAT). Rojo = Alto. Amarillo = Medio. Verde = Bajo.

4.2.2 Cobertura del suelo

Se utilizó un mapa actualizado del uso del suelo en Costa Rica, elaborado por Vargas (2020) y presentado en GitHub como una capa *raster* base para 2020. El producto fue generado a partir de la combinación de múltiples fuentes de información —incluyendo cubiertas boscosas, áreas agrícolas y límites de conservación— a través de un flujo de trabajo reproducible en R (remuestreo, rasterización, combinación, reclasificación y análisis estadístico). Este mapa refleja con una alta resolución la cobertura del suelo (ver Figura 66).

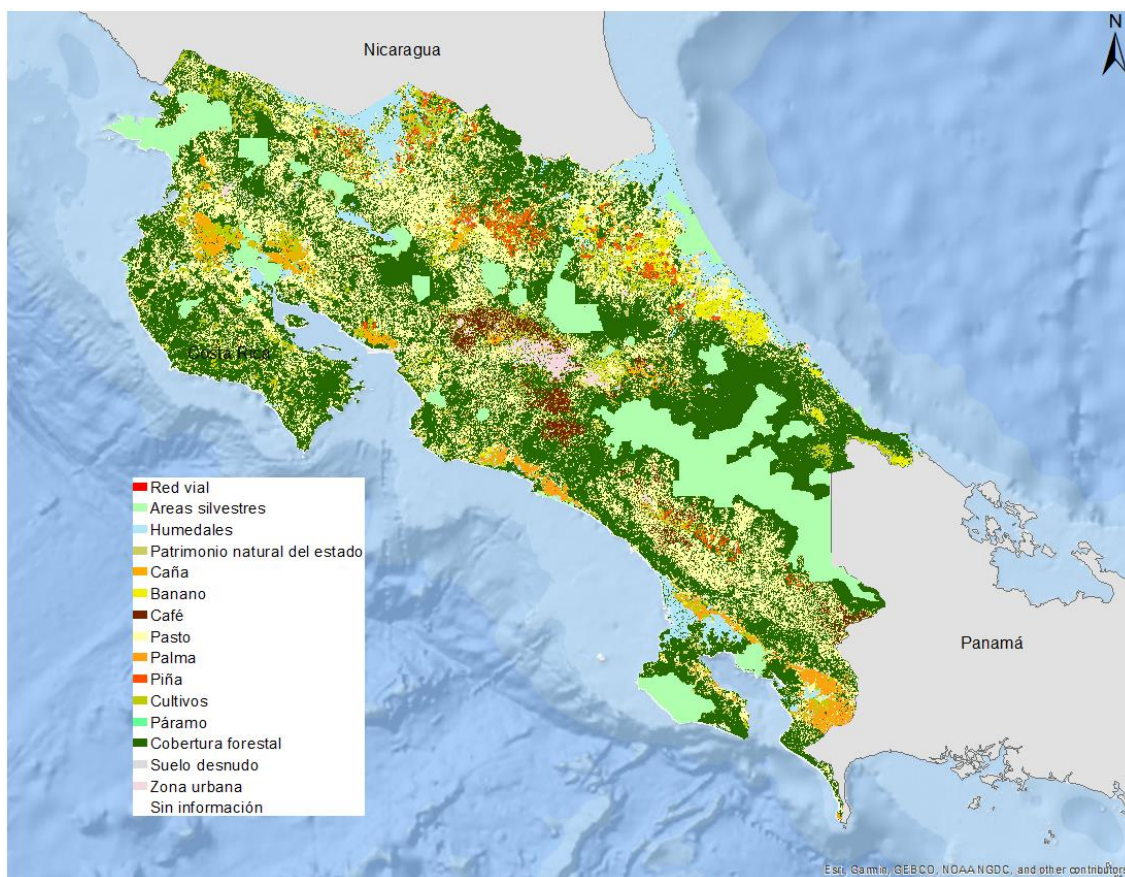


Figura 66. Cobertura del suelo (Vargas, 2020).

4.2.3 Número de curva

El Número de Curva (CN) es un parámetro hidrológico utilizado para estimar la escorrentía superficial generada por eventos de precipitación en cuencas hidrográficas. Este índice fue desarrollado por el *Soil Conservation Service* de los Estados Unidos (SCS), ahora parte del NRCS (*Natural Resources Conservation Service*), y se presenta en el informe técnico TR-55 (USDA, 1986).

El CN se basa en una ecuación empírica que relaciona la precipitación total (P), el escurrimiento directo (Q) y la retención potencial máxima (S) de una cuenca. La ecuación fundamental es:

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \quad \text{Ecuación 2}$$

En donde Q es la escorrentía directa (mm), P es la precipitación total (mm) y S es la retención potencial máxima (mm), que se define como:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad \text{Ecuación 3}$$

El CN varía entre 30 y 100, donde:

- CN = 30 corresponde a condiciones de alta infiltración (por ejemplo, suelos arenosos con vegetación densa).
- CN = 100 indica condiciones de escurrimiento total (por ejemplo, superficies impermeables como pavimentos o techos).

La determinación del CN se basa en cuatro factores principales:

- Grupo Hidrológico de Suelo (GHS): Clasificación de los suelos según su capacidad de infiltración.
- Uso y Tratamiento del Terreno: Tipo de cobertura del suelo (bosque, pasto, áreas urbanas, etc.).
- Condición Hidrológica del Terreno: Estado de la vegetación y manejo del suelo (bueno, regular, pobre).
- Condición de Humedad Antecedente: Nivel de humedad del suelo antes del evento de lluvia (seca, media, húmeda).

La combinación de estos factores permite asignar un CN específico a cada área, facilitando la estimación del escurrimiento superficial y la planificación de medidas de manejo de aguas pluviales. En la Tabla 16 se presentan los valores de CN asignados a cada una de las clases del mapa de cobertura. Estos valores se han determinado siguiendo la metodología establecida en el TR-55 del NRCS (USDA, 1986), que considera los factores previamente mencionados. La asignación del CN es fundamental para modelar el escurrimiento superficial y evaluar el riesgo de inundaciones, ya que refleja la capacidad de infiltración y el potencial de escurrimiento de cada tipo de cobertura.

Tabla 16. Número de curva asignado

Cobertura del suelo	CN estimado	Descripción	Fuente
Red vial (pavimentada)	98	Carreteras pavimentadas se consideran superficies totalmente impermeables; CN alto refleja escurrimiento casi total.	TR-55, tabla de áreas impermeables urbanas
Áreas Silvestres Protegidas (bosque)	55	Bosque en buen estado tiene una elevada capacidad de infiltración; CN moderado-bajo.	TR-55, valores “ <i>Woods good condition</i> ” Manual de Aguas Pluviales de Minnesota
Humedales	98	Suelen estar saturados o impermeables, generando escurrimiento inmediato; se aproximan a aguas abiertas.	TR-55 <i>land use open water</i> CN = 100 Transporte WA (aproximado)
Patrimonio Natural del Estado	55	Similar a bosque en buen estado — alta infiltración, vegetación bien conservada.	Igual que bosque (áreas protegidas)
Caña (caña de azúcar)	78	Cultivos en hileras buenas condiciones tienen CN típicos ~78.	TR-55, “ <i>Row crops, good</i> ” Directrices NRCS
Banano	78	Similar cultivo en hileras en buena condición; se asigna valor análogo a cultivos <i>row good</i> .	Análogo al row crops good (TR-55)
Café (arbusto)	72	Similar a cultivos arbustivos; se usa valor para “woods grass combo” poor–fair ~72–79.	TR-55 <i>woods/grass combination poor–fair</i> Manual de Aguas Pluviales de Minnesota
Pasto	74	Pasto en buena condición tiene CN ~74	TR-55 <i>pasture good</i> (74) Directrices NRCS

Cobertura del suelo	CN estimado	Descripción	Fuente
Palma (palma africana)	74	Similar a cultivos arbustivos o pasto; se asigna por analogía a pasto <i>good</i> .	Basado en pasto <i>good</i> (TR-55)
Piña	78	Cultivo en hileras similar a caña; valor análogo 78.	Basado en <i>row crops good</i> (TR-55)
Cultivos (genérico)	78	<i>Row crops good typical</i> para cultivos agrícolas bien mantenidos.	TR-55 <i>row crops good</i> Directrices NRCS
Páramo	55	Vegetación densa, alta infiltración; similar a bosques o zonas protegidas.	Como bosque <i>good</i> / áreas protegidas
Cobertura forestal	55	Bosque en buena condición, alta capacidad de infiltración.	TR-55 <i>woods good</i> Manual de Aguas Pluviales de Minnesota
Suelo desnudo	77	Suelo expuesto sin vegetación; valor de “ <i>newly graded</i> ” <i>pervious</i> en TR-55.	TR-55 <i>newly graded pervious</i> 77 Manual de Aguas Pluviales de Minnesota
Zonas urbanas (residencial densa)	85	Área con ~65 % superficie impermeable; valor típico residencial de lotes pequeños.	TR-55 <i>residential 65% impervious</i> = 85 Manual de Aguas Pluviales de Minnesota

Red vial (pavimentada) – CN: 98

Las carreteras pavimentadas se consideran superficies completamente impermeables, lo que genera un escurrimiento casi total del agua de lluvia. Según el TR-55, las superficies pavimentadas tienen un CN de 98, independientemente del grupo de suelo, debido a su alta impermeabilidad y escasa capacidad de infiltración (USDA, 1986).

Áreas Silvestres Protegidas (bosque) – CN: 55

Los bosques en buen estado presentan una alta capacidad de infiltración debido a la densa cobertura vegetal y la presencia de hojarasca que facilita la absorción del agua. El TR-55 asigna un CN de 55 para bosques en buena condición, lo que indica una moderada capacidad de escurrimiento (USDA, 1986).

Humedales – CN: 98

Los humedales suelen estar saturados o ser impermeables, lo que genera un escurrimiento inmediato de las aguas pluviales. De acuerdo con el TR-55, los humedales se clasifican como cuerpos de agua abiertos, asignándoles un CN de 98 (USDA, 1986).

Patrimonio Natural del Estado – CN: 55

Las áreas protegidas por el Estado, similares a los bosques en buen estado, presentan una alta capacidad de infiltración debido a la conservación de la vegetación y la ausencia de perturbaciones significativas. Por lo tanto, se les asigna un CN de 55, conforme a la clasificación del TR-55 para bosques en buena condición (USDA, 1986).

Caña (caña de azúcar) – CN: 78

Los cultivos en hileras, como la caña de azúcar, en buenas condiciones presentan una cobertura del suelo que permite una moderada infiltración del agua. El TR-55 asigna un CN de 78 para cultivos en hileras en buena condición, lo que refleja una capacidad de escurrimiento intermedia (USDA, 1986).

Banano – CN: 78

El cultivo de banano, al igual que otros cultivos en hileras en buenas condiciones, presenta una cobertura del suelo que facilita la infiltración del agua. Por analogía con el CN asignado a la caña de azúcar, se le asigna un CN de 78, según las directrices del NRCS (USDA, 1986).

Café (arbusto) – CN: 72

Los cultivos arbustivos, como el café, en condiciones de vegetación moderada presentan una capacidad de infiltración intermedia. El TR-55 asigna un CN de 72 para combinaciones de bosques y pastizales en condiciones pobres a regulares, lo que refleja una moderada capacidad de escurrimiento (USDA, 1986).

Pasto – CN: 74

El pasto en buenas condiciones presenta una cobertura del suelo que permite una infiltración eficiente del agua. El TR-55 asigna un CN de 74 para pastizales en buena condición, indicando una capacidad de escurrimiento moderada (USDA, 1986).

Palma (palma africana) – CN: 74

La palma africana, al igual que el pasto en buenas condiciones, presenta una cobertura del suelo que facilita la infiltración del agua. Por analogía con el CN asignado al pasto, se le asigna un CN de 74, según las directrices del NRCS (USDA, 1986).

Piña – CN: 78

El cultivo de piña, al igual que otros cultivos en hileras en buenas condiciones, presenta una cobertura del suelo que permite una moderada infiltración del agua. Por analogía con el CN asignado a la caña de azúcar, se le asigna un CN de 78, según las directrices del NRCS (USDA, 1986).

Cultivos (genérico) – CN: 78

Los cultivos agrícolas bien mantenidos, en condiciones óptimas, presentan una cobertura del suelo que permite una moderada infiltración del agua. El TR-55 asigna un CN de 78 para cultivos en hileras en buena condición, lo que refleja una capacidad de escurrimiento intermedia (USDA, 1986).

Páramo – CN: 55

El páramo, con su vegetación densa y alta capacidad de infiltración, presenta características similares a los bosques en buen estado. Por lo tanto, se le asigna un CN de 55, conforme a la clasificación del TR-55 para bosques en buena condición (USDA, 1986).

Cobertura forestal – CN: 55

La cobertura forestal en buena condición presenta una alta capacidad de infiltración debido a la densa vegetación y la presencia de hojarasca. El TR-55 asigna un CN de 55 para bosques en buena condición, lo que indica una moderada capacidad de escurrimiento (USDA, 1986).

Suelo desnudo – CN: 77

El suelo desnudo, sin vegetación, presenta una capacidad de infiltración reducida, lo que genera un mayor escurrimiento. El TR-55 asigna un CN de 77 para suelos recién nivelados y permeables, indicando una capacidad de escurrimiento elevada (USDA, 1986).

Zonas urbanas (residencial densa) – CN: 85

Las zonas urbanas residenciales densas, con aproximadamente un 65% de superficie impermeable, presentan características que influyen significativamente en el escurrimiento superficial. Según el TR-55, para áreas residenciales con una densidad de lotes de 1/8 de acre o menos (aproximadamente 500 m² por lote) y un 65% de superficie impermeable, el CN asignado es de 85. Este valor refleja una alta capacidad de escurrimiento debido a la considerable proporción de áreas impermeables, como pavimentos, techos y calles, que limitan la infiltración del agua (USDA, 1986).

En la Figura 67 se presenta el mapa de número de curva para Costa Rica. Conviene anotar que los valores presentados de CN fueron obtenidos del procesamiento de la capa de cobertura del suelo (ver Figura 66), aplicando las definiciones presentadas anteriormente.

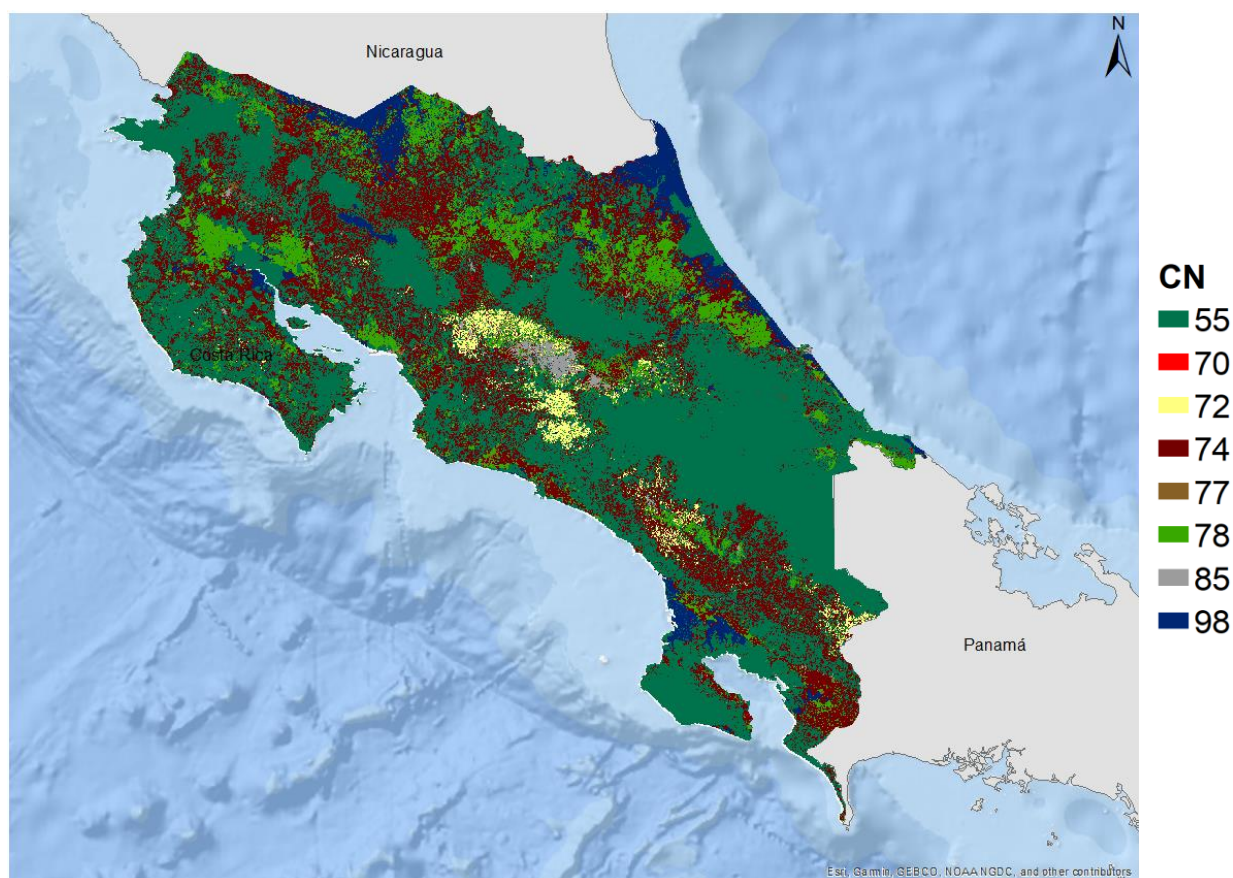


Figura 67. Número de curva.

4.2.4 Cuencas hidrográficas y red hídrica

En Costa Rica, las cuencas hidrográficas se distribuyen principalmente en tres vertientes: la del océano Pacífico, la del mar Caribe y la del río San Juan. Cada una de estas vertientes alberga múltiples cuencas que varían en tamaño, ubicación y características hidrológicas. Por ejemplo, la cuenca del río Tempisque, ubicada en la vertiente del Pacífico, es una de las más extensas y de gran importancia para la agricultura en la región (ANRCCR, 2021; INA, s.f.). A continuación, se presenta un mapa que ilustra las 34 principales cuencas hidrográficas de Costa Rica. La Figura 69 presenta la red hidrográfica de Costa Rica.



Figura 68. Cuencas hidrográficas.

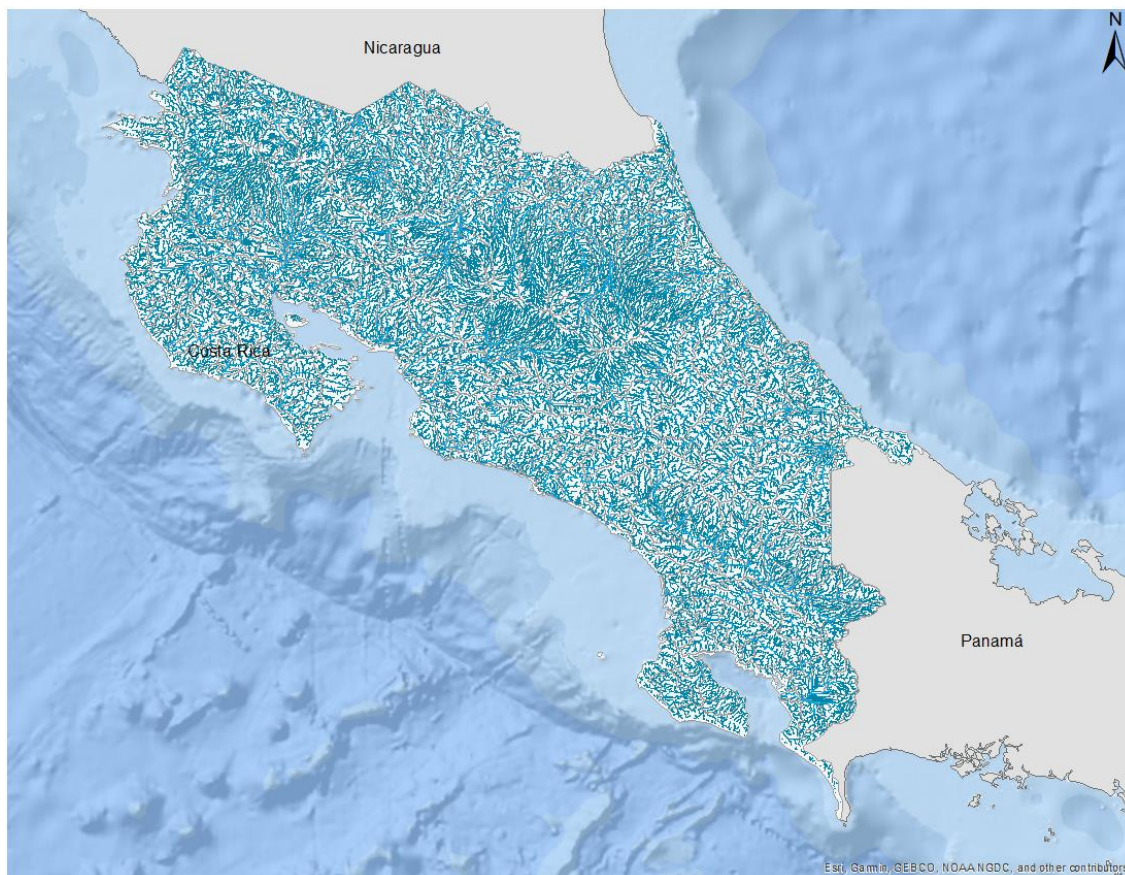


Figura 69. Red de drenaje.

En Costa Rica existe el documento *Estudio de las cuencas hidrográficas de Costa Rica*, elaborado por el Instituto Meteorológico Nacional (IMN), y presenta un análisis integral de las 34 principales cuencas hidrográficas del país. A través de una perspectiva biofísica, climatológica, geológica y socioeconómica, el estudio caracteriza cada cuenca mediante variables tales como geografía, geología, hidrogeología, susceptibilidad a deslizamientos, análisis de suelos, zonas de vida, áreas protegidas, así como aspectos demográficos, oferta y demanda de agua. Este trabajo, cuyo propósito es apoyar la planificación integrada del manejo hídrico, está dirigido especialmente a estudiantes, profesionales e investigadores interesados en la planificación, aprovechamiento, conservación y rehabilitación de los recursos naturales en las cuencas costarricenses. (IMN, 2011). En el Anexo A.4. se presenta una breve descripción de cada una de las cuencas junto con un resumen de parámetros morfométricos de interés.

4.3 Respuesta hidrológica de las cuencas

Como parte de la modelación de la amenaza por inundación, se evaluó la respuesta hidrológica de las cuencas en Costa Rica, tanto en el punto final de descarga, como en múltiples ubicaciones aguas arriba de este, con el fin de establecer variaciones en los caudales en diferentes posiciones sobre los cauces. A modo de ejemplo, se presenta en este informe los hidrogramas obtenidos para 100 eventos de alta precipitación seleccionados de entre las series meteorológicas simuladas de 1,000 años, para cuatro cuencas en Costa Rica. Los hidrogramas presentados consideran las cuencas completas, es decir, están calculados en sus

puntos finales de descarga. Resultados similares están disponibles para la totalidad de las cuencas listadas en la Figura 68, dentro del Dataset del proyecto.

4.3.1 Cuenca del río Tempisque

Según el estudio realizado por Trabado (2023) en la cuenca alta del río Tempisque, se analizaron caudales observados en la estación hidrológica Guardia, operada por el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE). Esta estación cuenta con registros diarios de caudal medio correspondientes al periodo 1981–2010. Durante dicho intervalo, se reportó un caudal medio de 26 m³/s y un caudal máximo de 903 m³/s.

Por otro lado, Espinoza-Rivera (2018) documenta que durante el paso de la tormenta Nate, en octubre de 2017, se registraron caudales estimados entre 1400 y 1550 m³/s sobre el río Tempisque, específicamente en la cuenca del río Las Palmas, una subcuenca del Tempisque. Las precipitaciones generadas por este evento corresponden a un periodo de retorno aproximado de 50 años según Espinoza-Rivera (2018).

Adicionalmente, Barquero (2019) realizó una modelación hidrológica considerando como entrada la precipitación inducida por el huracán Nate del 4 de octubre de 2017, que se encontraba en desarrollo frente a la costa caribe de Costa Rica (en la fecha indicada, Nate se encontraba en categoría de Tormenta Tropical). Barquero (2019) utilizó el software HEC-HMS y estimó un caudal máximo de 2057,2 m³/s en la subcuenca Las Palmas.

A partir de los datos climáticos simulados y la modelación hidrológica, se generaron hidrogramas sintéticos para cada una de las cuencas consideradas. Estos hidrogramas permiten representar de manera estimada los caudales máximos asociados a diferentes periodos de retorno, facilitando así la evaluación hidrológica y la modelación hidráulica de inundaciones en cada región. A continuación, se presenta la gráfica de los caudales sintéticos obtenidos para la cuenca Tempisque. Cada curva representa un evento sintético individual, seleccionado de manera aleatoria a partir del conjunto de simulaciones meteorológicas estocásticas generadas para la cuenca. Estas realizaciones se presentan con el fin de ilustrar la variabilidad en la forma y magnitud de los hidrogramas, y no como eventos de diseño ni umbrales probabilistas.

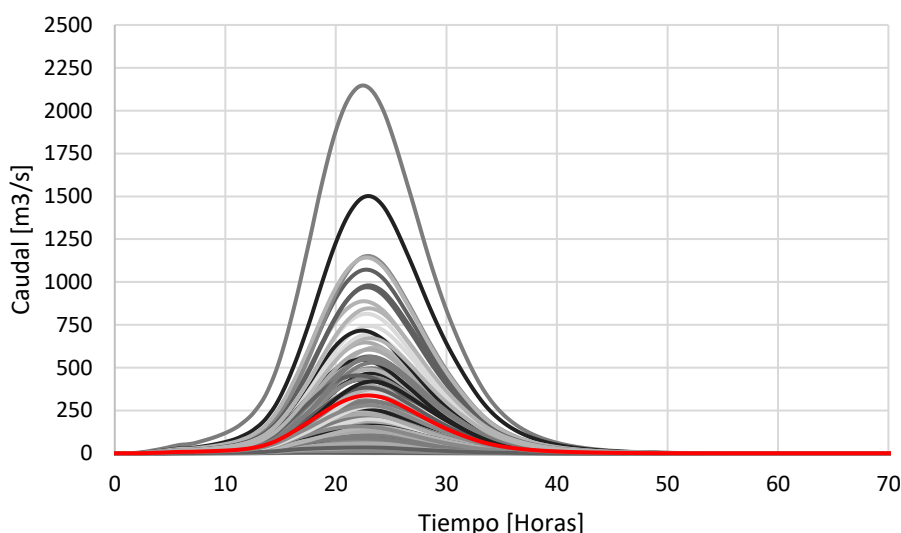


Figura 70. 100 hidrogramas sintéticos generados en la cuenca del río Tempisque. La curva roja es el promedio.

4.3.2 Cuenca del río Matina

Watson et al. (2022) reportaron caudales máximos históricos de hasta 2500 m³/s durante el periodo 1981–1995. A partir del análisis de los caudales máximos anuales y utilizando la distribución estadística de Weibull, se calcularon valores de caudal para distintos periodos de retorno. Para un periodo de retorno de 5 años, el caudal proyectado fue de aproximadamente 1200 m³/s; para 25 años, se alcanzaron valores de hasta 3000 m³/s; y para un periodo de retorno de 100 años, se determinó un caudal de 4000 m³/s. La Figura 71, presenta los caudales sintéticos obtenidos para la cuenca Matina.

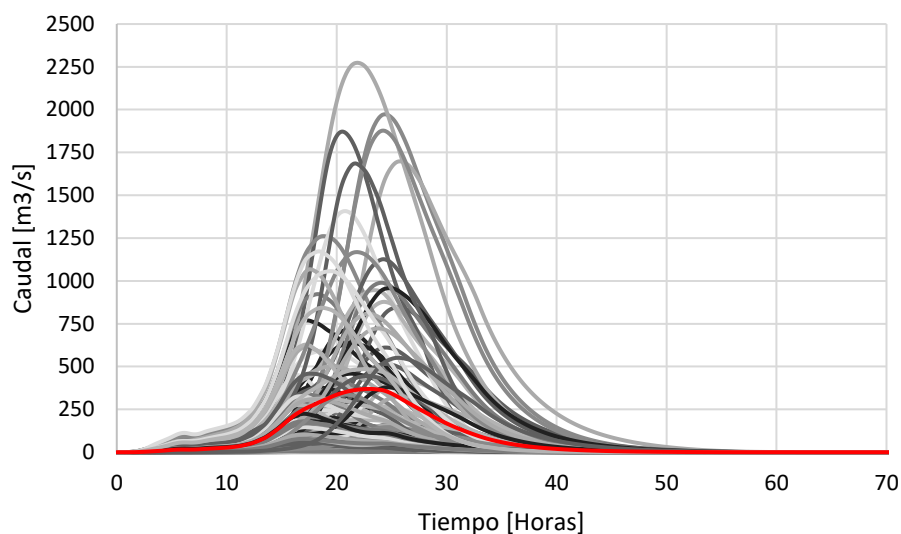


Figura 71. 100 hidrogramas sintéticos generados en la cuenca del río Matina. La curva roja es el promedio.

Aunque los caudales pico mostrados difieren de los valores reportados por Watson et al. (2022), estas diferencias pueden atribuirse a discrepancias en la metodología y en la escala de análisis. Las estimaciones presentadas por Watson et al. se derivan de un análisis estadístico de valores extremos aplicado a los caudales máximos anuales, el cual implica extrapolaciones a periodos de retorno largos y, por tanto, conlleva una incertidumbre considerable. En contraste, los hidrogramas sintéticos presentados en este estudio corresponden a realizaciones estocásticas individuales seleccionadas aleatoriamente de un amplio conjunto de simulaciones hidrológicas, y no a eventos de diseño asociados a periodos de retorno específicos. Adicionalmente, los caudales simulados reflejan procesos hidrológicos a escala de cuenca y entradas de precipitación espacialmente distribuidas, lo que tiende a atenuar los picos de caudal en comparación con los extremos extrapolados estadísticamente. En consecuencia, las diferencias en la magnitud de los picos son esperables y reflejan los distintos objetivos y supuestos de ambos enfoques.

4.3.3 Cuenca del río Pacuare

Rodríguez-Rojas (2019) llevó a cabo una modelación hidráulica considerando la influencia de los cauces del río Pacuare, los cuales estarían afectados por un caudal pico estimado de 2776,9 m³/s. Este trabajo se enmarca dentro del plan de inversiones del SENARA, fundamentado en la Declaratoria de Emergencia del año 2015 y respaldado por el Plan General de la Emergencia N.º 39056. Se tomó en cuenta un análisis hidrológico basado en eventos con un periodo de retorno de 25 años, apoyado en una base hidrometeorológica derivada de la información disponible, lo cual permitió generar los hidrogramas requeridos. Asimismo, se desarrolló un modelo precipitación-escorrentía a partir del análisis de datos de lluvia asociados a eventos extremos que contaban con registros detallados de precipitación y escorrentía. Esta información, suministrada por el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) y la Corporación Bananera Nacional (CORBANA), fue clave para la generación de los hidrogramas utilizados en la modelación hidráulica. Los caudales sintéticos obtenidos para la cuenca Pacuare, se presentan en la Figura 72.

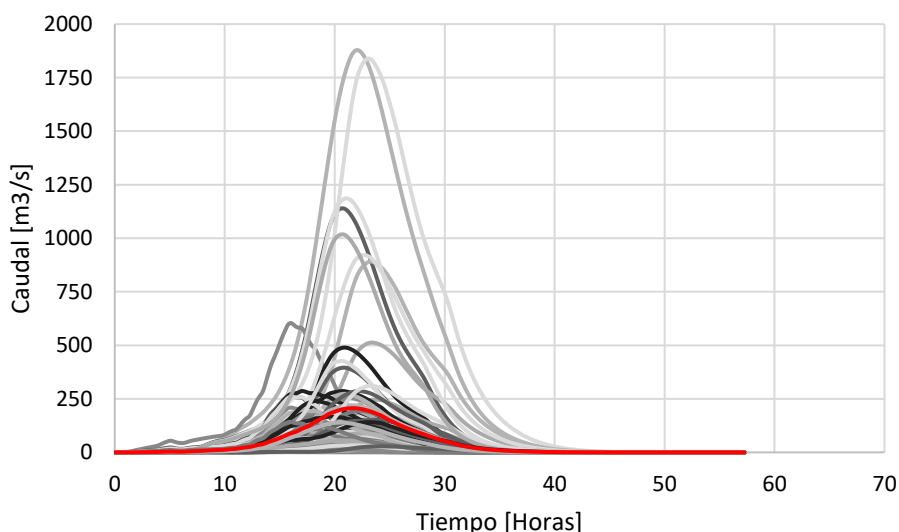


Figura 72. 100 hidrogramas sintéticos generados en la cuenca del río Pacuare. La curva roja es el promedio.

En la figura se observan caudales pico que, en algunos casos, superan el valor reportado por Rodríguez-Rojas (2019). Estos picos más elevados pueden asociarse a eventos con períodos de retorno mayores al evento de diseño de 25 años considerado en dicho estudio hidráulico. Los hidrogramas sintéticos representan un rango de posibles respuestas hidrológicas, incluyendo eventos más extremos, pero de menor frecuencia, lo que explica la presencia de caudales pico superiores en las simulaciones.

4.3.4 Cuenca del río Reventazón

Mojica (1967) reporta caudales máximos registrados de hasta 1600 m³/s en la cuenca alta del río Reventazón, durante el periodo comprendido entre 1954 y 1966. Estos valores corresponden a registros en el punto conocido como Angostura, el cual delimita una subcuenca del río Reventazón con una extensión de 1367 km². La Figura 73, muestra los caudales sintéticos obtenidos para la cuenca Reventazón.

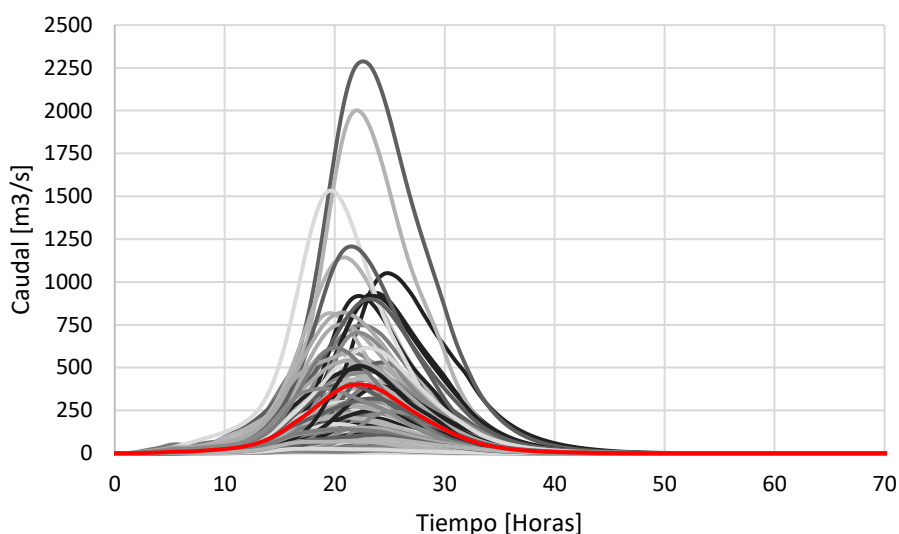


Figura 73. 100 hidrogramas sintéticos generados en la cuenca del río Reventazón. La curva roja es el promedio.

Estos valores superan los reportados por Mojica (1967), lo cual es esperable dada la diferencia en la cobertura espacial. Los registros históricos corresponden a la estación Angostura, que representa únicamente una subcuenca alta del río Reventazón. En contraste, los hidrogramas sintéticos presentados aquí reflejan la respuesta hidrológica de la cuenca completa del río Reventazón, lo que resulta en caudales pico más elevados debido al mayor aporte del área de drenaje.

4.4 Evaluación de la amenaza a nivel nacional

Siguiendo la metodología presentada en el Anexo A.3, se evaluó la amenaza por inundación mediante dos enfoques complementarios:

- Inundación pluvial, enfocada al anegamiento del terreno por sobresaturación del suelo.
- Inundación fluvial, que se refiere al desbordamiento de ríos y quebradas.

En ambos casos, el forzamiento meteorológico corresponde a las series de simulaciones previamente definidas. De la Figura 74 a la Figura 79 se presentan mapas de amenaza uniforme para 25, 50, 100, 200, 500 y 1000 años de periodo de retorno, para la inundación pluvial en Costa Rica, considerando el clima base. Por su parte, de la Figura 80 a la Figura 85 se presentan mapas de amenaza uniforme para los mismos periodos de retorno, para la inundación fluvial.

Como es de esperarse, el fenómeno de inundación pluvial, es decir el anegamiento o encharcamiento del terreno, es considerablemente menos severo que la inundación fluvial. Por lo tanto, se espera que el aporte de la inundación pluvial en el riesgo sea marginal. Esto puede evidenciarse en los mapas presentados. Nótese la escala de colores, que corresponde a profundidad de inundación, y en donde es evidente que los valores de inundación pluvial son por lo menos un orden de magnitud inferiores a los de inundación fluvial.

Así mismo, es importante anotar que la inundación pluvial, dado que se refiere a un fenómeno de acumulación superficial de agua por anegamiento del terreno, tiende a mostrar mapas de amenaza de mayor extensión territorial. En contraste, la inundación fluvial se concentra principalmente alrededor de río y quebradas, así como en zonas de desembocadura (deltas, estuarios o bahías), lo cual limita su extensión espacial. Es decir, las cuencas y ríos actúan como acumuladores de la precipitación incidente, trasladando grandes volúmenes de agua a regiones relativamente pequeñas. Esto no se manifiesta de la misma manera en la inundación pluvial, en la cual la distribución espacial del fenómeno está controlada de forma muy determinante por la topografía (el PAT), y en ese sentido puede tomar mayores extensiones territoriales.

Los mapas presentados corresponden a la amenaza para el clima base. Conviene anotar que los mapas presentados son de amenaza integrada, es decir, integran el aporte de todos los eventos individuales de inundación. Esto significa que las inundaciones mostradas en los mapas de diferentes periodos de retorno no pueden materializarse durante un único evento. Como se mencionó anteriormente, y como se resume en la Tabla 14, se están considerando 36 posibles climas futuros de acuerdo con las combinaciones de GCM, trayectoria de emisiones y año objetivo. La totalidad de los mapas de amenaza correspondientes se incluye en el Dataset del proyecto. Sin embargo, a modo de ilustración, la Figura 86 presenta los mapas de amenaza de inundación fluvial, de 1000 años de periodo de retorno, para los climas EC-Earth3 SSP5-8.5 2100, GFDL-ESM4 SSP5-8.5 2100, y MPI-ESM1-2-LR SSP5-8.5 2100, comparados con el clima base. Esto con el fin de mostrar las variaciones inducidas por el cambio climático. No obstante, se insiste en que estos mapas son solamente una ilustración de la totalidad de resultados, que no se incluyen en este informe para no extenderlo demasiado.

La resolución final del resultado de la evaluación de la amenaza por inundación es la misma de la información topográfica empleada como insumo, es decir, 30 metros de píxel para el modelo nacional, y 5 metros de píxel para el modelo local del cantón de Heredia. Esta resolución describe suficientemente bien el comportamiento de la inundación, permitiendo capturar los aspectos hidráulicos mínimos requeridos, según la escala de los modelos. Así mismo, es una resolución suficiente para la evaluación del riesgo en los diferentes proyectos que componen esta consultoría.

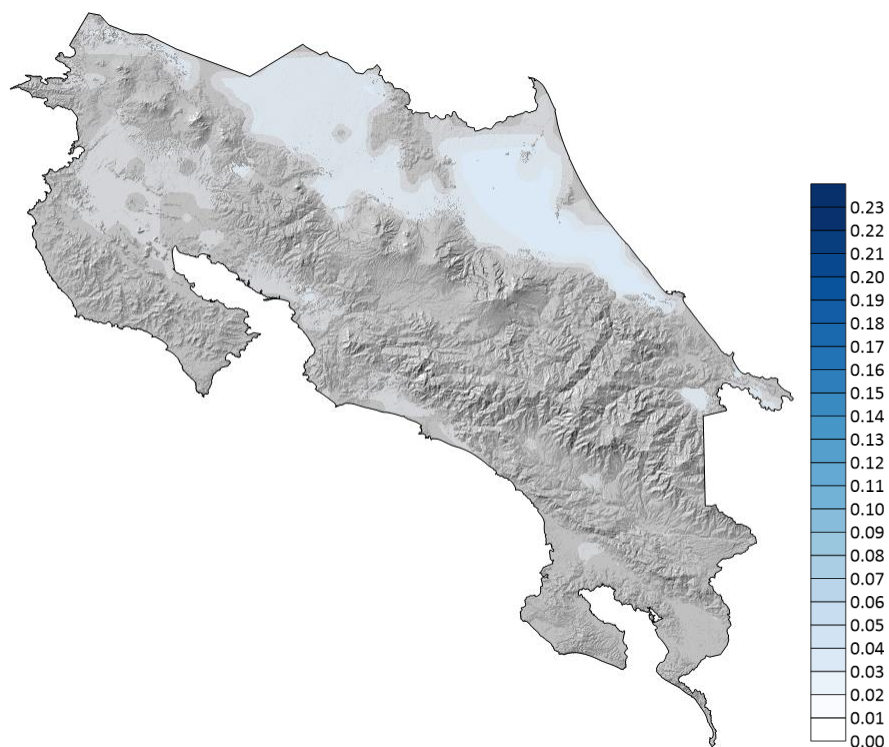


Figura 74. Mapa de amenaza de inundación pluvial para clima base. TR = 25 años. Profundidad de inundación en metros.

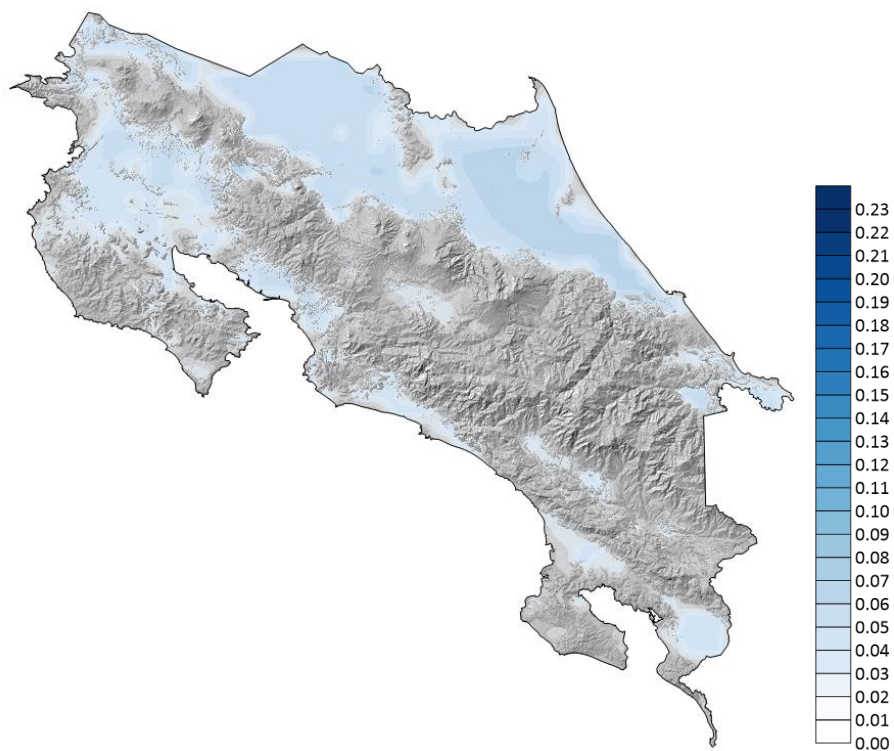


Figura 75. Mapa de amenaza de inundación pluvial para clima base. TR = 50 años. Profundidad de inundación en metros.

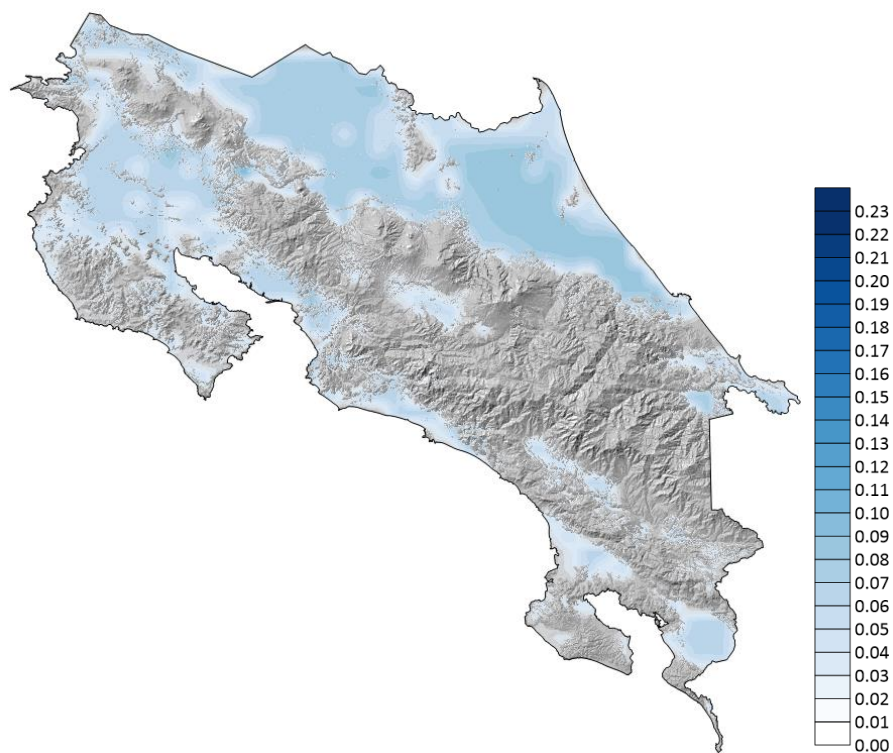


Figura 76. Mapa de amenaza de inundación pluvial para clima base. TR = 200 años. Profundidad de inundación en metros.

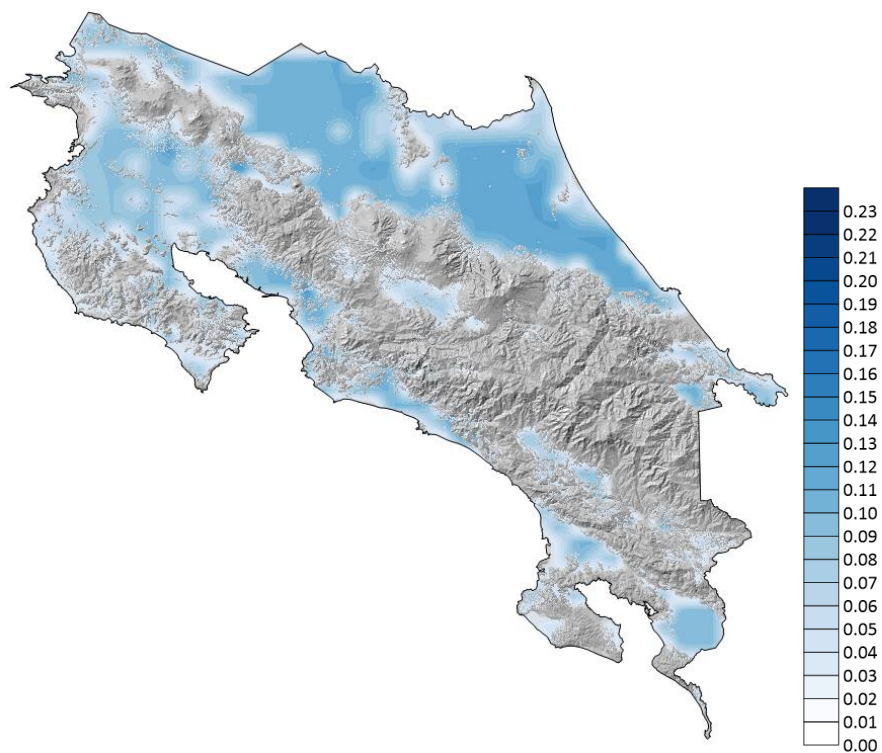


Figura 77. Mapa de amenaza de inundación pluvial para clima base. TR = 100 años. Profundidad de inundación en metros.

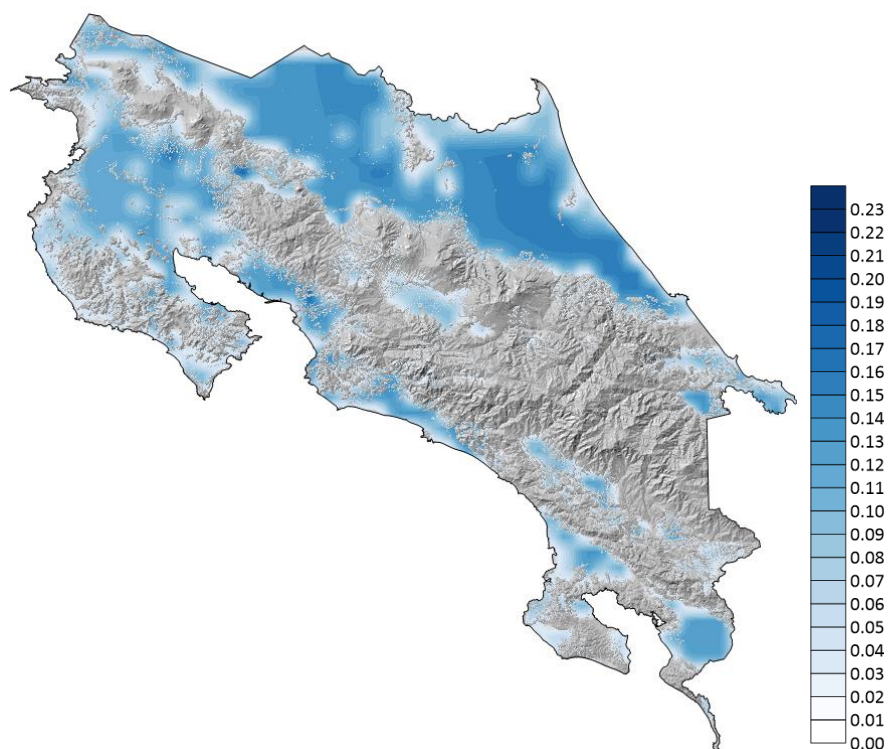


Figura 78. Mapa de amenaza de inundación pluvial para clima base. TR = 500 años. Profundidad de inundación en metros.

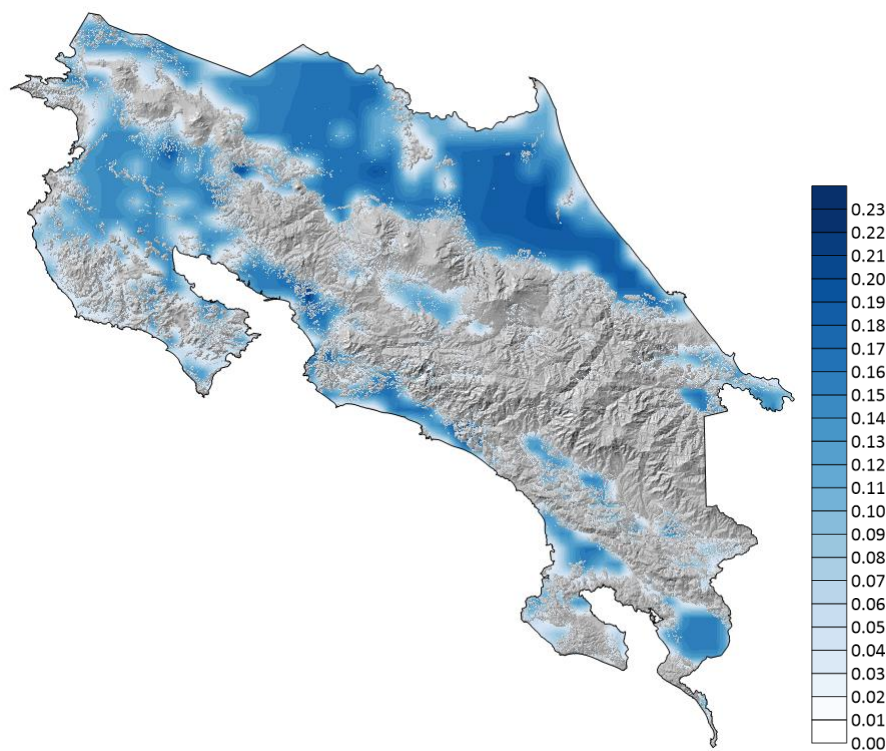


Figura 79. Mapa de amenaza de inundación pluvial para clima base. TR = 1000 años. Profundidad de inundación en metros.



Figura 80. Mapa de amenaza de inundación fluvial para clima base. TR = 25 años. Profundidad de inundación en metros.

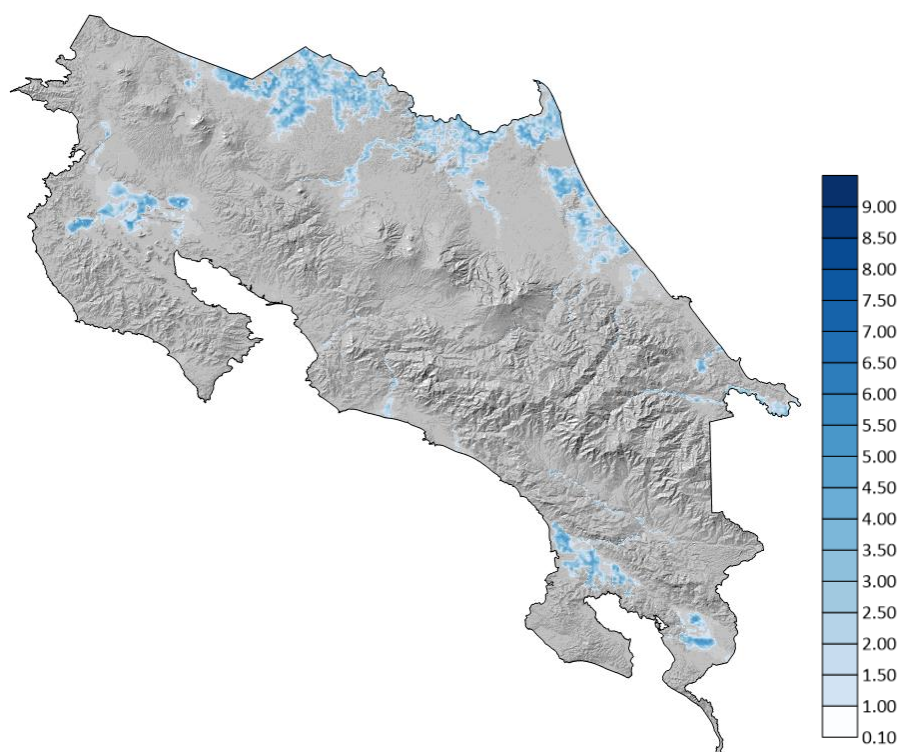


Figura 81. Mapa de amenaza de inundación fluvial para clima base. TR = 50 años. Profundidad de inundación en metros.



Figura 82. Mapa de amenaza de inundación fluvial para clima base. TR = 100 años. Profundidad de inundación en metros.

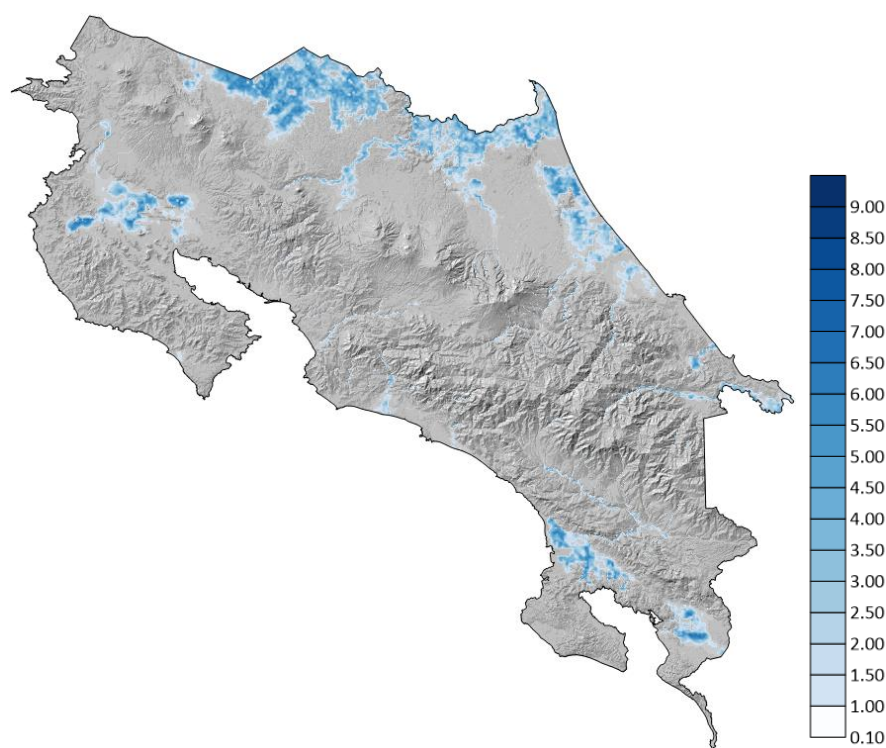


Figura 83. Mapa de amenaza de inundación fluvial para clima base. TR = 200 años. Profundidad de inundación en metros.

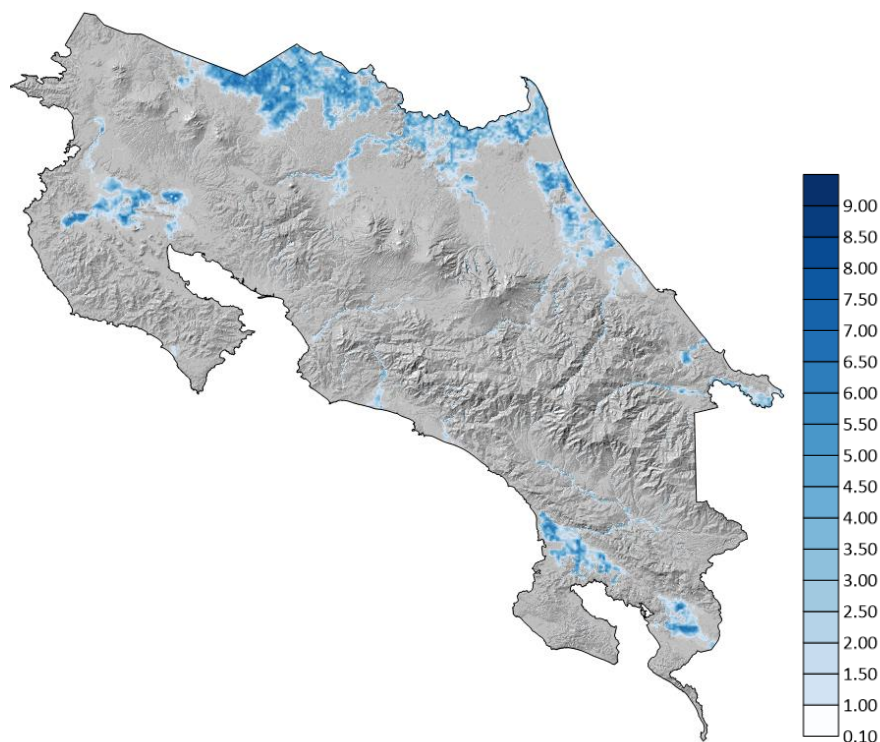


Figura 84. Mapa de amenaza de inundación fluvial para clima base. TR = 500 años. Profundidad de inundación en metros.

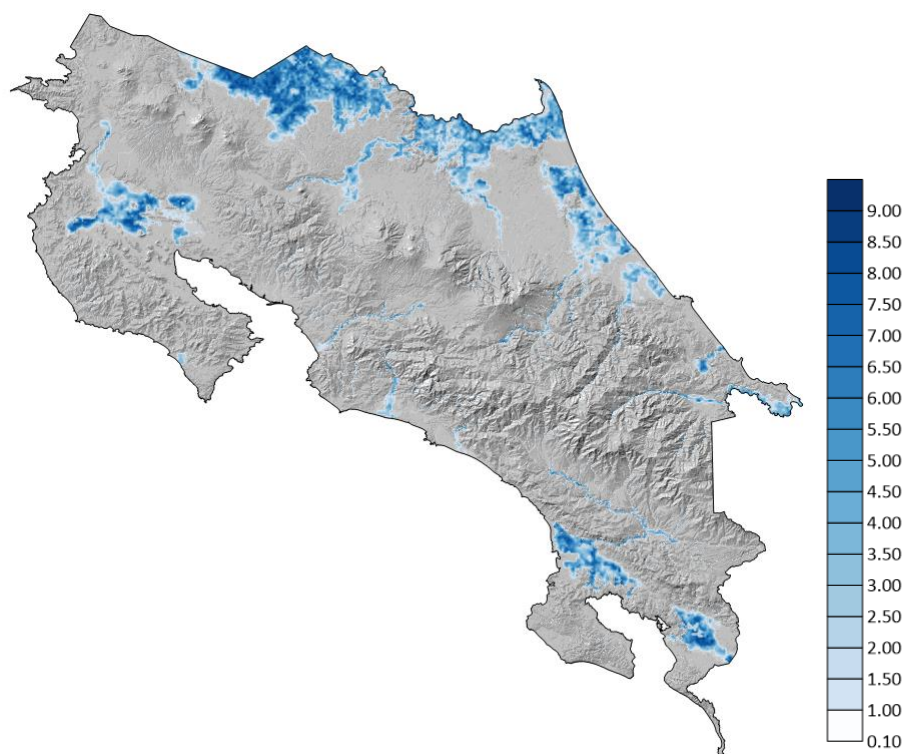


Figura 85. Mapa de amenaza de inundación fluvial para clima base. TR = 1000 años. Profundidad de inundación en metros.

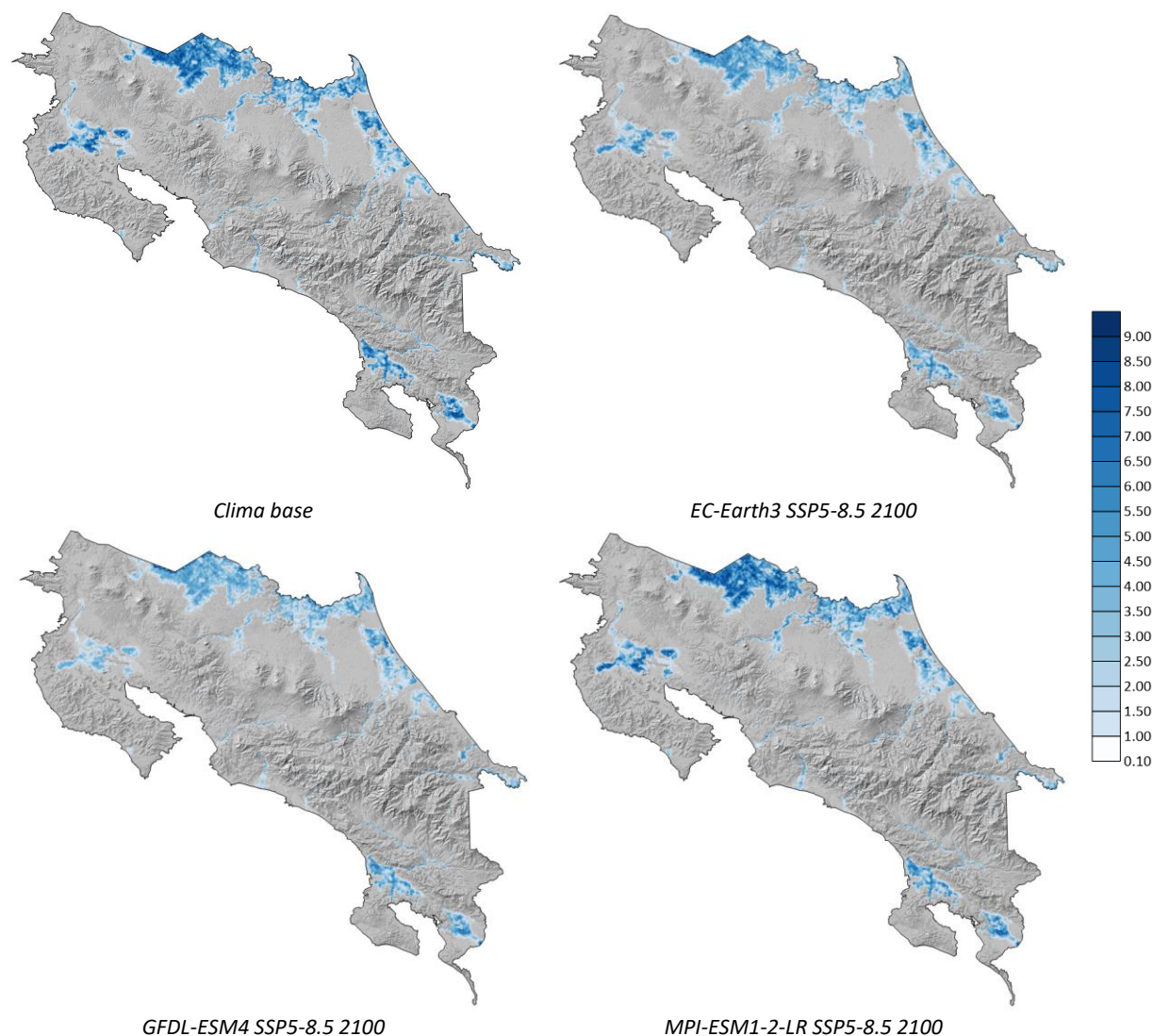


Figura 86. Comparación de mapas de amenaza de TR = 1000 años, para 3 climas futuros. Profundidad de inundación en metros.

4.4.1 Comparación de la amenaza de inundación con el proyecto GRAF

El proyecto GRAF (Global Risk Assessment Framework) de la UNDRR fue implementado en Costa Rica en el año 2024, entregando resultados de riesgo por inundación y terremoto para algunos sectores. En lo que se refiere a la información de amenaza de inundación, el proyecto hace uso del dataset de amenaza de inundación desarrollado por CIMA para el informe GAR 2015 de UNDRR. Dado que INGENIAR-CIMNE tuvo a cargo el desarrollo de la modelación del riesgo para el informe GAR 2015, se cuenta con ese dataset para fines comparativos.

La Figura 87 muestra el mapa de amenaza por inundación de 1000 años de periodo de retorno, obtenido del proyecto GRAF (mismo del GAR 2015) y el calculado en este trabajo (mismo de la Figura 85). A la escala de la imagen presentada, las diferencias parecen mínimas y son prácticamente imperceptibles. Esto se deben, en gran medida, a que los métodos de cálculo son similares, y por lo tanto es de esperarse que al

ser parametrizados con la información meteorológica del clima base, arrojen resultados similares. Los detalles del método de evaluación desarrollado por CIMA para el modelo de inundación del GAR 2015 pueden consultarse en Rudari et al. (2015).

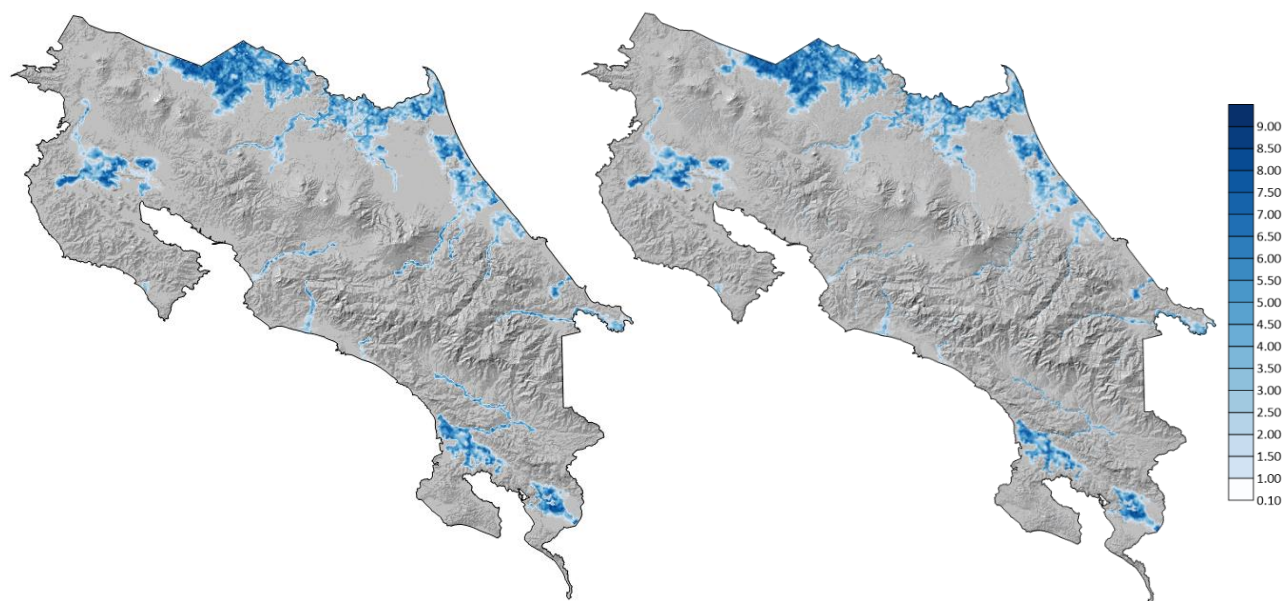


Figura 87. Comparación de mapas de amenaza de inundación fluvial de 1000 años. Izq.: GRAF. Der.: Este trabajo.

Sin embargo, los resultados no son iguales. Desde lo metodológico, existen diferencias en el abordaje, principalmente de los modelos hidrológicos. En el modelo del GRAF los caudales se estiman de forma aproximada con hidrogramas triangulares, mientras que, en este trabajo, se usa un modelo hidrológico distribuido (ModClark) el cual es una mejor aproximación a las condiciones de infiltración en el terreno.

Por otra parte, existen diferencias en la resolución del cálculo. El modelo del GRAF usa una resolución espacial de 0.009 grados (aprox. 1 Km de píxel). Esta resolución es aceptable para un modelo de escala mundial, pero resulta muy gruesa para un país como Costa Rica. Por su parte, el modelo de inundación desarrollado en este trabajo tiene una resolución espacial de 0.00018 grados (aprox. 30 metros de píxel). Las diferencias resultantes se pueden apreciar de la Figura 88 a la Figura 90, en donde se ilustran 3 regiones arbitrarias al interior de Costa Rica.

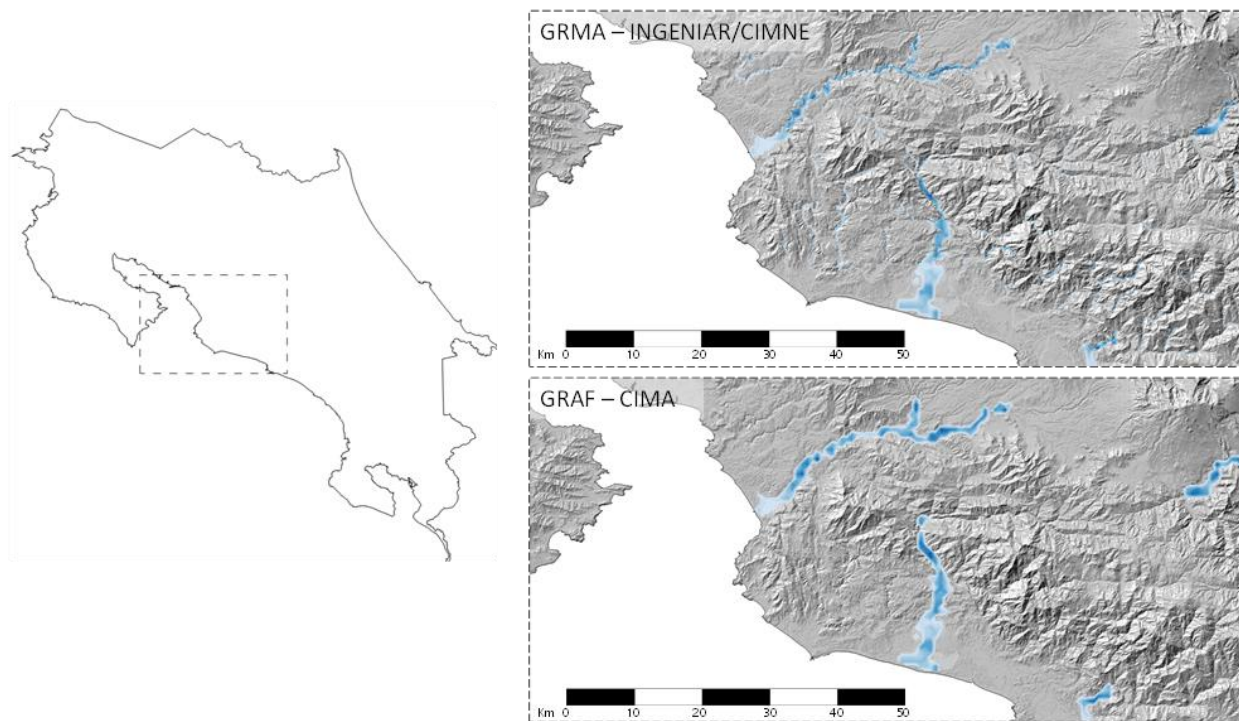


Figura 88. Comparación de mapas de amenaza de inundación fluvial de 1000 años en la región encerrada por el recuadro.

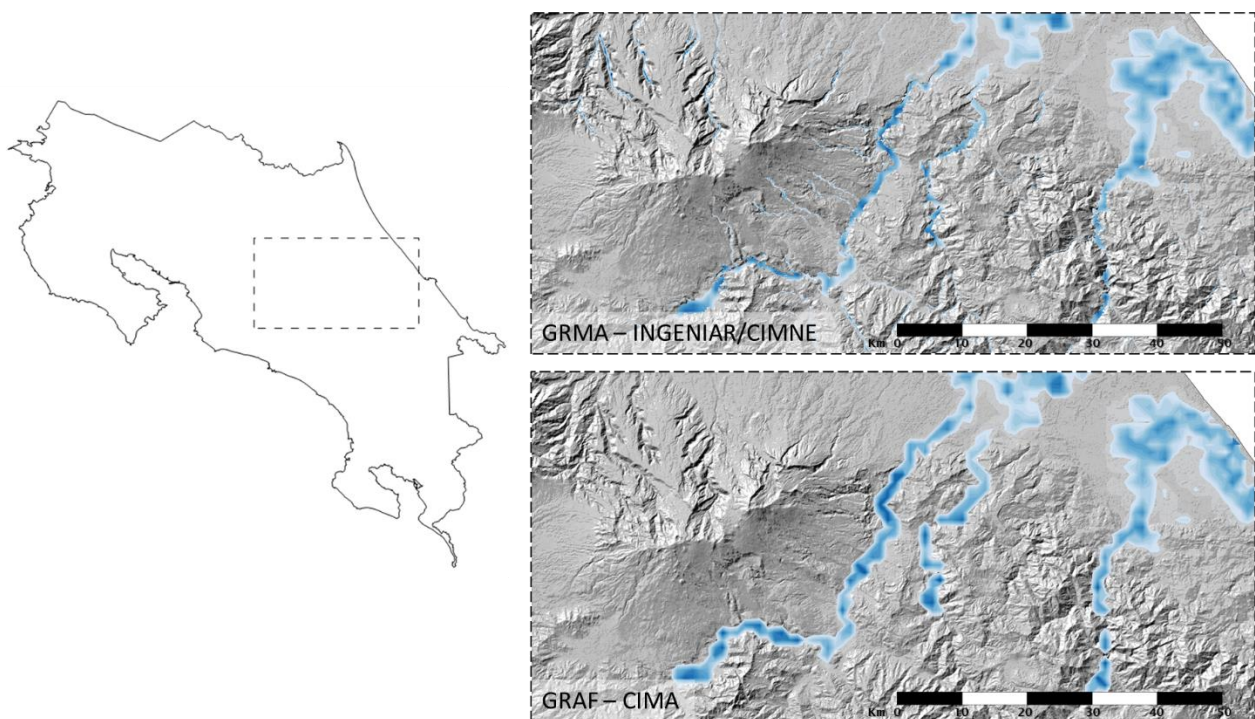


Figura 89. Comparación de mapas de amenaza de inundación fluvial de 1000 años en la región encerrada por el recuadro.

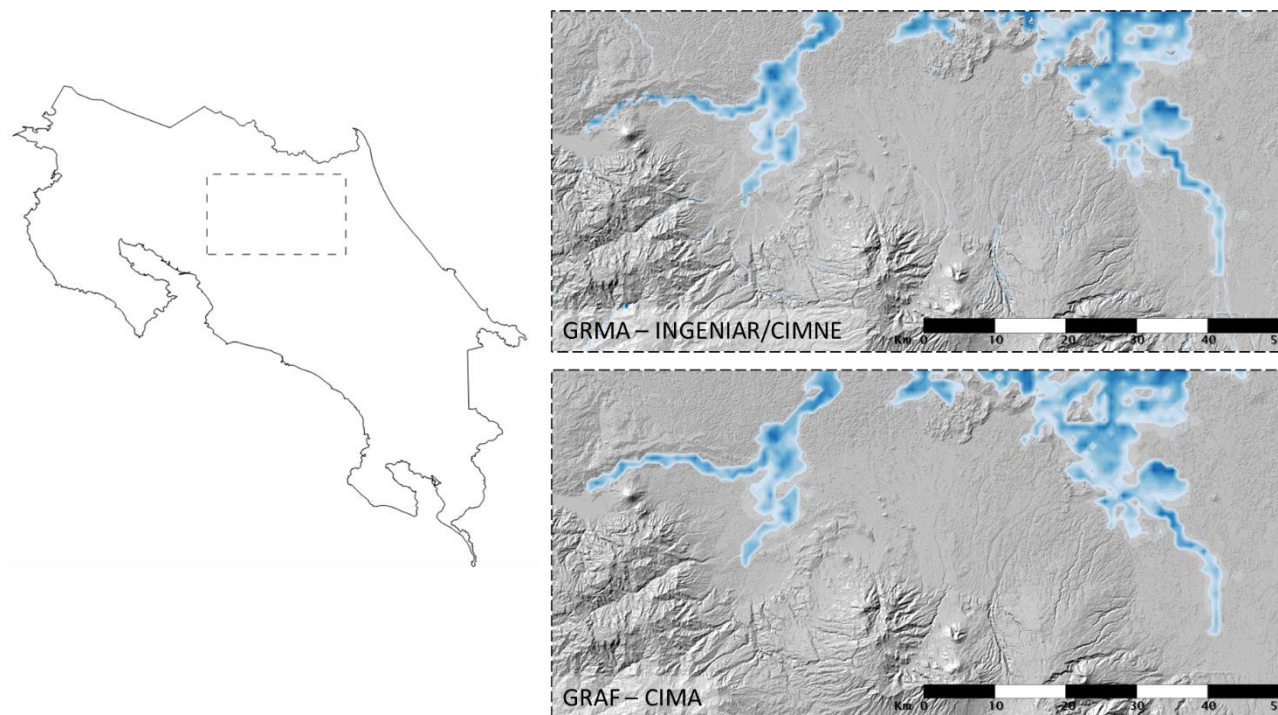


Figura 90. Comparación de mapas de amenaza de inundación fluvial de 1000 años en la región encerrada por el recuadro.

Finalmente, se calculó la diferencia, punto por punto en el país, entre el mapa de inundación de 1000 años de periodo de retorno para Costa Rica usado en el proyecto GRAF, y el mapa de inundación calculado en este proyecto. La diferencia se calculó así:

$$\text{Diferencia} = h_{GRMA} - h_{GRAF} \quad \text{Ecuación 4}$$

El resultado se presenta en la Figura 91. Las manchas rojas indican que el modelo GRMA provee un mayor valor que GRAF, y las manchas azules muestran lo contrario². Como puede observarse, muchos de los cauces de ríos y quebradas de Costa Rica aparecen dibujados en rojo, lo cual indica que el modelo GRMA está en capacidad de incorporarlos debido a su mayor resolución. En otras palabras, el modelo GRAF es ciego a estos cauces por cuenta de su baja resolución espacial. Así mismo, se observan algunas manchas azules alrededor de cauces de ríos. Esto debido a que esos ríos sí están incluidos en el modelo GRAF, pero, de nuevo, con una baja resolución, lo cual artificialmente amplía las áreas inundables alrededor de los cauces. Esta situación se ha modificado en el modelo GRMA permitiendo una mejor definición de los márgenes de los ríos. Finalmente, en las zonas ampliamente inundables, se observa que los resultados coinciden bastante bien, con leves diferencias en azul, es decir, en donde GRAF levemente sobreestima el valor de la inundación con respecto a GRMA.

² Como se observa en el mapa, la escala se truncó entre -1 y 1. Es decir que el color rojo oscuro muestra diferencias mayores a un metro, y el color azul oscuro diferencias menores a -1 metros.

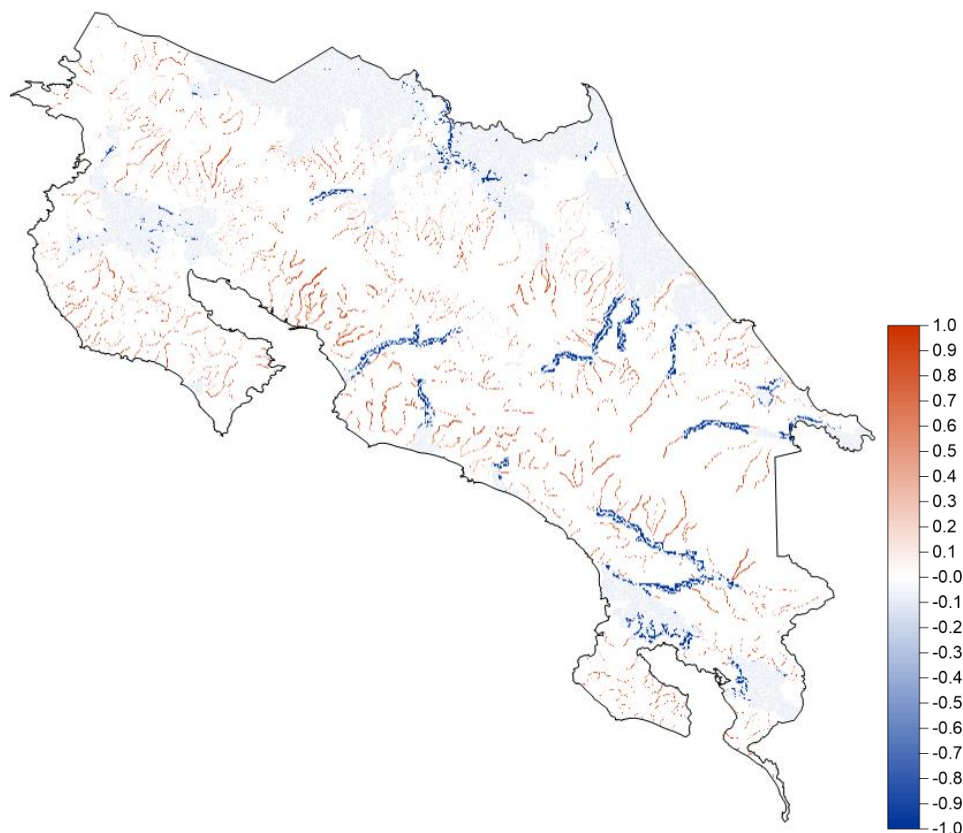


Figura 91. Diferencia entre modelos de inundación de GRMA y GRAF. La escala está en metros.

Conviene anotar que, si bien existen las diferencias mencionadas, estas son de esperarse al modificar la resolución espacial y los modelos de cálculo. Si bien el modelo GRMA es un modelo de mayor resolución, desarrollado con el fin de ser un modelo de escala nacional, el modelo GRAF, originalmente de escala mundial, es un modelo aceptable cuyos resultados son razonables a pesar de la escala gruesa.

4.5 Amenaza de inundación para el cantón de Heredia

Así como para el nivel nacional, se evaluó para el cantón de Heredia tanto amenaza por inundación pluvial o por encharcamiento del terreno, como fluvial o por desbordamiento de ríos.

4.5.1 Inundación pluvial en el cantón de Heredia

La evaluación de la amenaza por inundación pluvial en Heredia, sigue los mismos preceptos aplicados a la evaluación de esta amenaza a nivel nacional. Es decir, a partir de un modelo digital de elevación, se determinan las zonas expuestas al encharcamiento, así como las zonas que no lo están, en función de la forma de la topografía. La Figura 92 muestra el modelo digital de elevación empleado para el cantón de Heredia, el cual tiene una resolución espacial de 5 metros de pixel. La metodología de evaluación se encuentra descrita en el Anexo A.3.

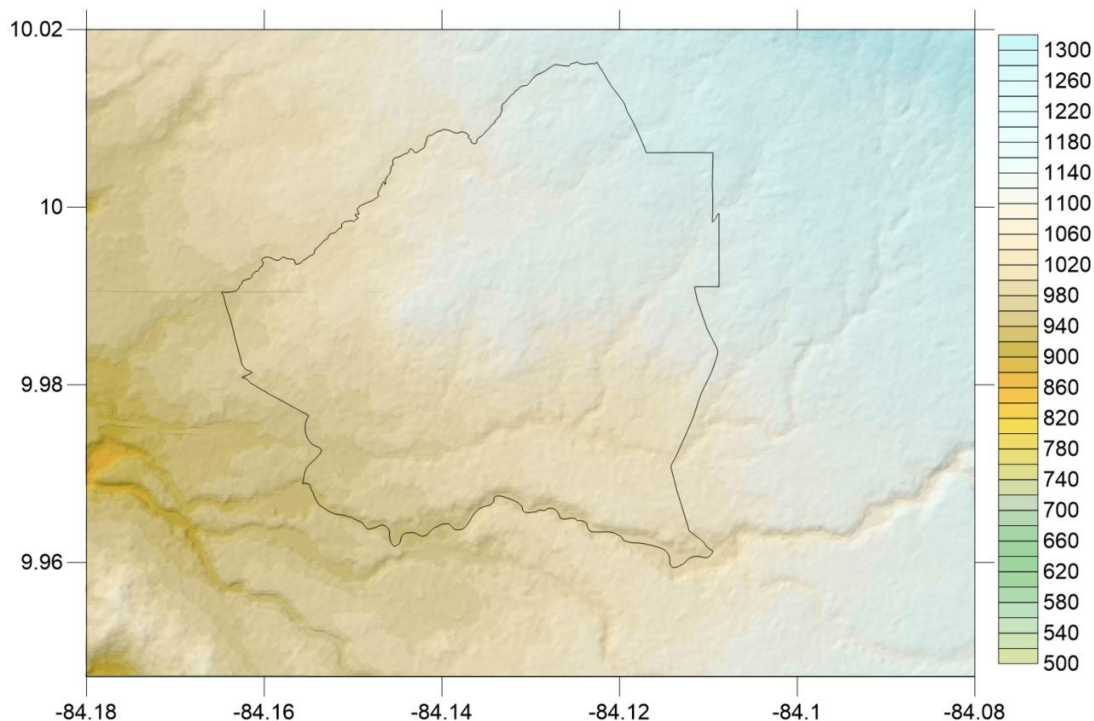


Figura 92. Modelo digital de elevación para el cantón de Heredia. La escala son metros sobre el nivel del mar.

Aplicando la metodología incluida en el Anexo A.3, se obtienen los resultados que se resumen en los mapas de la Figura 93 a Figura 97. La escala de los mapas es profundidad de inundación, en metros. Se resaltan ubicaciones elevadas o con curvaturas positivas del terreno en las cuales no se prevé que ocurra inundación pluvial, es decir, son áreas de muy baja o nula acumulación del volumen de precipitación. Por lo demás, la mayoría del área del cantón presenta intensidades de inundación pluvial. Conviene señalar que estas intensidades son muy bajas, con valores máximos inferiores a los 13 cm para 1000 años de periodo de retorno.

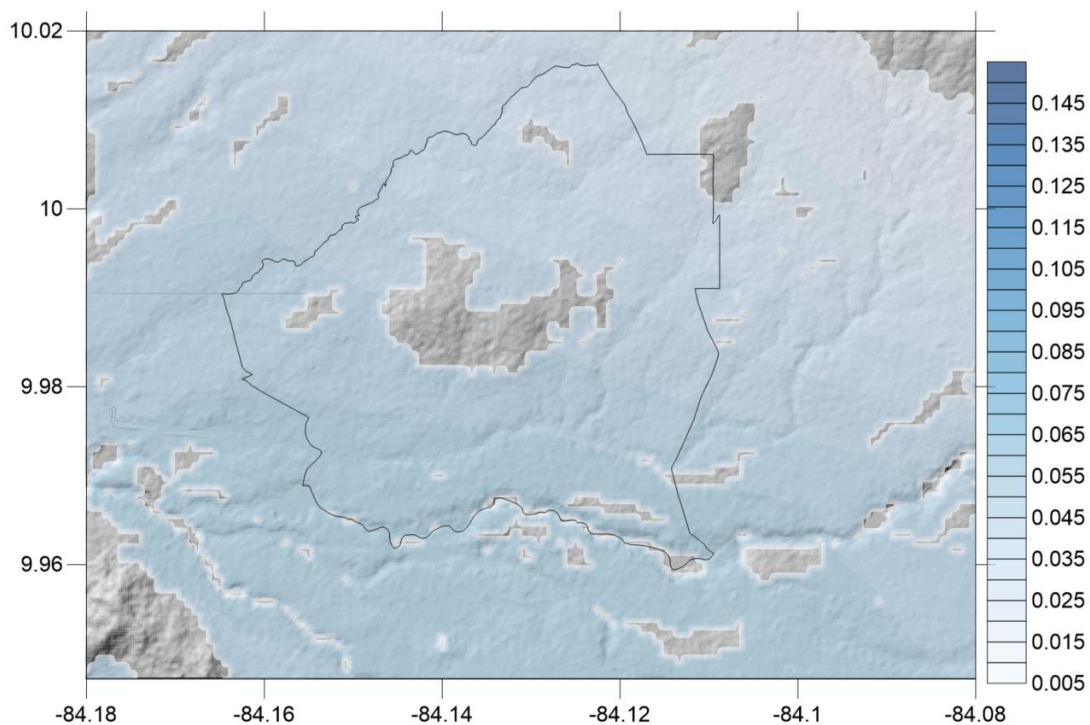


Figura 93. Mapa de amenaza por inundación pluvial en el cantón de Heredia, para 100 años de periodo de retorno. La escala es profundidad de inundación en metros.

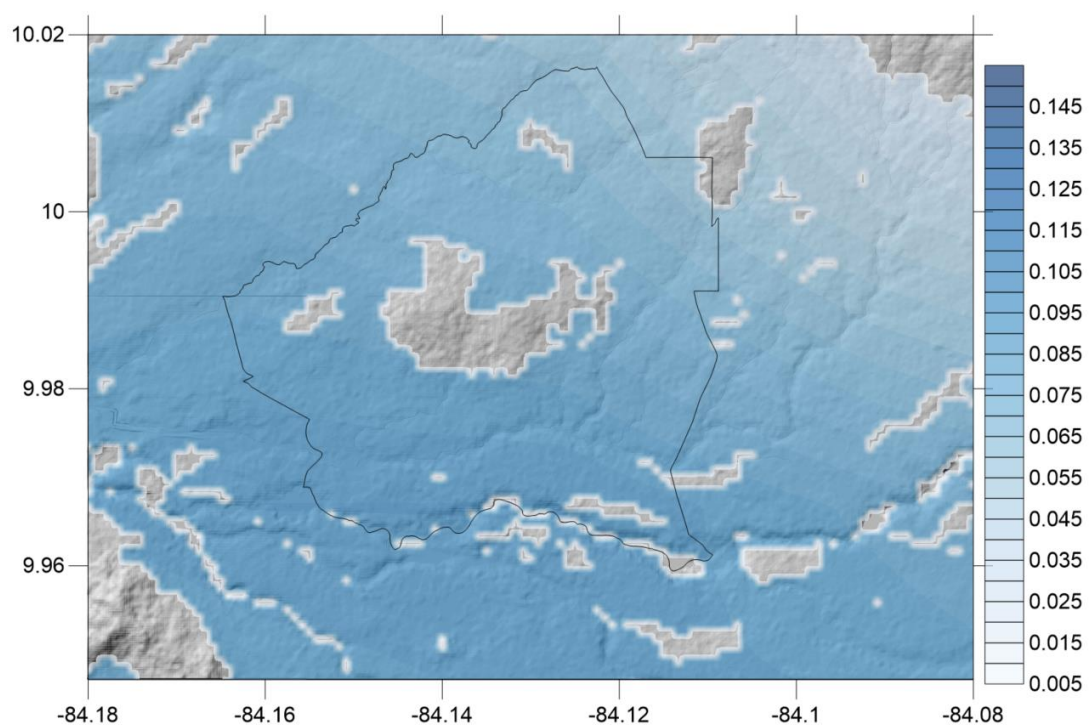


Figura 94. Mapa de amenaza por inundación pluvial en el cantón de Heredia, para 500 años de periodo de retorno. La escala es profundidad de inundación en metros.

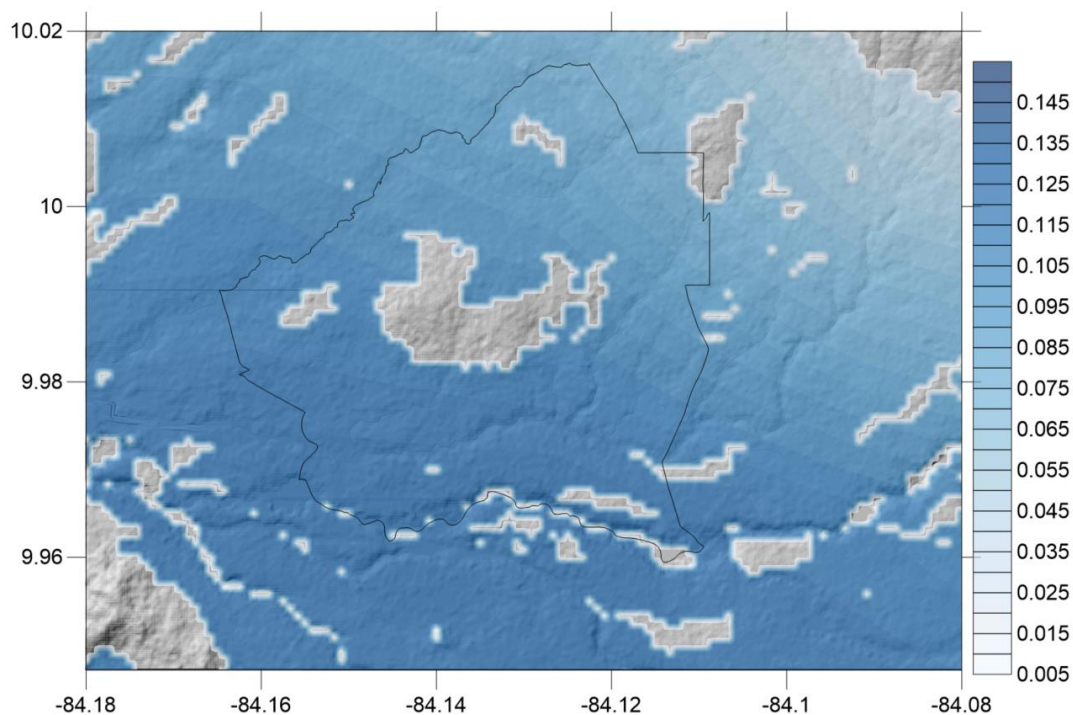


Figura 95. Mapa de amenaza por inundación pluvial en el cantón de Heredia, para 1000 años de periodo de retorno. La escala es profundidad de inundación en metros.

4.5.2 Inundación fluvial en el cantón de Heredia

La cuenca del río Pirro ocupa espacio en 3 cantones. En su parte alta al norte pertenece al cantón de San Rafael, en su parte oriental toca al cantón de San Pablo y en su parte media baja el cantón de Heredia. Alcanza una superficie total de 10,678 km², la cual en su mayoría esta ubicada en el area urbana de Heredia. El río Pirro nace cerca del cerro Piedra (Peineta) y hace parte de la cuenca del Río Bermúdez, que es afluente del río Virilla.

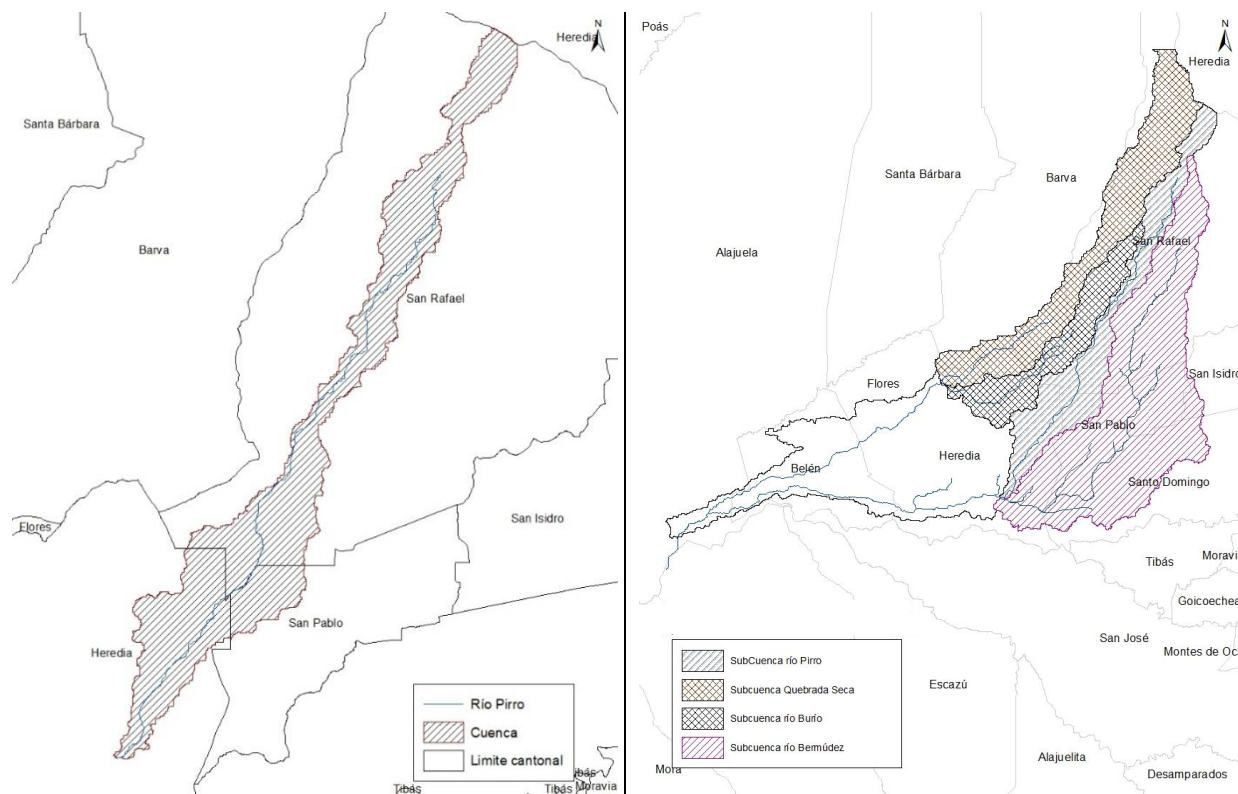


Figura 96. Izq.: cuenca Río Pirro. Der.: cuencas de los ríos Pirro, Bermúdez y Burío

Por lo anterior, adicionalmente al análisis en la cuenca del río Pirro, también se tuvo en cuenta el río Bermúdez, mencionado anteriormente, el río Burío y la quebrada Seca. La superficie de análisis se amplía ocupando la mayor parte del cantón de Heredia, cubriendo la totalidad del cantón de San Pablo y una parte del cantón Santo Domingo y del cantón de San Rafael, cubriendo un área total de 82.38 km². La Figura 96 muestra la ubicación de las cuencas mencionadas.

La topografía utilizada fue obtenida de EOS DATA ANALYTICS. Se trata de un DEM con resolución espacial de 4.7 metros y elevación máxima al interior de la cuenca de 2298.13 m.s.n.m. La Figura 97 presenta el DEM para esta zona de estudio. La clasificación de la cobertura fue obtenida del mapa actualizado del uso del suelo en Costa Rica, elaborado por Vargas (2020). A partir de esta cobertura se determina el Número de Curva (CN), siguiendo el mismo procedimiento descrito previamente en la sección 4.2.3.

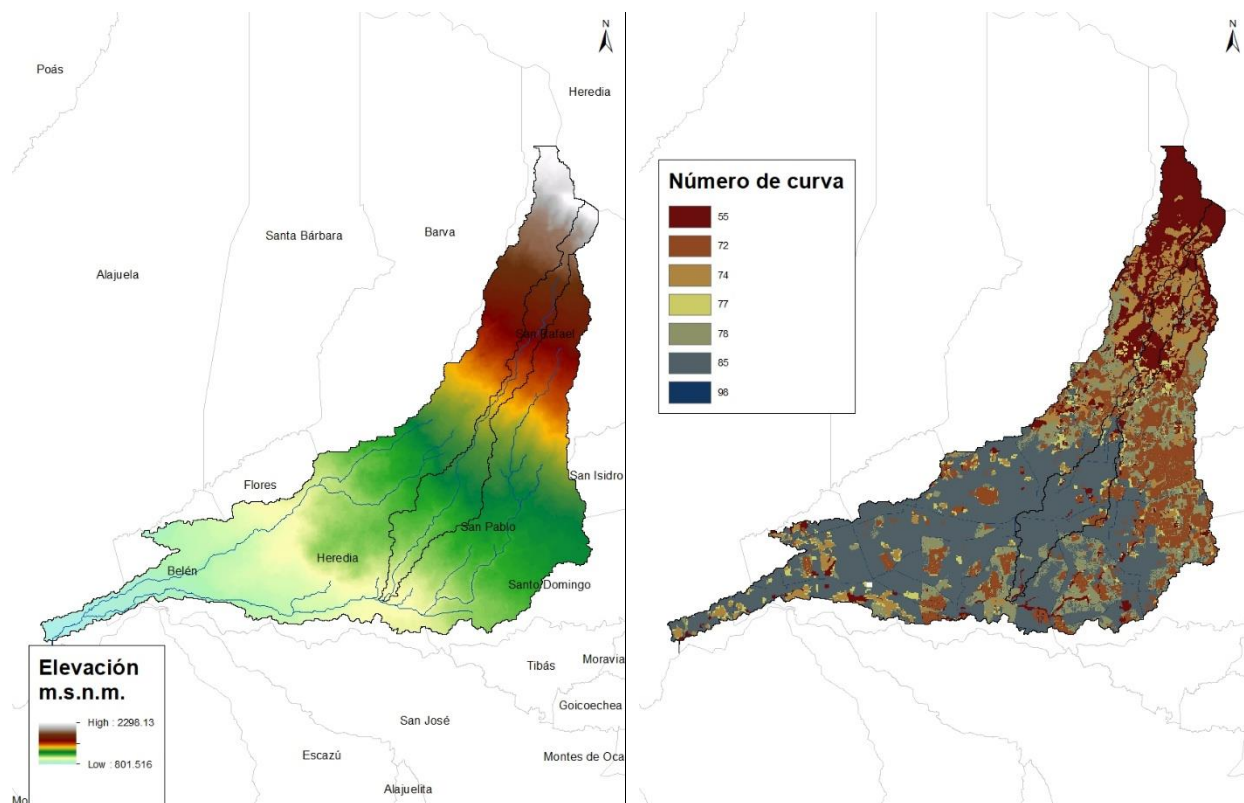


Figura 97. Izq.: Modelo digital de elevación. Der.: Número de curva. Cuencas de los ríos Burío, Pirro y Bermúdez.

La modelación hidráulica se realiza, en este caso, por, medio de un modelo bidimensional, en donde el comportamiento hidrodinámico se aproxima promediando las velocidades en profundidad, y resolviendo el flujo en las dos direcciones horizontales. Esto permite modelar el flujo en los cauces y el desbordamiento de estos con un nivel de detalle apropiado para los fines del proyecto. En este trabajo se emplea el software HEC-RAS v6.0 como motor de modelación hidráulica bidimensional.

Dada la alta dependencia del modelo de la topografía, el DEM es sometido a un preprocesamiento para corregir posibles vacíos en el archivo, rellenar falsos sumideros o eliminar falsos picos, que pueden existir como errores propios de la resolución de los datos y el redondeo de elevaciones al entero más próximo. El DEM fue procesado con la herramienta HydroTools³ con el objetivo de describir de forma apropiada los cauces. La Figura 98 muestra el DEM antes y después del preprocesamiento, en la región baja de la cuenca de estudio. Si bien las diferencias son aparentemente sutiles, son muy significativas para la calidad de la modelación hidrodinámica.

Adicionalmente, se aplicó un procedimiento de indexación de los cauces conocidos para asegurar que el flujo superficial siguiera correctamente la red hidrográfica. Para ello, se comparó el DEM con cartografía oficial de ríos de Costa Rica y con imágenes satelitales, con el fin de identificar la ubicación real de los cauces y ajustar la línea de río cuando el DEM mostraba desviaciones. El ancho y la profundidad de los cauces se estimaron a partir de estas fuentes, dado que no se contaba con batimetrías de los ríos. Este

³ HydroTools es un paquete de procesamiento geoespacial de ArcGIS

paso garantiza que la modelación hidrodinámica capture adecuadamente el flujo en los cauces y los posibles desbordamientos.

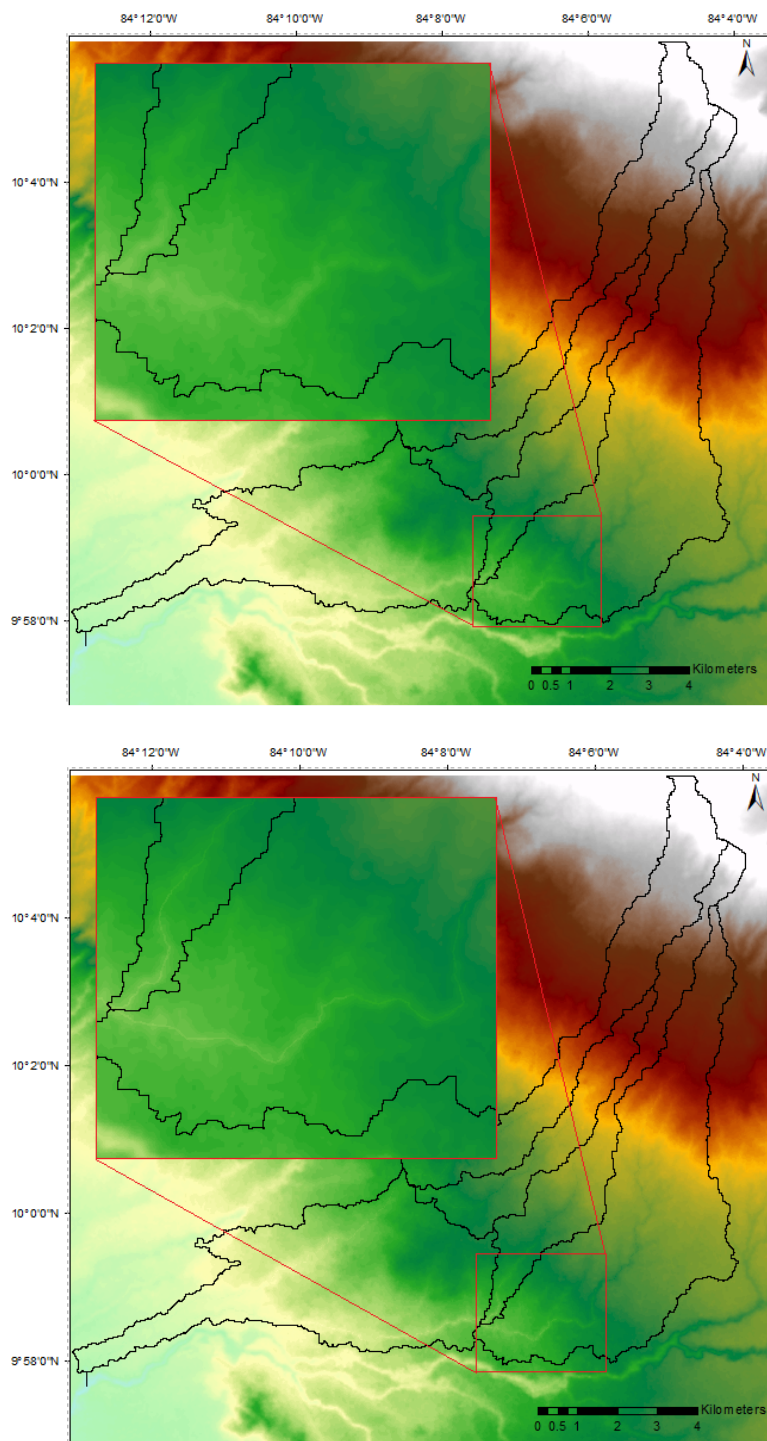


Figura 98. Modelo digital de elevación antes (arriba) y después (abajo) del preprocesamiento.

El área para modelación 2D fue definida por medio de un límite superior en zonas altas no inundables, hasta un límite inferior en el punto de descarga del río, y que se encuentra aproximadamente 5 Km al Oeste del límite del cantón de Heredia. Se definió al interior de este dominio una malla de resolución de 10m x 10m de píxel. La Figura 99 muestra la extensión del modelo bidimensional.

Con el objeto de mejorar la precisión de la modelación en las zonas de mayor interés hidráulico, se aplicó un refinamiento de malla local adicional a lo largo de los cauces principales dentro del dominio 2D. Esto consistió en una malla más densa (4m x 4m) alineada con los ejes de los ríos y quebradas, manteniendo el resto del dominio con una resolución de 10 m x 10 m. El refinamiento de malla permite capturar con mayor detalle las variaciones de superficie y los gradientes de velocidad asociados al flujo en canales naturales, mejorando la representatividad del modelo.

Para la representación de la resistencia al flujo en el dominio 2D se asignaron coeficientes de rugosidad de Manning (n) de acuerdo con el tipo de superficie y las características observadas en sitio. Para los cauces principales con lecho rocoso, presencia de piedras, basura y márgenes con vegetación dispersa, se utilizó $n = 0.05$, valor consistente con Chow (1959) y Arcement & Schneider (1989), quienes reportan rangos de 0.035–0.060 para cauces naturales con lecho de grava y 0.045–0.055 para tramos con irregularidades y obstrucciones heterogéneas. Para las calles pavimentadas y plazas urbanas se asignó $n = 0.014$, mientras que las áreas verdes con pasto y vegetación dispersa se modelaron con $n = 0.03$. En las zonas de vivienda, que combinan superficies impermeables (calles, patios), pequeños jardines y obstáculos como cercas y edificaciones, se asignó $n = 0.035$, representando de manera realista la resistencia al flujo superficial en áreas urbanas densas. La selección de estos valores permite una modelación hidráulica coherente con la heterogeneidad de superficies dentro del dominio, incorporando tanto la rugosidad de los cauces como la de las zonas urbanas y residenciales.

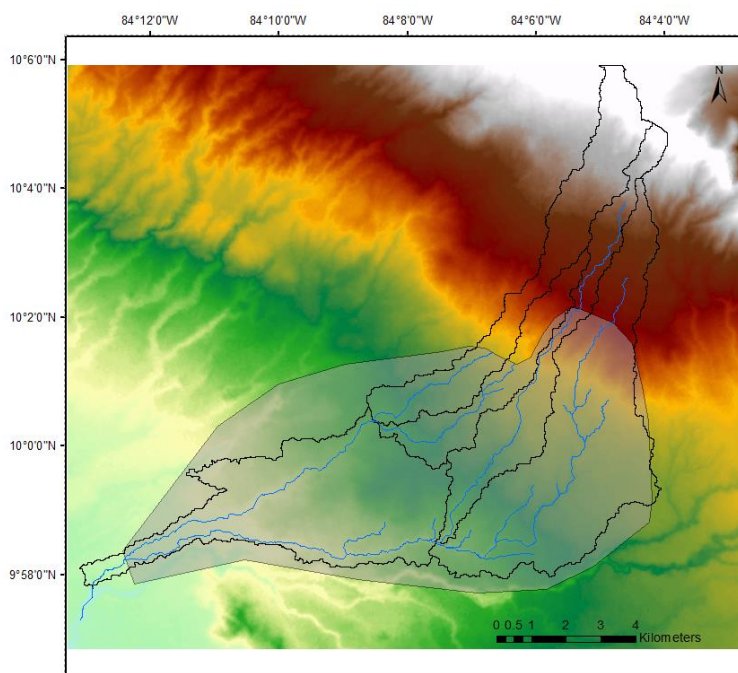


Figura 99. Extensión del modelo hidráulico bidimensional.

Se realizó la modelación de la respuesta hidrológica de las cuencas consideradas ante el forzamiento meteorológico simulado, dando como resultado hidrogramas de creciente que se emplean como entradas al modelo hidráulico bidimensional. El caudal resultante de las subcuencas se calculó usando el método Clark modificado, presentado en el Informe de inicio, y se aplicó en los cauces principales como puntos de entrada del dominio 2D. Estas entradas no ocurren simultáneamente, sino desfasadas de acuerdo con los tiempos de concentración de las cuencas tributarias, tal como se indica en la Figura 100. De forma simultánea, HEC-RAS 2D considera la lluvia que cae directamente sobre la malla, transformándola en escorrentía superficial y llevándola progresivamente al cauce. De esta manera, el modelo integra tanto los aportes de las subcuencas aguas arriba como la lluvia sobre el dominio, asegurando que no se subestime el caudal y que los niveles de inundación reflejen adecuadamente las diferentes tormentas y la dinámica completa del flujo dentro de la zona de estudio.

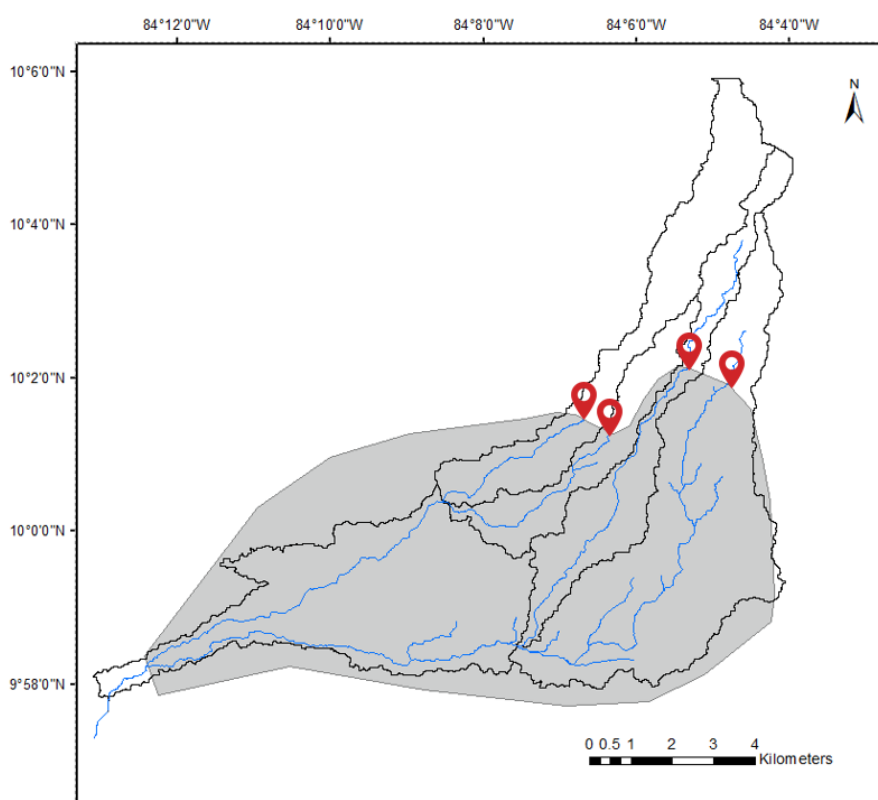


Figura 100. Puntos de carga del modelo hidrodinámico.

La Figura 101 muestra 4 escenarios de precipitación obtenidos de las simulaciones meteorológicas sobre la región de estudio, los cuales se presentan a modo de ejemplo para ilustrar los resultados de la modelación. Estos escenarios fueron escogidos arbitrariamente con el fin de visualizar diferentes respuestas de las cuencas y del modelo hidráulico.

Cada subcuenca genera los hidrogramas de creciente que se presentan en la Figura 102, ante el escenario de precipitación correspondiente. Estos hidrogramas son transitados por el modelo bidimensional, ingresando en los puntos de carga previamente indicados, resultando en la respuesta hidráulica presentada en la de la Figura 103 a la Figura 106.

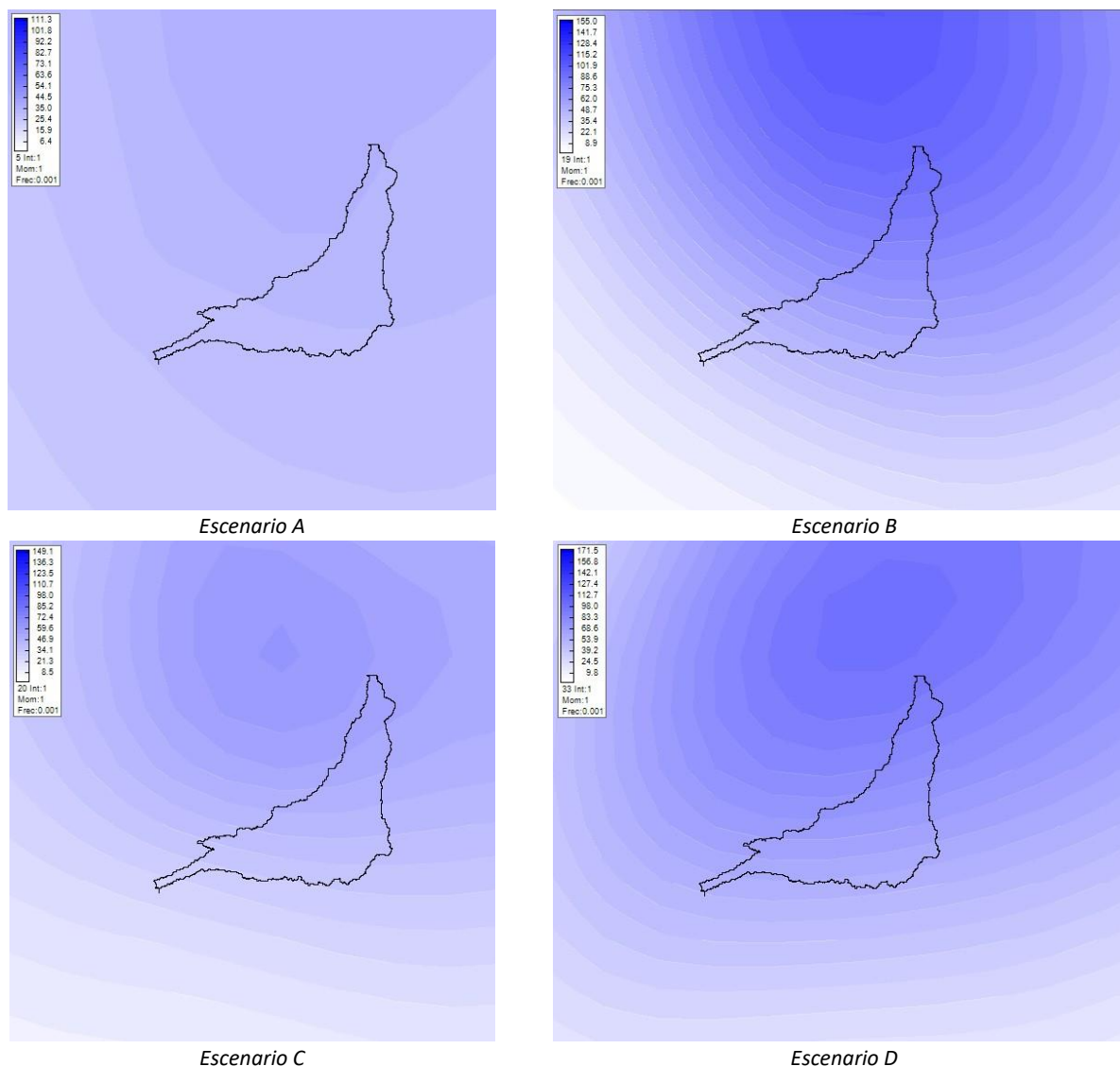


Figura 101. Distribución de la precipitación en escenarios seleccionados

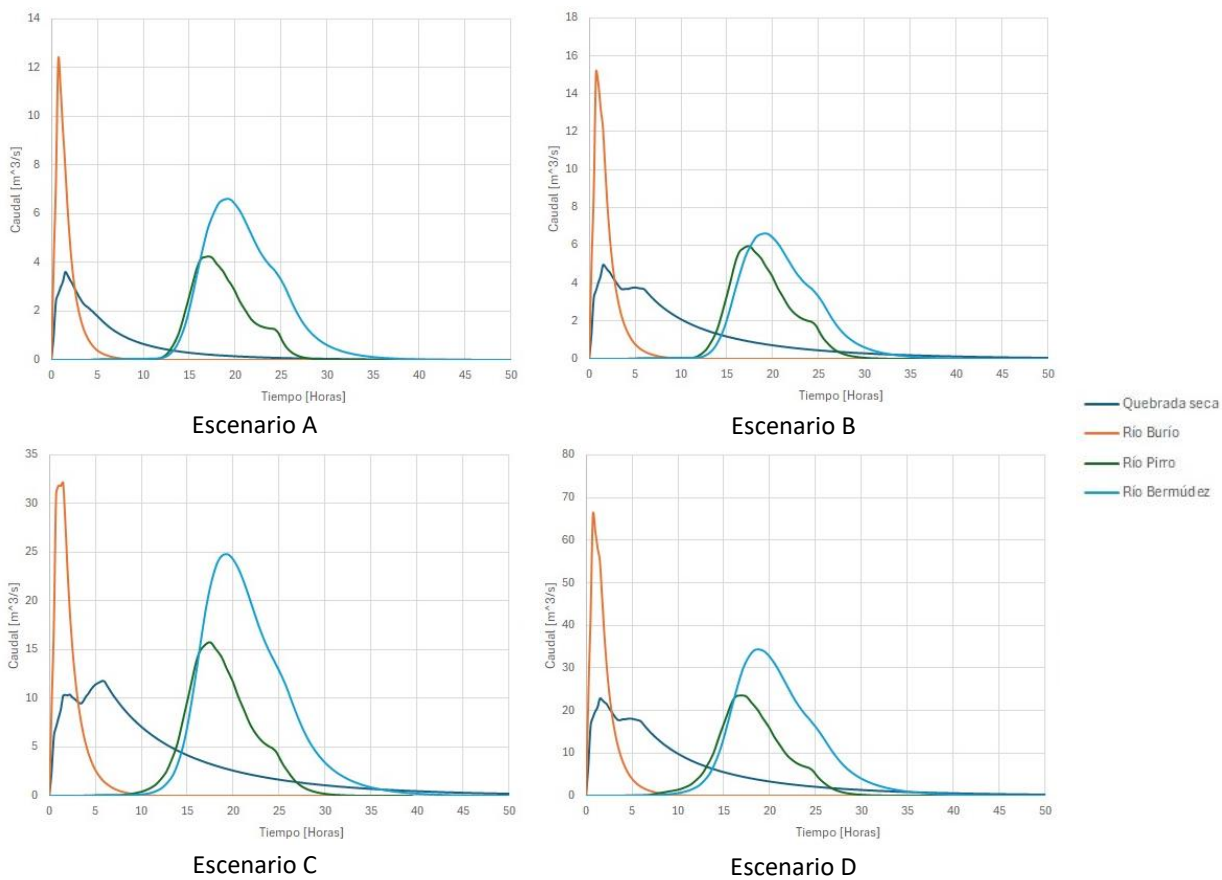


Figura 102. Hidrogramas de respuesta de cuencas ante las precipitaciones seleccionadas.

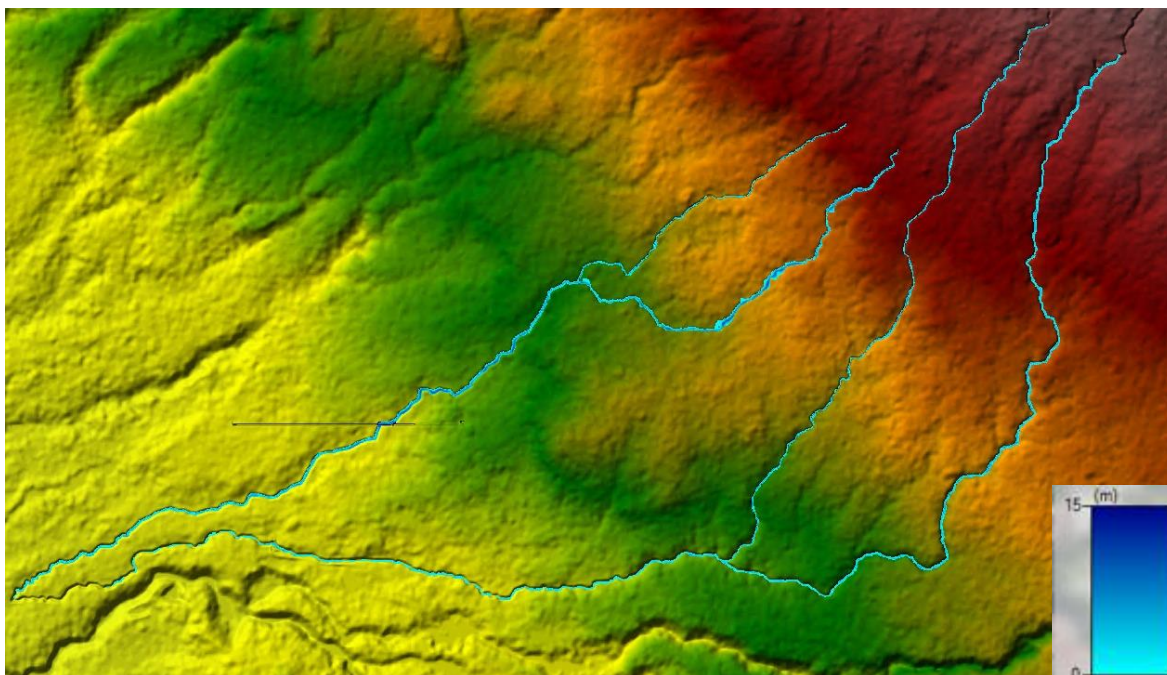


Figura 103. Respuesta del modelo hidráulico para escenarios seleccionados. Escenario A

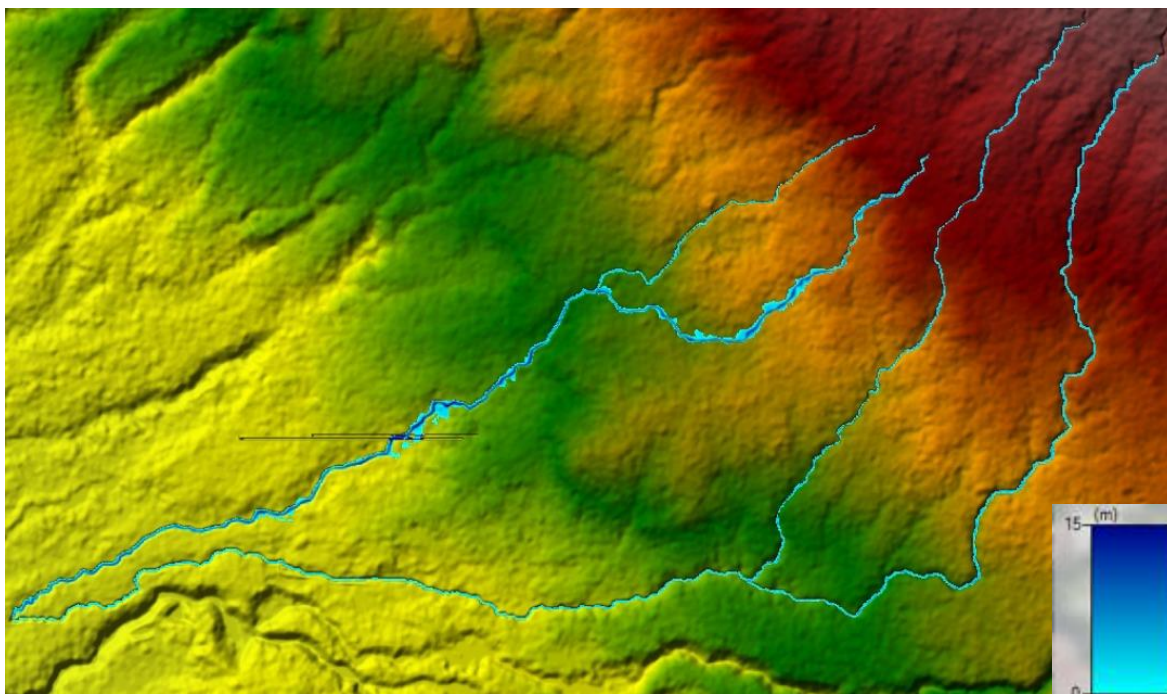


Figura 104. Respuesta del modelo hidráulico para escenarios seleccionados. Escenario B

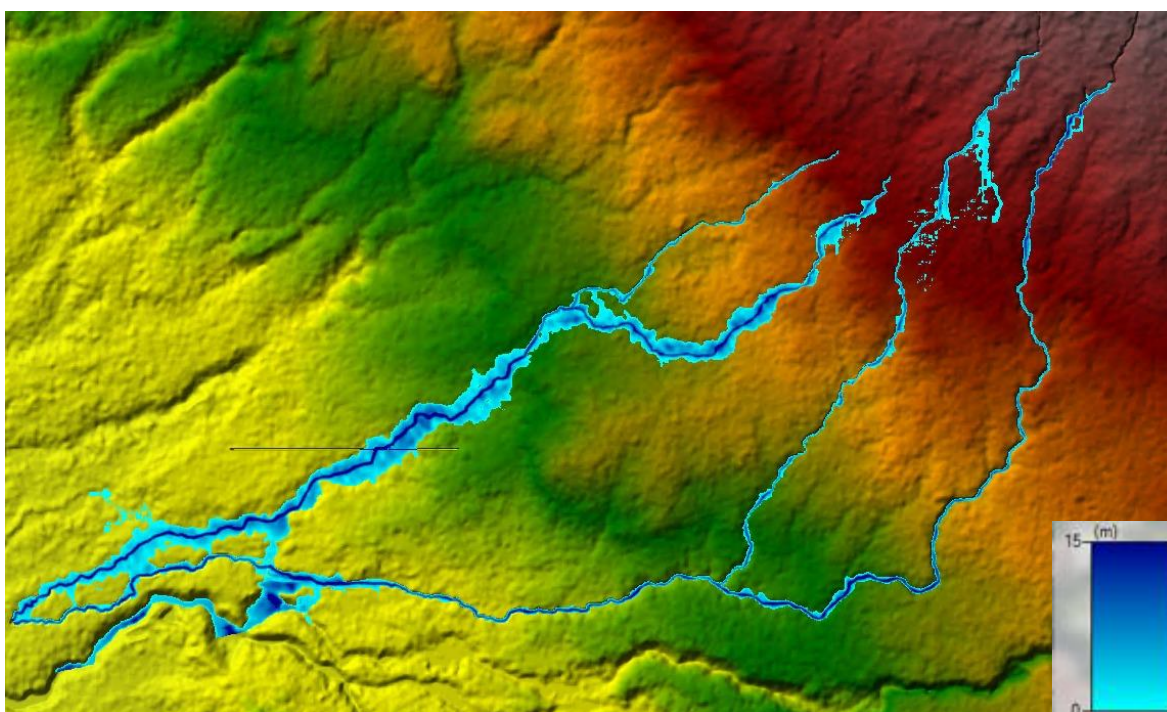


Figura 105. Respuesta del modelo hidráulico para escenarios seleccionados. Escenario C

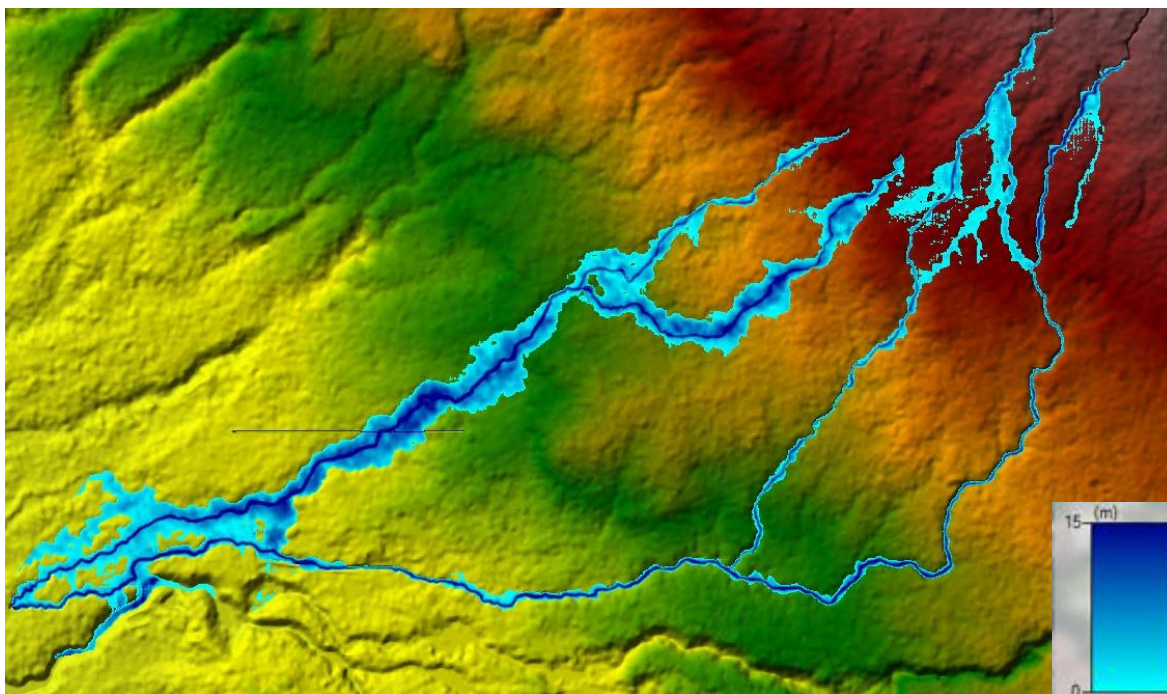


Figura 106. Respuesta del modelo hidráulico para escenarios seleccionados. Escenario D

5 AMENAZA DE INUNDACIÓN COSTERA

En este trabajo, se considera la inundación costera como detonada por fenómenos meteorológicos extremos, particularmente huracanes, dada su capacidad de producir sobre elevaciones del nivel del mar en las costas. Si bien los huracanes típicamente no impactan directamente las costas costarricenses, generan sobre elevaciones por marea de tormenta que se manifiestan como potenciales inundaciones costeras. También se consideran los tsunamis en la evaluación de la inundación costera, como se presenta en la sección 5.3. Los enfoques metodológicos de cálculo para la inundación costera detonada por ciclones tropicales y por tsunamis, se incluyen en los Anexos A.5 y A.6, respectivamente.

5.1 Insumos para la modelación

5.1.1 Trayectorias históricas

Las trayectorias de los huracanes históricos, al igual que los diferentes parámetros de intensidad asociados y su variación con la trayectoria, se obtuvieron de la base de datos IBTrACS⁴: (International Best Track Archive for Climate Stewardship) de la Oficina Nacional de Administración Oceánica (NOAA, por sus siglas en inglés) la cual constituye el archivo global más completo y reconocido de trayectorias y características de ciclones tropicales (Knapp et al., 2010). Esta base de datos cuenta con la siguiente información:

- Fecha (hora, día, mes y año) de cada observación
- Presión central del ciclón (en milibares)
- Posición geográfica (latitud, longitud)
- Velocidad máxima sostenida de viento promediada a 1 min

Para el Océano Atlántico, la base de datos cuenta con 1589 ciclones tropicales del año 1851 a 2025. Para el Océano Pacífico la base de datos cuenta con 965 ciclones tropicales de 1950 a 2025. En la Figura 107 y la Figura 108 se muestran las trayectorias de los ciclones tropicales para los Océanos Atlántico y Pacífico, respectivamente, contenidas en la base de datos IBTrACS hasta el año 2025.

⁴ La base de datos se accede a través del enlace <https://www.ncei.noaa.gov/products/international-best-track-archive>

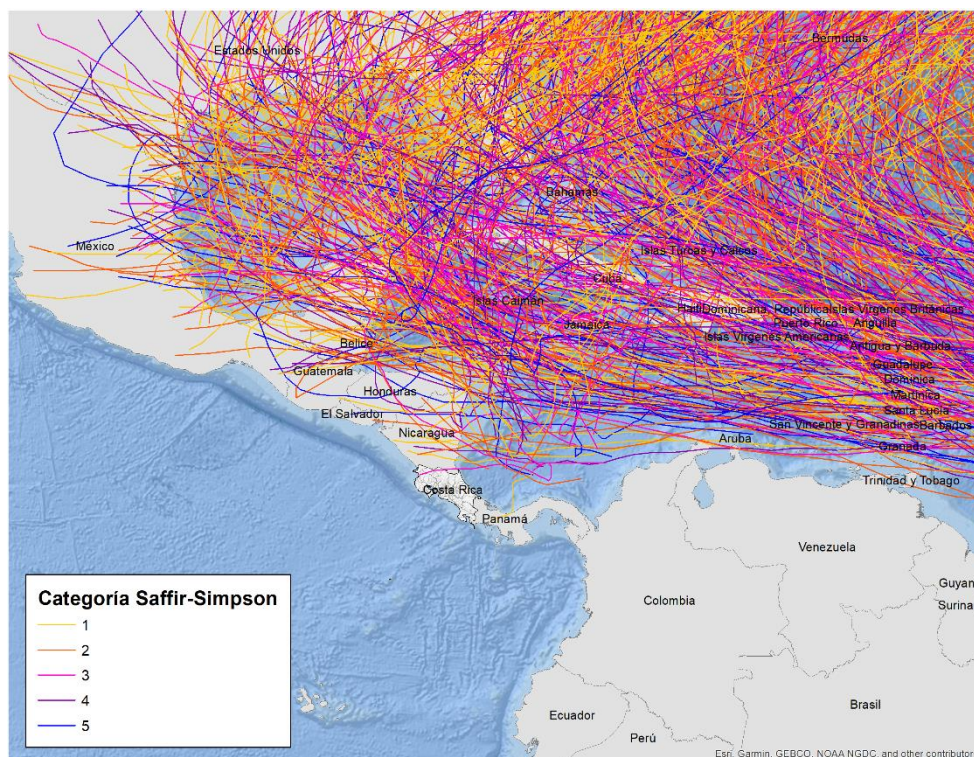


Figura 107. Trayectorias históricas en la cuenca del océano Atlántico

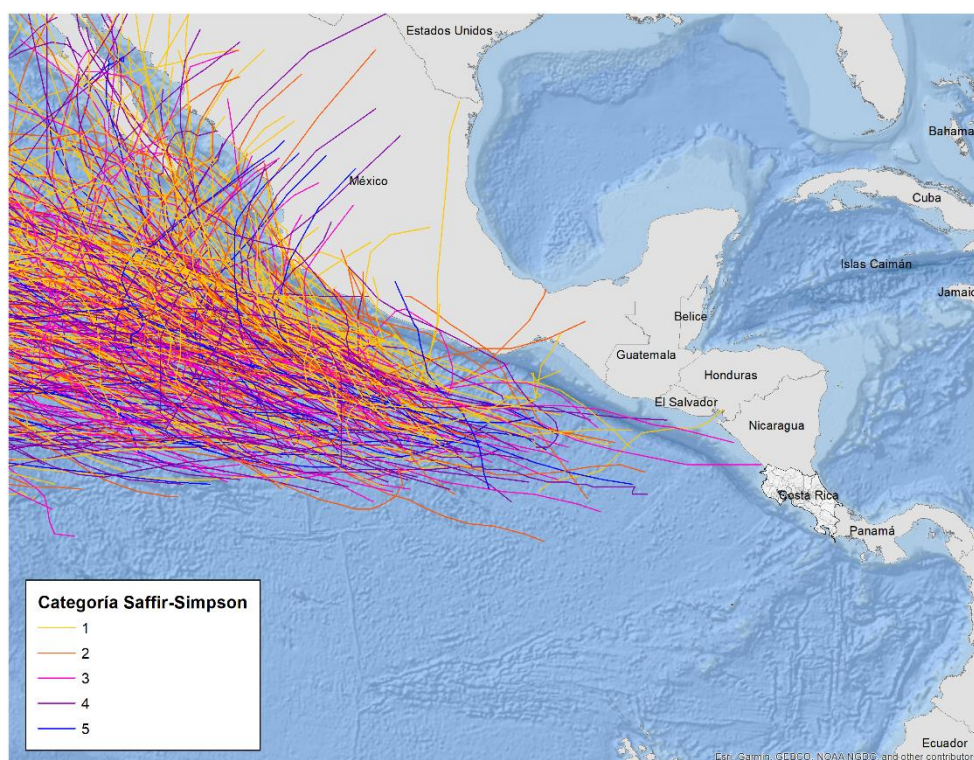


Figura 108. Trayectorias históricas en la cuenca del océano Pacífico

5.1.2 Trayectorias simuladas para clima futuro

Con el fin de incorporar la perturbación causada por el cambio climático en la ciclogénesis, así como en la vida de las tormentas, es necesario incluir proyecciones obtenidas de modelos de circulación global sobre las variables que tienen incidencia en la formación y avance de los ciclones tropicales. Con este fin, el catálogo de huracanes se compone de registros históricos tomados de IBTrACS, complementado con una muestra representativa del conjunto de datos STORM desarrollado por Bloemendaal et al. (2020). Este conjunto de datos proporciona 10.000 años equivalentes de trayectorias simuladas, desarrolladas a partir de un modelo estocástico de las principales características que determinan la trayectoria de los ciclones tropicales, como la presión central, la velocidad y dirección de avance, la ubicación de la ciclogénesis, la temperatura de la superficie del mar, la presión media al nivel del mar, entre otras.

Bloemendaal et al. (2020) incluyeron en su modelo STORM las proyecciones de 5 modelos de circulación global (GCM), los cuales son los únicos que, a la fecha, cuentan con la resolución espacial y temporal para aproximar procesos de mesoescala meteorológica. Estos modelos son: CMCC-CM2-VHRA, CNRM-CM6-1-HR, EC-Earth3P-HR, y HadGEM3-GC31-HM, todos ellos tomados del PRIMAVERA High Resolution Model Intercomparison Project (HighResMIP), que es un subproyecto del CMIP6. Las trayectorias futuras han sido determinadas usando STORM, a partir de las proyecciones de los modelos GCM mencionados, en todos los casos considerando una trayectoria de emisiones RCP8.5, siendo esta la única trayectoria incluida en esta evaluación. En la actualidad no se cuenta con proyecciones compatibles con este mismo nivel de resolución para otras trayectorias de emisiones de gases de efecto invernadero. Sobre las trayectorias seleccionadas de STORM, se realizan simulaciones estocásticas adicionales para generar nuevas trayectorias que cubren todos los posibles eventos en un rango amplio de frecuencias e intensidades.

Como consecuencia de lo anterior, no es posible modelar la amenaza de inundación costera para los mismos climas futuros presentados en la Tabla 14, y que son aplicables a las amenazas de sequía e inundación pluvial y fluvial. Por el contrario, solo es posible modelar para una trayectoria de emisiones (la SSP5-8.5), con un resultado conjunto de 4 GCMs, pero no con proyecciones obtenidas de forma separada de cada modelo. Es decir, las trayectorias ciclónicas futuras se obtienen de un ensamble de los modelos de HighResMIP, y no de cada modelo de forma individual. Esto significa que, para la inundación costera, los resultados se obtienen únicamente considerando 2 climas futuros, como se presenta en la Tabla 17.

Tabla 17. Climas futuros considerados para la inundación costera

GCM	Trayectoria	Año objetivo
HighResMIP	SSP5-8.5	2035
HighResMIP	SSP5-8.5	2050

En la Figura 109 y la Figura 110 se muestran las trayectorias simuladas con cambio climático de los ciclones tropicales para los Océanos Atlántico y Pacífico, respectivamente.

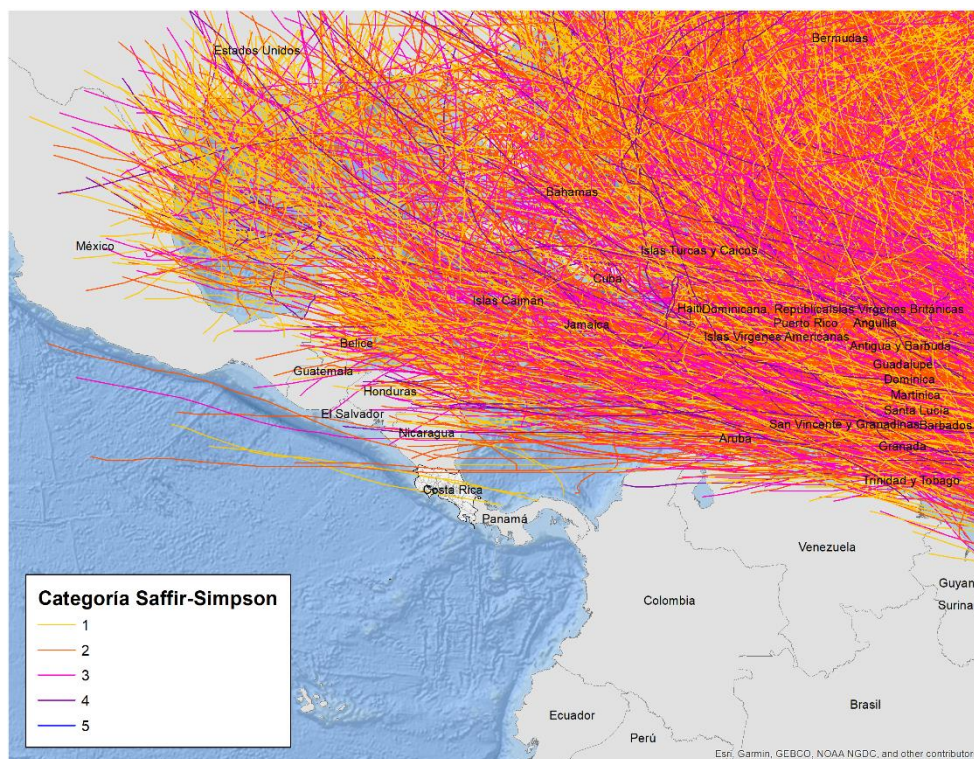


Figura 109. Trayectorias simuladas con cambio climático en la cuenca del océano Atlántico

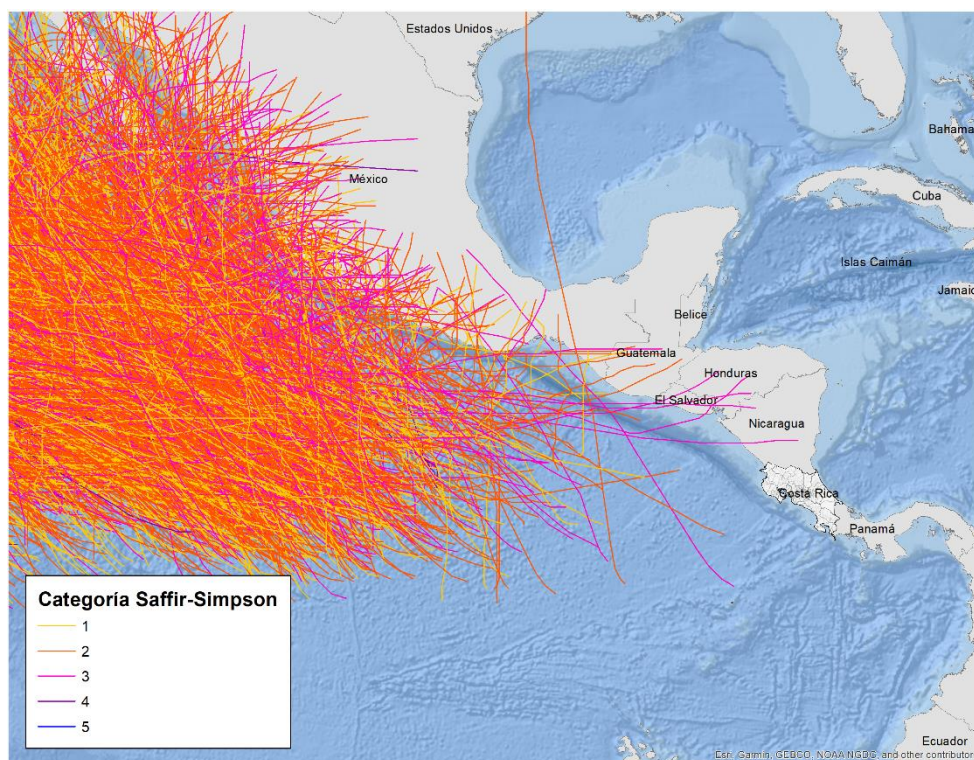


Figura 110. Trayectorias simuladas con cambio climático en la cuenca del océano Pacífico

5.1.3 Elevación del nivel del mar

Con el fin de incorporar la elevación del nivel del mar en condiciones climáticas futuras, se emplearon datos de la base Global Sea Level Change Time Series (1950–2050), desarrollada en el marco del Copernicus Climate Change Service (C3S). Este dataset fue generado a partir del modelo hidrodinámico Global Tide and Surge Model (GTSM) versión 3.0, que simula niveles de agua a intervalos de 10 minutos, incorporando forzamientos climáticos provenientes tanto de reanálisis como de modelos de circulación global (Deltares, 2021). En el periodo histórico (1950–2014), los forzamientos climáticos provienen de ERA5 y simulaciones históricas de CMIP6, mientras que para el futuro (2015–2050) se utilizan proyecciones derivadas de cinco GCMs del proyecto HighResMIP-CMIP6, bajo el escenario de emisiones SSP5-8.5. Lo anterior es totalmente consistente con lo expuesto para la definición de trayectorias ciclónicas futuras, lo que permite mantener la coherencia en la definición de los climas futuros a ser considerados.

En cuanto a su resolución espacial, el dataset presenta una malla global en coordenadas latitud-longitud con paso variable según la cercanía a la costa: 0.1° en puntos costeros, 0.25° hasta 100 km mar adentro, y hasta 1° a más de 500 km de la línea de costa. En el dominio temporal, las series incluyen datos desde 1950 hasta 2050, con resoluciones de 10 minutos, valores horarios y promedios anuales (Hermans et al., 2023).

La variable principal utilizada en este estudio corresponde al nivel medio anual del mar relativo al periodo base, expresado en metros. Esta métrica integra múltiples contribuciones al ascenso del nivel del mar, incluyendo la expansión térmica de los océanos, cambios en la circulación oceánica, aportes de las capas de hielo de Groenlandia y la Antártida, así como el ajuste glacio-isostático. Sin embargo, no considera procesos locales como la subsidencia tectónica o sedimentaria, que en ciertas regiones pueden amplificar o contrarrestar los cambios observados (IPCC, 2021).

Se obtuvieron los valores de elevación anual del nivel del mar para los años 2035 (Figura 111) y 2050 (Figura 112), específicamente sobre la franja costera de Costa Rica.

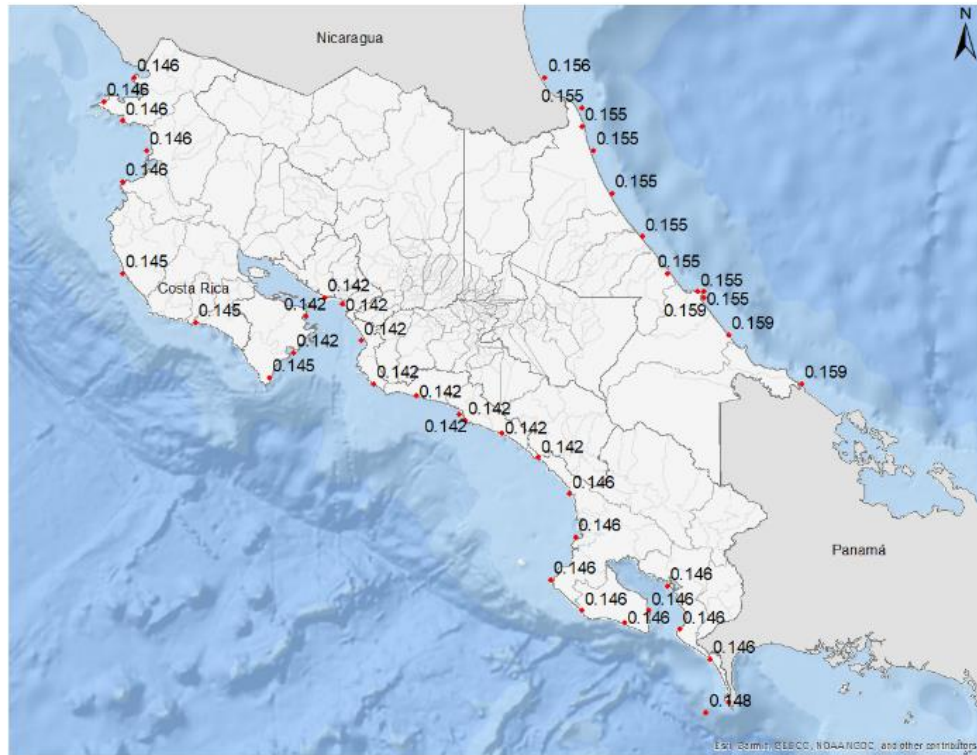


Figura 111. Elevación del nivel del mar al 2035

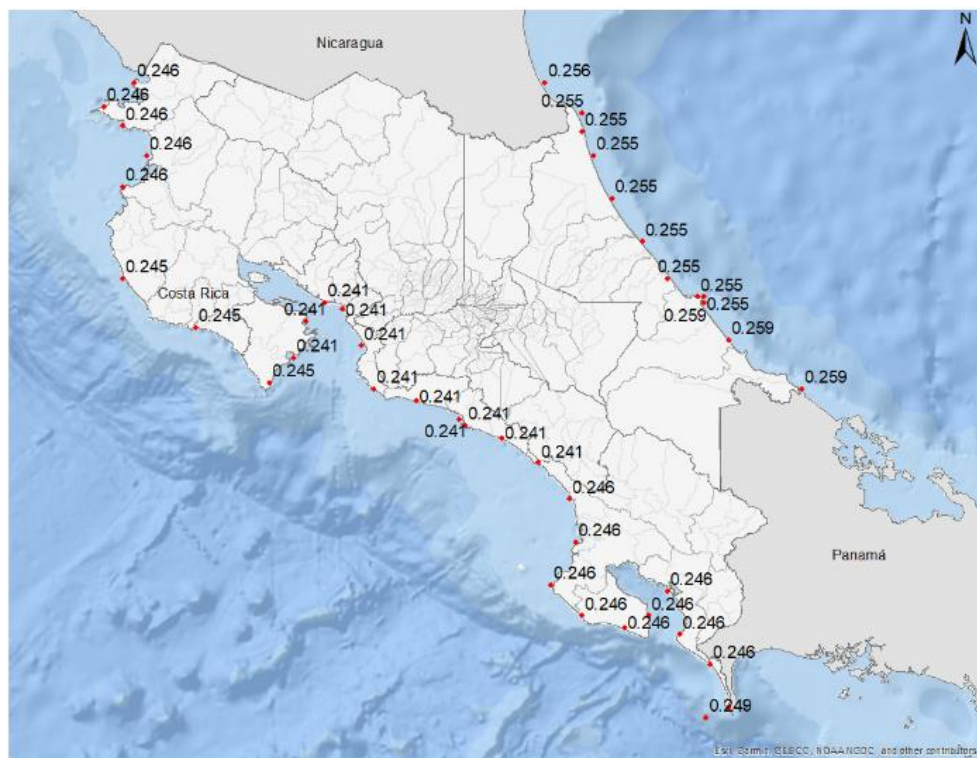


Figura 112. Elevación del nivel del mar al 2050

5.1.4 Batimetría y topografía

La batimetría es necesaria para el cálculo de la sobreelevación del mar y la consecuente marea de tormenta que se origina durante el paso de un huracán por una zona costera. La información batimétrica corresponde a la versión 2024 de la batimetría GEBCO⁵ (General Bathymetric Chart of the Oceans) cuyo modelo global continuo batimétrico tiene una resolución espacial de 15 arco segundos, lo que equivale aproximadamente a 500 metros en el ecuador, y lo convierte en uno de los modelos batimétricos con mayor resolución espacial a nivel global. La información topográfica es la misma presentada en la Figura 113, que corresponde a un ráster con resolución espacial de 12.5 m.

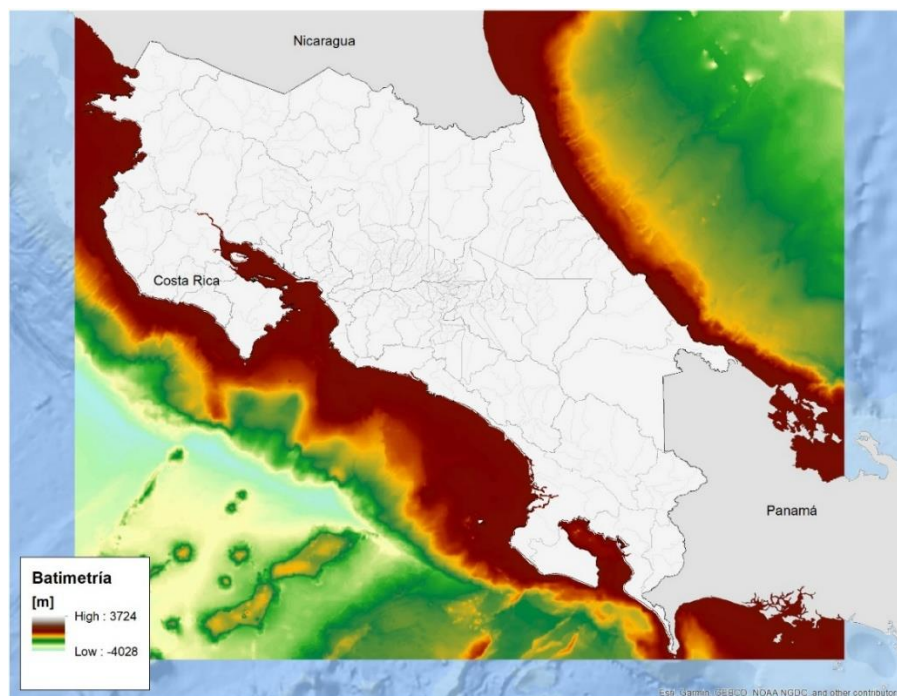


Figura 113. Batimetría. Fuente: GEBCO.

5.2 Evaluación de la amenaza de inundación costera

Se calcularon mapas de amenaza uniforme por marea de tormenta en la costa Atlántica y Pacífica costarricense, tomando como medida de intensidad tirante de inundación. Los cálculos fueron realizados empleando el programa Tropical Cyclone Hazard Modeler (TCHM)⁶. En la Figura 114 se presentan los mapas de amenaza uniforme de la altura de ola generada por la marea de tormenta sobre la costa costarricense para períodos de retorno de 50, 100, 250, 500 y 1000 años, para el escenario de clima base. Se muestran estos mapas en términos de la altura de ola, dado que a la escala de dibujo es imperceptible cualquier detalle asociado a la inundación costera. Este formato permite visualizar la amenaza a nivel de

⁵ El dataset se encuentra disponible para visualización y descarga en el enlace: <https://download.gebco.net/>.

⁶ TCHM es el módulo de evaluación de amenaza por ciclones tropicales de CAPRA ROBOT

toda la extensión de las costas costarricenses. Así mismo, la Figura 115 muestra los mapas de amenaza uniforme de altura de ola considerando el clima con trayectoria de emisiones SSP5-8.5 al 2050.

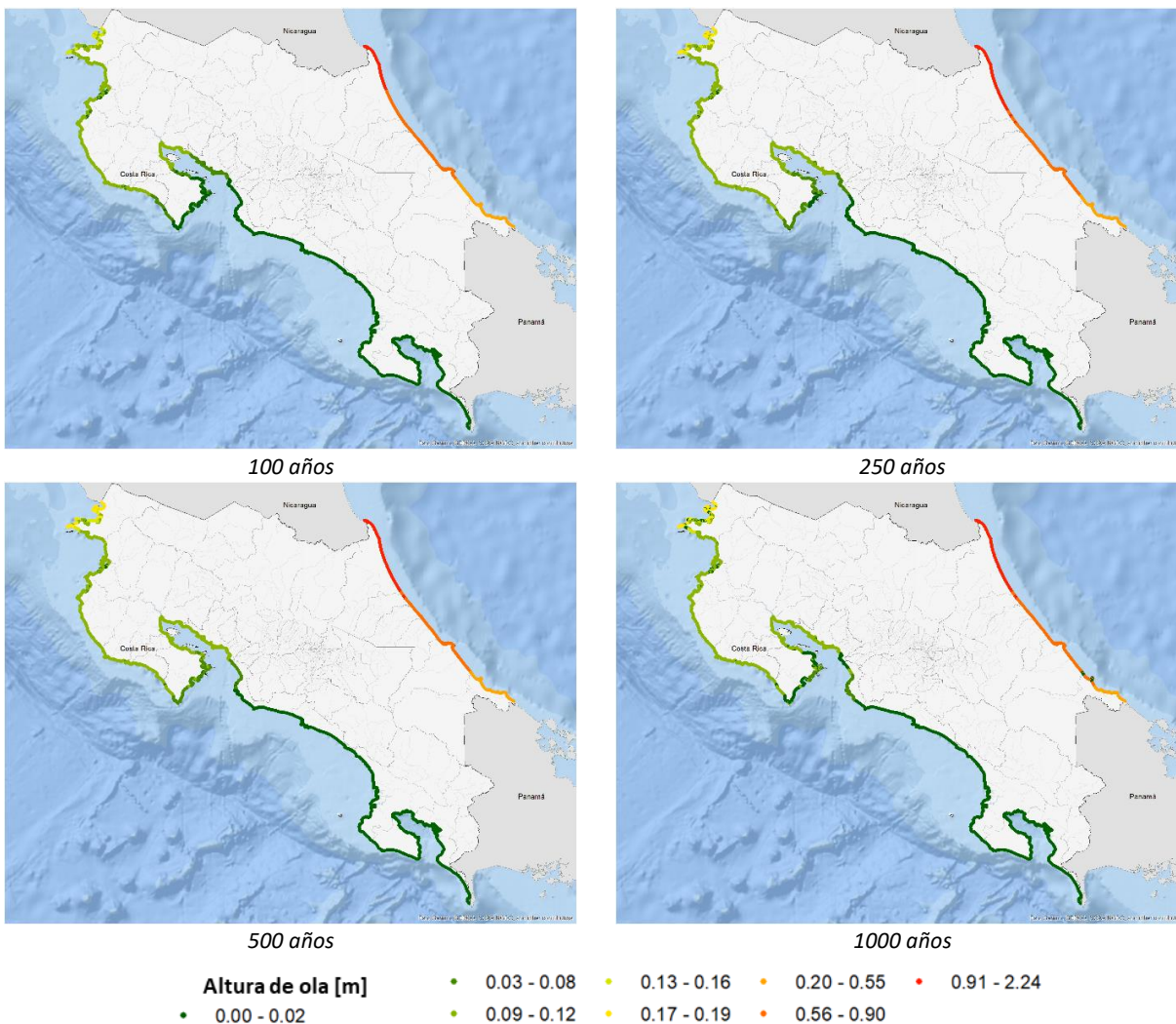


Figura 114. Mapas de amenaza uniforme por inundación costera (altura de ola) para el escenario de clima base

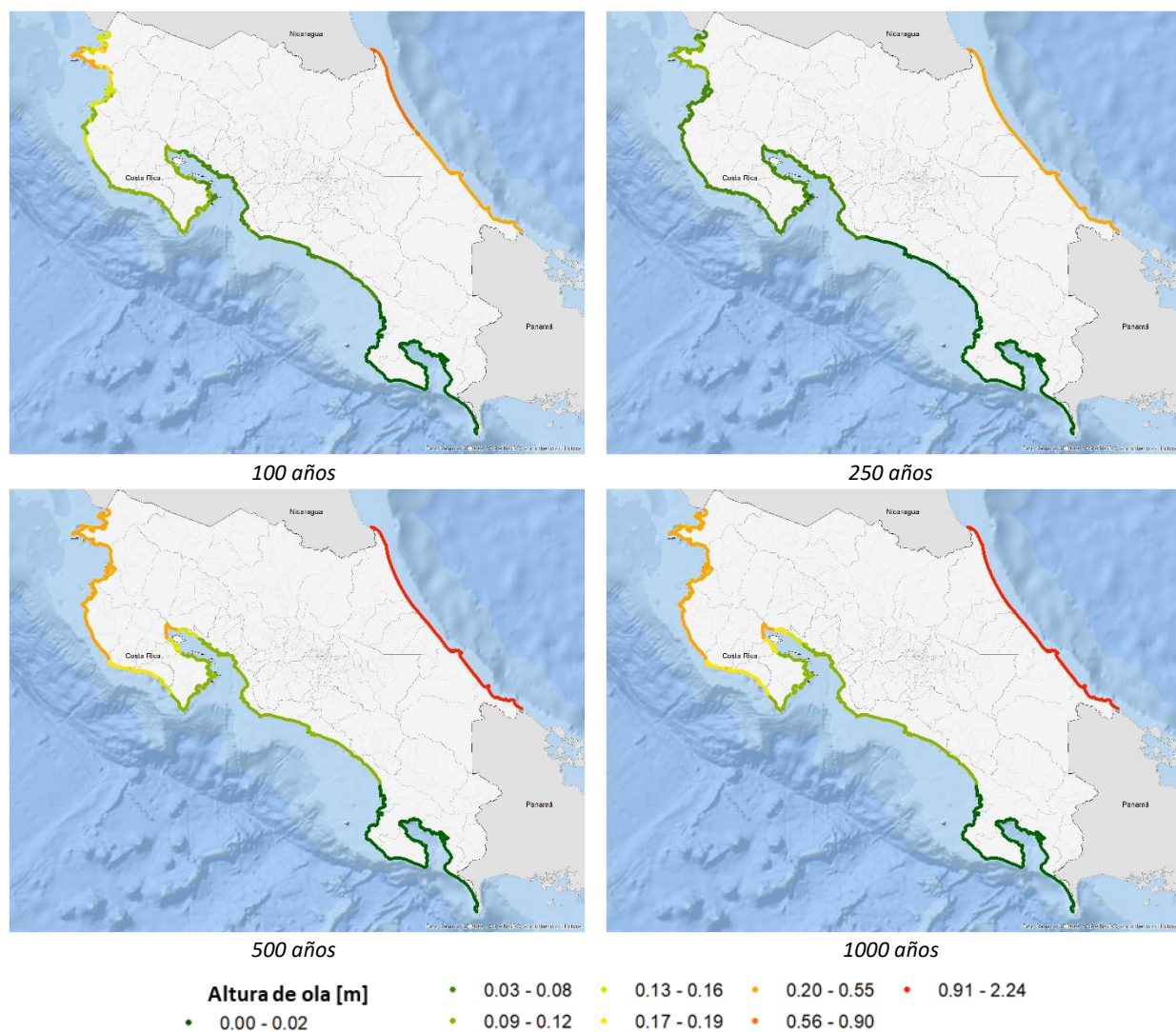


Figura 115. Mapas de amenaza uniforme por inundación costera (altura de ola) para el escenario de clima SSP5-8.5 al 2050

La extensión de la inundación costera al interior solo es perceptible si se visualizan porciones de la costa. Por esta razón, se ilustra a continuación el resultado del modelo para algunos sectores de las costas Caribe y Pacífico de Costa Rica, para 1,000 años de periodo de retorno y para el clima base. Así mismo, la Figura 117 muestra un acercamiento a la ciudad de Limón, con el fin de ilustrar la amenaza por inundación costera de 1000 años de periodo de retorno en una menor escala. Se hace énfasis en que se trata únicamente de una selección arbitraria de sectores de costa, con el fin de ilustrar al lector. No obstante, la totalidad de los resultados pueden ser consultados en el Dataset del proyecto.

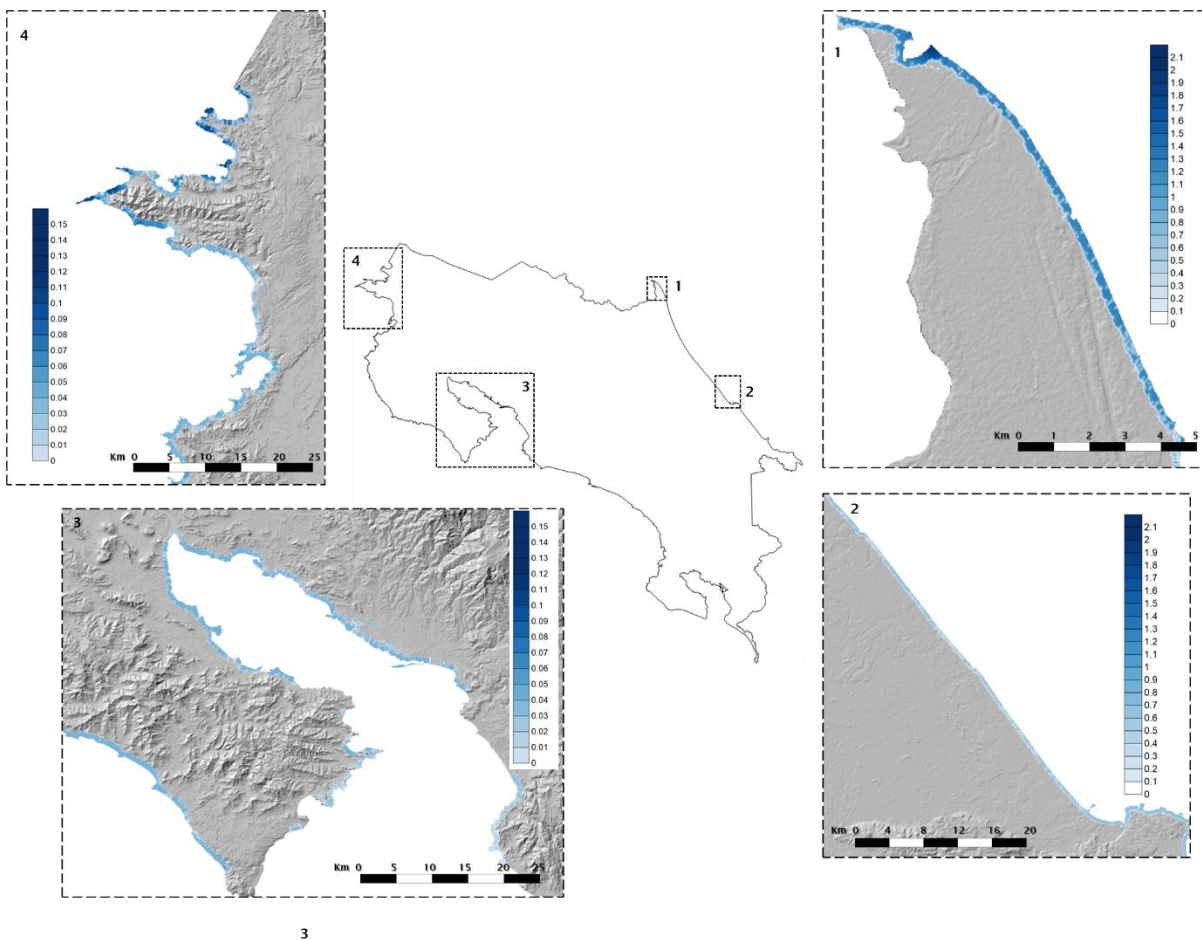


Figura 116. Acercamientos a sectores seleccionados de la costa costarricense. Inundación costera de 1000 años de periodo de retorno para clima base. Altura de inundación en metros.

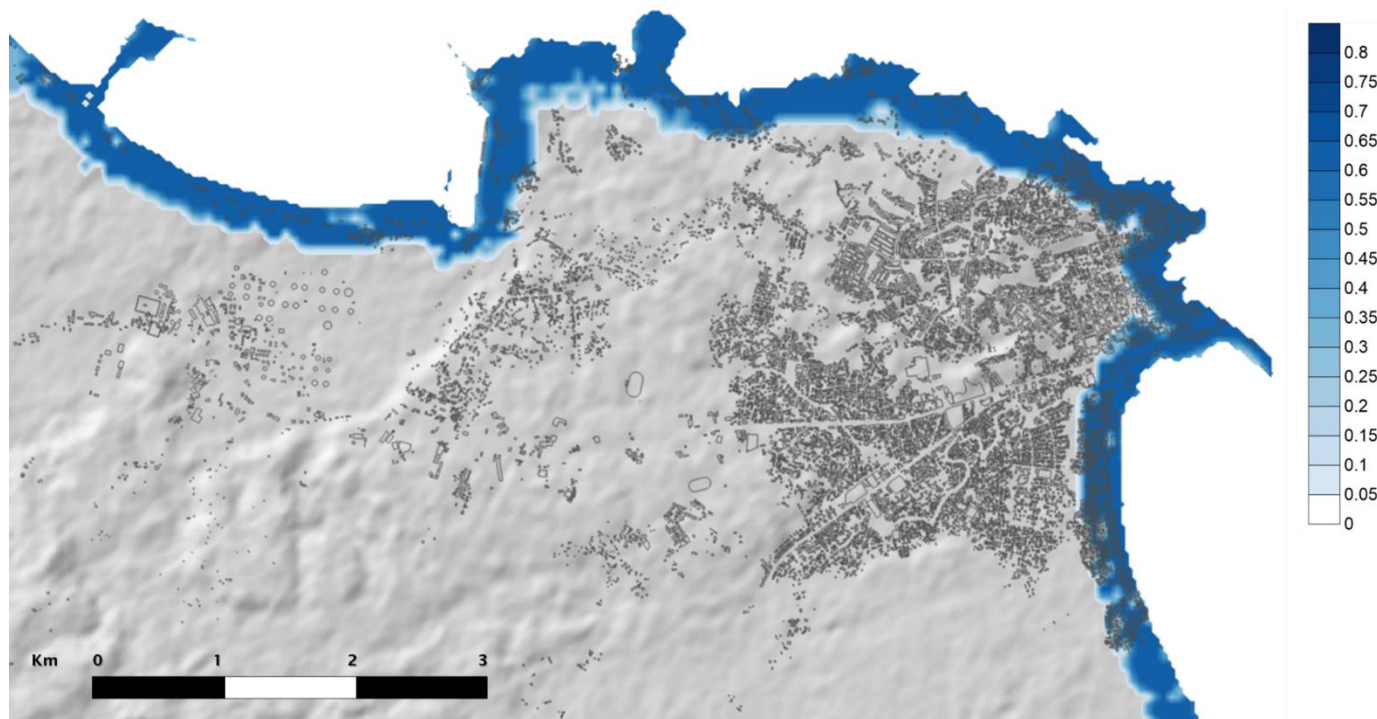


Figura 117. Acercamiento a la ciudad de Limón. Inundación costera de 1000 años de periodo de retorno para clima base. Altura de inundación en metros.

5.3 Inundación costera por tsunami

Como valor agregado, se evaluó la inundación costera por tsunami en la costa pacífica de Costa Rica, haciendo uso del modelo de amenaza sísmica presentado en el Informe de Geoamenazas de esta consultoría⁷ (modelo ASLAC) en lo que se refiere a la definición de los eventos sísmicos para el cálculo (modelo de generación), y el modelo de propagación y arribo que se presentó en el Informe de inicio.

Se definió una colección de temblores capaces de detonar tsunamis en la costa pacífica de Costa Rica. Estos son sismos generados en la zona de subducción, de alta magnitud y relativa baja profundidad. Se establecieron como umbrales para la selección de los eventos sísmicos, con base en la experiencia del consultor, una magnitud de momento M_w mayor o igual a 7 y profundidad menor a 20 Km.

La Figura 118 muestra los eventos sísmicos seleccionados. Arriba, se muestra el catálogo de eventos de Magnitud M_w mayor a 7 generados en la zona de subducción del pacífico costarricense, obtenidos de un catálogo estocástico de 10,000 años equivalentes generado desde el modelo ASLAC. Abajo en la Figura 118, se muestran solo el subgrupo de sismos con profundidades hipocentrales menores a 20 Km. Este subgrupo corresponde al conjunto de eventos empleados en la evaluación de la amenaza por tsunami, constituido por 240 sismos.

⁷ Informe titulado: "Revisión de datos de amenazas geológicas y recomendaciones para aplicar en la evaluación del riesgo". INGENIAR-CIMNE 2025 para GRMA.

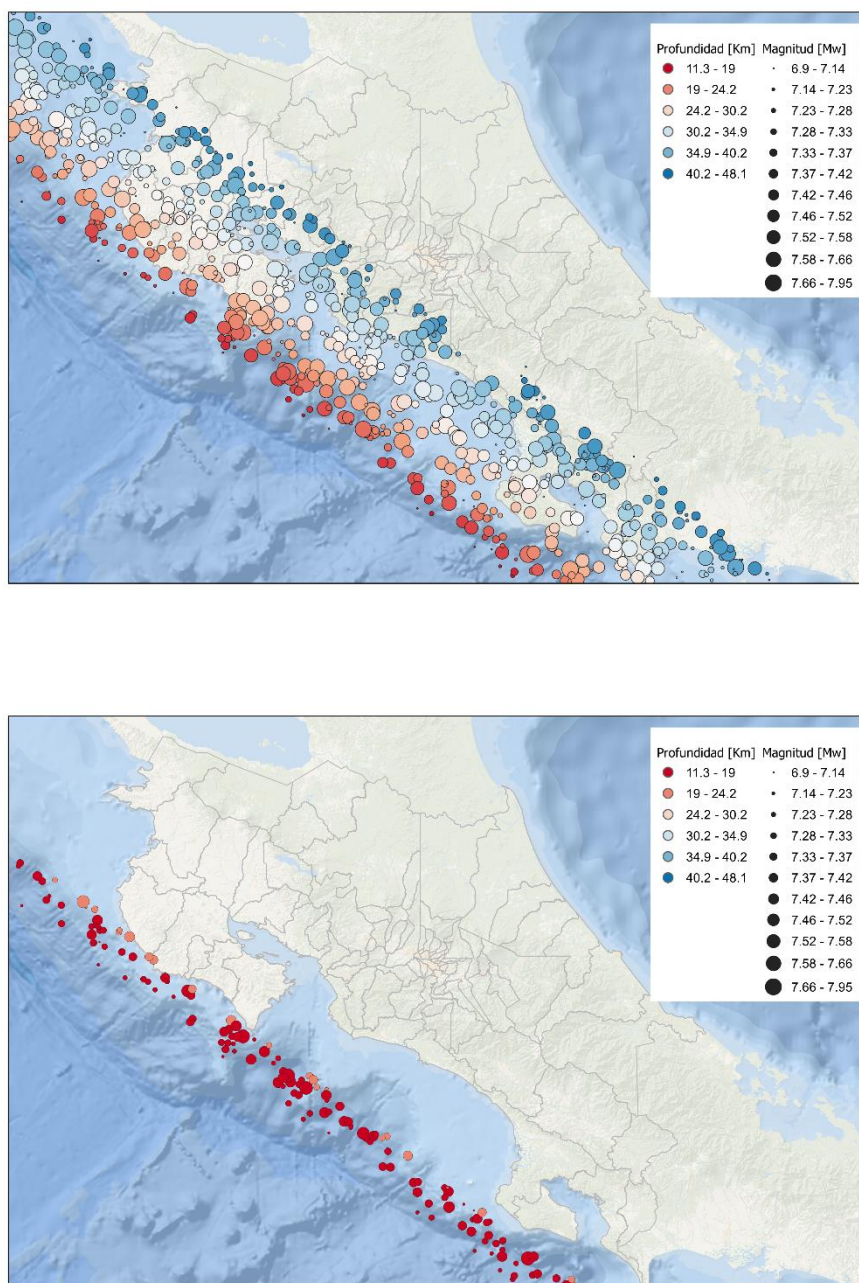


Figura 118. Eventos sísmicos para la modelación de tsunamis. Arriba) Sismos de subducción con Mw mayor o igual a 7. Abajo) Subgrupo de sismos con profundidad hipocentral menor a 20 Km.

Para cada uno de los temblores se aplica el método de cálculo presentado en el Anexo A.6 y se evalúa la inundación costera, usando la misma información topográfica y batimétrica presentada anteriormente (ver sección 5.1.4). La integración de estos resultados permite obtener alturas de inundación costera por tsunami para diferentes periodos de retorno.

Como resultado, se obtienen los valores de altura de ola mostrados en la Figura 119 para diferentes periodos de retorno. Al igual que con la inundación costera por ciclones tropicales, se presentan en la Figura 120 algunos acercamientos a sectores de la costa pacífica, para 1000 años de periodo de retorno. Los correspondientes mapas de altura de inundación por tsunami para otros periodos de retorno se encuentran incluidos en el Dataset del proyecto.

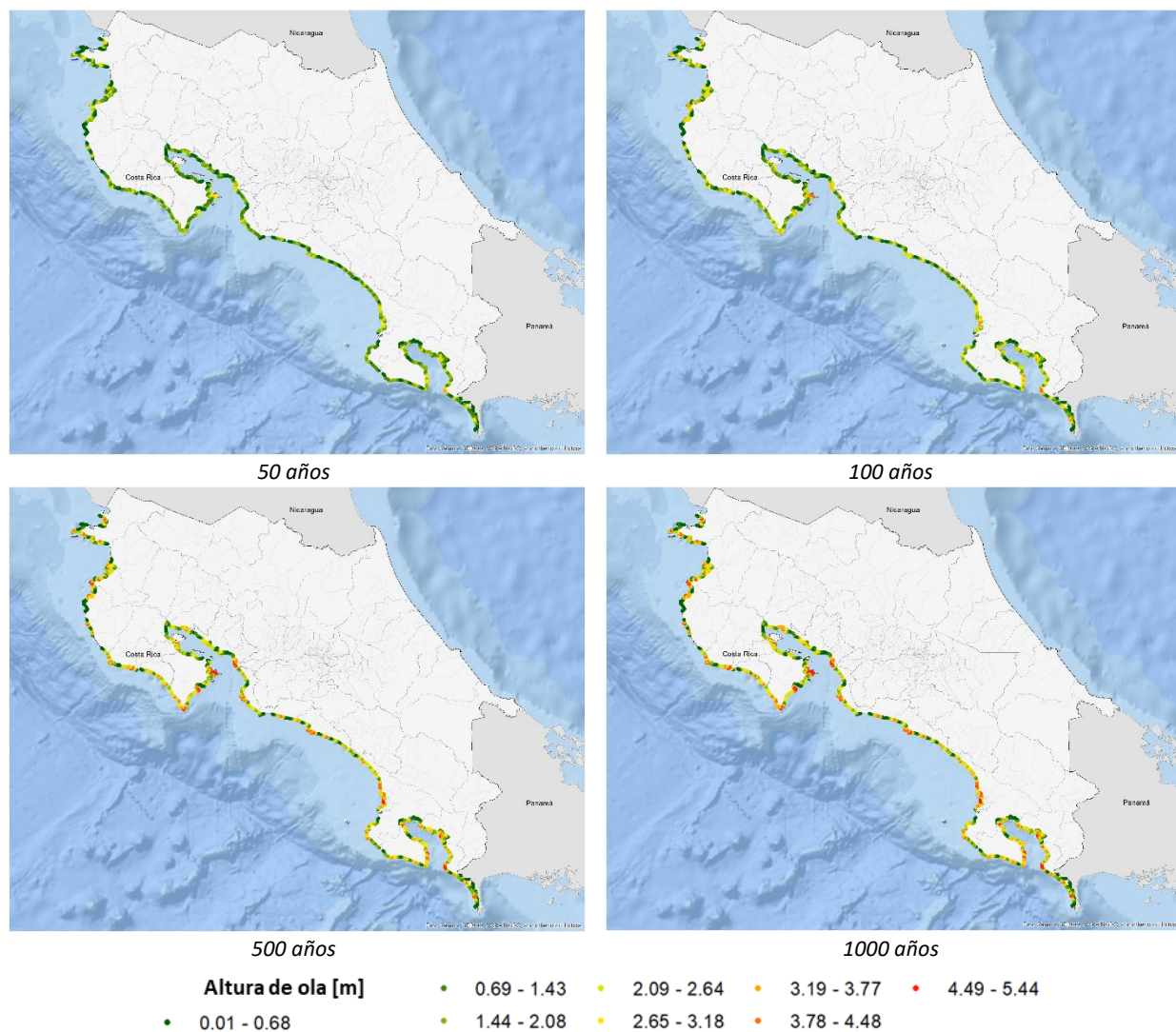


Figura 119. Mapas de amenaza uniforme por inundación costera por tsunami (altura de ola)

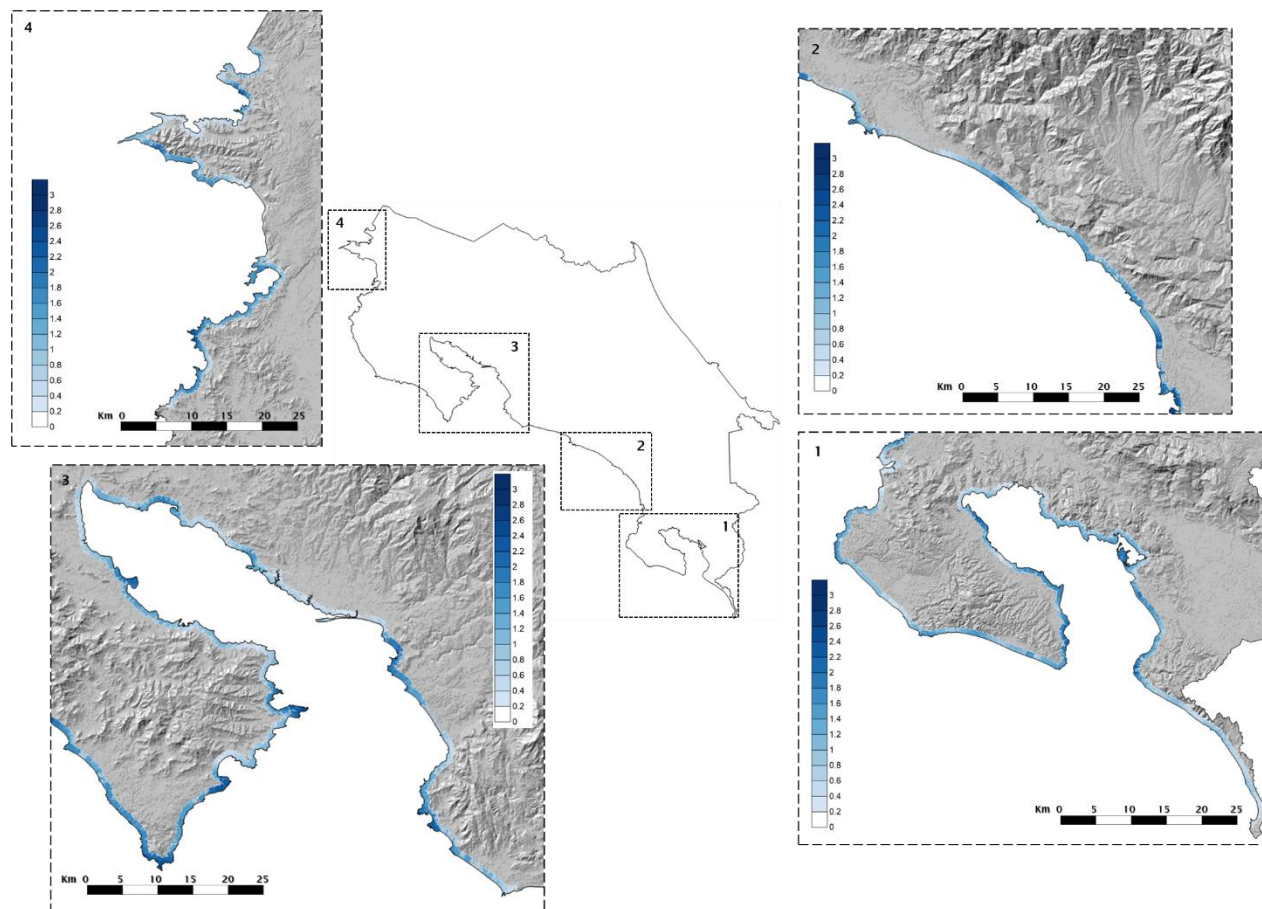


Figura 120. Acercamientos a sectores seleccionados de la costa costarricense. Inundación costera por tsunami de 1000 años de periodo de retorno. Altura de inundación en metros.

6 PROGRAMA DE DESARROLLO DE CAPACIDADES

Como parte del proceso de fortalecimiento de capacidades en modelación del riesgo, se desarrolla el Curso de Modelación Probabilista del Riesgo de Desastres. Este curso está dirigido a profesionales, especialistas e investigadores vinculados al Grupo Técnico de Trabajo del programa GRMA – Costa Rica, así como funcionarios de otras entidades locales interesadas, con formación en disciplinas relacionadas con las ciencias de la tierra, ingeniería, matemáticas, física, econometría o análisis financiero/actuarial.

El objetivo principal del curso es proporcionar a los participantes los fundamentos científicos necesarios para comprender y ejecutar la modelación del riesgo, así como interpretar sus resultados. Al finalizar el proceso formativo, los participantes estarán en capacidad de realizar evaluaciones de riesgo ante amenazas naturales utilizando herramientas avanzadas del sistema CAPRA-ROBOT.

El curso asincrónico de capacitación inició formalmente el 18 de marzo de 2025. Tiene una duración aproximada de 24 semanas con una dedicación estimada de 2 horas semanales. No obstante, la duración real dependerá de la dedicación personal al curso. Este curso cubre todas las temáticas de modelación previstas en el proyecto GRMA - Costa Rica, como se detalla en el Informe de Inicio de esta consultoría. Esto incluye por supuesto, actividades de capacitación en amenaza y riesgo sísmico, volcánico y por deslizamientos.

6.1 Módulo 1 - Fundamentos

El curso, de modalidad asincrónica, inició formalmente el 18 de marzo de 2025 con el Módulo 1, el cual abordaba los fundamentos generales de la evaluación probabilista del riesgo. Una vez completado este módulo, los participantes continuaron con el Módulo 2, enfocado en la modelación de amenazas naturales y la evaluación de la vulnerabilidad de los elementos expuestos.

6.2 Módulo 2 – Componentes de la modelación del riesgo

El Módulo 2, iniciado el 13 de mayo de 2025, permite a cada participante seleccionar la amenaza de interés entre las consideradas en el proyecto GRMA. Es decir, el módulo proporciona materiales teóricos y prácticos sobre la modelación de amenaza y vulnerabilidad de los elementos expuestos para todas las amenazas cubiertas por el proyecto, permitiendo así una formación especializada y contextualizada a las necesidades de los participantes.

En este informe se presentan de forma resumida el alcance y contenidos de los módulos relacionados con ciclones tropicales, inundación y sequía únicamente.

6.2.1 Ciclones tropicales

Este módulo inicia cubriendo los métodos requeridos para incorporar el cambio climático en la evaluación de riesgos hidrometeorológicos, dado que fenómenos como las lluvias intensas —detonantes clave en la ocurrencia de deslizamientos— se ven significativamente afectados por este fenómeno.

Posteriormente, aborda conceptos meteorológicos clave relacionados con la generación de depresiones tropicales, tormentas y ciclones, su ciclo de vida, los modelos de campo de viento y marejada ciclónica, así

como los enfoques de modelación. Desde la perspectiva de la ingeniería, también se incluyen los efectos topográficos, las transformaciones por duración de ráfagas, la respuesta de la vivienda y los modelos de daño en edificaciones.

Asimismo, se presentan los modelos matemáticos necesarios para la correcta aplicación y comprensión de la teoría de evaluación probabilista del riesgo, sus resultados y métricas asociadas. La Tabla 18 presenta en detalle los temas tratados en cada unidad.

Tabla 18. Temario del módulo 2: Ciclones tropicales

Unidad	Título	Temas
1	Conceptos básicos de cambio climático	• Sistema climático terrestre • Balance energético • Circulación general de la atmósfera • Forzamiento radiativo • Emisiones de gases de efecto invernadero • Modelos de circulación global • Proyecciones globales
2	Estructura y formación de ciclones tropicales	• Estructura • Condiciones para la formación • Generación de ciclones tropicales • Escala Saffir Simpson • Trayectorias y avisos
3	Efectos de los ciclones tropicales	• Viento de gradiente • Capa límite • Velocidad de ráfaga • Hidrógrafas de marea • Espiral de Ekman • Marea por baja presión
4	Evaluación probabilista de la amenaza por ciclones tropicales	• Completitud de trayectorias • Perturbación de trayectorias • Catálogo de ciclones e integración de la amenaza • Influencia del cambio climático en la formación de ciclones tropicales • Tendencia en la elevación del nivel del mar
5	Modelos de daño: Funciones de fragilidad y vulnerabilidad	• Curvas de fragilidad • Curvas de vulnerabilidad
6	Vulnerabilidad por viento e inundación	• Efectos del viento en las estructuras • Cargas por presiones en edificaciones • Cargas de viento cíclicas en edificios altos • Vulnerabilidad al campo de viento • Vulnerabilidad por impacto de escombros • Vulnerabilidad a la inundación por marea

Las sesiones teóricas se complementan con sesiones prácticas tipo *hands-on*, en las que los participantes aprenderán a utilizar software especializado para la modelación de la amenaza por ciclones tropicales, entre los cuales se incluyen:

Tropical Cyclones Hazard Modeler: TCHM es el módulo de la plataforma CAPRA Robot para la amenaza por ciclones tropicales. Implementa metodologías de cálculo para vientos fuertes, marea de tormenta y precipitación acumulada. TCHM permite simular de manera adecuada el fortalecimiento y debilitamiento de los ciclones tropicales a medida que avanzan por trayectorias aleatorias, así como sus efectos en superficie en términos de intensidad de la amenaza.

Vulnerability Studio: es una herramienta que permite modelar la vulnerabilidad de los elementos expuestos mediante funciones matemáticas que relacionan la intensidad de la amenaza con el impacto físico directo. Implementa varios métodos para la creación de funciones de vulnerabilidad adaptadas a diferentes tipos de amenazas, permitiendo estimar funciones de probabilidad de pérdidas para distintos niveles de intensidad.

CAPRA ROBOT: es el motor de cálculo de riesgo. Permite calcular la Curva de Excedencia de Pérdidas (LEC) para cualquier base de datos de exposición, utilizando el marco probabilista de evaluación de riesgo tipo CAT. Este módulo permite agregar pérdidas provenientes de diferentes amenazas, generando resultados de riesgo multiamenaza. CAPRA ROBOT calcula métricas financieras como la Pérdida Anual Esperada (AAL), la Pérdida Máxima Probable (PML), entre otras.

Los participantes estarán en capacidad de realizar modelaciones probabilistas de amenaza por ciclones tropicales y estimaciones de riesgo, haciendo uso de estas herramientas, que están alineadas con la metodología CAPRA empleada en el proyecto GRMA. Estas capacidades están en línea con los objetivos del Proyecto Operacional 3, fortaleciendo la integración de herramientas técnicas en la gestión del riesgo de desastres en el sector turismo.

6.2.2 Inundación

Este módulo inicia cubriendo los métodos requeridos para incorporar el cambio climático en la evaluación de riesgos hidrometeorológicos, dado que fenómenos como las lluvias se ven significativamente afectados por este fenómeno.

Posteriormente, aborda aspectos clave de las inundaciones fluviales, las cuales ocurren cuando lluvias excesivas durante un período prolongado hacen que un río exceda su capacidad, el agua se desborda del cauce e inunda las áreas cercanas, dependiendo de la topografía local.

Se utiliza un generador de clima para obtener series de precipitación que sigan el mismo régimen que los registros históricos en el área de estudio.

Desde la perspectiva de la ingeniería, se analiza la serie estocástica de precipitaciones intensas, así como la identificación del conjunto de eventos de lluvia excesiva que pueden desencadenar inundaciones.

También se abordan los análisis hidrológicos e hidráulicos completos en la cuenca y en el cauce del río.

Asimismo, se presentan los modelos matemáticos necesarios para la correcta aplicación y comprensión de la teoría de evaluación probabilista del riesgo, así como sus resultados y métricas asociadas.

La Tabla 19 presenta en detalle los temas que serán tratados en cada unidad.

Tabla 19. Temario del módulo 2: Inundaciones

Unidad	Título	Temas
1	Conceptos básicos de Cambio Climático	• Sistema climático terrestre • Balance energético • Circulación general de la atmósfera • Forzamiento radiativo • Emisiones de gases de efecto invernadero • Modelos de circulación global • Proyecciones globales
2	Incorporación del CC en la modelación de amenaza y riesgo	• Downscaling • Simulación estocástica • Regla de escala • Modelo de todas las variaciones
3	Modelación hidrológica	• Ciclo hidrológico • Teorema de transporte de Reynolds • Sistema hidrológico: precipitación, evapotranspiración, infiltración y escorrentía • Hidrograma de salida de la cuenca hidrográfica
4	Modelación hidráulica	• Modelación unidimensional • Modelación bidimensional • HEC-RAS
5	Modelos de daño: Funciones de fragilidad y vulnerabilidad	• Curvas de fragilidad • Curvas de vulnerabilidad • Vulnerabilidad binaria
6	Vulnerabilidad ante inundaciones	• Umbrales lluvia-deslizamiento • Deslizamientos detonados por lluvias intensas • Deslizamientos detonados por terremotos

Las sesiones teóricas estarán acompañadas de sesiones *hands-on* donde el estudiante aprenderá el manejo de software especializado para la modelación de la amenaza por inundaciones, entre los cuales se incluyen:

Drought Pro: es una herramienta de simulación avanzada que permite la modelación estocástica del forzamiento meteorológico, en particular la lluvia, como fenómeno detonante de deslizamientos. El sistema fue inicialmente concebido para la modelación de sequías (de ahí su nombre) pero ha evolucionado a ser un sistema de simulación climática general, el cual por medio de un generador climático estocástico crea múltiples simulaciones de variables meteorológicas (como la precipitación y la temperatura), basándose en las series diarias históricas disponibles en el territorio. Dadas estas capacidades, se emplea en la modelación de múltiples fenómenos distintos, como sequías, inundaciones,

deslizamientos o incendios forestales, al permitir la construcción de modelos probabilistas del forzamiento meteorológico.

Flood Analyst: es un software cuyo objetivo es la evaluación de la amenaza por inundación. Calcula las intensidades de amenaza para eventos de lluvias intensas e inundaciones fluviales en múltiples ubicaciones dentro del área de interés. Flood Analyst genera eventos estocásticos de lluvias intensas y está acoplado con el software HEC-RAS (Brunner & Bonner, 1994), el cual realiza el análisis hidrológico e hidráulico para cada uno de los eventos y proporciona la huella de inundación asociada.

Vulnerability Studio: es una herramienta que permite modelar la vulnerabilidad de los elementos expuestos mediante funciones matemáticas que relacionan la intensidad de la amenaza con el impacto físico directo. Implementa varios métodos para la creación de funciones de vulnerabilidad adaptadas a diferentes tipos de amenazas, permitiendo estimar funciones de probabilidad de pérdidas para distintos niveles de intensidad.

CAPRA ROBOT: como se mencionó anteriormente, es el motor de cálculo de riesgo. Permite calcular la Curva de Excedencia de Pérdidas (LEC) para cualquier base de datos de exposición, utilizando el marco probabilista de evaluación de riesgo tipo CAT. Este módulo permite agregar pérdidas provenientes de diferentes amenazas, generando resultados de riesgo multiamenaza. CAPRA ROBOT calcula métricas financieras como la Pérdida Anual Esperada (AAL), la Pérdida Máxima Probable (PML), entre otras.

Los participantes estarán en capacidad de realizar modelaciones probabilistas de amenaza por inundaciones y estimaciones de riesgo, haciendo uso de estas herramientas, que están alineadas con la metodología CAPRA empleada en el proyecto GRMA. Estas capacidades están alineadas con los objetivos del Proyecto Estratégico, y los Proyectos Operacionales 1, 2 y 3, orientados al fortalecimiento de las capacidades técnicas para la evaluación del riesgo de desastres en el sector de infraestructura vial, turismo, el sector agropecuario y las edificaciones e infraestructura del cantón Heredia.

6.2.3 Sequía

Este módulo inicia cubriendo los métodos requeridos para incorporar el cambio climático en la evaluación de riesgos hidrometeorológicos, dado que fenómenos como las lluvias intensas se ven significativamente afectados por este fenómeno.

Posteriormente, abarca la generación de condiciones climáticas futuras que combinan déficits de precipitación con temperaturas superiores al promedio durante un período determinado, en una zona geográfica específica. Utilizando la información de eventos estocásticos futuros, se puede realizar una evaluación prospectiva de sequía para el sector agrícola, con el fin de evaluar daños a los cultivos y cuantificar pérdidas. Se puede calcular la reducción total del rendimiento debido al estrés hídrico en las tierras cultivables de una región o de todo el país, considerando las diferentes etapas de crecimiento de los cultivos. Asimismo, se puede cuantificar la reducción en la producción ganadera a partir de la disminución del pasto disponible para los animales durante los eventos de sequía.

La Tabla 20 presenta en detalle los temas que serán tratados en cada unidad.

Tabla 20. Temario del módulo 2: Sequía

Unidad	Título	Temas
1	Conceptos básicos de Cambio Climático	• Sistema climático terrestre • Balance energético • Circulación general de la atmósfera • Forzamiento radiativo • Emisiones de gases de efecto invernadero • Modelos de circulación global • Proyecciones globales
2	Incorporación del CC en la modelación de amenaza y riesgo	• Downscaling • Simulación estocástica • Regla de escala • Modelo de todas las variaciones
3	Modelación hidrológica	• Ciclo hidrológico • Teorema de transporte de Reynolds • Sistema hidrológico: precipitación, evapotranspiración, infiltración y escorrentía • Hidrograma de salida de la cuenca hidrográfica
4	Tipos de sequía e indicadores	• Sequía meteorológica • Sequía agrícola • Sequía hidrológica • Indicadores de sequía • Indicadores estandarizados
5	Respuesta de cultivos al agua	• Elementos expuestos del sector agrícola y características • Características del suelo requeridas para la modelación de la vulnerabilidad • Modelo de respuesta al agua de los cultivos • Balance hídrico • Desarrollo del cultivo • Producción de biomasa • Rendimiento
6	Capacidad de carga ganadera	•

Las sesiones teóricas se complementarán con sesiones prácticas tipo *hands-on* donde los participantes aprenderán el manejo de software especializado para la modelación de la amenaza por sequía, como:

Drought Pro: es una herramienta de simulación avanzada que permite la modelación estocástica del forzamiento meteorológico. El sistema fue inicialmente concebido para la modelación de sequías (de ahí su nombre) pero ha evolucionado a ser un sistema de simulación climática general, el cual por medio de un generador climático estocástico crea múltiples simulaciones de variables meteorológicas (como la precipitación y la temperatura), basándose en las series diarias históricas disponibles en el territorio. Dadas estas capacidades, se emplea en la modelación de múltiples fenómenos distintos, como sequías,

inundaciones, deslizamientos o incendios forestales, al permitir la construcción de modelos probabilistas del forzamiento meteorológico.

Vulnerability Studio: es una herramienta que permite modelar la vulnerabilidad de los elementos expuestos mediante funciones matemáticas que relacionan la intensidad de la amenaza con el impacto físico directo. Implementa varios métodos para la creación de funciones de vulnerabilidad adaptadas a diferentes tipos de amenazas, permitiendo estimar funciones de probabilidad de pérdidas para distintos niveles de intensidad.

Al finalizar, los participantes estarán en capacidad de realizar modelaciones probabilistas de amenaza volcánica y estimaciones de riesgo, utilizando estas herramientas alineadas con la metodología CAPRA empleada en el proyecto GRMA. Estas capacidades se encuentran en concordancia con los objetivos del Proyecto Operacional 2, orientado al fortalecimiento de las capacidades técnicas para la evaluación del riesgo de desastres en el sector agropecuario.

6.3 Módulo 3 - Aplicaciones avanzadas

Una vez completado satisfactoriamente el Módulo 2, los participantes podrán continuar con el Módulo 3, enfocado en aplicaciones avanzadas en la gestión del riesgo y la adaptación al cambio climático. Este módulo constituye la etapa final del curso y es fundamental para adquirir una comprensión integral del proceso completo. Si bien se recomienda cursar los tres módulos para una formación completa, aquellos interesados en comprender únicamente la estructura general del proceso de gestión del riesgo y su relevancia estratégica pueden optar por avanzar directamente del Módulo 1 al Módulo 3.

En este módulo se abordarán temas clave para la toma de decisiones en contextos de alta incertidumbre y sistemas complejos, como la modelación de la resiliencia en sistemas dinámicos, la evaluación holística del riesgo, la toma robusta de decisiones, la ingeniería de control del riesgo y una introducción a la protección financiera frente a desastres. La Tabla 21 presenta en detalle los temas que serán tratados en cada unidad. Este módulo es especialmente útil ya que proporciona herramientas avanzadas para integrar el análisis técnico del riesgo con los procesos de planificación, inversión y política pública.

Tabla 21. Temario del módulo 3: aplicaciones avanzadas

Unidad	Título	Temas
1	Modelación de la resiliencia de sistemas de infraestructura	• Concepto de sistema • Interdependencia de elementos • Desbalance en oferta/demanda • Curvas de desempeño • Simulación del desempeño
2	Evaluación holística del riesgo	• Definición de condiciones de contexto • Fragilidad social y falta de resiliencia • Coeficiente de agravamiento • Sistema de indicadores y funciones de pertenencia • Desagregación de indicadores holísticos
3	Toma robusta de decisiones	• Incertidumbre profunda

		• Estados futuros inciertos • Teoría de conjuntos aleatorios • Métricas de riesgo imprecisas • Toma de decisiones en condición de incertidumbre profunda
4	Ingeniería de Control del Riesgo	• Proceso de control del riesgo • Formulación de acciones de intervención • Optimización estocástica • Curvas de inversión • Planes óptimos de gestión y adaptación
5	Introducción a la protección financiera	• Tipos de instrumentos financieros • Justificación y costos de los instrumentos • Estructuras de retención y transferencia del riesgo • Modalidades de reclamación en seguros • Introducción a los Bonos CAT

7 BIBLIOGRAFÍA

- Alaska Satellite Facility. (2014). ALOS PALSAR RTC Products – High and Low Resolution DEMs [Base de datos]. Tipo de producto RTC, píxeles de 12,5 m. ASF.
- Alianza Nacional de Ríos y Cuencas de Costa Rica - ANRCCR. (2021, julio 10). Cuencas hidrográficas ¿Qué son? ¿Cuál es su importancia? Recuperado de <https://web.riosycuencas.com/2021/07/10/cuencas-hidrogrficas-qu-son-cul-es-su-importancia/>
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements (FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56). Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Almazroui, M., Islam, M. N., Saeed, F., Saeed, S., Ismail, M., & Ehsan, M. A. (2021). Projected changes in temperature and precipitation over the United States, Central America, and the Caribbean in CMIP6 GCMs. *Earth Systems and Environment*, 5, 1–24. <https://doi.org/10.1007/s41748-021-00199-5>.
- Almazroui, M., Islam, M. N., Saeed, F., Saeed, S., & Ismail, M. (2021). Projected changes in temperature and precipitation over the United States, Central America, and the Caribbean in CMIP6 GCMs. *Atmosphere*, 12(6), 638. <https://doi.org/10.3390/atmos12060638>
- Arcement, G. J., & Schneider, V. R. (1989). Guide for Selecting Manning’s Roughness Coefficients for Natural Channels and Flood Plains. U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2339.
- Barquero Pizarro, G. (2019). Análisis hidrológico de cauces de la cuenca del río Tempisque involucrados en el proyecto Abastecimiento de Agua para la Cuenca Media del Río Tempisque y Comunidades Costeras (PAACUME) (Trabajo final de graduación). Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica.
- Bernal, G. A., Escovar, M. A., Zuloaga, D., & Cardona, O. D. (2017). Agricultural Drought Risk Assessment in Northern Brazil: An Innovative Fully Probabilistic Approach. In V. Marchezini, B. Wiesner, S. Saito, & L. Londe (Eds.), *Reduction of Vulnerability to Disasters: from Knowledge to Action*. RiMa Ed., pp. 331–356
- Bernal, G., Rincon, D., Escovar, M.A. & Cardona, O. D. (2018). Drought Pro: Computer program for probabilistic drought risk assessment of crops and livestock systems.
- Cardona, O.D., Bernal, G., Pabón, J.D., M. A., Marulanda, M. C., Carreño, M. L., González, D., Villegas, C., Marulanda, P., Grajales, S., Rincón, D., Molina, J.F. (2020). Entregable 3: Informe con los resultados de la propuesta de medidas de adaptación y su efecto en reducción del riesgo – Fase 1. Preparado para Expertise France. INGENIAR Risk Intelligence Ltda. Bogotá. Disponible en: https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/10/Modelacion_Adaptacion_Riesgo_Colombia.pdf
- Cardona, O.D., Bernal, G., Villegas, C., Rincón, D., Gonzales, D., Grajales, S., Herrera, S., Molina, J. F., Acosta, M., Brenes, A. (2025). Informe de Inicio – Evaluación del riesgo y desarrollo de capacidades en Costa Rica. Global Risk Modelling Alliance – SUGESE.

- Chow, V. T. (1959). Open-Channel Hydraulics. McGraw-Hill.
- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1994). Applied hydrology (4th ed.). McGraw-Hill.
- Climate Hazards Center. (2025). CHIRPS version 3: climate hazards infrared precipitation with stations, v3. <https://doi.org/10.15780/G2JQ0P>
- Copernicus Climate Change Service. (2017). ERA5: Fifth generation of ECMWF atmospheric reanalyses of the global climate. Copernicus Climate Data Store (CDS). Recuperado de <https://cds.climate.copernicus.eu>
- Copernicus Climate Change Service. (2023). Global sea level change time series from 1950 to 2050 derived from reanalysis and high resolution CMIP6 climate projections. Climate Data Store (CDS). <https://doi.org/10.24381/cds.a4f4d062>
- Córdoba-Muñoz, R., Rojas-Soto, E., & Jiménez, J. A. (2022). Coastal vulnerability to sea level rise in Costa Rica: Implications for adaptation planning. Regional Environmental Change, 22(4), 115. <https://doi.org/10.1007/s10113-022-01986-2>
- Deltares. (2021). Global Tide and Surge Model (GTSM) version 3.0: Model description and validation. Deltares, Delft, Netherlands.
- Döscher, R., Acosta, M., Alessandri, A., Anthoni, P., Arneth, A., ... & Yang, S. (2022). The EC-Earth3 Earth system model for CMIP6. Geoscientific Model Development, 15(8), 2973–3020. <https://doi.org/10.5194/gmd-15-2973-2022>.
- Dunne, J. P., Horowitz, L. W., Adcroft, A. J., Ginoux, P., Held, I. M., ... & Zadeh, N. (2020). The GFDL Earth System Model version 4.1 (GFDL-ESM4.1): Model description and simulation characteristics. Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 12(11), e2019MS002015. <https://doi.org/10.1029/2019MS002015>.
- ECMWF. (2017). ERA5: Fifth generation of ECMWF atmospheric reanalyses of the global climate. Copernicus Climate Change Service (C3S). European Centre for Medium-Range Weather Forecasts. <https://cds.climate.copernicus.eu>
- Espinoza-Rivera, Y. L. (2018). Modelación hidrodinámica del río Las Palmas y un trayecto del río Tempisque para determinar áreas de afectación en eventos extremos, permitiendo visualizar su influencia sobre la red de canales del proyecto Paacume (Informe de trabajo final de graduación, Escuela de Ingeniería Agrícola, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica)
- European Commission. (2007). Directive 2007/60/EC on the assessment and management of flood risks. Official Journal of the European Union.
- Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J., & Taylor, K. E. (2016). Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. Geoscientific Model Development, 9(5), 1937–1958. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016>.

- Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., Husak, G., Rowland, J., Harrison, L., Hoell, A., & Michaelsen, J. (2015). The climate hazards infrared precipitation with stations (CHIRPS). *Scientific Data*, 2, 150066. <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>
- Gis & Beers. (2018). Descarga ALOS PALSAR DEM alta resolución. Obtenido de Gis&Beers: se ofrece DEM remuestreado a 12,5 m desde mosaicos históricos 2006–2011.
- Hermans, T. H. J., Verlaan, M., & Slangen, A. B. A. (2023). High-resolution projections of tides, surges, and mean sea level for coastal impact studies. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 128(4), e2022JC019555. <https://doi.org/10.1029/2022JC019555>
- Hersbach, H., & ECMWF. (2023). ERA5 reanalysis dataset description. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF).
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M., ... Thépaut, J. N. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730), 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- Instituto Meteorológico Nacional – IMN. (2011). Estudio de las cuencas hidrográficas de Costa Rica [Análisis biofísico, climatológico y socioeconómico]. Recuperado de <http://cglobal.imn.ac.cr/documentos/publicaciones/EstudioCuencas/EstudioCuencasHidrograficasCR.pdf>
- Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica [IMN]. (2017). Mapas de cobertura y uso de la tierra de Costa Rica. San José, Costa Rica. <https://cglobal.imn.ac.cr>
- Instituto Nacional de Aprendizaje (INA). (s.f.). Cuenca hidrográfica | Recurso Hídrico - Tema 1. Recuperado de https://www.inavirtual.ed.cr/pluginfile.php/1311915/mod_resource/content/16/final/cuenca_hidrografica.html
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (V. Masson-Delmotte et al., Eds.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- IPCC. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis* (WG I, Chapter 4; Summary for Policymakers). Cambridge University Press.
- Junta Sectorial Copernicus European Drought Observatory. (2020). SPI indicator factsheet. Comunidad Europea.
- Kundzewicz, Z. W., Kanae, S., Seneviratne, S. I., Handmer, J. W., Nicholls, N., Peduzzi, P., Mechler, R., Bouwer, L. M., Arnell, N., Mach, K. J., Muir-Wood, R., Brakenridge, R., Kron, W., Benito, G., Honda, Y., Takahashi, K., & Sherstyukov, B. (2014). Flood risk and climate change: Global and regional

- perspectives. Hydrological Sciences Journal, 59(1), 1–28.
<https://doi.org/10.1080/02626667.2013.857411>
- McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993). The Relationship of Drought Frequency and Duration to Time Scales. En *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology* (pp. 179–184). American Meteorological Society.
- Maskrey, A., Cardona, O.D., Bernal, G., Escovar, M. A., Villegas, C., Grajales, S., Rincón, D. (2019). Agricultural Drought Risk: The case of Kazakhstan. Report for the UN Economic and Social Commission for Asia and the Pacific – ESCAP. 2019
- Mojica Armella, I.H. (1967). Producción hídrica de la cuenca superior y media del río Reventazón, Costa Rica (Tesis de maestría, CATIE). Repositorio institucional CATIE.
- Muñoz-Sabater, J., Dutra, E., Agustí-Panareda, A., Albergel, C., Arduini, G., Balsamo, G., ... Thépaut, J. N. (2021). ERA5-Land: A state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications. *Earth System Science Data*, 13(9), 4349–4383. <https://doi.org/10.5194/essd-13-4349-2021>
- Navarro-Racines, C., Tarapues, J., Thornton, P., Jarvis, A., & Ramirez-Villegas, J. (2020). High-resolution and bias-corrected CMIP5 projections for climate change impact assessments. *Scientific Data*, 7(1), 7. <https://doi.org/10.1038/s41597-019-0343-8>
- OMM (2017). Directrices de la Organización Meteorológica Mundial sobre el cálculo de las normales climáticas. OMM-1203.
- O'Neill, B. C., Tebaldi, C., van Vuuren, D. P., Eyring, V., Friedlingstein, P., ... & Sanderson, B. M. (2016). The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geoscientific Model Development*, 9(9), 3461–3482. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-3461-2016>.
- Pike, R. J., Evans, I. S., & Hengl, T. (2008). Geomorphometry: a brief guide. En T. Hengl & H. I. Reuter (Eds.), *Geomorphometry: Concepts, Software, Applications* (pp. 3–33). Elsevier.
- Riahi, K., van Vuuren, D. P., Kriegler, E., Edmonds, J., O'Neill, B. C., ... & Tavoni, M. (2017). The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. *Global Environmental Change*, 42, 153–168. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009>.
- Rodríguez Echavarría, T. (2013). Cooperación transfronteriza y ambiente en América Central: el caso de la cuenca del río Sixaola entre Costa Rica y Panamá. *LiminaR. Estudios Sociales y Humanísticos*, 11(2), 13–34. <https://doi.org/10.29043/liminar.v11i2.220>
- Rodríguez-Rojas, M. D. (2019). Modelación hidráulica del río Pacuare bajo diferentes escenarios de obras de protección contra inundación en la comunidad de La Lucha de Siquirres, Limón (Proyecto de graduación, Escuela de Ingeniería Agrícola, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica). Repositorio institucional del TEC.
- Rojas-Soto, E., Alfaro, E. J., & Hidalgo, H. G. (2022). Future Changes in Simulated Streamflow in Costa Rica from CMIP6 climate models. *Frontiers in Hydrology Meeting 2022*. <https://hdl.handle.net/10669/86843>

- Rojas-Soto, E., Alfaro, E. J., Hidalgo, H. G., & Hidalgo, C. (2024). Flood projections for selected Costa Rican main basins using CMIP6 climate models downscaled output in the HBV hydrological model for scenario SSP5-8.5. *Hydrological Research Letters*, 18(1), 35-41. <https://doi.org/10.3178/hrl.18.35>
- Rudari, R., Silvestro, F., Campo, L., Rebora, N., Boni, G., & Herold, C. 2015. Improvement of the Global Flood Model for the GAR 2015. UNISDR / UNDRR – CIMA Foundation – UNEP GRID-Arendal.
- Smith, K., & Ward, R. C. (1998). *Floods: Physical Processes and Human Impacts*. John Wiley & Sons.
- Trabado Sagot, A. (2023). Modelación hidrológica de la cuenca alta del Río Tempisque con HBV Light y su aplicabilidad en la subcuenca del Río Sardinal, Costa Rica (Tesis de maestría, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza – CATIE, Turrialba, Costa Rica). Repositorio institucional CATIE.
- United States Department of Agriculture [USDA], Natural Resources Conservation Service [NRCS]. (1986). Urban hydrology for small watersheds (Technical Release No. 55). <https://www.nrcs.usda.gov/sites/default/files/2022-09/TR55%20%281986%29.pdf>
- United States Department of Agriculture (USDA). (1998). Technical Release 55: Urban Hydrology for Small Watersheds (Versión 2.10). Natural Resources Conservation Service.
- Vargas, M. (2020). Mapa de uso agropecuario y bosques, GitHub. [Online]. Disponible en: <https://github.com/mapa-agropecuario-bosques/2020>
- Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., & López-Moreno, J. I. (2010). A multiscalar drought index sensitive to global warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. *Journal of Climate*, 23(7), 1696–1718. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>
- Vousdoukas, M. I., Mentaschi, L., Voukouvalas, E., Verlaan, M., & Feyen, L. (2018). Extreme sea levels on the rise along Europe's coasts. *Earth's Future*, 6(5), 704–715. <https://doi.org/10.1029/2018EF000995>
- Watson, F., Guzmán-Arias, I., & Villagra-Mendoza, K. (2022). Case study: Analysis of flood adaptation measures through the simulation of an event in the Matina Limón river, Costa Rica. *Revista Tecnología en Marcha*, 35(4), 28-44. <https://doi.org/10.18845/tm.v35i4.5904>

A.1 RELACIÓN DE DATOS FALTANTES DE ESTACIONES METEOROLÓGICAS

A continuación, se listan las estaciones meteorológicas del IMN, identificadas con código único, y se indican las fechas inicial y final de registro de la variable, así como la cantidad de datos presentes y faltantes dentro del periodo de control de 1991-2020.

Datos de precipitación

Código estación	Fecha inicial	Fecha final	Datos presentes en el periodo de control	Datos faltantes en el periodo de control
1003	01/01/2000	23/12/2014	5192	5766
100615	12/10/2001	14/03/2006	1560	9398
100631	01/01/2000	11/02/2009	2976	7982
100633	12/02/2004	14/02/2025	5928	5030
100641	09/03/2007	05/03/2025	4738	6220
100643	11/12/2009	24/03/2025	4039	6919
100645	31/07/2012	19/09/2017	1775	9183
100649	16/01/2013	10/02/2025	2668	8290
100651	16/05/2013	05/03/2025	2712	8246
100653	04/09/2013	12/09/2024	2658	8300
100655	23/10/2014	21/03/2025	2253	8705
100659	16/06/2015	24/10/2018	1227	9731
2002	01/01/2000	11/07/2017	3221	7737
2004	01/01/2000	28/06/2000	180	10778
2007	24/05/2008	15/08/2019	2604	8354
2009	23/11/2013	08/03/2018	1547	9411
69597	01/01/2000	15/01/2003	1111	9847
69633	01/01/2000	28/03/2025	6991	3967
69647	07/11/2002	25/12/2024	6348	4610
69649	01/01/2000	11/07/2002	923	10035
69651	01/01/2000	23/07/2004	1664	9294
69655	01/01/2000	14/02/2005	1872	9086
69659	01/01/2000	29/08/2002	964	9994
69661	01/01/2000	23/03/2017	5608	5350
69677	01/04/2001	13/10/2021	7007	3951
69679	01/01/2000	10/02/2025	7335	3623
69681	01/01/2000	17/12/2024	7039	3919
69695	24/09/2008	25/10/2024	3797	7161
69697	22/10/2009	17/09/2021	3987	6971
69699	15/03/2011	19/02/2025	3114	7844
69701	21/09/2011	20/01/2025	3390	7568
69707	23/07/2013	17/09/2014	422	10536
69709	20/08/2012	01/12/2024	3056	7902
69711	10/04/2013	13/11/2024	2773	8185
69713	12/04/2013	19/02/2025	2821	8137
69715	22/04/2013	10/12/2024	2738	8220
69717	17/09/2013	10/10/2024	2398	8560
69719	28/10/2015	30/08/2022	1413	9545
69721	08/10/2013	17/06/2024	2642	8316

Código estación	Fecha inicial	Fecha final	Datos presentes en el periodo de control	Datos faltantes en el periodo de control
69723	10/10/2013	04/02/2025	2593	8365
69725	15/10/2014	01/11/2024	2121	8837
69727	26/03/2014	29/11/2024	2452	8506
69729	22/09/2014	10/10/2024	2177	8781
69731	05/11/2014	07/10/2024	2059	8899
69735	20/02/2015	13/11/2024	2012	8946
69737	13/05/2015	10/03/2025	1864	9094
69739	14/05/2015	19/02/2025	2059	8899
69743	24/03/2017	07/01/2025	1376	9582
69745	07/09/2017	14/02/2018	161	10797
69747	21/04/2017	20/01/2025	1147	9811
69749	10/05/2017	24/01/2025	1332	9626
69751	31/05/2018	21/01/2025	946	10012
7115	01/01/2000	01/01/2025	6897	4061
7121	01/01/2000	05/12/2005	2109	8849
7123	16/01/2014	17/11/2021	1673	9285
72141	01/01/2000	01/06/2004	1611	9347
72145	01/01/2000	18/11/2004	1744	9214
72149	23/03/2004	05/03/2025	5214	5744
72153	10/11/2004	14/11/2024	5549	5409
72157	01/01/2000	21/02/2025	7363	3595
72159	27/10/2002	10/01/2025	5950	5008
72161	10/11/2004	04/03/2014	3190	7768
72163	31/03/2012	22/08/2024	3166	7792
72165	21/09/2012	28/08/2024	2794	8164
72167	11/04/2013	12/02/2025	2739	8219
72169	24/11/2020	15/10/2024	38	10920
72171	25/11/2020	29/09/2022	37	10921
72173	27/11/2020	16/09/2024	35	10923
72177	24/11/2015	22/08/2024	1333	9625
72179	12/12/2014	19/02/2020	1766	9192
72181	20/05/2015	26/03/2025	1981	8977
72183	27/04/2016	05/12/2024	1710	9248
72185	17/08/2017	26/08/2024	1127	9831
72187	04/08/2017	21/02/2022	987	9971
72189	07/08/2017	04/10/2024	1230	9728
72191	31/08/2017	14/03/2025	1129	9829
72193	19/01/2018	26/08/2024	1062	9896
72195	09/02/2018	07/02/2025	1057	9901
72197	06/09/2018	23/10/2019	413	10545
73123	01/01/2000	14/02/2025	7353	3605
73129	01/01/2000	22/02/2025	7448	3510
73137	03/11/2004	19/02/2025	5470	5488
73141	18/07/2007	06/01/2025	2804	8154
73143	26/01/2010	10/01/2025	3560	7398
73145	31/10/2011	09/10/2024	3185	7773
73147	19/12/2011	01/01/2025	3178	7780

Código estación	Fecha inicial	Fecha final	Datos presentes en el periodo de control	Datos faltantes en el periodo de control
73149	16/02/2012	23/06/2024	3176	7782
73151	20/10/2007	20/03/2025	2053	8905
73153	05/07/2013	05/08/2024	2737	8221
73155	27/09/2013	07/01/2025	2555	8403
73157	01/11/2013	12/09/2024	2597	8361
73159	13/02/2014	04/03/2025	2124	8834
73161	26/02/2015	07/08/2024	2081	8877
73163	10/09/2018	08/07/2024	282	10676
73167	07/05/2015	21/12/2024	2056	8902
73169	17/07/2017	05/02/2025	1214	9744
73171	06/09/2018	14/02/2025	848	10110
73173	26/09/2019	05/02/2025	454	10504
7449	25/06/2003	12/11/2003	141	10817
7451	01/01/2000	20/02/2025	7555	3403
7453	01/01/2000	04/03/2025	7039	3919
7459	02/11/2013	28/11/2024	2529	8429
7461	29/02/2012	15/10/2024	2839	8119
7463	07/03/2012	04/03/2025	3032	7926
7465	23/09/2015	31/08/2016	219	10739
7467	04/04/2013	05/03/2025	2684	8274
7469	21/09/2015	15/10/2024	868	10090
7471	13/06/2016	22/08/2024	1573	9385
7473	18/05/2017	19/02/2025	1253	9705
7475	24/07/2017	22/08/2024	1254	9704
7477	18/05/2017	04/02/2025	1324	9634
7481	21/04/2017	05/03/2025	1351	9607
7483	27/09/2017	21/08/2024	1192	9766
7651	01/01/2000	18/10/2005	2104	8854
7655	01/01/2000	07/03/2025	7351	3607
7657	21/10/2009	01/10/2021	4078	6880
7659	06/05/2011	24/01/2025	3510	7448
7661	29/10/2014	12/11/2024	2243	8715
7663	14/09/2016	11/11/2024	1300	9658
7665	24/07/2017	15/03/2020	876	10082
7667	23/11/2017	11/11/2024	1116	9842
7823	01/01/2000	21/05/2007	2661	8297
7827	07/01/2001	12/12/2024	6744	4214
7829	01/01/2000	08/11/2000	312	10646
7831	19/07/2013	07/04/2022	2406	8552
7833	08/07/2016	25/11/2024	1638	9320
7835	04/07/2017	19/08/2024	998	9960
7919	22/12/2020	18/10/2024	10	10948
8013	19/08/2014	11/07/2023	2186	8772
8113	03/12/2014	17/02/2025	1830	9128
815	01/01/2000	17/02/2025	7389	3569
8211	22/11/2012	22/01/2025	2888	8070
8213	31/10/2013	09/11/2022	2513	8445

Código estación	Fecha inicial	Fecha final	Datos presentes en el periodo de control	Datos faltantes en el periodo de control
8215	07/11/2014	21/01/2025	1983	8975
8217	03/03/2017	08/03/2024	1400	9558
8219	05/06/2017	11/09/2024	1274	9684
837	11/09/2013	08/10/2024	2408	8550
840	01/01/2000	05/11/2002	1022	9936
84124	01/11/2001	07/08/2002	256	10702
84139	13/01/2000	18/03/2025	7488	3470
84141	01/01/2000	07/01/2025	7544	3414
84143	01/01/2000	10/06/2005	1988	8970
84145	01/01/2000	07/03/2012	4197	6761
84167	01/01/2000	02/09/2002	976	9982
84169	01/01/2000	17/02/2025	7317	3641
84179	06/03/2002	05/08/2002	153	10805
84181	20/02/2003	27/11/2024	5471	5487
84185	23/09/2008	17/02/2025	4037	6921
84187	01/01/2000	21/01/2025	7623	3335
84189	07/04/2003	04/02/2025	6384	4574
84191	01/01/2000	25/03/2025	6963	3995
84193	01/08/2008	19/02/2025	4255	6703
84195	01/01/2000	05/03/2015	5497	5461
84197	05/11/2001	22/01/2025	6730	4228
84199	31/03/2005	22/01/2025	5391	5567
84203	14/11/2007	22/08/2022	3527	7431
84205	04/06/2009	10/06/2015	2022	8936
84207	13/09/2010	14/02/2025	3111	7847
84209	30/09/2011	10/02/2025	2899	8059
84213	24/06/2011	14/02/2025	3306	7652
84215	14/11/2012	14/01/2025	2852	8106
84217	28/06/2012	25/02/2025	2537	8421
84219	01/03/2011	25/02/2025	3457	7501
84221	05/09/2011	22/01/2025	3001	7957
84225	20/09/2012	06/01/2025	2887	8071
84227	05/07/2012	12/02/2014	436	10522
84231	29/08/2012	22/01/2025	2926	8032
84233	14/01/2013	17/02/2025	2518	8440
84235	27/08/2013	02/11/2016	1122	9836
84237	27/08/2013	23/09/2024	2659	8299
84239	24/10/2013	25/03/2025	2397	8561
84241	30/10/2013	06/08/2024	2572	8386
84243	19/11/2013	21/11/2024	2529	8429
84245	19/11/2020	11/07/2024	43	10915
84247	23/02/2016	10/06/2020	1451	9507
84249	13/05/2015	20/09/2024	1934	9024
84251	09/10/2014	25/11/2024	1887	9071
84283	04/05/2018	10/02/2025	703	10255
84285	05/03/2015	14/01/2025	1958	9000
84293	18/09/2015	26/09/2024	1825	9133

Código estación	Fecha inicial	Fecha final	Datos presentes en el periodo de control	Datos faltantes en el periodo de control
84295	10/11/2015	25/04/2023	1615	9343
8521	01/01/2000	13/02/2025	6337	4621
8523	27/01/2005	14/02/2025	5109	5849
8525	06/11/2013	24/02/2025	2217	8741
8527	16/01/2016	03/11/2020	1692	9266
8613	06/05/2015	25/02/2025	2066	8892
8713	01/01/2000	07/02/2025	6384	4574
8835	01/01/2000	06/08/2010	3689	7269
8841	01/01/2000	10/06/2009	3446	7512
8847	28/02/2009	14/01/2025	4110	6848
8849	16/07/2013	06/01/2025	2723	8235
8851	17/02/2015	14/01/2025	2145	8813
8855	31/05/2017	24/01/2025	1311	9647
9011	01/01/2000	01/06/2005	1814	9144
9013	08/10/2008	25/02/2025	4397	6561
9015	12/03/2014	25/02/2025	2361	8597
9413	31/01/2012	01/01/2025	3002	7956
9415	27/03/2014	27/02/2025	2406	8552
9417	13/08/2020	28/09/2024	139	10819
9419	16/12/2016	01/01/2025	981	9977
963	14/05/2013	06/12/2024	2776	8182
98101	01/01/2000	07/12/2009	592	10366
98103	30/09/2009	01/08/2021	4056	6902
98105	26/11/2013	25/09/2024	2495	8463
98107	15/12/2016	05/03/2025	1468	9490
98109	22/06/2017	16/09/2024	1289	9669
9875	01/01/2000	25/02/2025	7453	3505
9879	01/01/2000	17/06/2008	2878	8080
9887	01/01/2000	12/03/2025	7002	3956
9891	01/01/2000	24/02/2025	7671	3287
9895	01/01/2000	26/03/2025	7316	3642
9897	17/06/2008	10/02/2025	4489	6469
9899	18/06/2008	23/10/2018	3401	7557

Datos de temperatura

Código estación	Fecha inicial	Fecha final	Datos presentes en el periodo de control	Datos faltantes en el periodo de control
1003	01/01/2000	23/12/2014	5361	5597
100615	12/10/2001	14/03/2006	1560	9398
100631	01/01/2000	11/02/2009	2976	7982
100633	16/10/2003	14/02/2025	6017	4941
100641	09/03/2007	05/03/2025	4783	6175
100643	11/12/2009	24/03/2025	4039	6919
100645	31/07/2012	19/09/2017	1855	9103
100649	16/01/2013	10/02/2025	2874	8084

Código estación	Fecha inicial	Fecha final	Datos presentes en el periodo de control	Datos faltantes en el periodo de control
100651	16/05/2013	05/03/2025	2688	8270
100653	04/09/2013	12/09/2024	2295	8663
100655	23/10/2014	21/03/2025	2245	8713
100659	16/06/2015	24/10/2018	1227	9731
2002	01/01/2000	11/07/2017	3221	7737
2004	01/01/2000	28/06/2000	180	10778
2007	24/05/2008	15/08/2019	3110	7848
2009	23/11/2013	08/03/2018	1547	9411
69597	01/01/2000	15/01/2003	1111	9847
69633	01/01/2000	28/03/2025	7236	3722
69647	07/11/2002	25/12/2024	6375	4583
69649	01/01/2000	11/07/2002	923	10035
69651	01/01/2000	23/07/2004	1663	9295
69655	01/01/2000	14/02/2005	1872	9086
69659	01/01/2000	29/08/2002	972	9986
69661	01/01/2000	23/03/2017	5721	5237
69677	29/03/2001	13/10/2021	6984	3974
69679	01/01/2000	10/02/2025	7439	3519
69681	01/01/2000	17/12/2024	7157	3801
69695	06/01/2008	25/10/2024	4495	6463
69697	22/10/2009	17/09/2021	3987	6971
69699	15/03/2011	19/02/2025	3156	7802
69701	21/09/2011	20/01/2025	3390	7568
69707	23/07/2013	17/09/2014	422	10536
69709	20/08/2012	01/12/2024	3056	7902
69711	10/04/2013	13/11/2024	2763	8195
69713	12/04/2013	19/02/2025	2736	8222
69715	22/04/2013	10/12/2024	2784	8174
69717	17/09/2013	10/10/2024	2663	8295
69719	28/10/2015	05/10/2022	1633	9325
69721	08/10/2013	07/10/2024	2642	8316
69723	10/10/2013	04/02/2025	2593	8365
69725	15/10/2014	01/11/2024	2145	8813
69727	26/03/2014	29/11/2024	2452	8506
69729	22/09/2014	10/10/2024	2177	8781
69731	05/11/2014	07/10/2024	2232	8726
69735	20/02/2015	13/11/2024	2078	8880
69737	13/05/2015	10/03/2025	2041	8917
69739	14/05/2015	19/02/2025	2059	8899
69743	24/03/2017	07/01/2025	1379	9579
69745	07/09/2017	14/02/2018	161	10797
69747	21/04/2017	20/01/2025	1147	9811
69749	10/05/2017	24/01/2025	1332	9626
69751	31/05/2018	21/01/2025	866	10092
7115	01/01/2000	01/01/2025	6715	4243
7121	01/01/2000	05/12/2005	2152	8806
7123	16/01/2014	08/07/2022	2134	8824

Código estación	Fecha inicial	Fecha final	Datos presentes en el periodo de control	Datos faltantes en el periodo de control
72141	01/01/2000	01/06/2004	1611	9347
72145	01/01/2000	18/11/2004	1744	9214
72149	23/03/2004	04/02/2025	5179	5779
72153	10/11/2004	14/11/2024	5660	5298
72157	01/01/2000	21/02/2025	7391	3567
72159	27/10/2002	10/01/2025	5864	5094
72161	10/11/2004	04/03/2014	3167	7791
72163	31/03/2012	22/08/2024	3166	7792
72165	21/09/2012	28/08/2024	2980	7978
72167	11/04/2013	12/02/2025	2784	8174
72169	24/11/2020	15/10/2024	38	10920
72173	27/11/2020	16/09/2024	35	10923
72177	24/11/2015	22/08/2024	1450	9508
72179	12/12/2014	19/02/2020	1766	9192
72181	20/05/2015	26/03/2025	2052	8906
72183	27/04/2016	05/12/2024	1710	9248
72185	17/08/2017	26/08/2024	1127	9831
72187	04/08/2017	21/02/2022	1152	9806
72189	07/08/2017	04/10/2024	1230	9728
72191	31/08/2017	14/03/2025	1219	9739
72193	19/01/2018	26/08/2024	1059	9899
72195	09/02/2018	07/02/2025	1057	9901
73123	01/01/2000	14/02/2025	7469	3489
73129	01/01/2000	22/02/2025	7566	3392
73137	03/11/2004	19/02/2025	5507	5451
73141	18/07/2007	06/01/2025	3049	7909
73143	26/01/2010	10/01/2025	3844	7114
73145	31/10/2011	09/10/2024	3221	7737
73147	19/12/2011	01/01/2025	3215	7743
73149	16/02/2012	23/06/2024	3176	7782
73151	20/10/2007	20/03/2025	2053	8905
73153	05/07/2013	05/08/2024	2737	8221
73155	27/09/2013	07/01/2025	2547	8411
73157	01/11/2013	12/09/2024	2617	8341
73159	13/02/2014	04/03/2025	2409	8549
73161	26/02/2015	07/08/2024	2081	8877
73163	10/09/2018	08/07/2024	282	10676
73167	07/05/2015	21/12/2024	2056	8902
73169	17/07/2017	05/02/2025	1264	9694
73171	06/09/2018	14/02/2025	616	10342
73173	26/09/2019	05/02/2025	454	10504
7449	25/06/2003	12/11/2003	141	10817
7451	01/01/2000	20/02/2025	7494	3464
7453	01/01/2000	04/03/2025	7024	3934
7459	02/11/2013	28/11/2024	2585	8373
7461	29/02/2012	15/10/2024	3049	7909
7463	07/03/2012	04/03/2025	3102	7856

Código estación	Fecha inicial	Fecha final	Datos presentes en el periodo de control	Datos faltantes en el periodo de control
7465	23/09/2015	20/02/2017	517	10441
7467	04/04/2013	05/03/2025	2731	8227
7469	21/09/2015	15/10/2024	887	10071
7471	13/06/2016	22/08/2024	1663	9295
7473	18/05/2017	19/02/2025	1243	9715
7475	24/07/2017	22/08/2024	1254	9704
7477	18/05/2017	04/02/2025	1324	9634
7481	21/04/2017	05/03/2025	1351	9607
7483	27/09/2017	21/08/2024	1192	9766
7651	01/01/2000	18/10/2005	2029	8929
7655	01/01/2000	07/03/2025	7228	3730
7657	21/10/2009	01/10/2021	4025	6933
7659	06/05/2011	24/01/2025	3510	7448
7661	29/10/2014	12/11/2024	2191	8767
7663	14/09/2016	11/11/2024	1570	9388
7665	24/07/2017	15/03/2020	876	10082
7667	23/11/2017	11/11/2024	1116	9842
7823	01/01/2000	21/05/2007	2599	8359
7827	07/01/2001	12/12/2024	6766	4192
7829	01/01/2000	08/11/2000	312	10646
7831	16/09/2013	04/01/2022	2664	8294
7833	08/07/2016	25/11/2024	1517	9441
7835	04/07/2017	19/08/2024	998	9960
7919	22/12/2020	18/10/2024	10	10948
8013	19/08/2014	11/07/2023	2216	8742
8113	03/12/2014	17/02/2025	2073	8885
815	01/01/2000	17/02/2025	7342	3616
8211	22/11/2012	22/01/2025	2888	8070
8213	31/10/2013	09/11/2022	2513	8445
8215	07/11/2014	21/01/2025	2247	8711
8217	03/03/2017	08/03/2024	1400	9558
8219	05/06/2017	11/09/2024	1274	9684
837	11/09/2013	08/10/2024	2495	8463
840	01/01/2000	05/11/2002	1022	9936
84124	01/01/2000	05/09/2002	979	9979
84139	13/01/2000	18/03/2025	7488	3470
84141	01/01/2000	07/01/2025	7605	3353
84143	01/01/2000	10/06/2005	1988	8970
84145	01/01/2000	07/03/2012	4196	6762
84167	01/01/2000	02/09/2002	976	9982
84169	01/01/2000	17/02/2025	7445	3513
84179	06/03/2002	05/08/2002	153	10805
84181	20/02/2003	27/11/2024	5943	5015
84185	17/04/2008	17/02/2025	4148	6810
84187	01/01/2000	21/01/2025	7629	3329
84189	07/04/2003	04/02/2025	6373	4585
84191	01/01/2000	25/03/2025	7501	3457

Código estación	Fecha inicial	Fecha final	Datos presentes en el periodo de control	Datos faltantes en el periodo de control
84193	01/08/2008	19/02/2025	4270	6688
84195	01/01/2000	05/03/2015	5504	5454
84197	05/11/2001	22/01/2025	6715	4243
84199	02/11/2004	22/01/2025	5562	5396
84203	14/11/2007	22/08/2022	3526	7432
84205	04/06/2009	10/06/2015	2022	8936
84207	13/09/2010	14/02/2025	3762	7196
84209	30/09/2011	10/02/2025	3067	7891
84213	30/06/2011	14/02/2025	3355	7603
84215	14/11/2012	14/01/2025	2970	7988
84217	17/11/2013	25/02/2025	2572	8386
84219	01/03/2011	25/02/2025	3457	7501
84221	05/09/2011	22/01/2025	2202	8756
84225	20/09/2012	06/01/2025	2887	8071
84227	05/07/2012	12/02/2014	471	10487
84231	29/08/2012	22/01/2025	2707	8251
84233	14/01/2013	17/02/2025	2689	8269
84235	27/08/2013	02/11/2016	1158	9800
84237	27/08/2013	23/09/2024	2659	8299
84239	24/10/2013	25/03/2025	2565	8393
84241	30/10/2013	06/08/2024	2615	8343
84243	19/11/2013	22/01/2025	2565	8393
84245	19/11/2020	14/10/2024	43	10915
84247	23/02/2016	10/06/2020	1424	9534
84249	13/05/2015	20/09/2024	2059	8899
84251	09/10/2014	25/11/2024	1931	9027
84283	04/05/2018	17/05/2024	781	10177
84285	05/03/2015	14/01/2025	2127	8831
84293	18/09/2015	26/09/2024	1854	9104
84295	10/11/2015	25/04/2023	1632	9326
8521	01/01/2000	13/02/2025	6079	4879
8523	27/01/2005	14/02/2025	5150	5808
8525	06/11/2013	24/02/2025	2217	8741
8527	16/01/2016	03/11/2020	1692	9266
8613	06/05/2015	25/02/2025	2066	8892
8713	01/01/2000	07/02/2025	6450	4508
8835	01/01/2000	06/08/2010	3618	7340
8841	01/01/2000	10/06/2009	3446	7512
8847	28/02/2009	14/01/2025	4234	6724
8849	16/07/2013	06/01/2025	2723	8235
8851	17/02/2015	14/01/2025	2145	8813
8855	31/05/2017	24/01/2025	1311	9647
9011	01/01/2000	01/06/2005	1794	9164
9013	08/10/2008	25/02/2025	4397	6561
9015	12/03/2014	15/11/2024	2343	8615
9413	31/01/2012	01/01/2025	3013	7945
9415	27/03/2014	27/02/2025	2406	8552

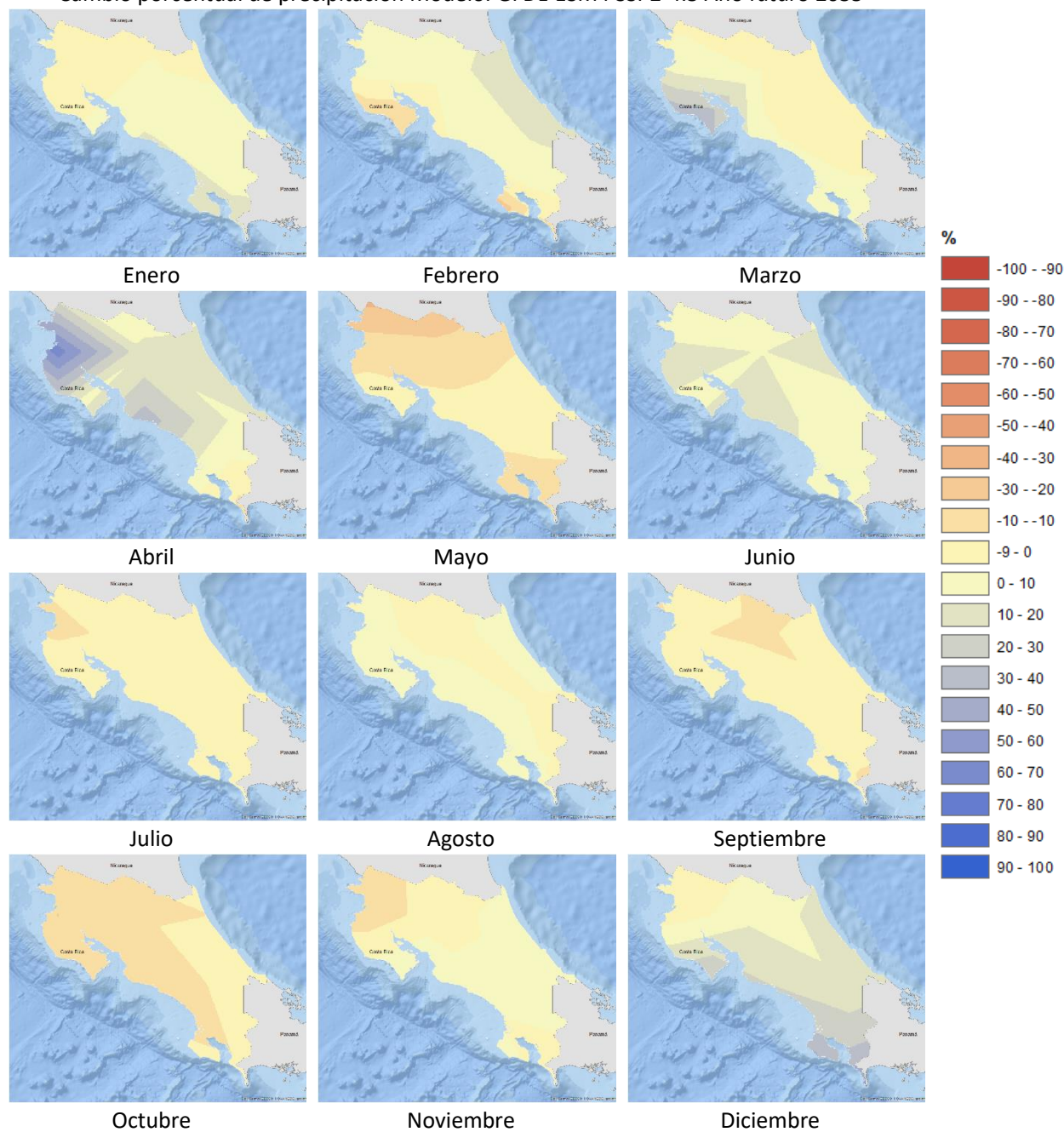
Código estación	Fecha inicial	Fecha final	Datos presentes en el periodo de control	Datos faltantes en el periodo de control
9417	13/08/2020	28/09/2024	139	10819
9419	16/12/2016	01/01/2025	981	9977
963	14/05/2013	06/12/2024	2676	8282
98101	01/01/2000	07/12/2009	592	10366
98103	30/09/2009	01/08/2021	4103	6855
98105	26/11/2013	25/09/2024	2495	8463
98107	15/12/2016	05/03/2025	1473	9485
98109	07/12/2017	16/09/2024	1121	9837
9875	01/01/2000	25/02/2025	7470	3488
9879	01/01/2000	17/06/2008	2878	8080
9887	01/01/2000	12/03/2025	7002	3956
9891	01/01/2000	24/02/2025	7444	3514
9895	01/01/2000	26/03/2025	7260	3698
9897	17/06/2008	10/02/2025	4524	6434
9899	18/06/2008	23/10/2018	3401	7557

A.2 ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO

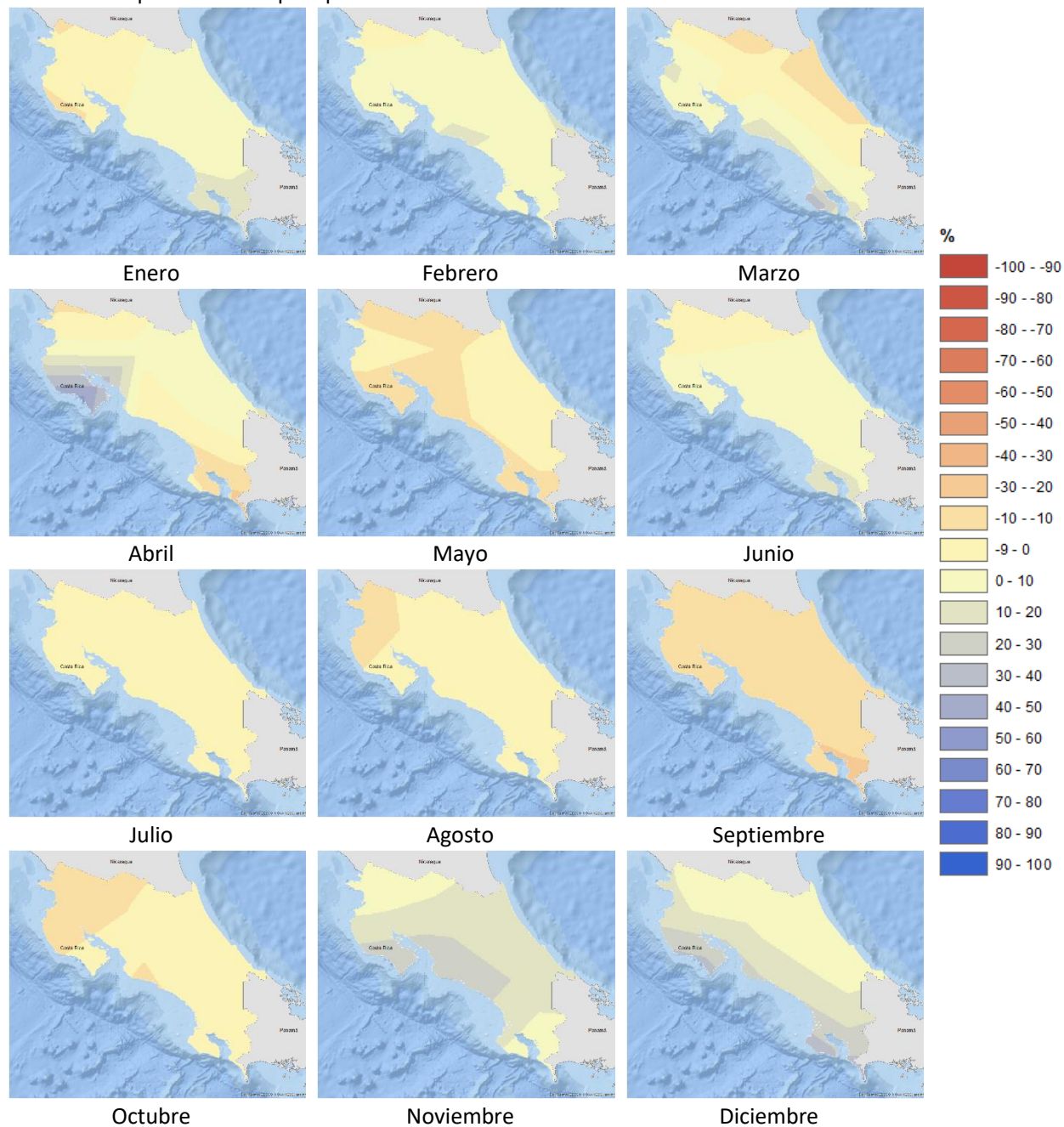
En este anexo se presentan las variaciones en porcentaje (%) para la precipitación y en °C para la temperatura, correspondientes a los modelos GFDL-ESM4, EC-Earth3 y MPI-ESM1-2-LR bajo las trayectorias SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 y SSP5-8.5, y evaluados para los años 2035, 2050 y 2100.

Precipitación SSP2-4.5

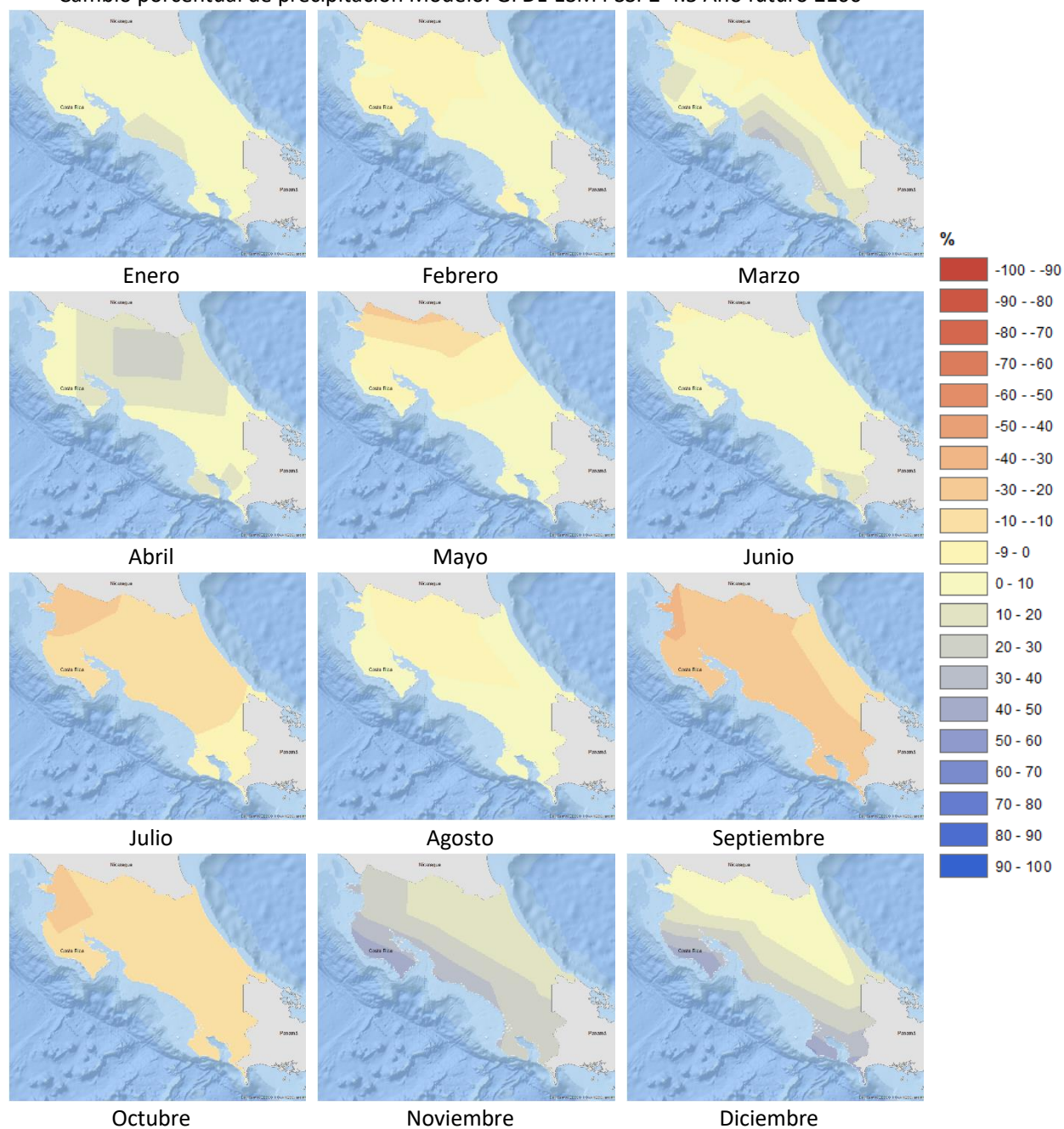
Cambio porcentual de precipitación Modelo: GFDL-ESM4 SSP2-4.5 Año futuro 2035



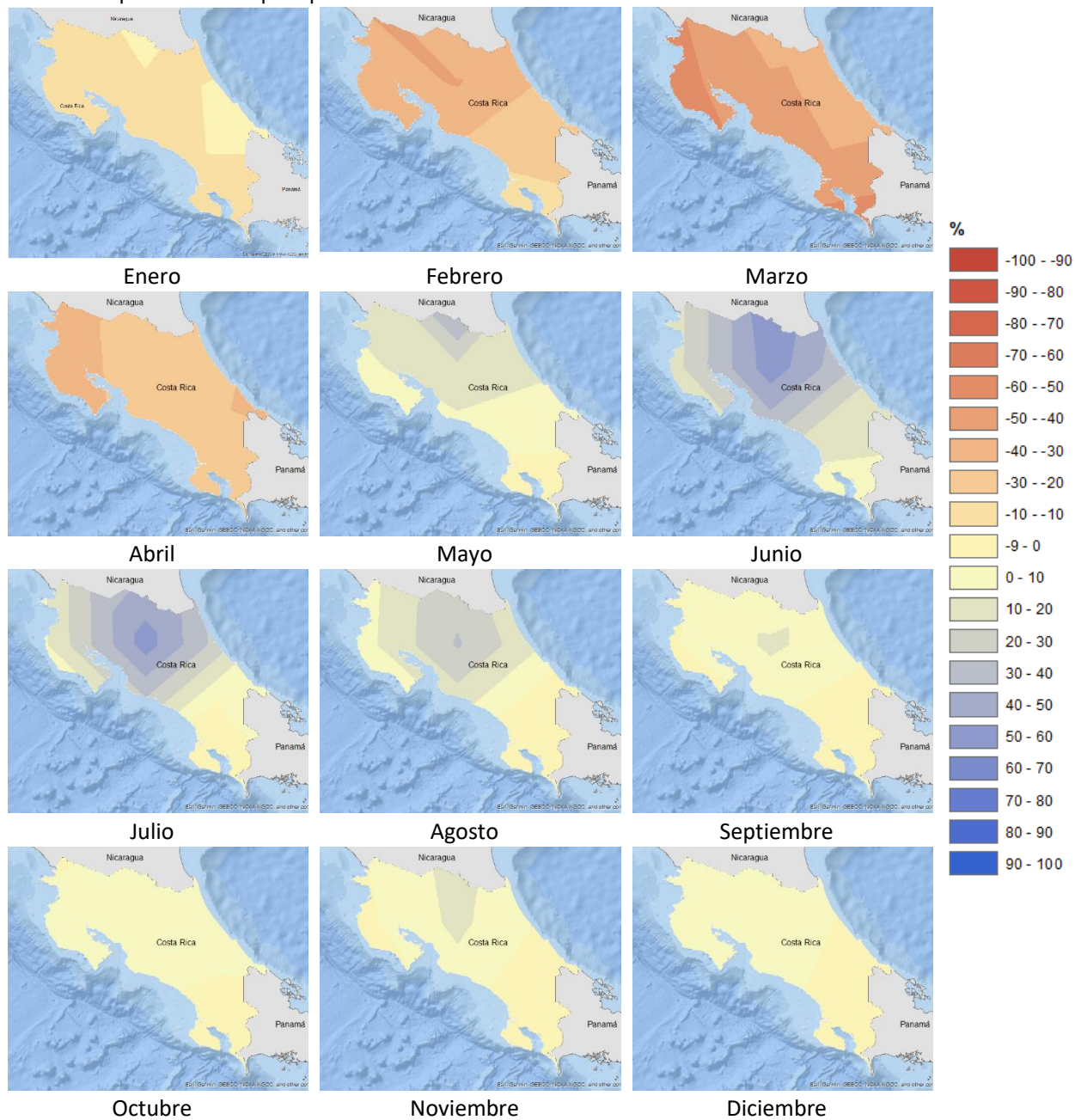
Cambio porcentual de precipitación Modelo: GFDL-ESM4 SSP2-4.5 Año futuro 2050



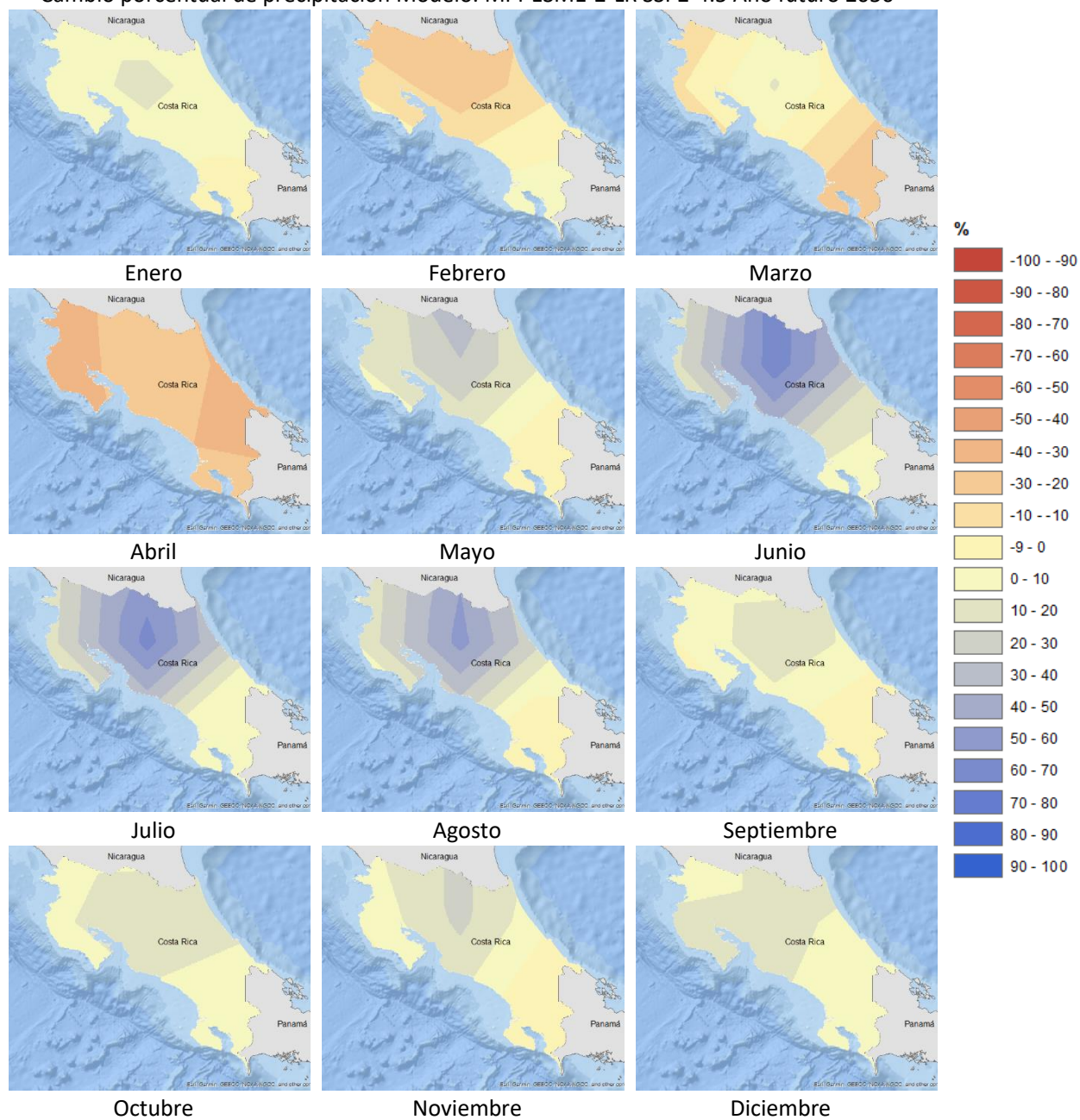
Cambio porcentual de precipitación Modelo: GFDL-ESM4 SSP2-4.5 Año futuro 2100



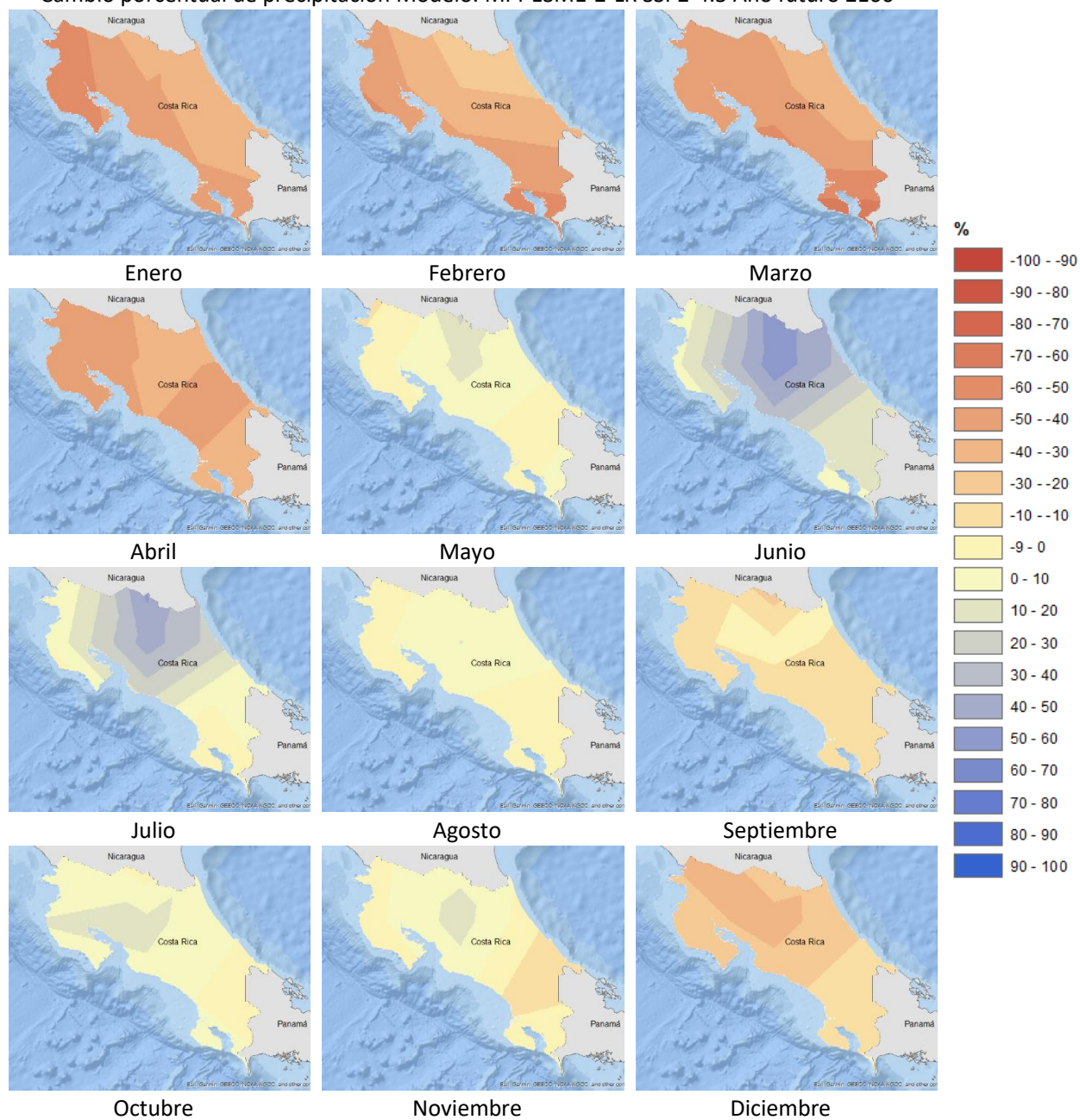
Cambio porcentual de precipitación Modelo: MPI-ESM1-2-LR SSP2-4.5 Año futuro 2035



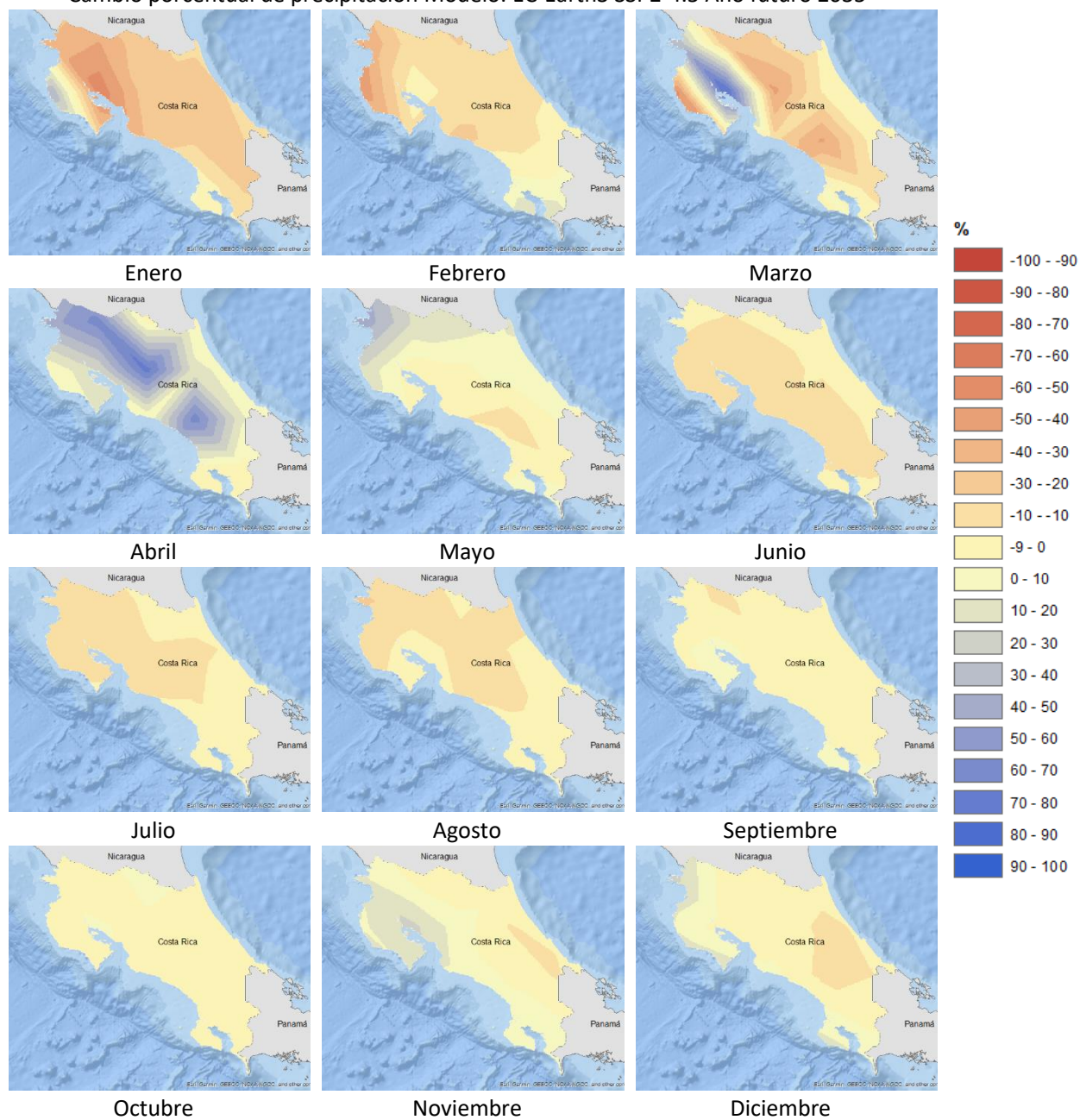
Cambio porcentual de precipitación Modelo: MPI-ESM1-2-LR SSP2-4.5 Año futuro 2050



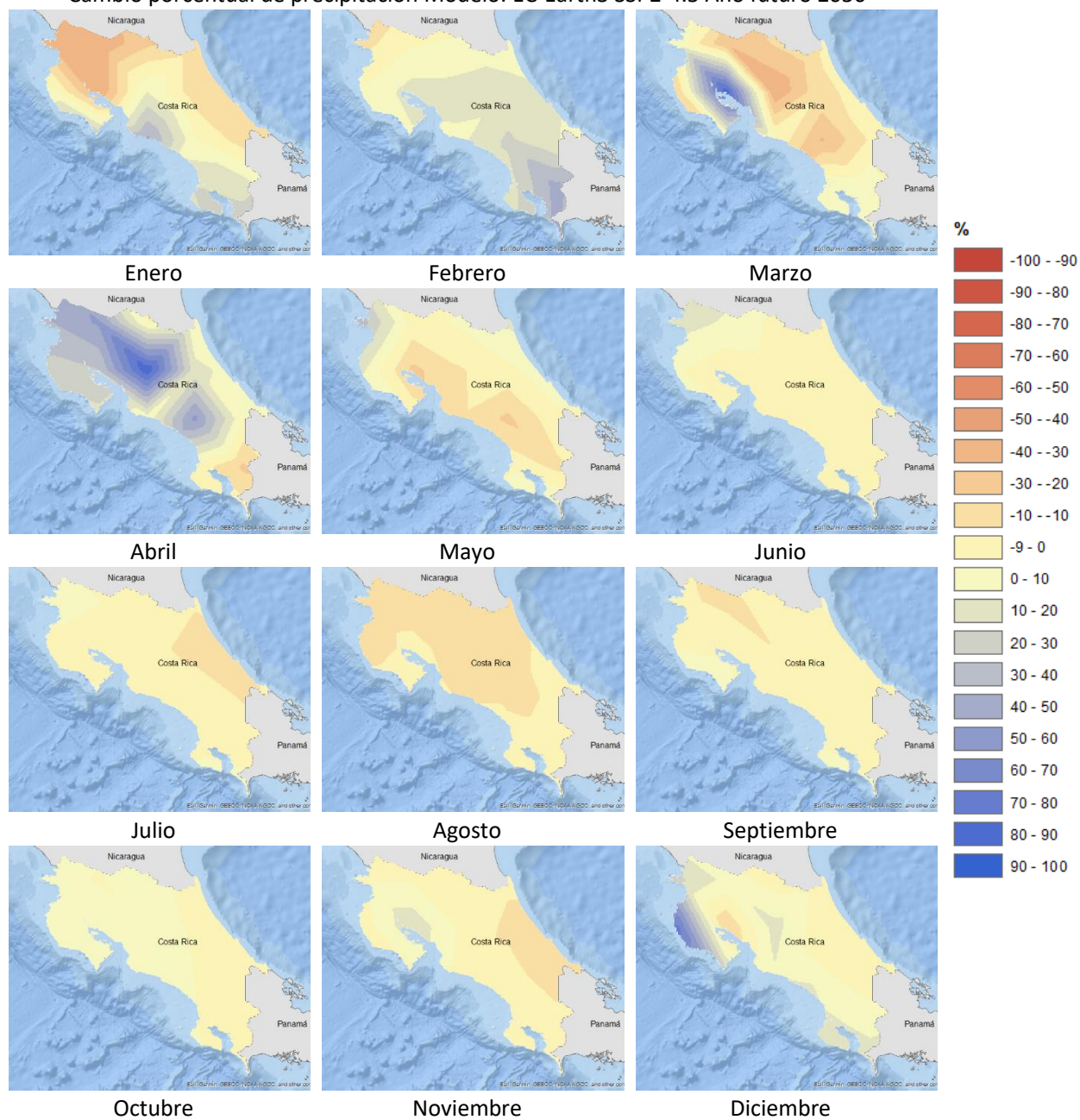
Cambio porcentual de precipitación Modelo: MPI-ESM1-2-LR SSP2-4.5 Año futuro 2100



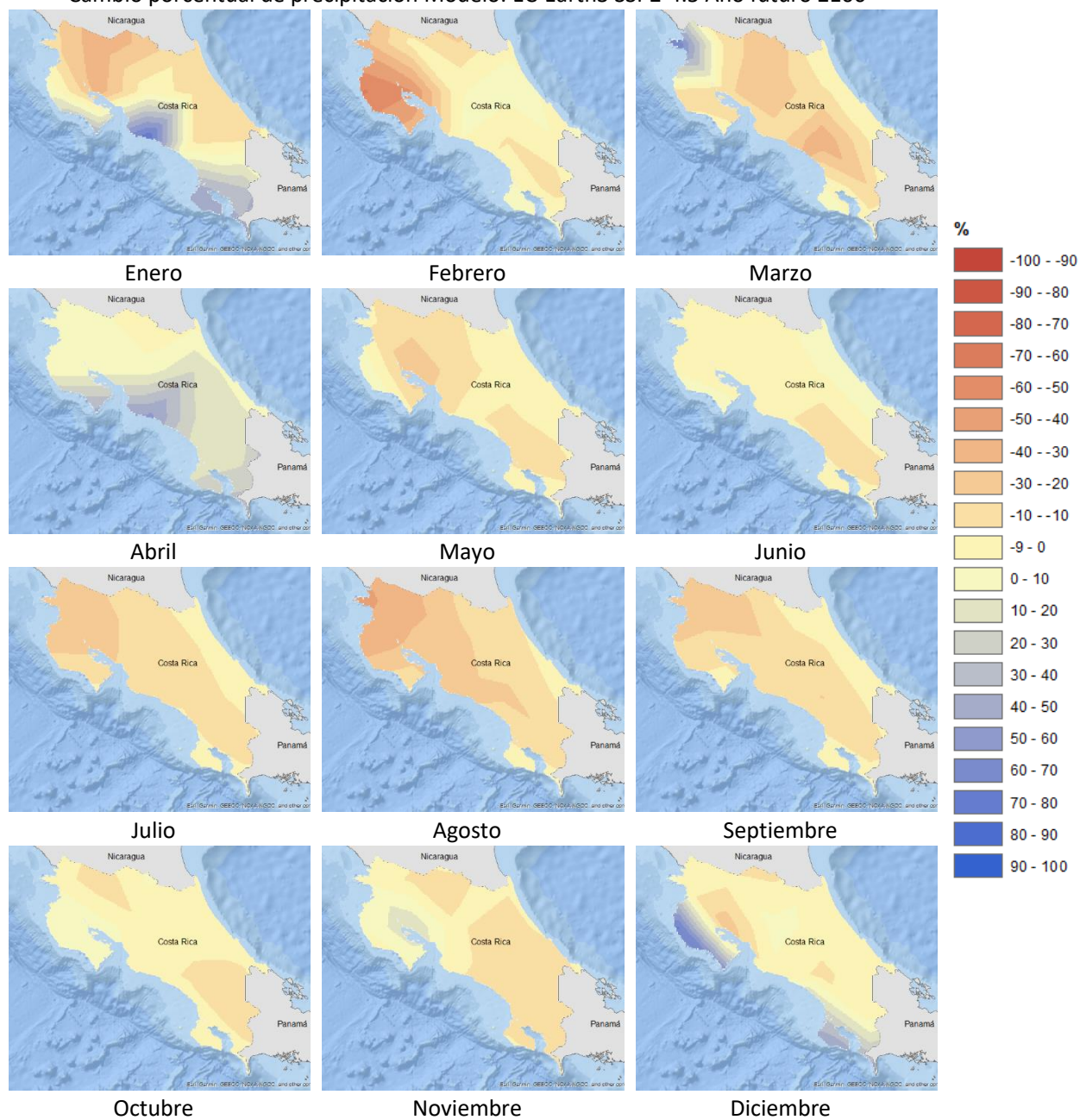
Cambio porcentual de precipitación Modelo: EC-Earth3 SSP2-4.5 Año futuro 2035



Cambio porcentual de precipitación Modelo: EC-Earth3 SSP2-4.5 Año futuro 2050

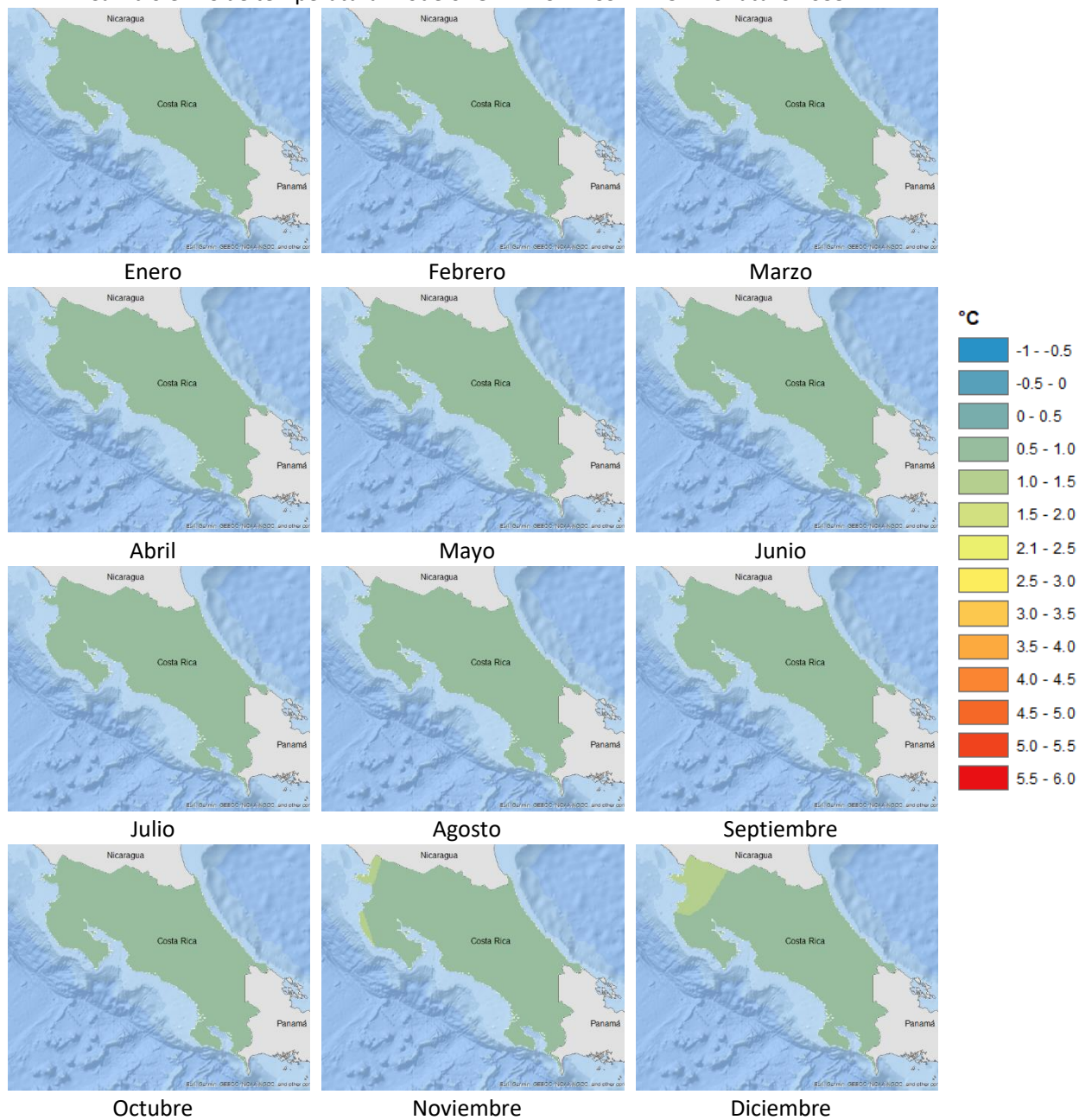


Cambio porcentual de precipitación Modelo: EC-Earth3 SSP2-4.5 Año futuro 2100

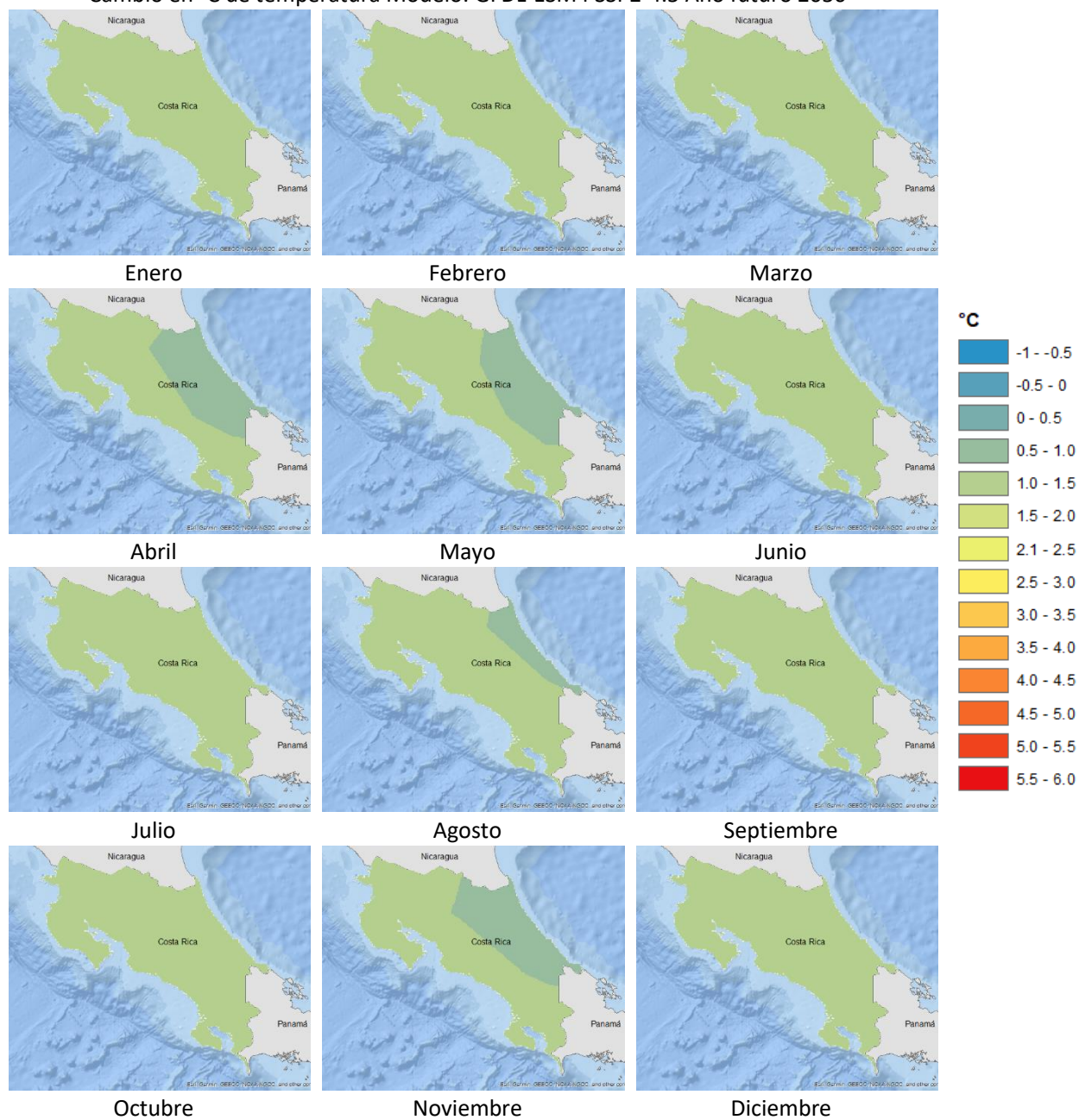


Temperatura SSP2-4.5

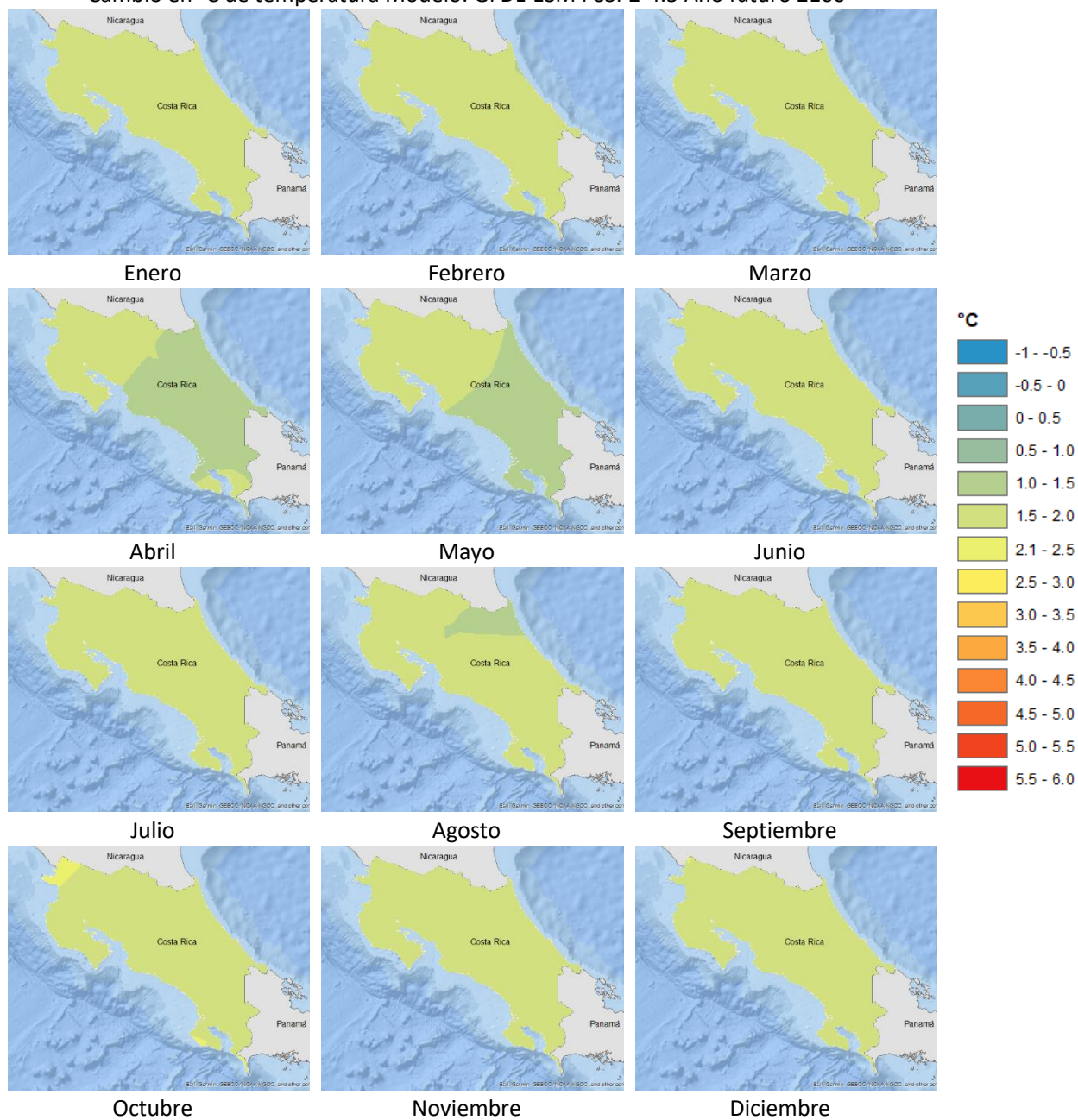
Cambio en °C de temperatura Modelo: GFDL-ESM4 SSP2-4.5 Año futuro 2035



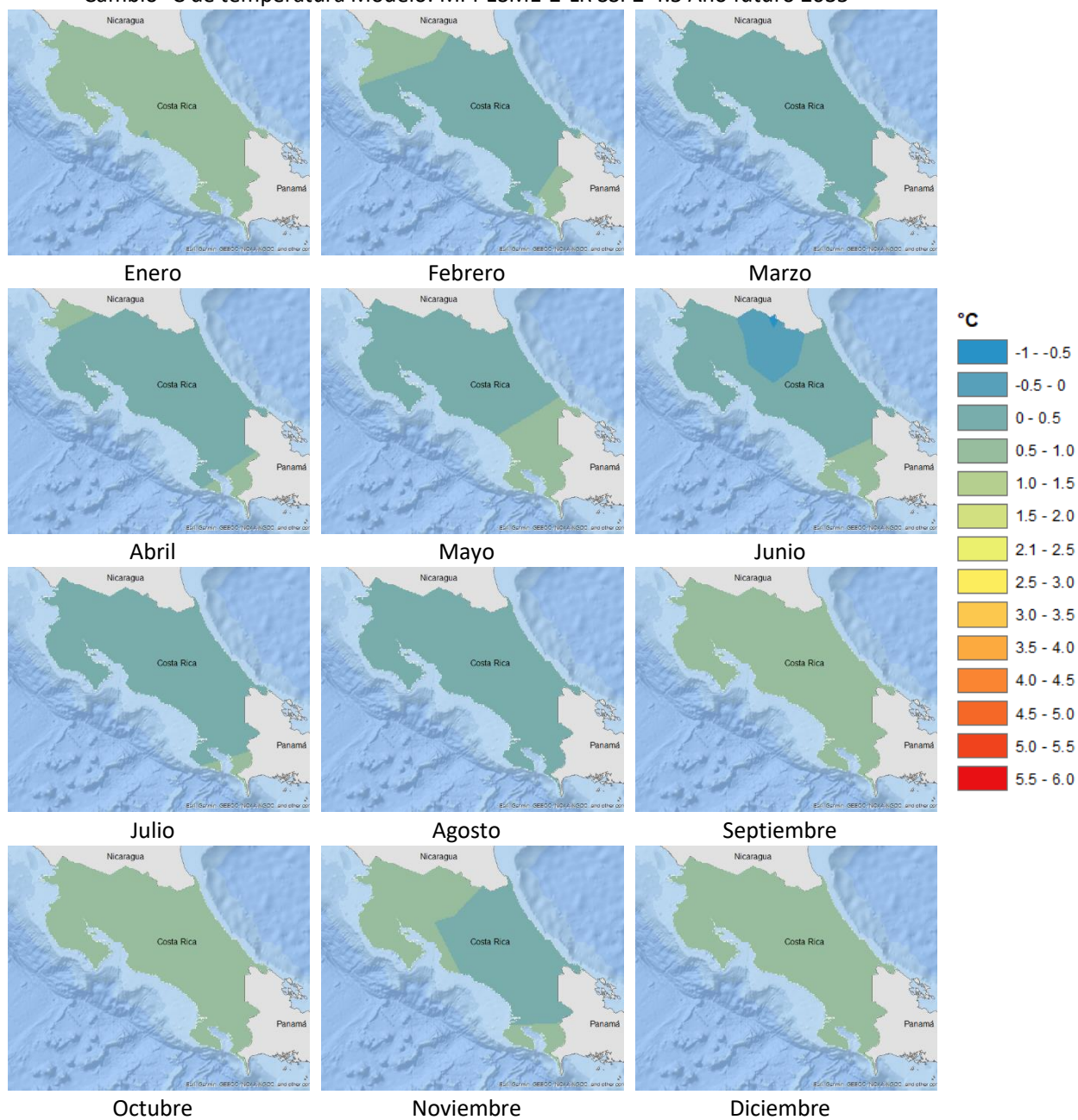
Cambio en °C de temperatura Modelo: GFDL-ESM4 SSP2-4.5 Año futuro 2050



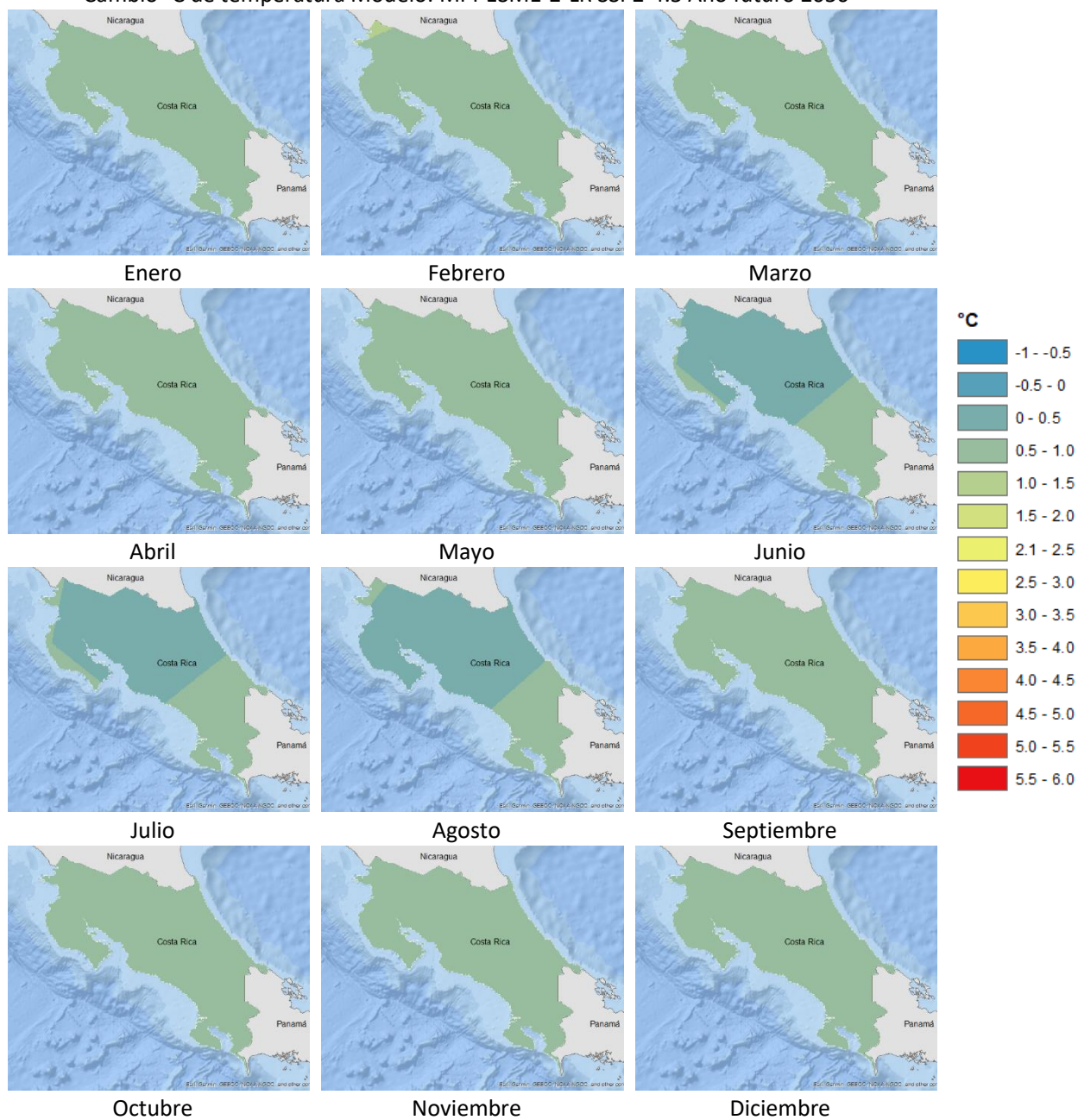
Cambio en °C de temperatura Modelo: GFDL-ESM4 SSP2-4.5 Año futuro 2100



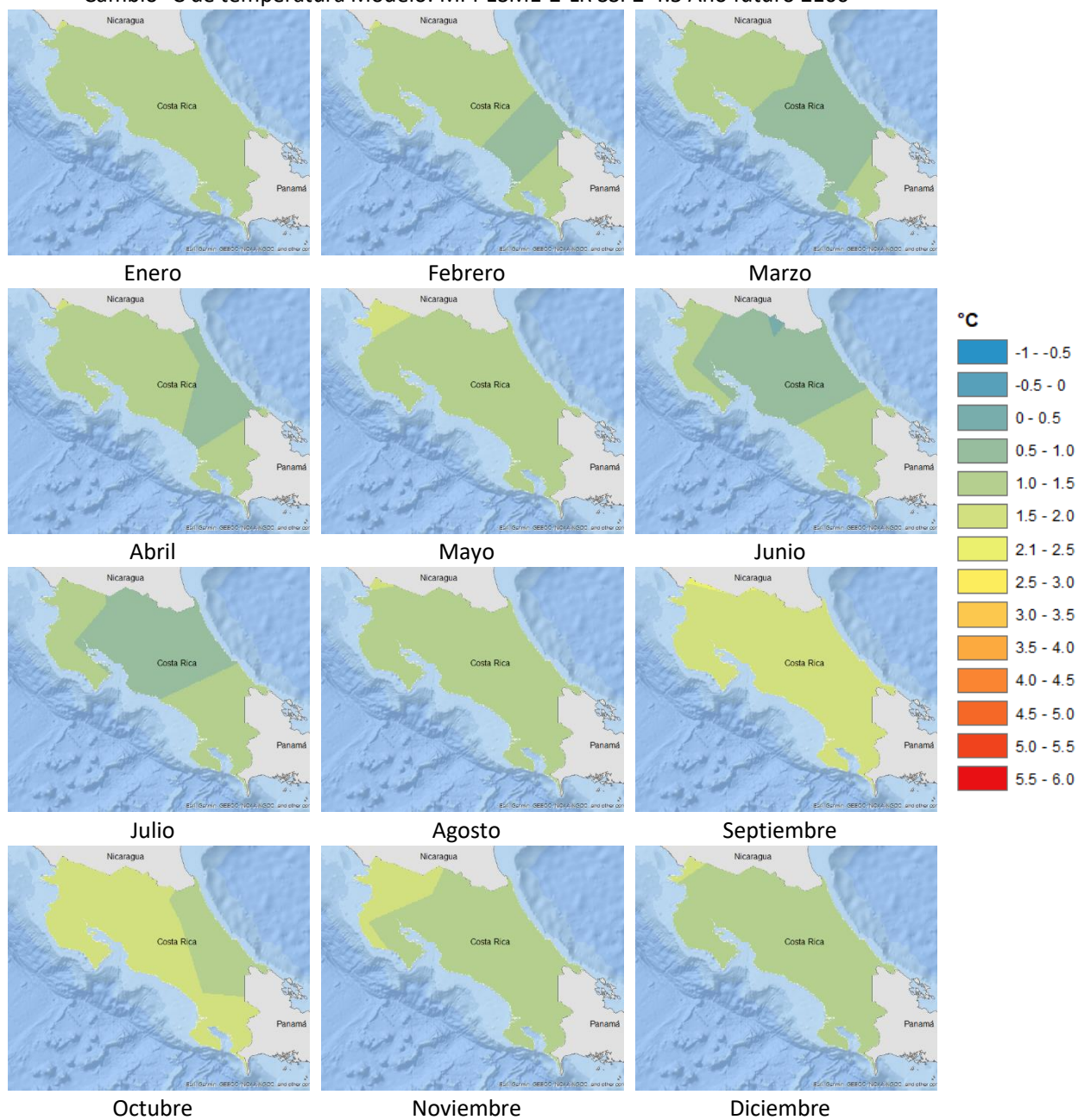
Cambio °C de temperatura Modelo: MPI-ESM1-2-LR SSP2-4.5 Año futuro 2035



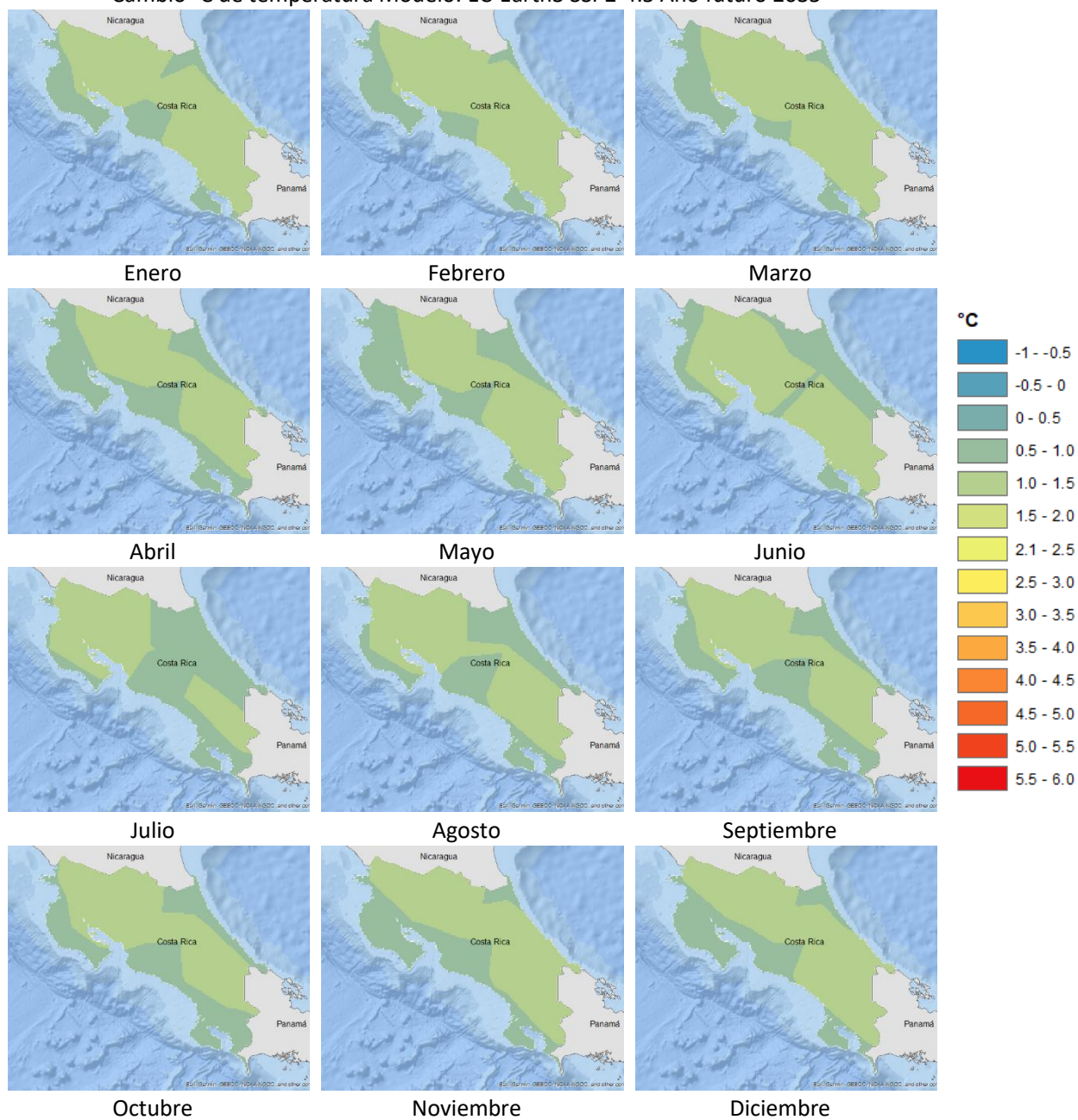
Cambio °C de temperatura Modelo: MPI-ESM1-2-LR SSP2-4.5 Año futuro 2050



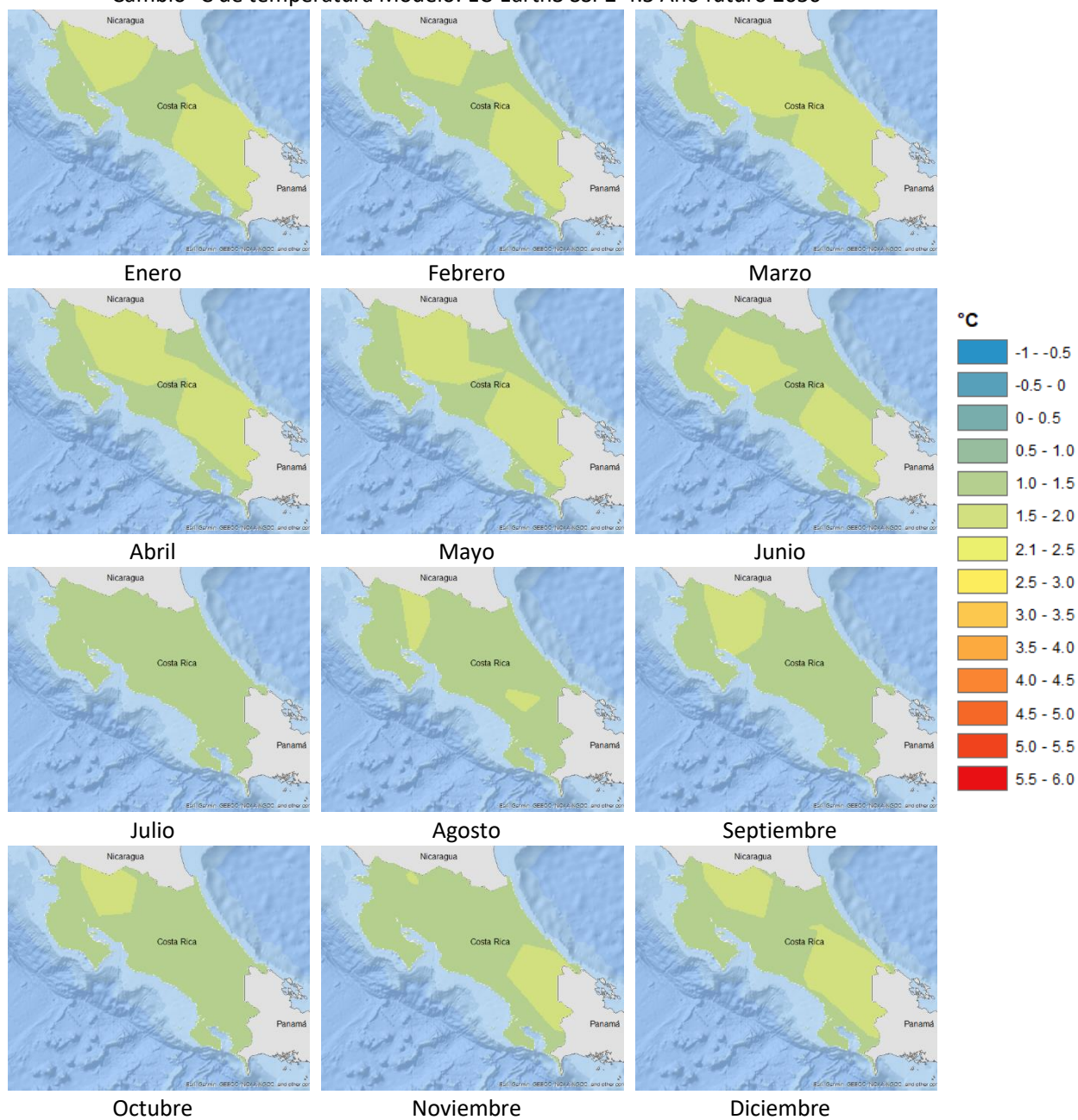
Cambio °C de temperatura Modelo: MPI-ESM1-2-LR SSP2-4.5 Año futuro 2100



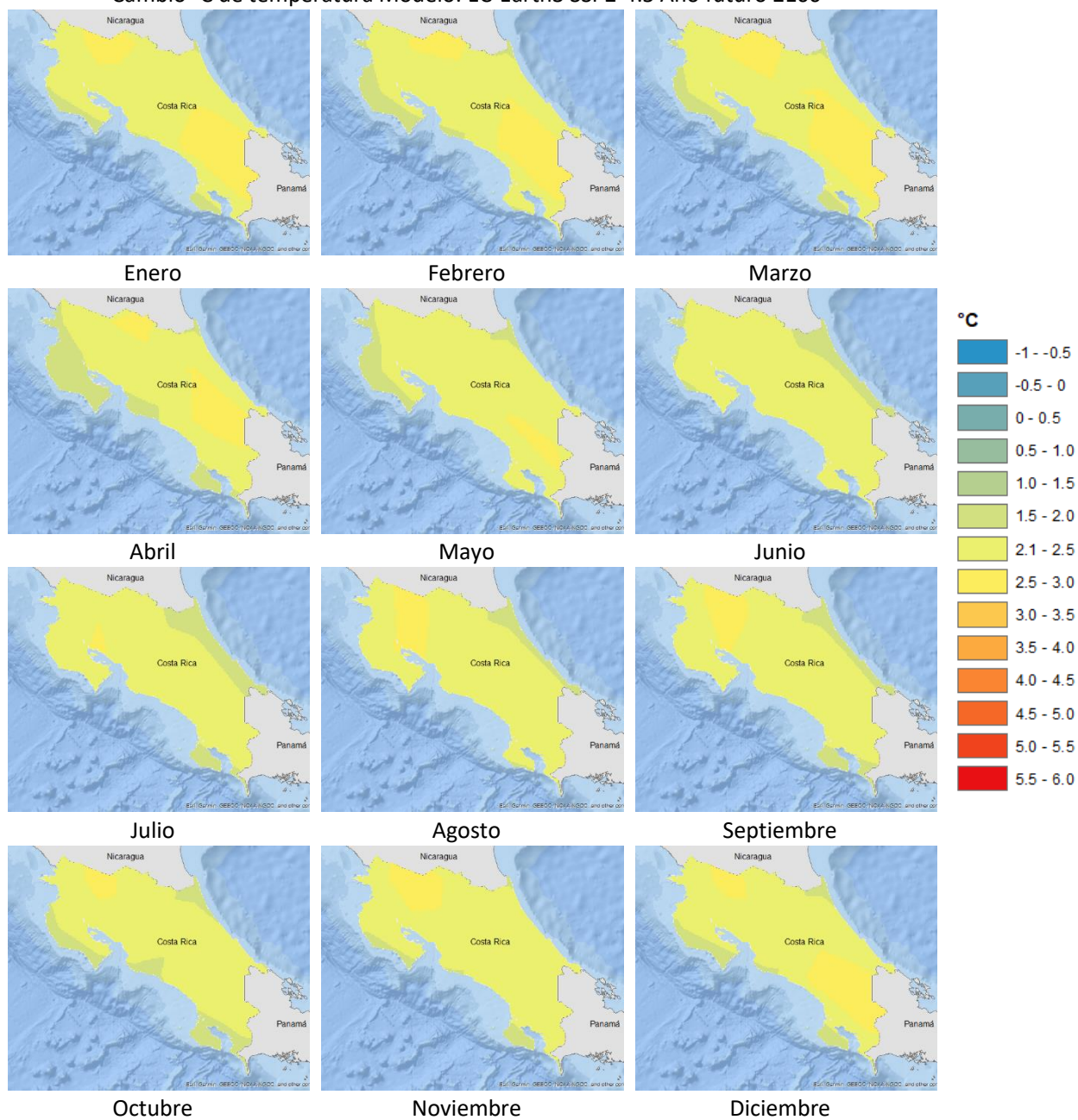
Cambio °C de temperatura Modelo: EC-Earth3 SSP2-4.5 Año futuro 2035



Cambio °C de temperatura Modelo: EC-Earth3 SSP2-4.5 Año futuro 2050

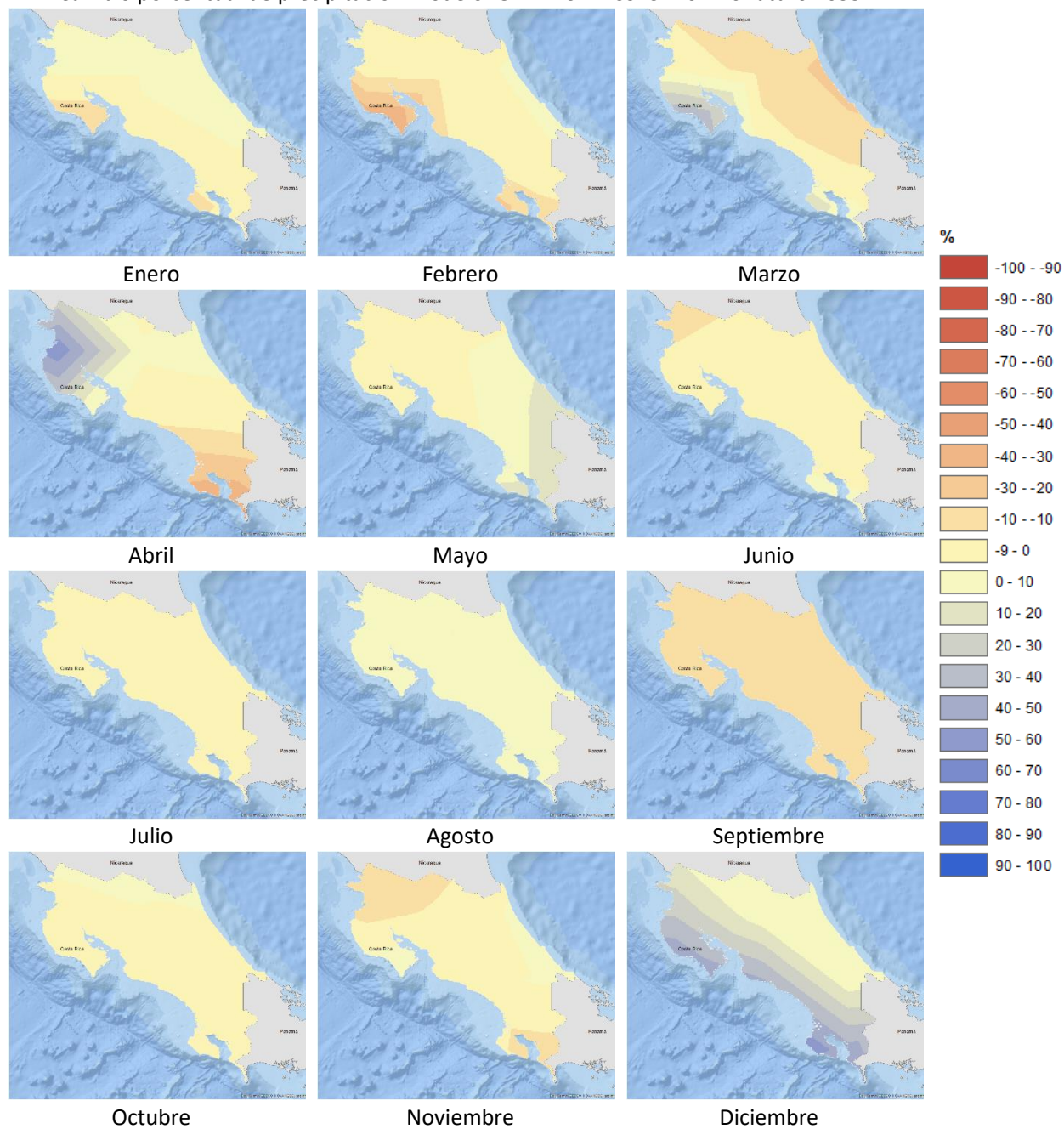


Cambio °C de temperatura Modelo: EC-Earth3 SSP2-4.5 Año futuro 2100

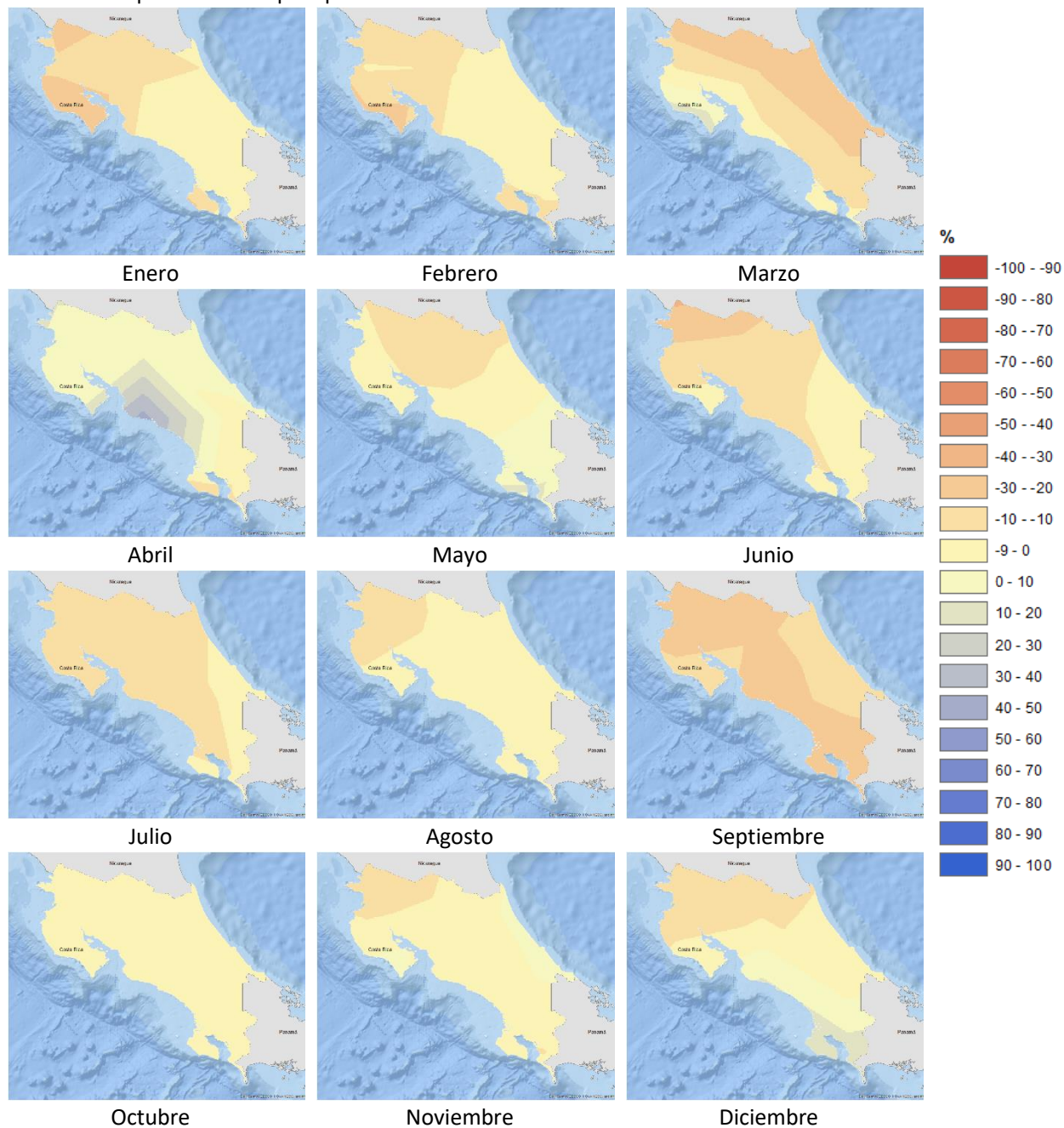


Precipitación SSP3-7.0

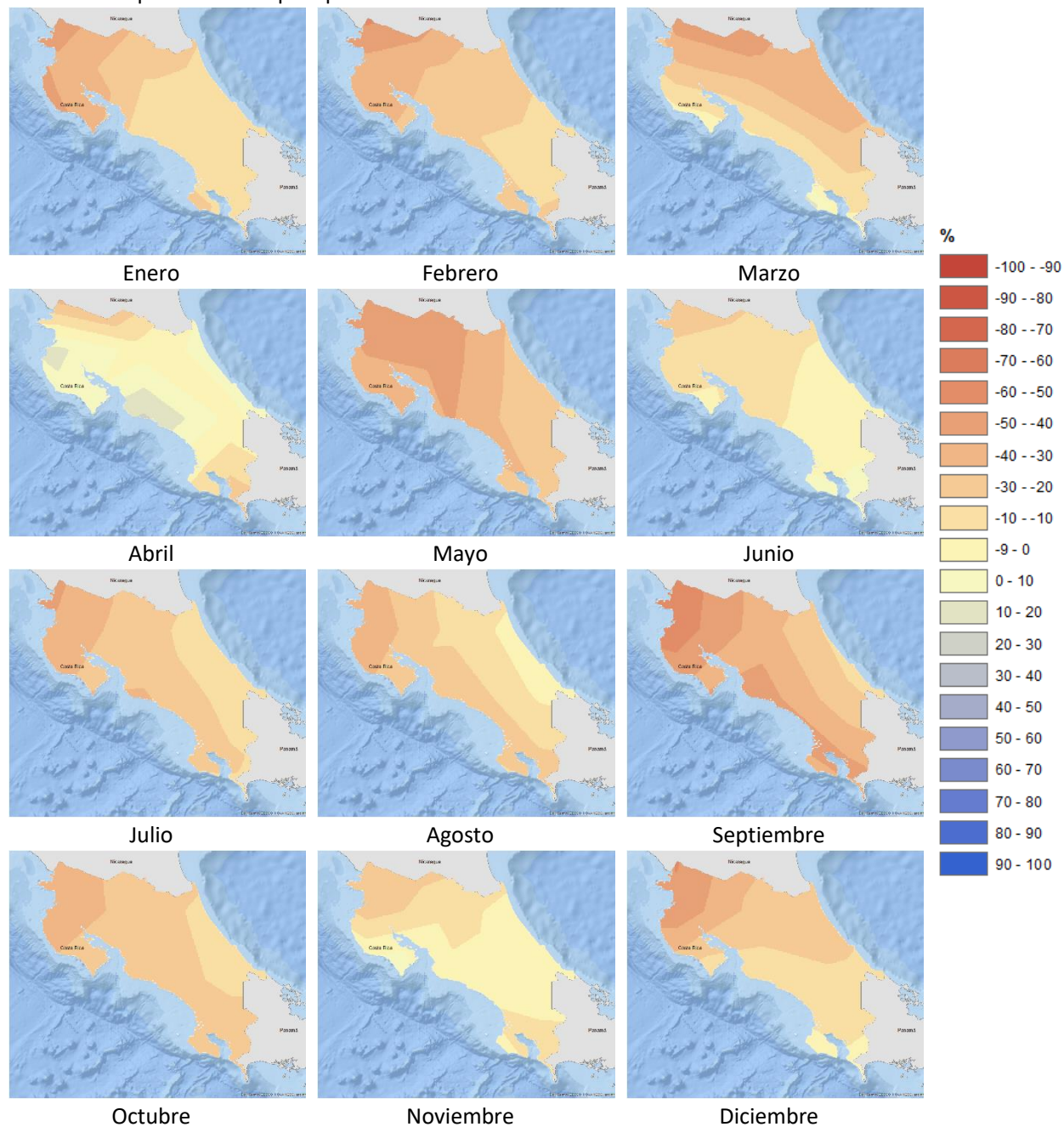
Cambio porcentual de precipitación Modelo: GFDL-ESM4 SSP3-7.0 Año futuro 2035



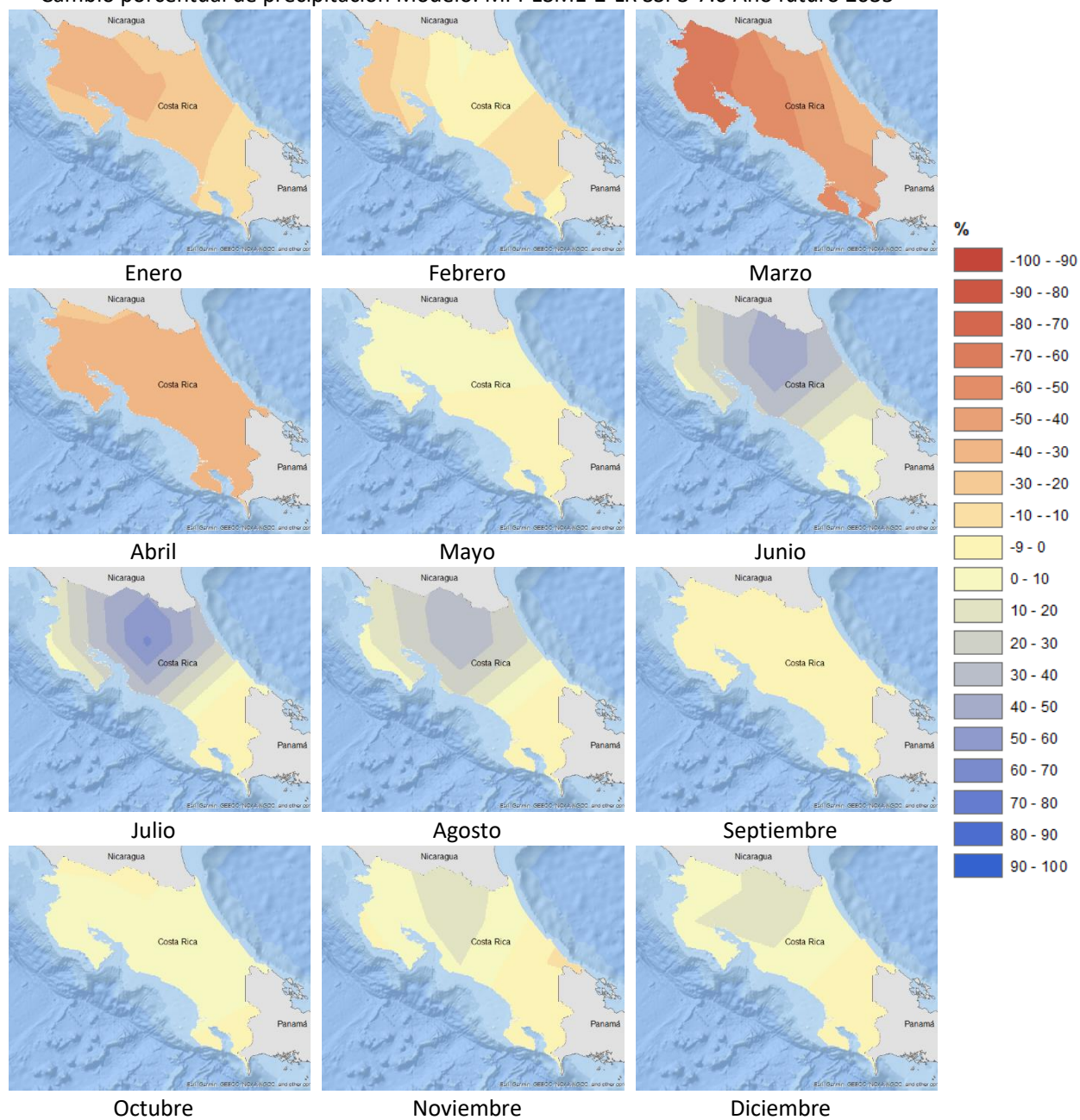
Cambio porcentual de precipitación Modelo: GFDL-ESM4 SSP3-7.0 Año futuro 2050



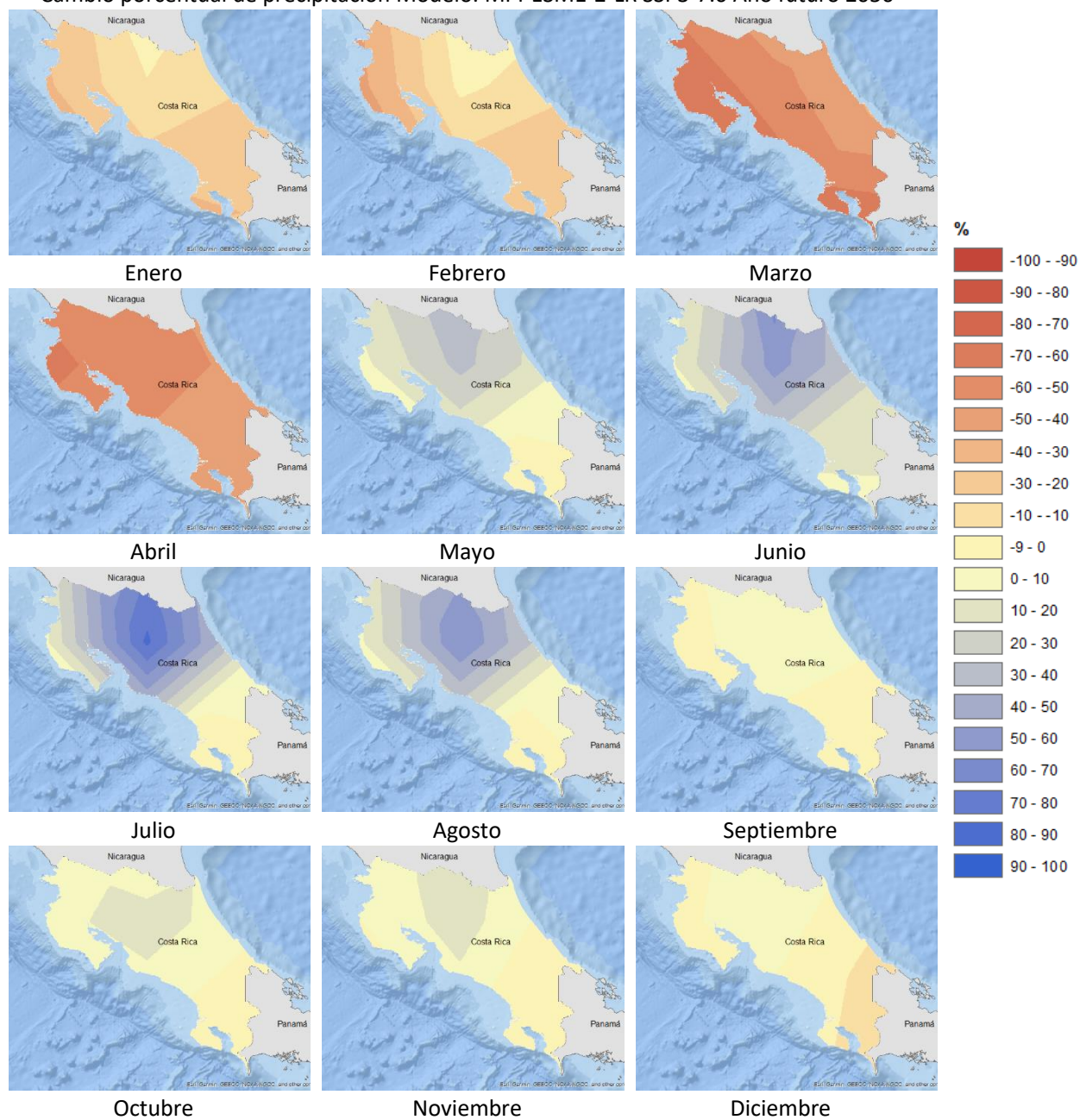
Cambio porcentual de precipitación Modelo: GFDL-ESM4 SSP3-7.0 Año futuro 2100



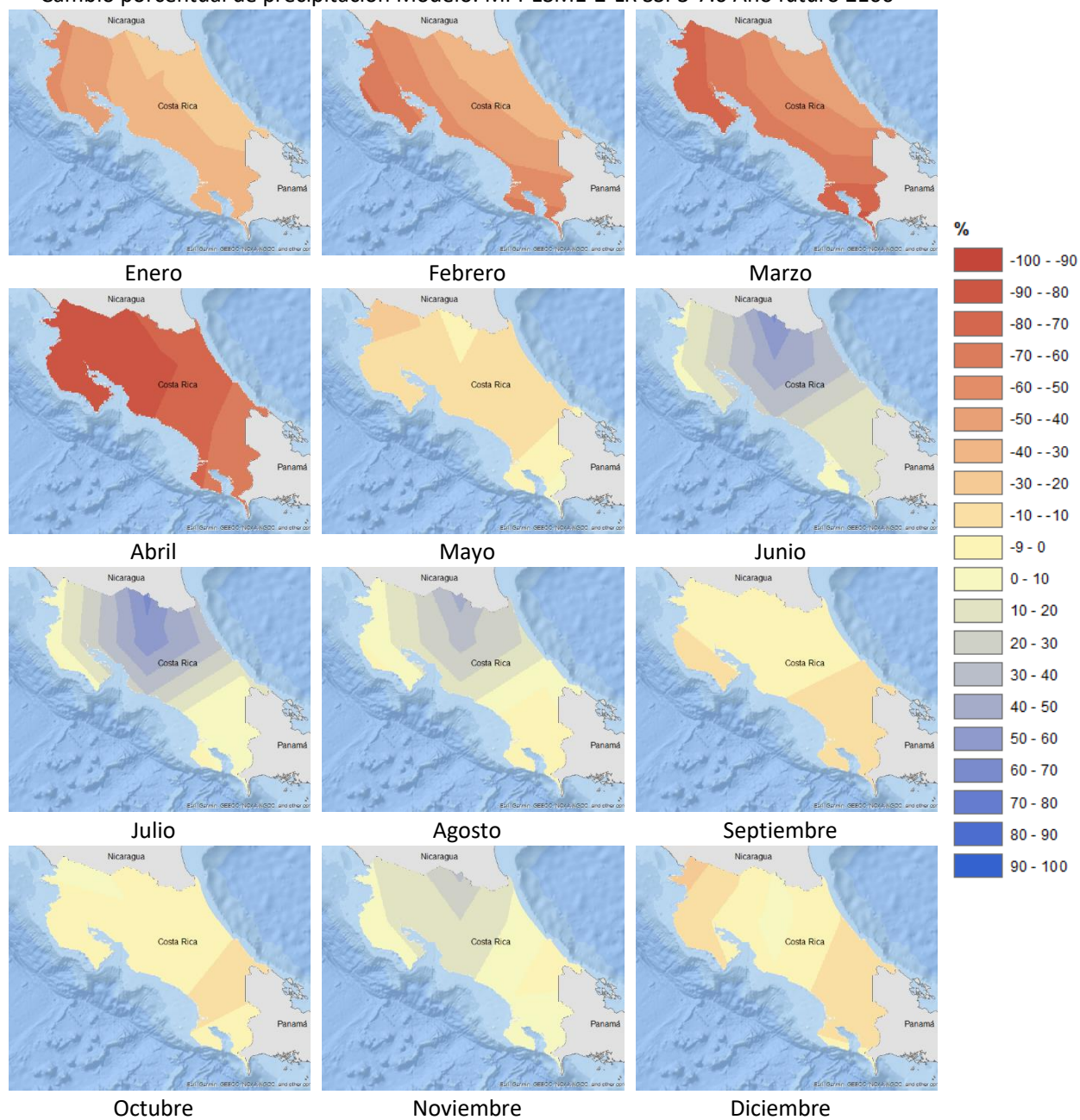
Cambio porcentual de precipitación Modelo: MPI-ESM1-2-LR SSP3-7.0 Año futuro 2035



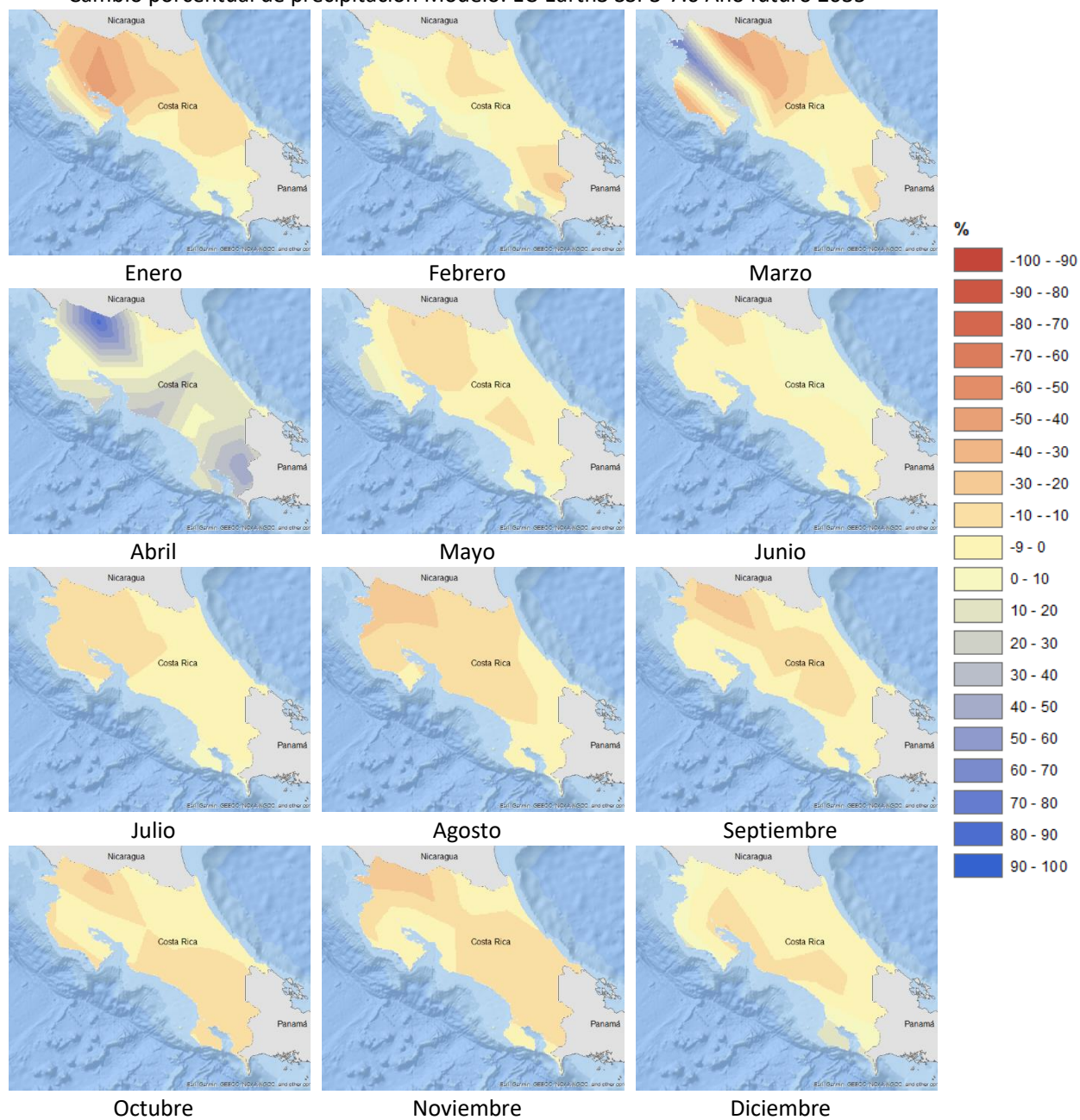
Cambio porcentual de precipitación Modelo: MPI-ESM1-2-LR SSP3-7.0 Año futuro 2050



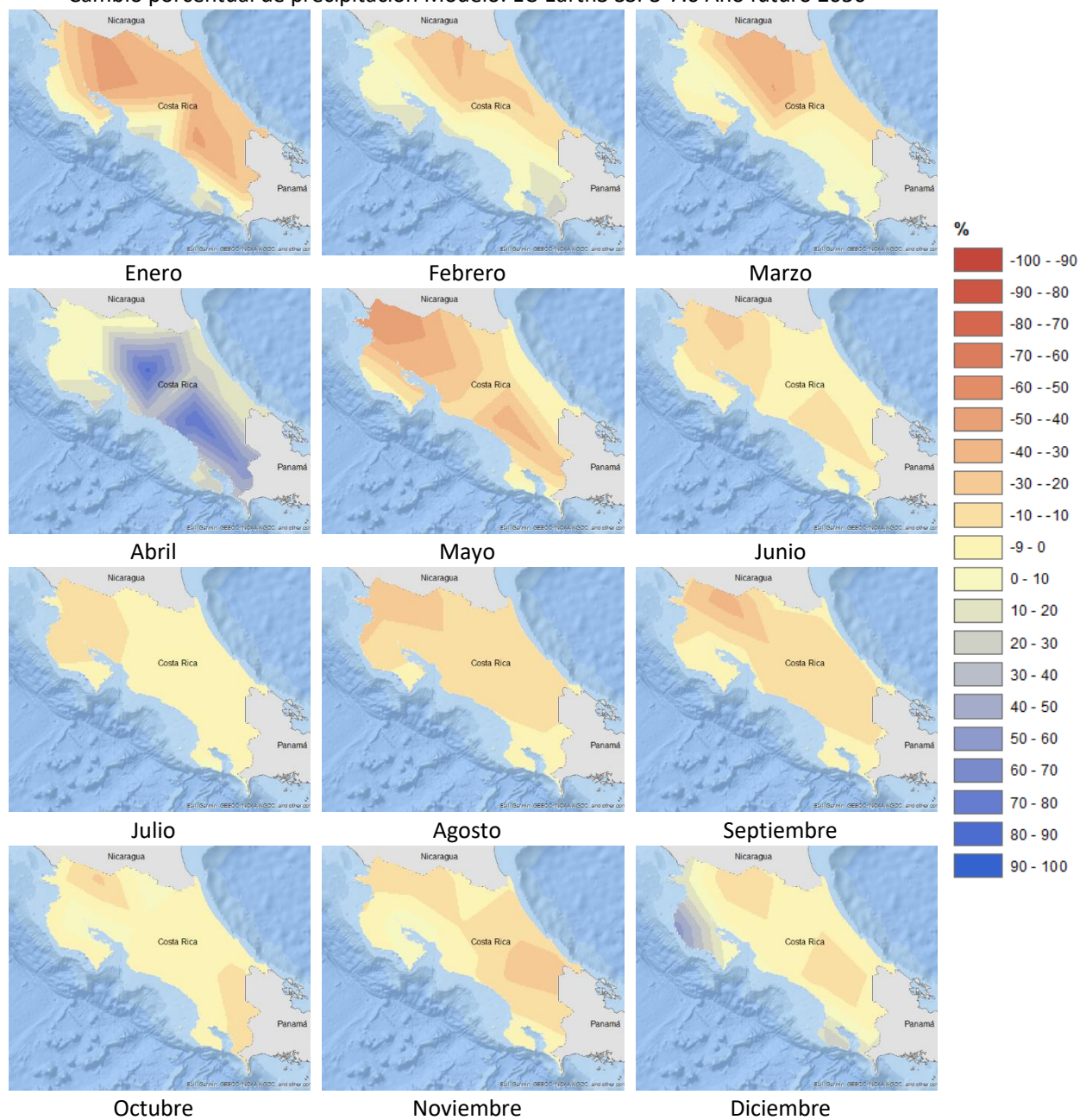
Cambio porcentual de precipitación Modelo: MPI-ESM1-2-LR SSP3-7.0 Año futuro 2100



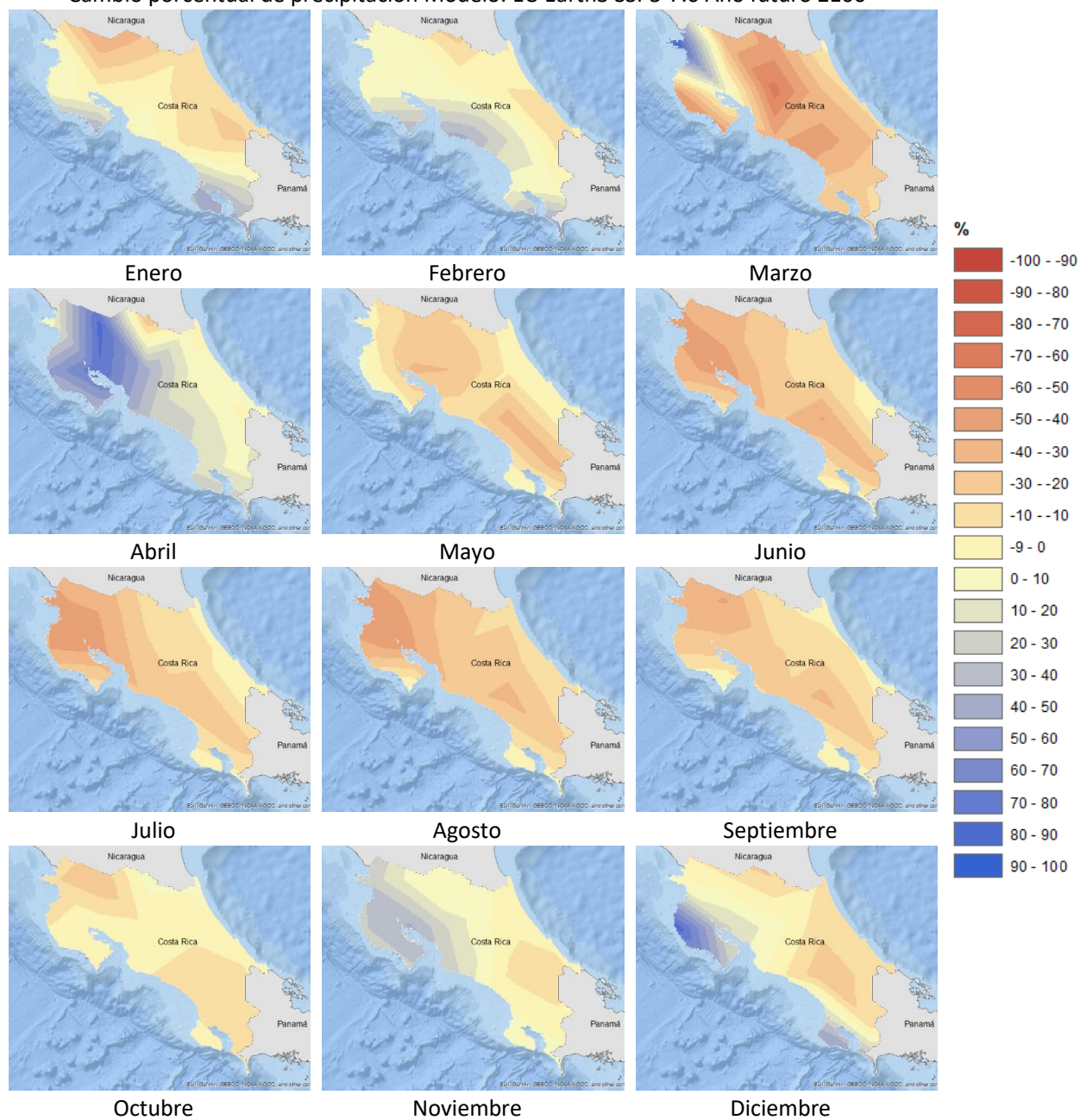
Cambio porcentual de precipitación Modelo: EC-Earth3 SSP3-7.0 Año futuro 2035



Cambio porcentual de precipitación Modelo: EC-Earth3 SSP3-7.0 Año futuro 2050

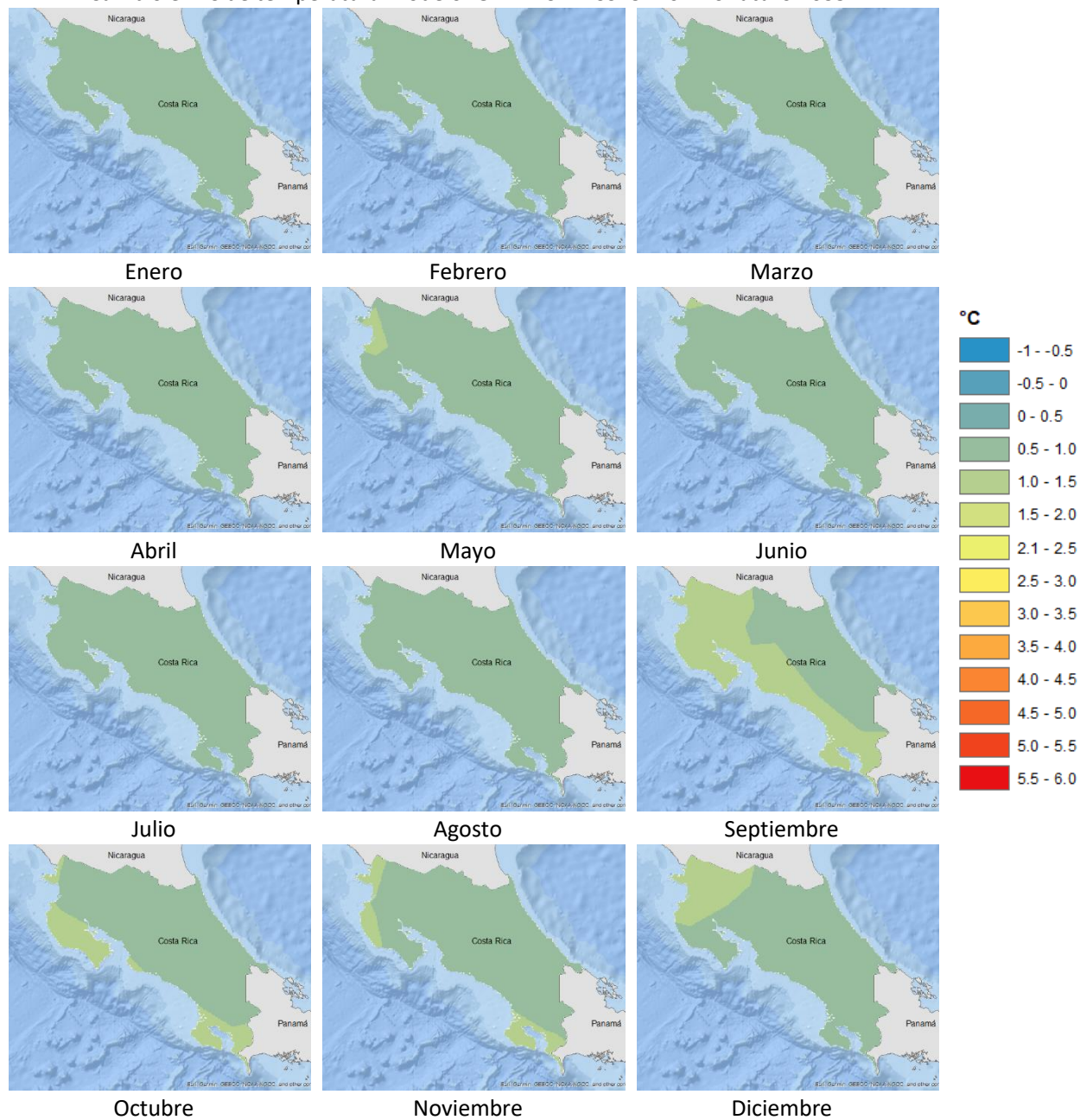


Cambio porcentual de precipitación Modelo: EC-Earth3 SSP3-7.0 Año futuro 2100

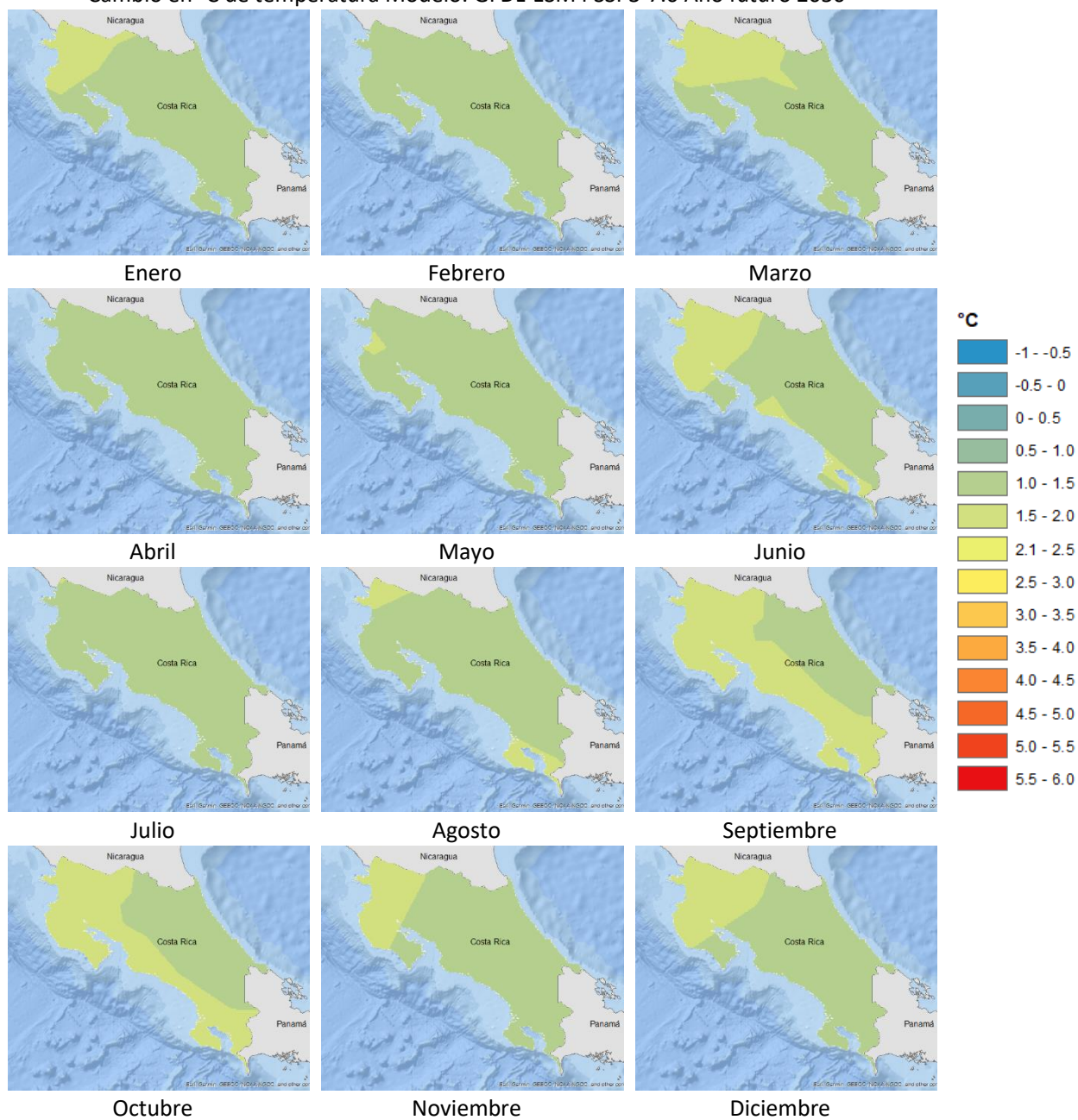


Temperatura SSP3-7.0

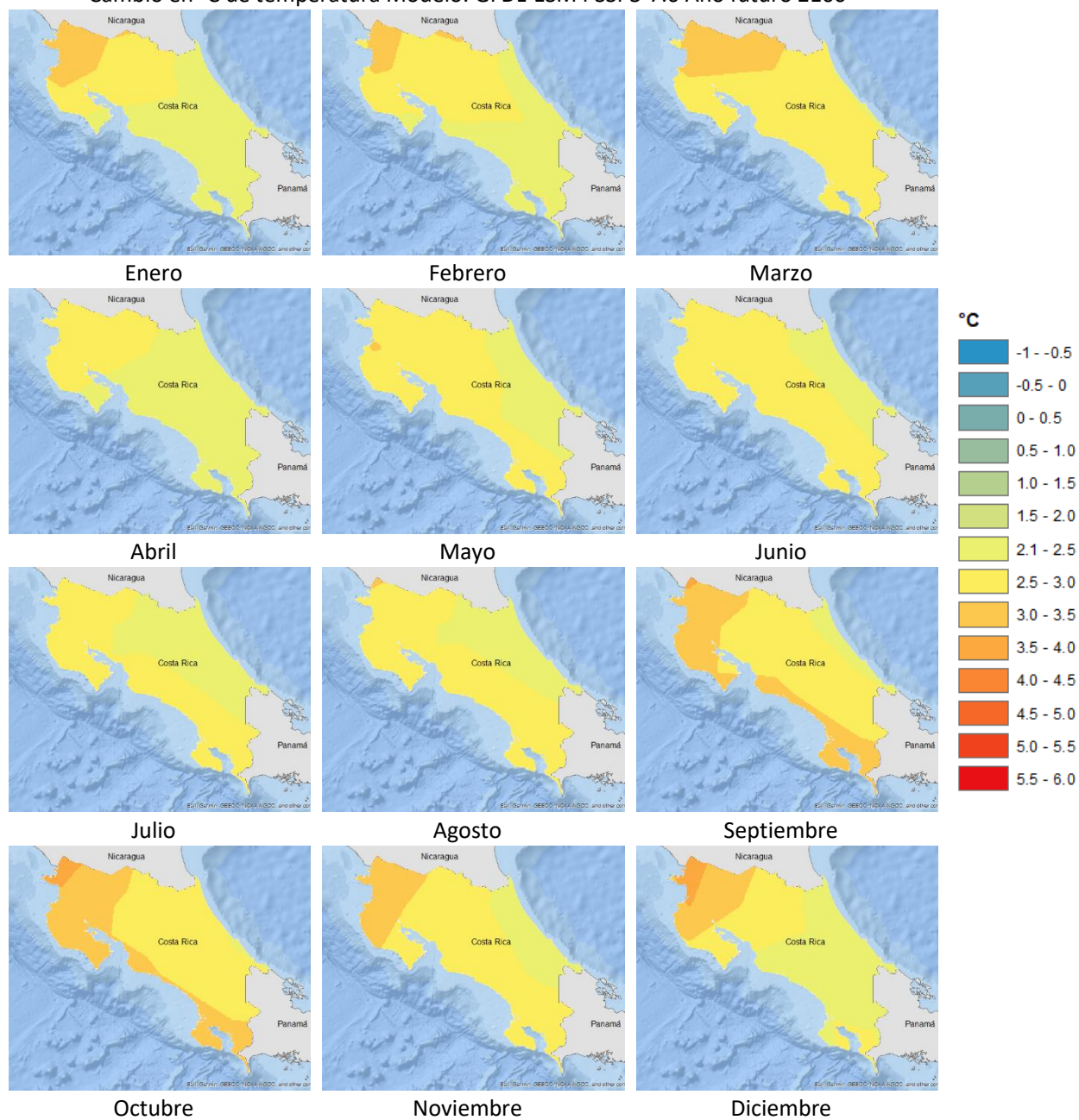
Cambio en °C de temperatura Modelo: GFDL-ESM4 SSP3-7.0 Año futuro 2035



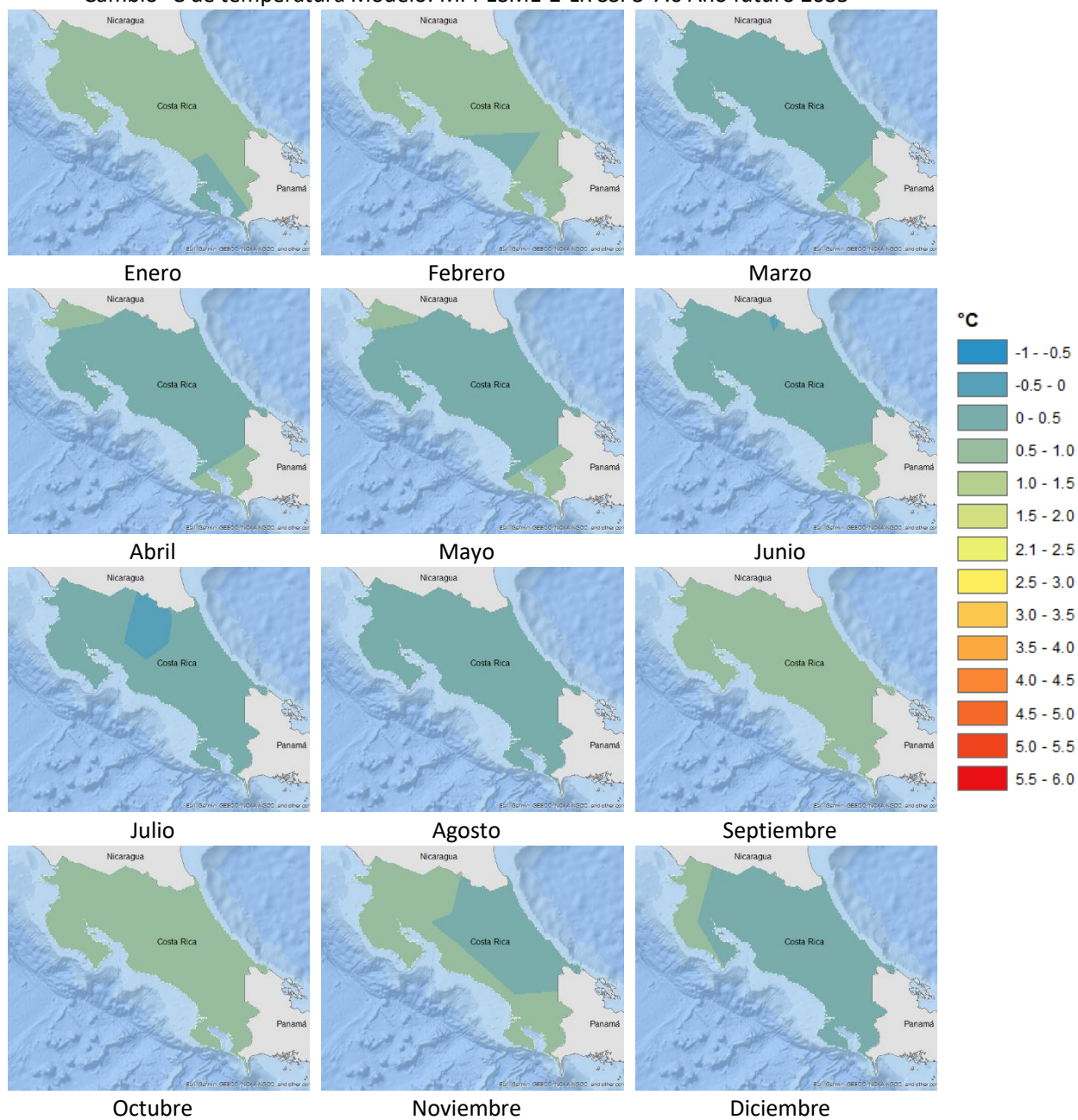
Cambio en °C de temperatura Modelo: GFDL-ESM4 SSP3-7.0 Año futuro 2050



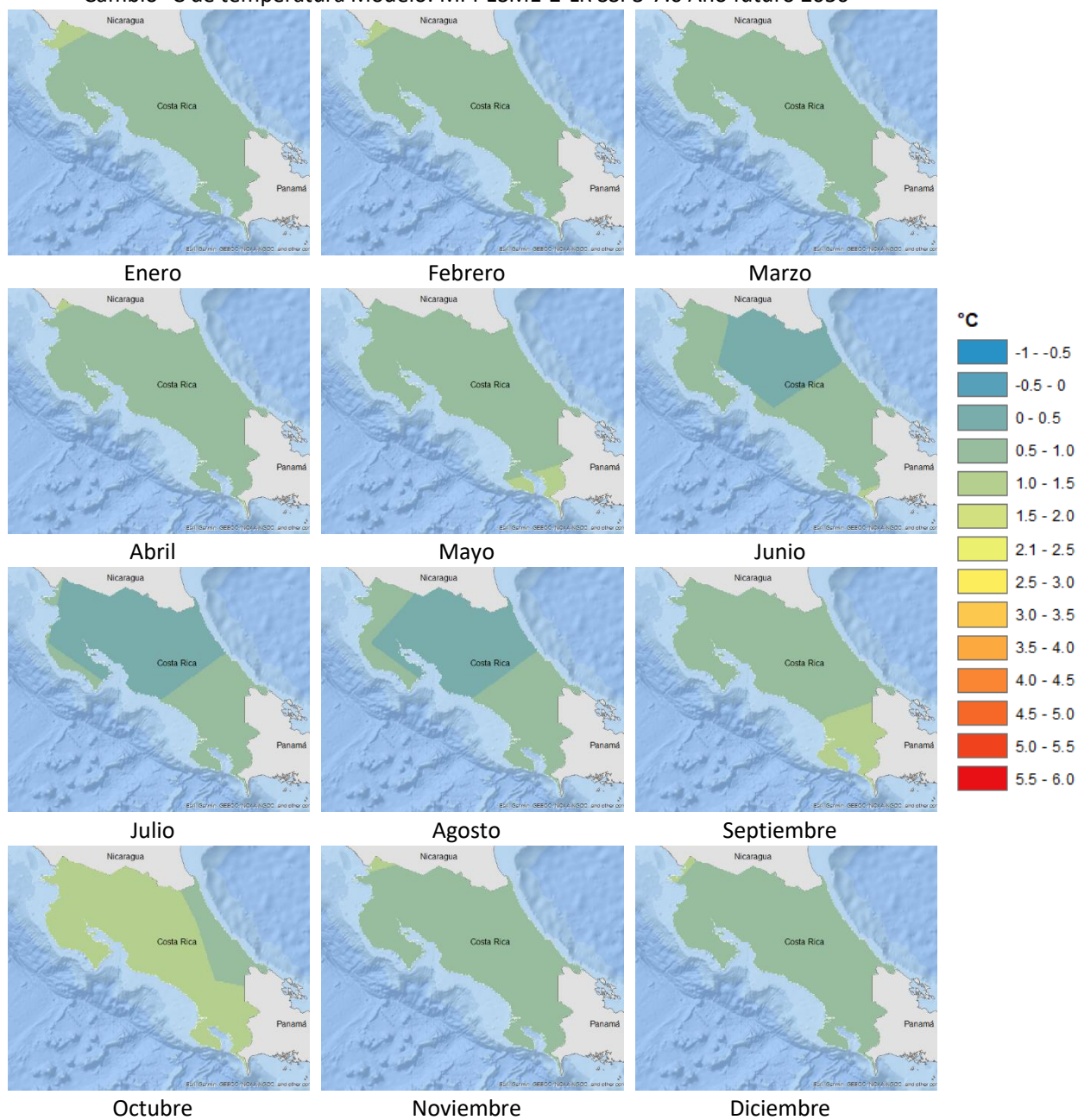
Cambio en °C de temperatura Modelo: GFDL-ESM4 SSP3-7.0 Año futuro 2100



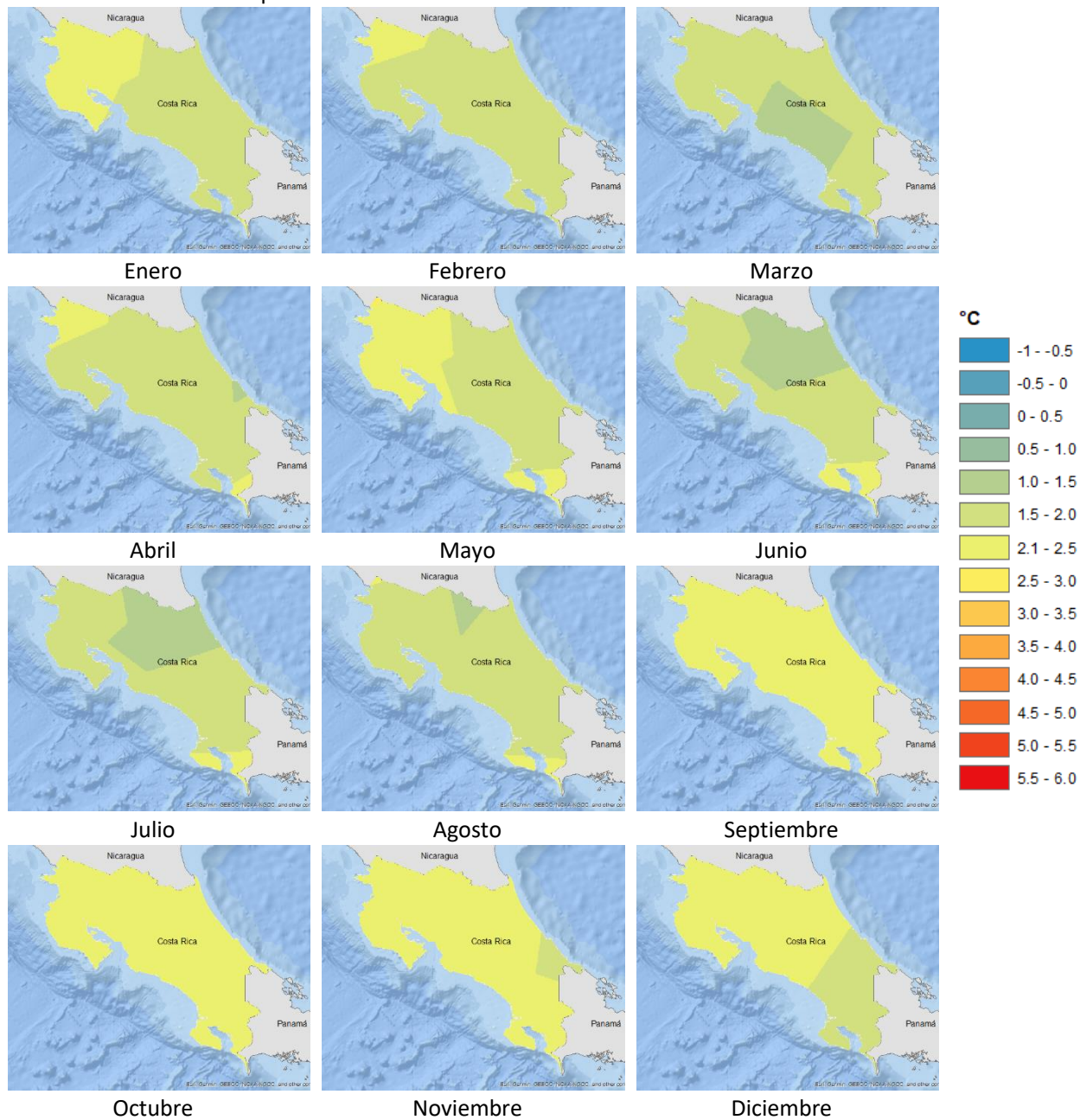
Cambio °C de temperatura Modelo: MPI-ESM1-2-LR SSP3-7.0 Año futuro 2035



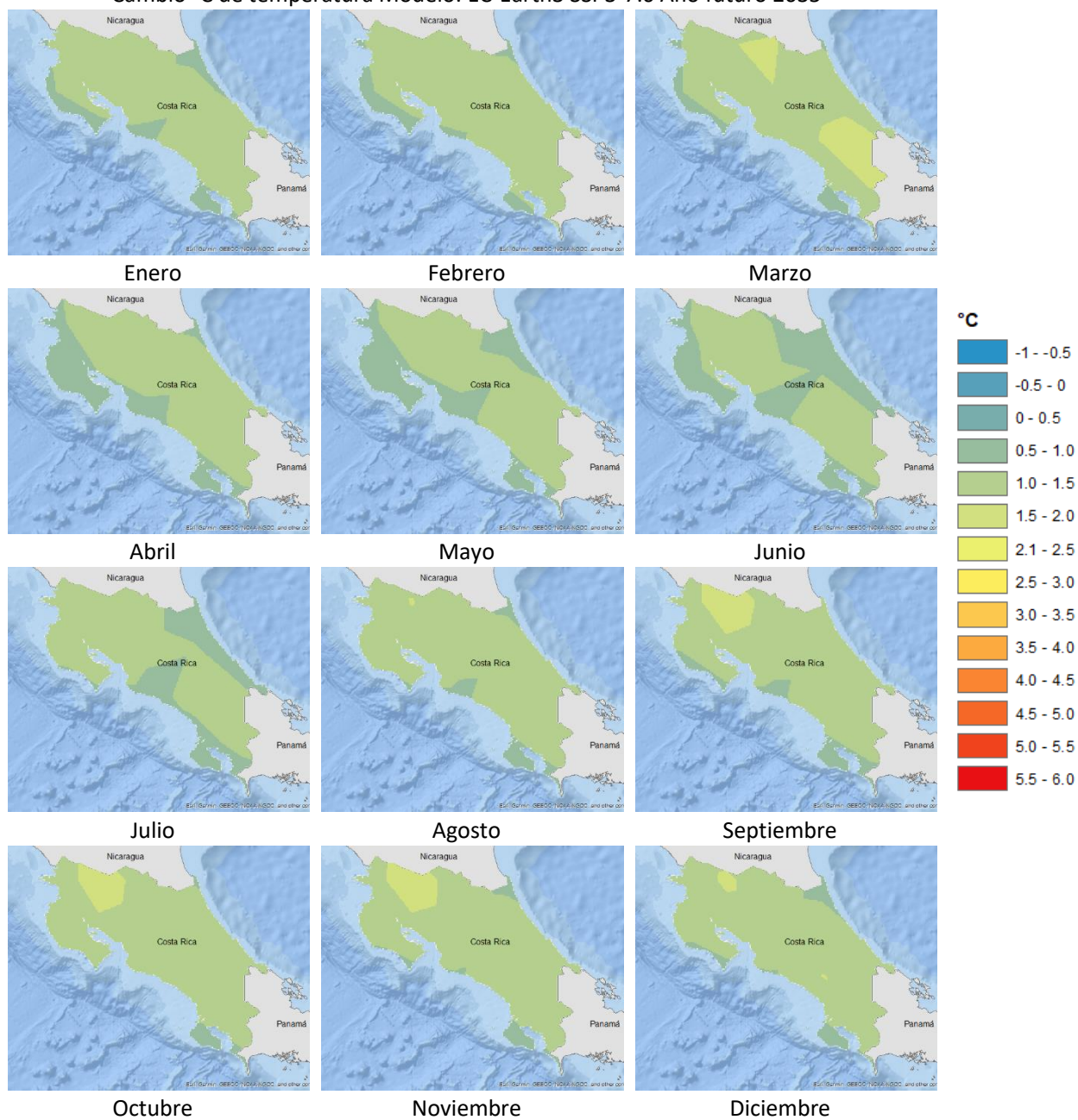
Cambio °C de temperatura Modelo: MPI-ESM1-2-LR SSP3-7.0 Año futuro 2050



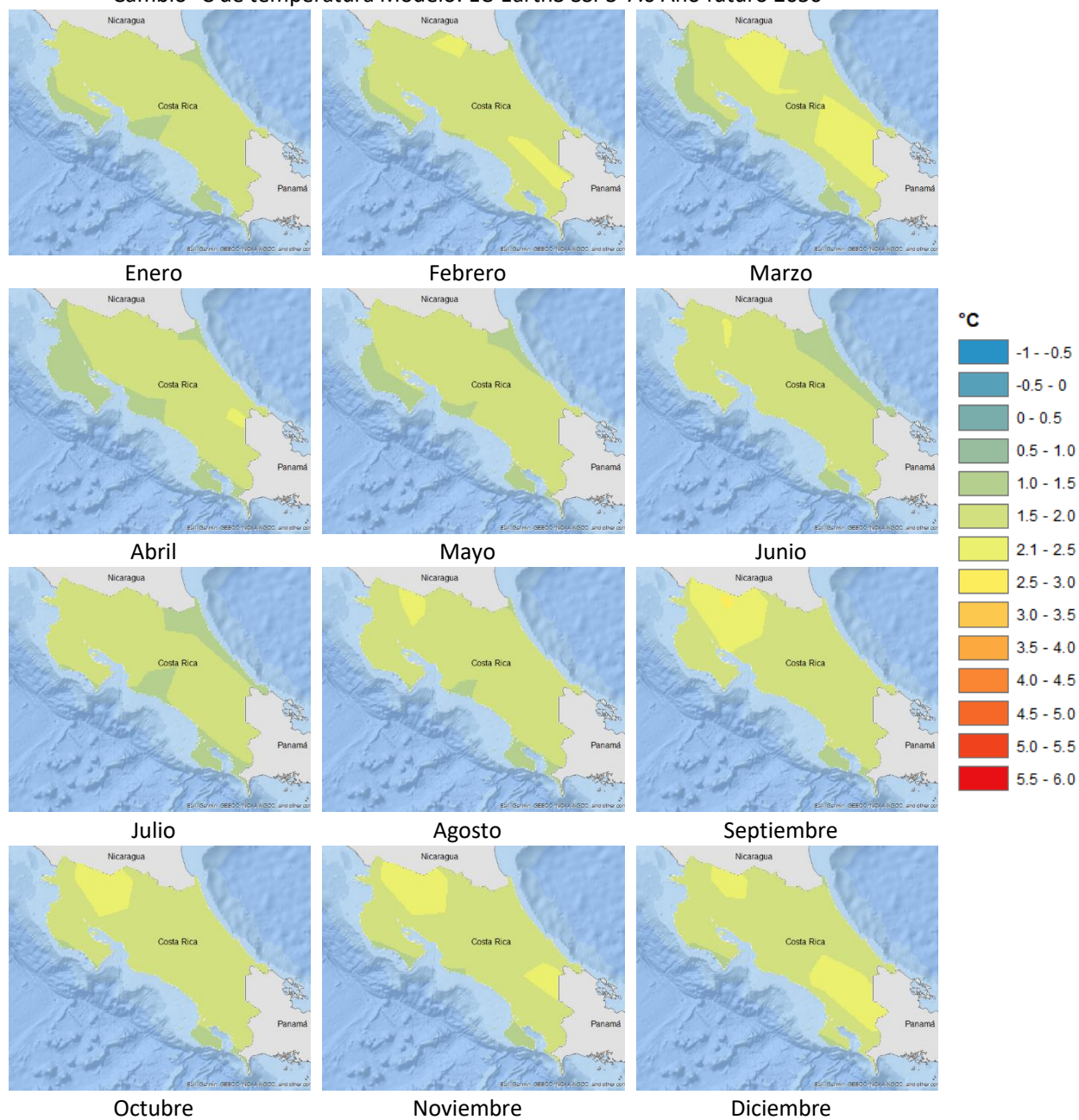
Cambio °C de temperatura Modelo: MPI-ESM1-2-LR SSP3-7.0 Año futuro 2100



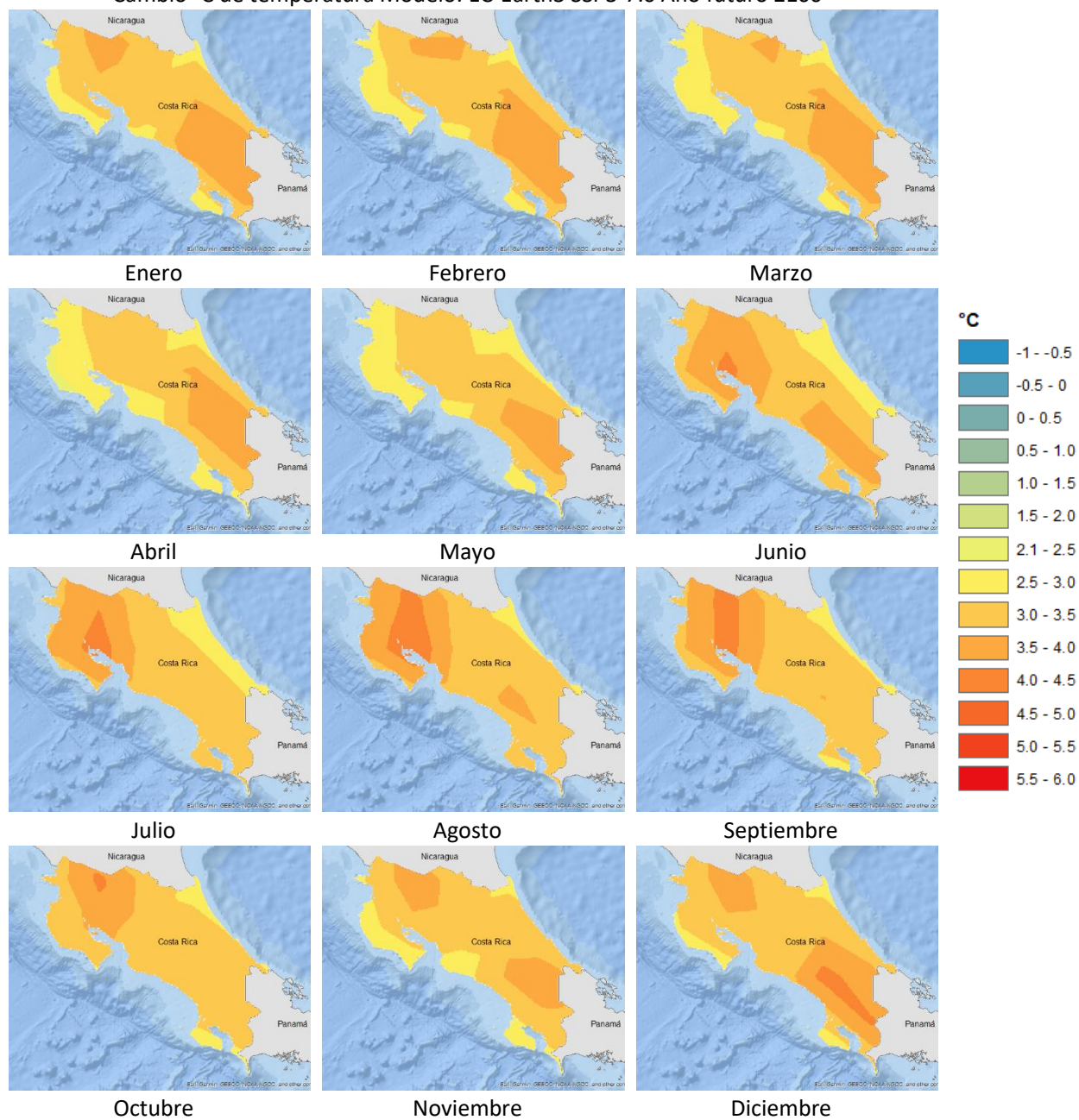
Cambio °C de temperatura Modelo: EC-Earth3 SSP3-7.0 Año futuro 2035



Cambio °C de temperatura Modelo: EC-Earth3 SSP3-7.0 Año futuro 2050

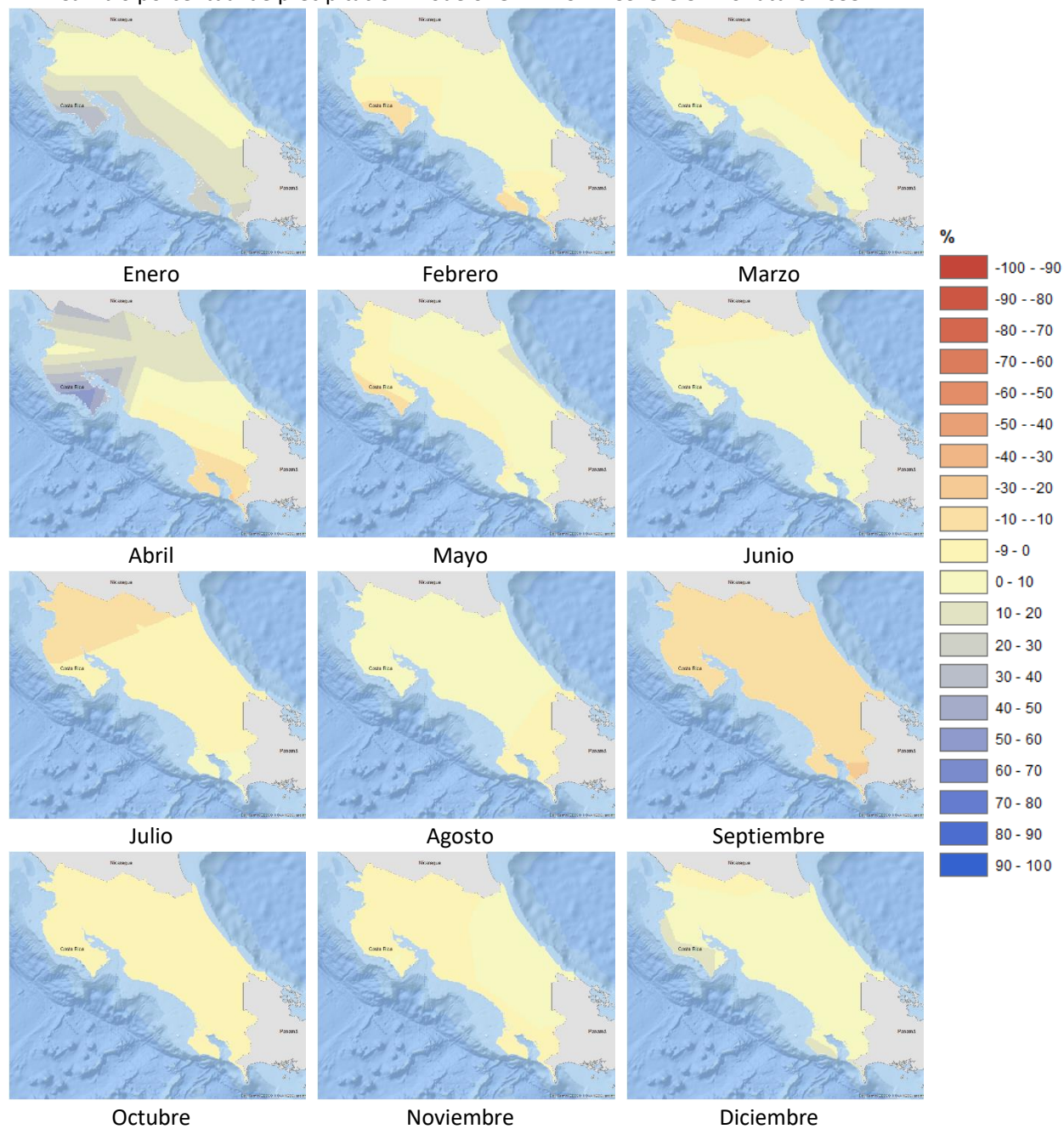


Cambio °C de temperatura Modelo: EC-Earth3 SSP3-7.0 Año futuro 2100

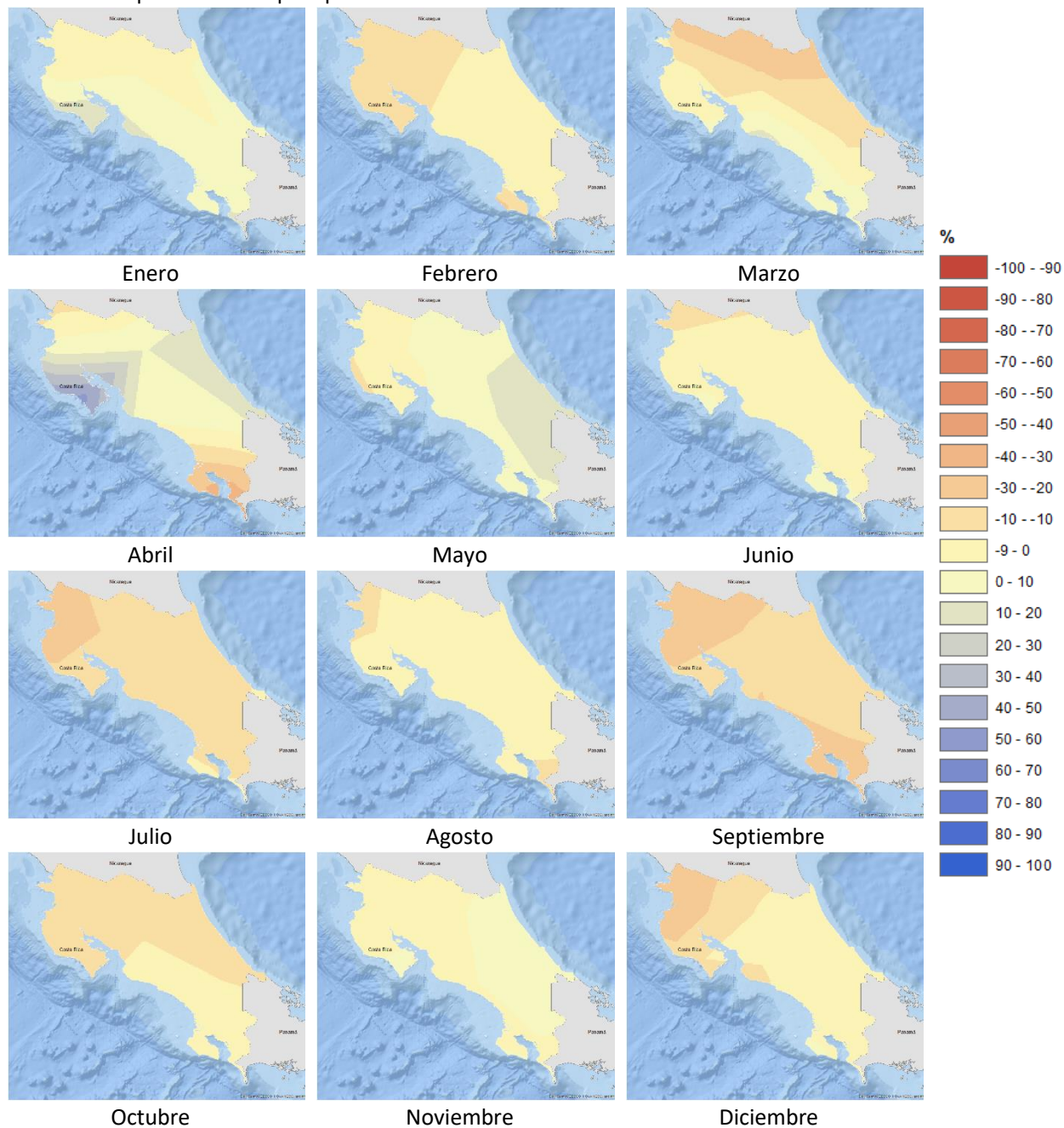


Precipitación SSP5-8.5

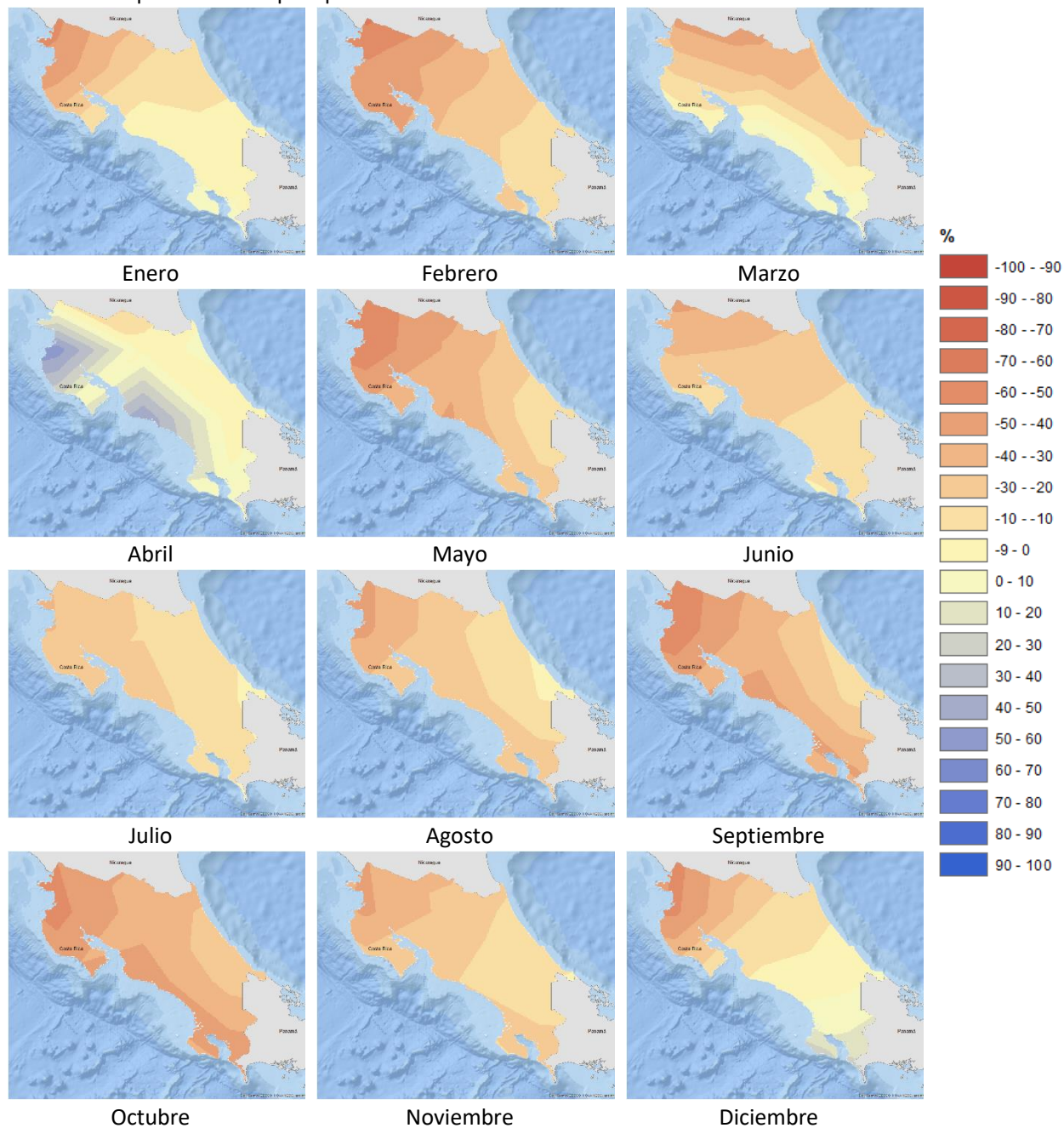
Cambio porcentual de precipitación Modelo: GFDL-ESM4 SSP5-8.5 Año futuro 2035



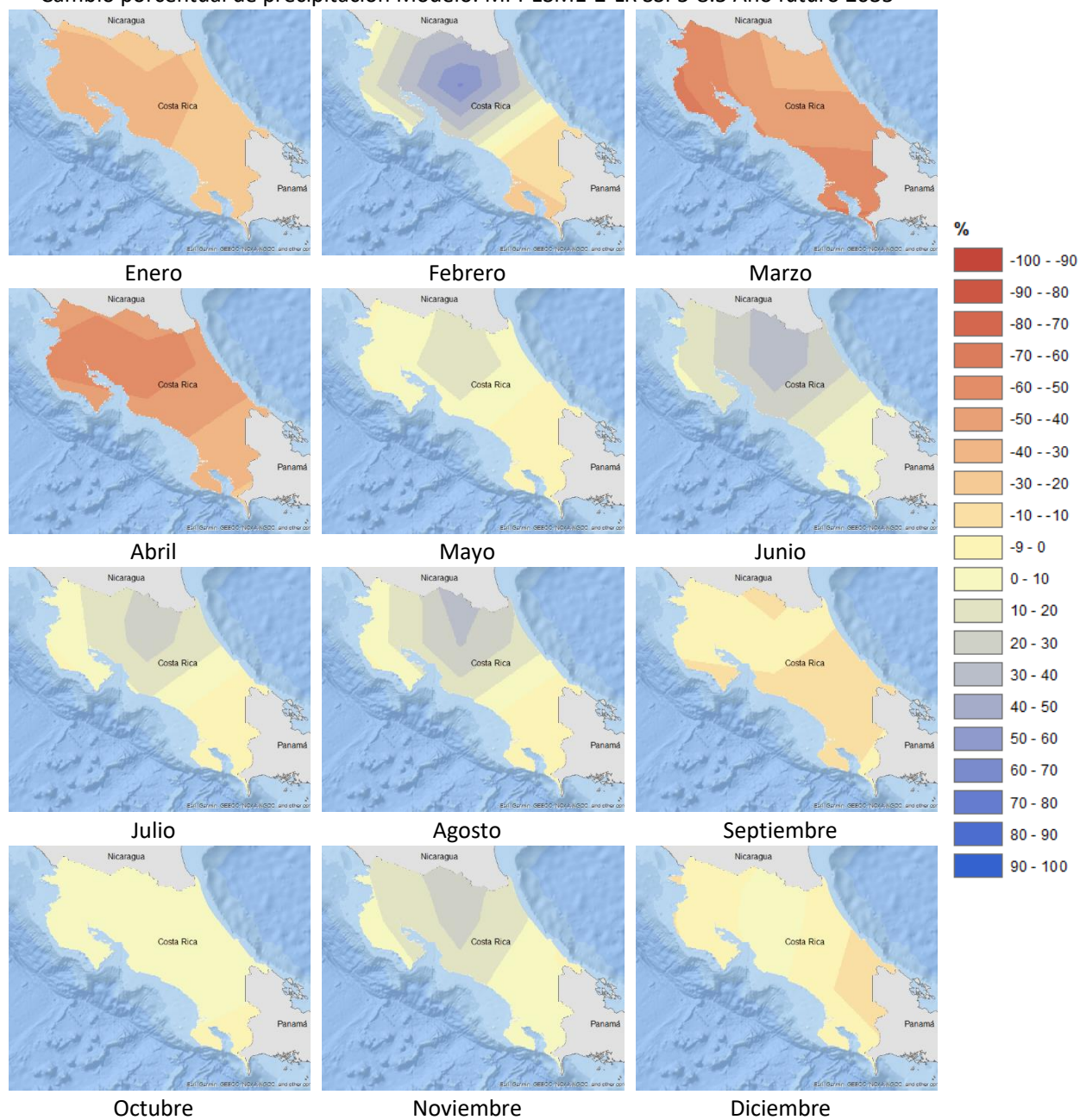
Cambio porcentual de precipitación Modelo: GFDL-ESM4 SSP5-8.5 Año futuro 2050



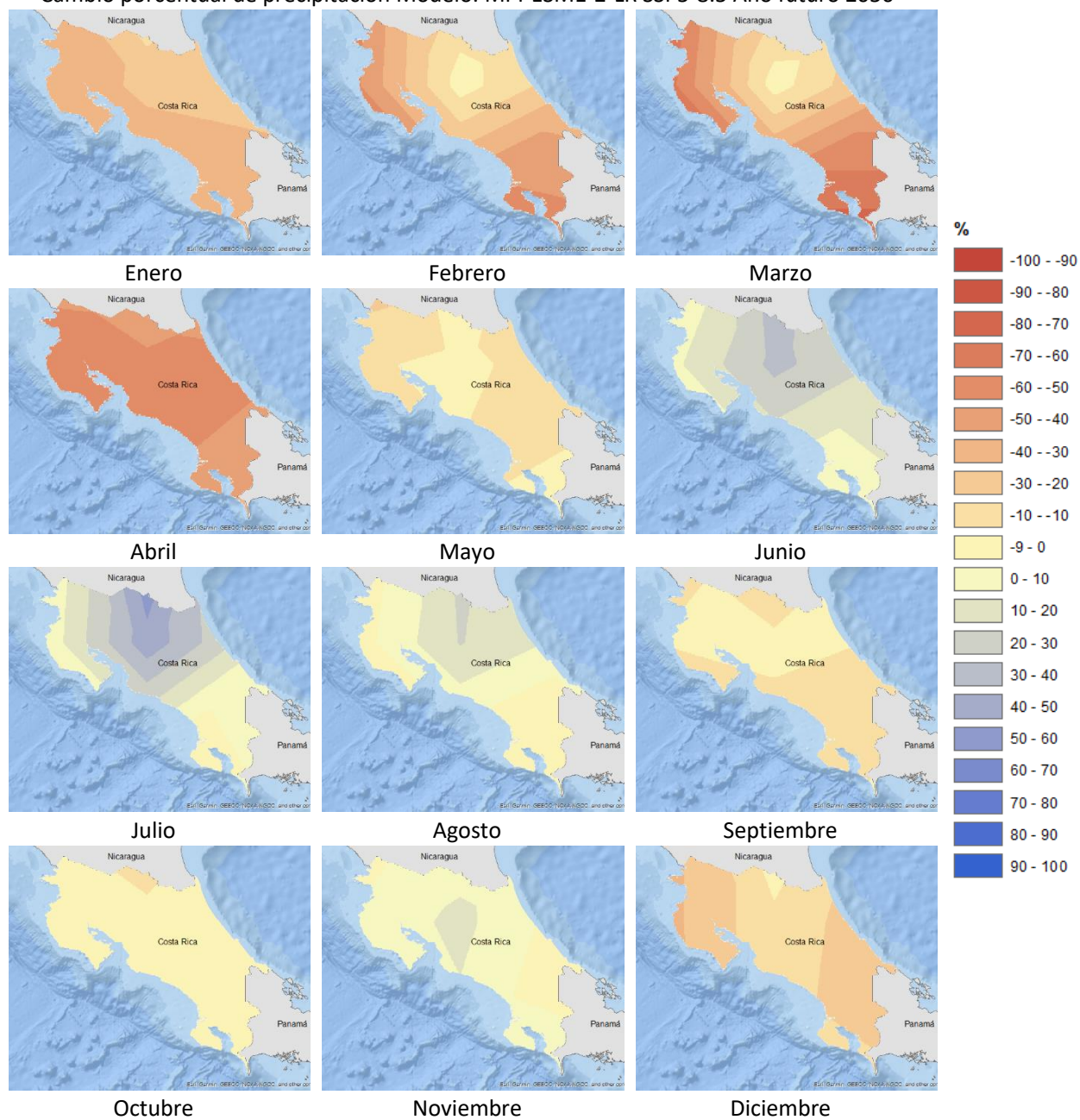
Cambio porcentual de precipitación Modelo: GFDL-ESM4 SSP5-8.5 Año futuro 2100



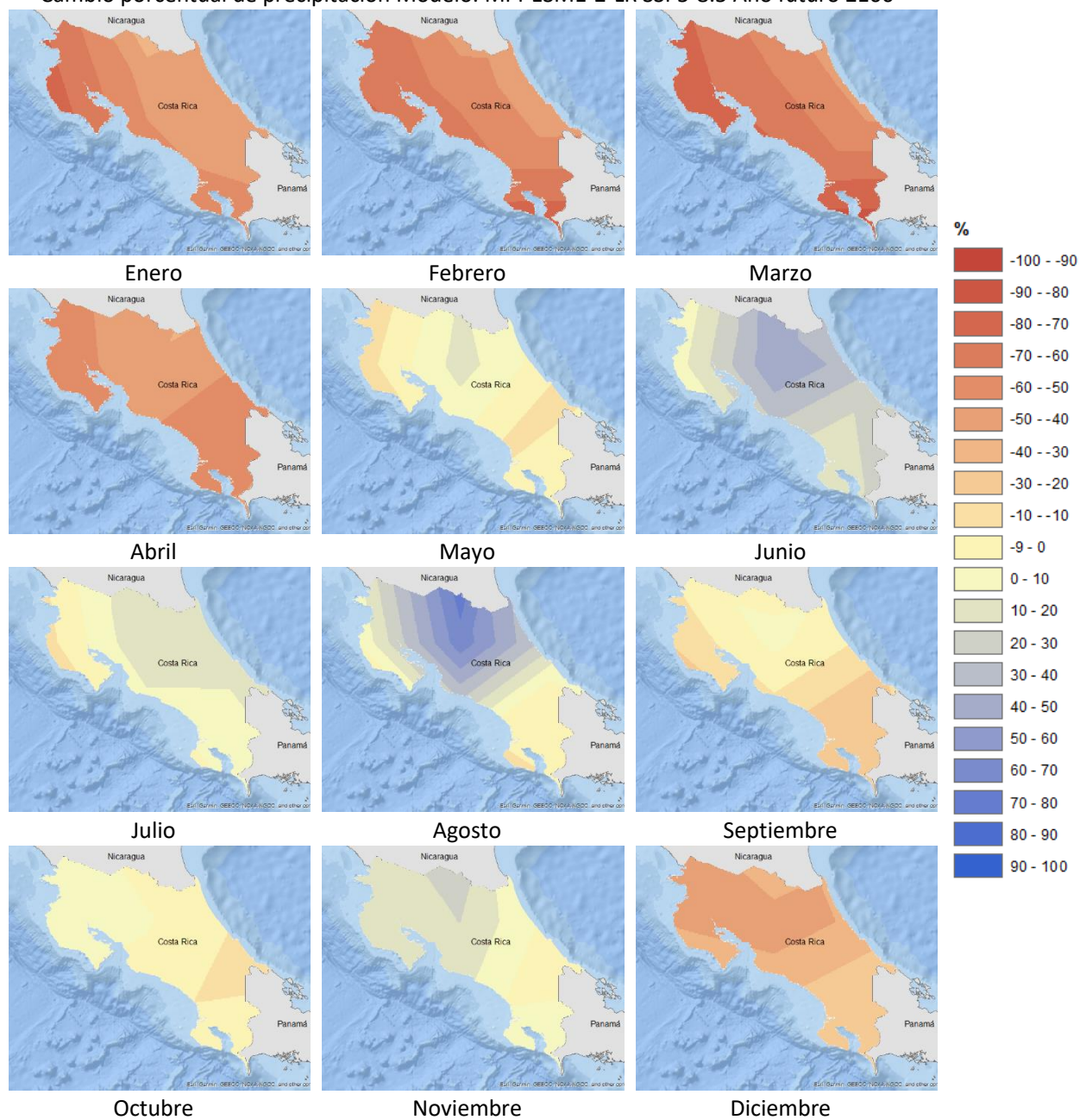
Cambio porcentual de precipitación Modelo: MPI-ESM1-2-LR SSP5-8.5 Año futuro 2035



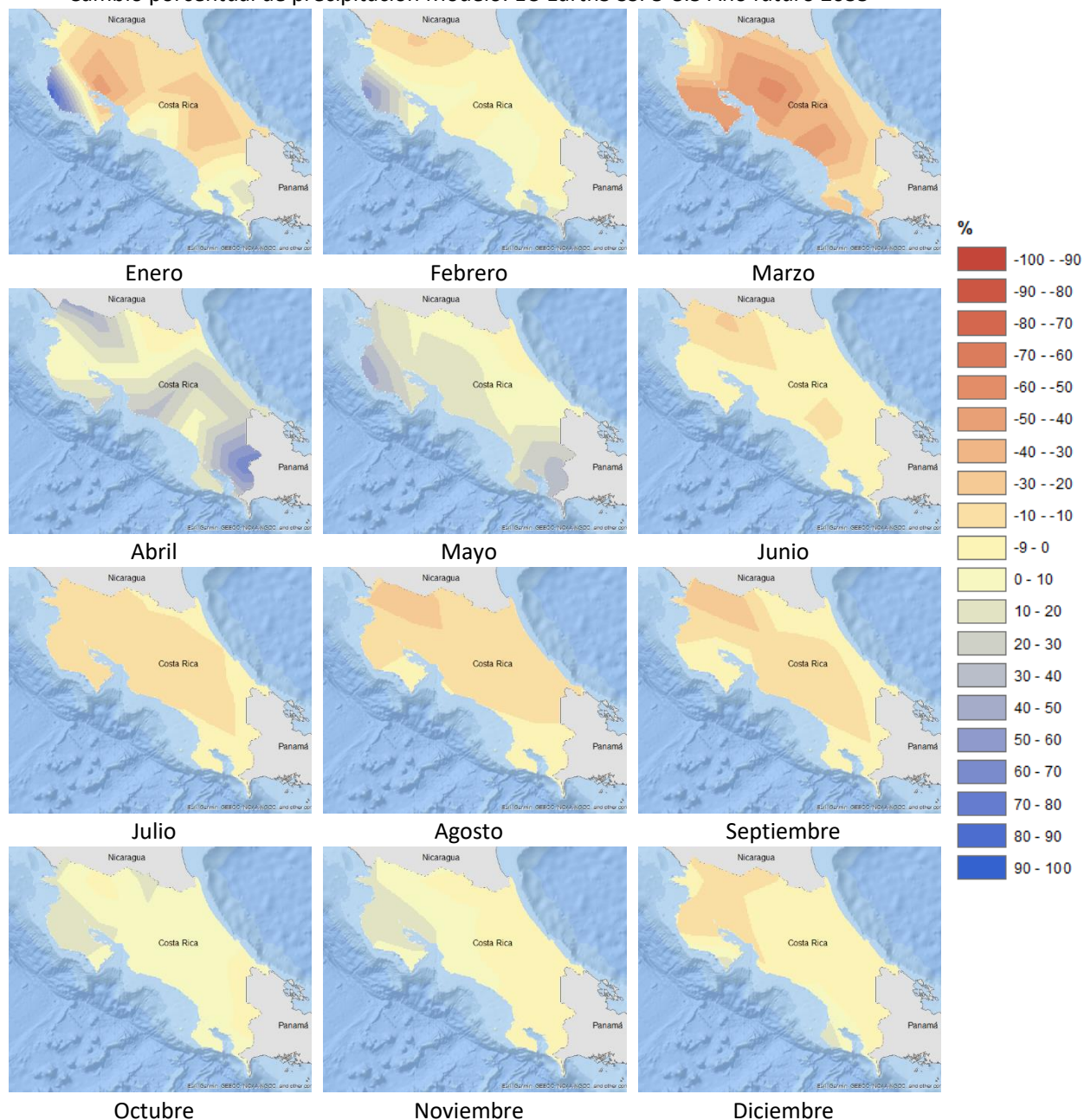
Cambio porcentual de precipitación Modelo: MPI-ESM1-2-LR SSP5-8.5 Año futuro 2050



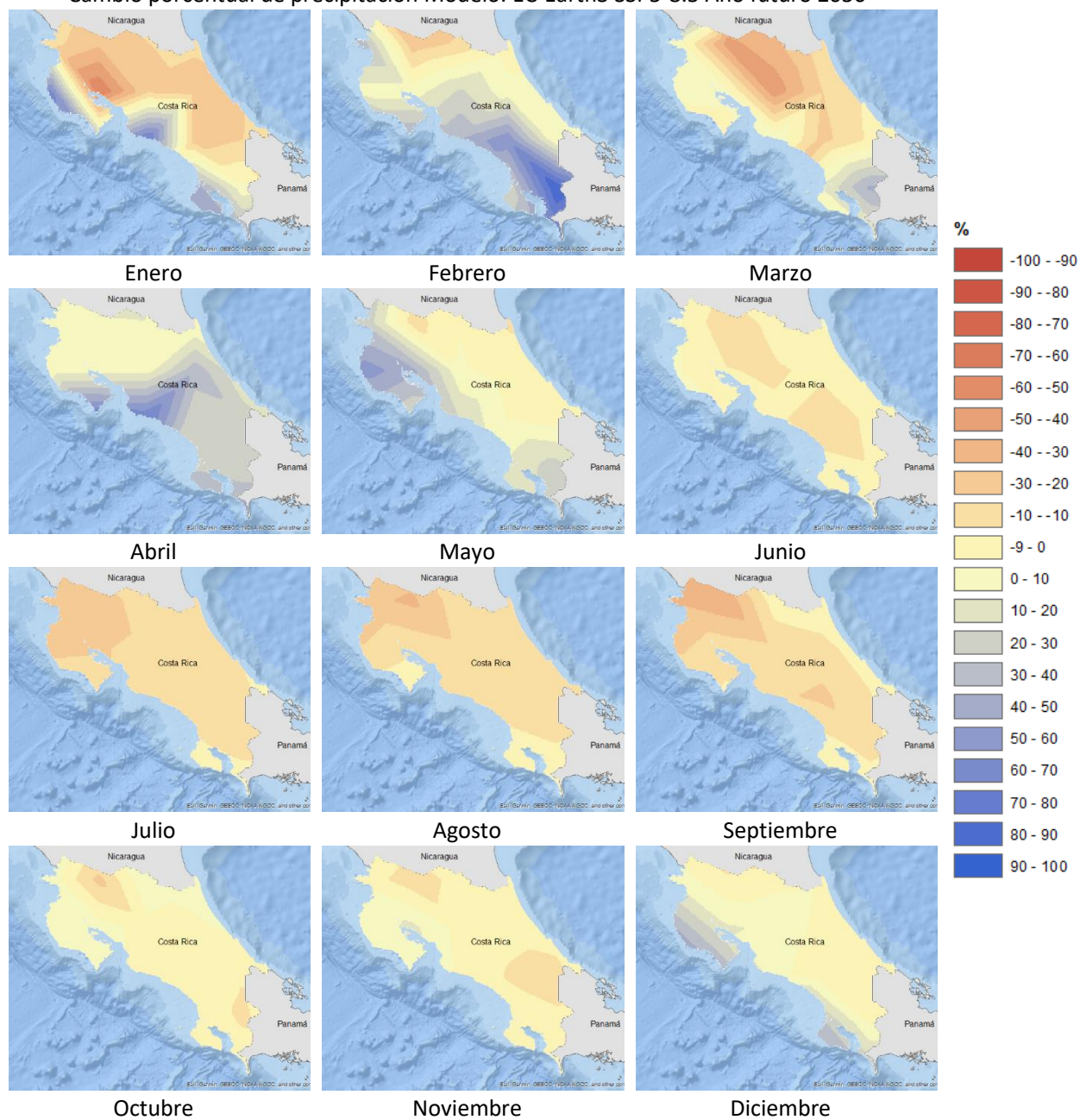
Cambio porcentual de precipitación Modelo: MPI-ESM1-2-LR SSP5-8.5 Año futuro 2100



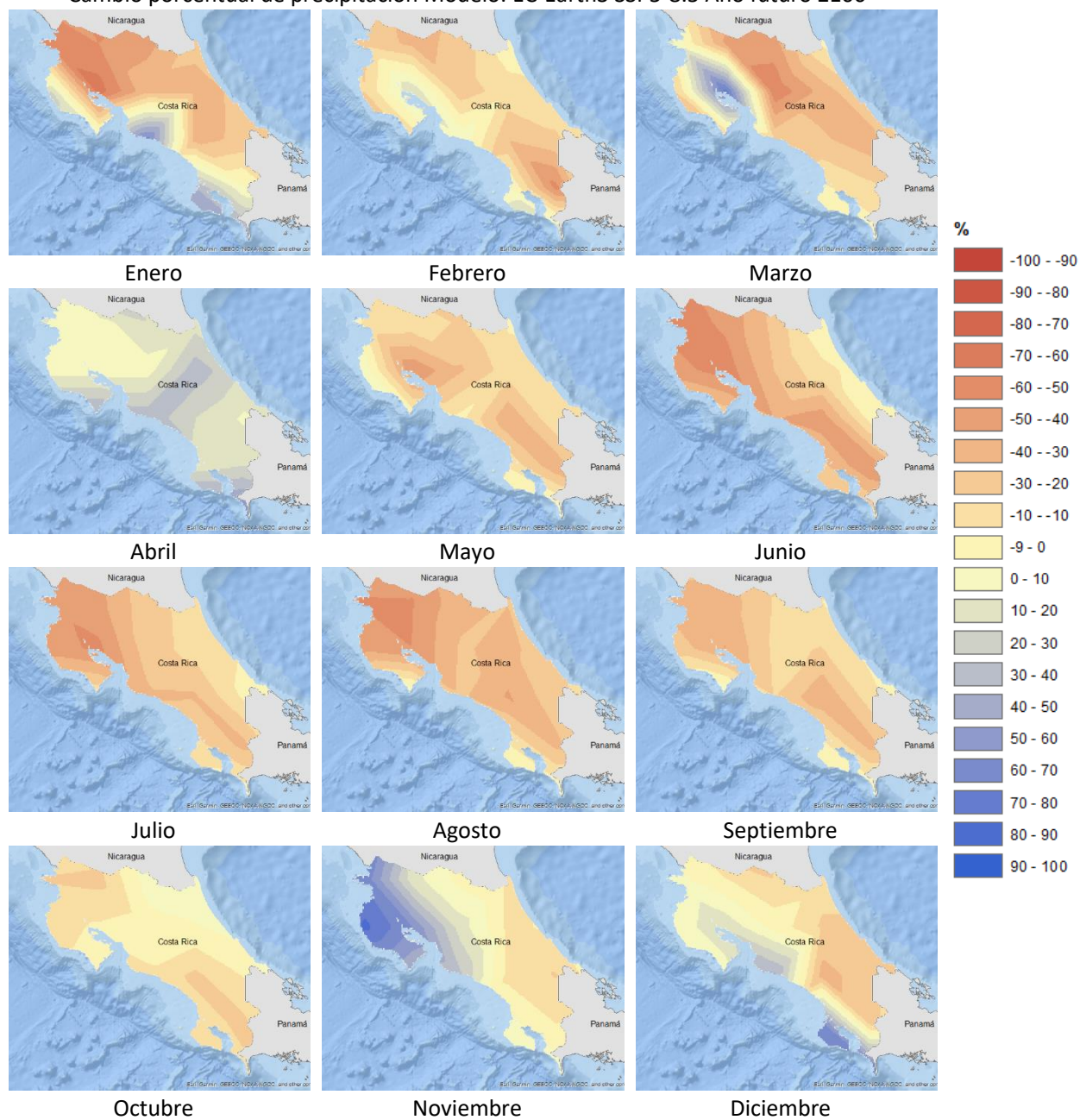
Cambio porcentual de precipitación Modelo: EC-Earth3 SSP5-8.5 Año futuro 2035



Cambio porcentual de precipitación Modelo: EC-Earth3 SSP5-8.5 Año futuro 2050

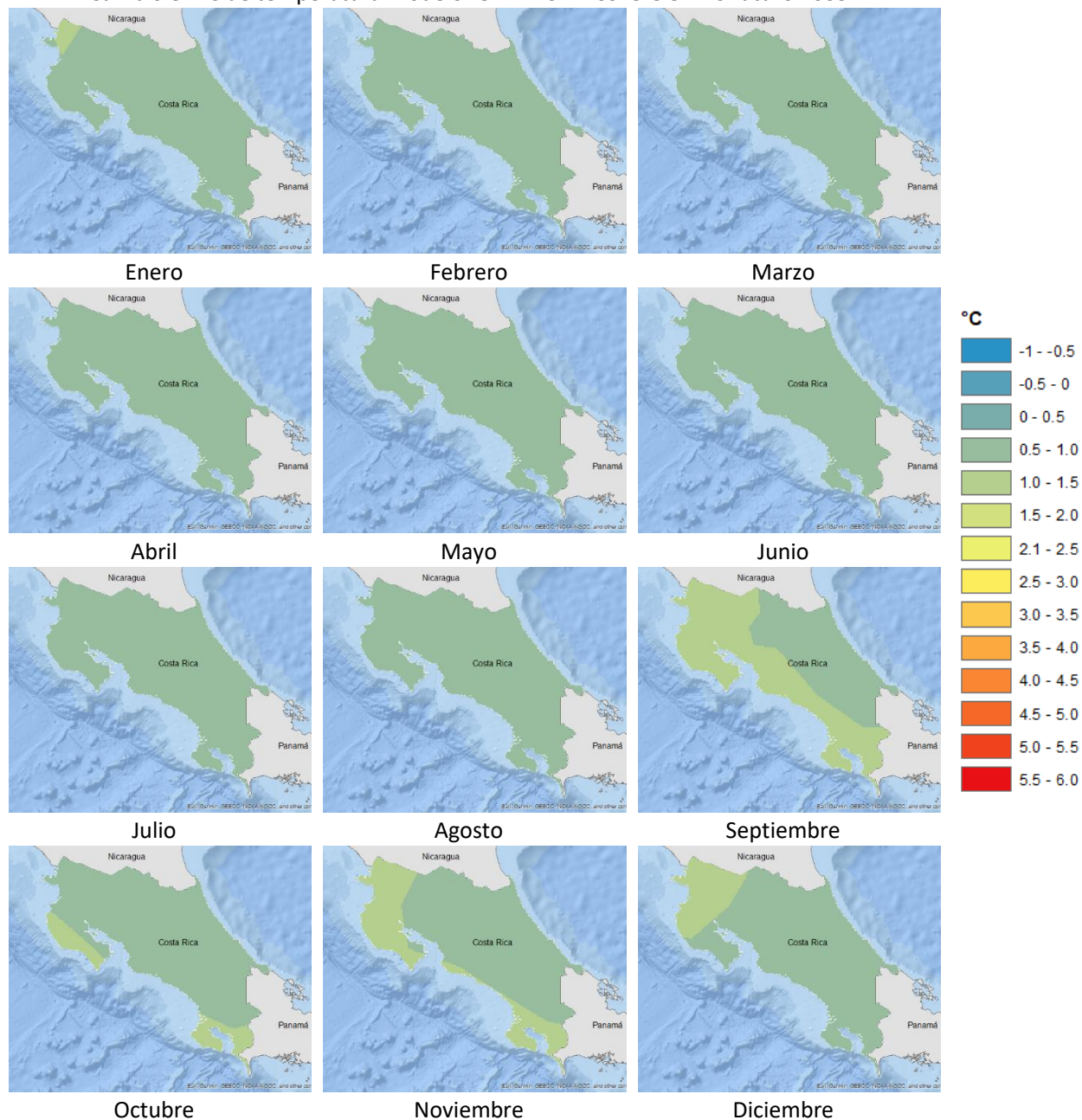


Cambio porcentual de precipitación Modelo: EC-Earth3 SSP5-8.5 Año futuro 2100

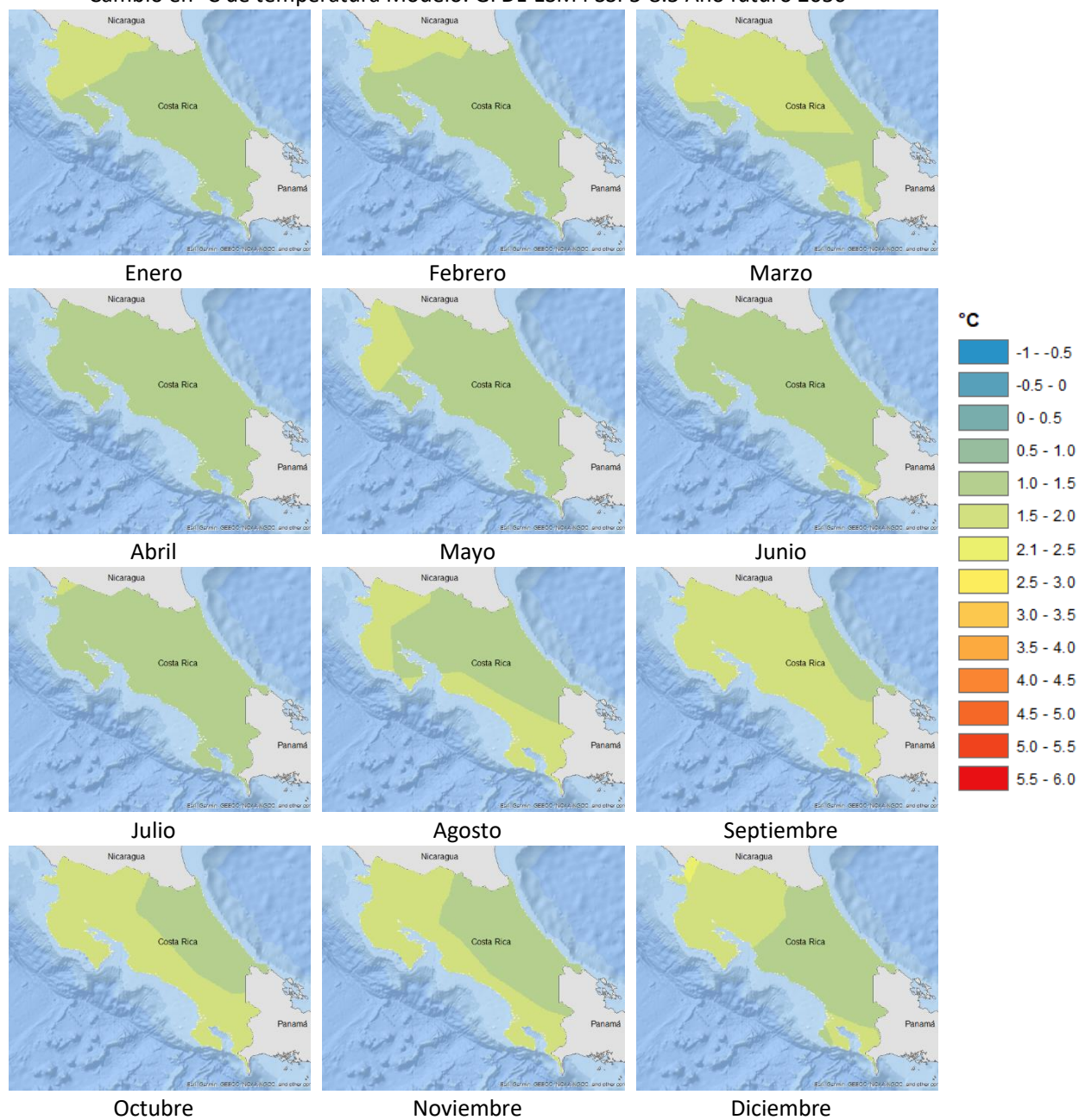


Temperatura SSP5-8.5

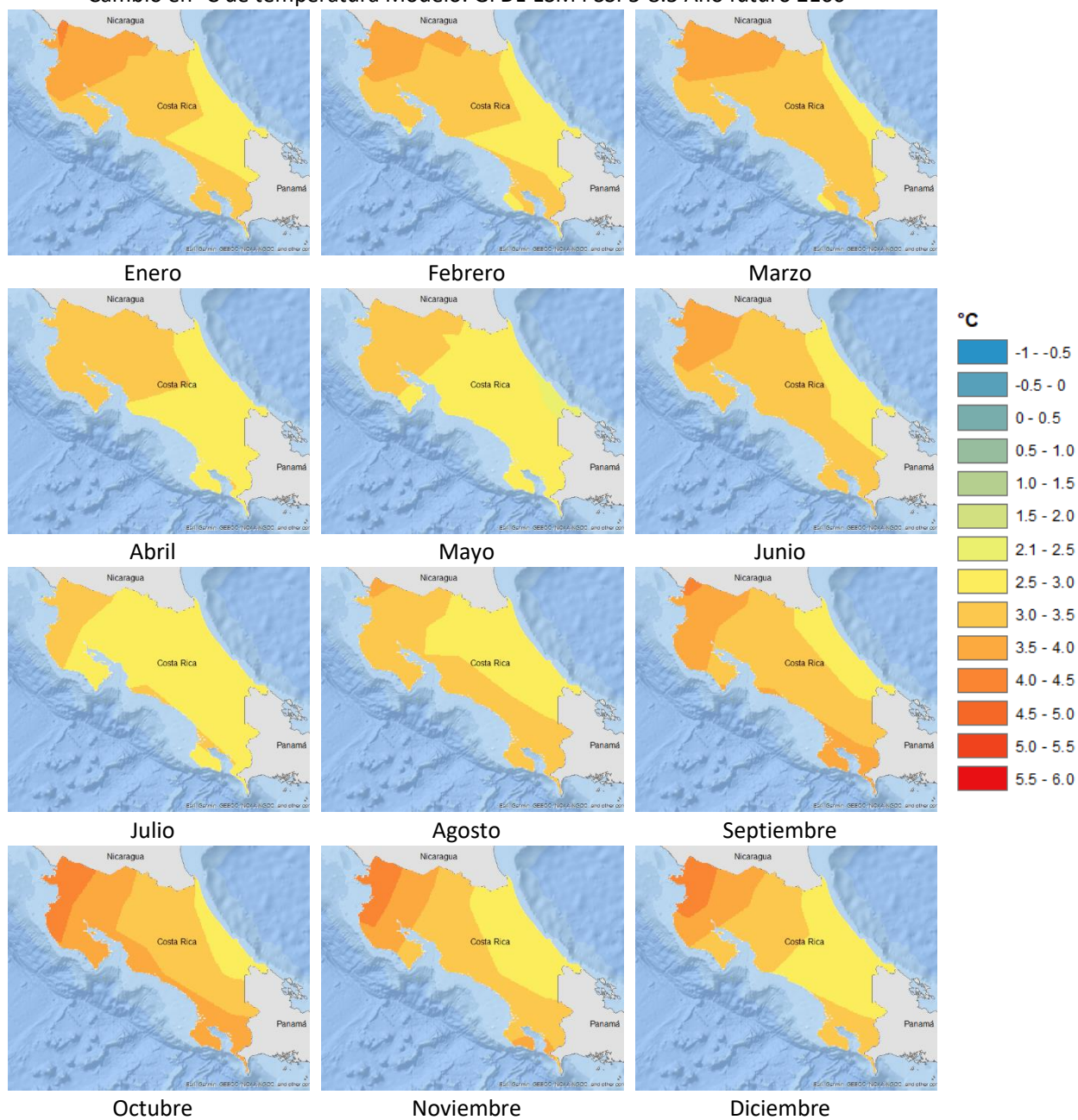
Cambio en °C de temperatura Modelo: GFDL-ESM4 SSP5-8.5 Año futuro 2035



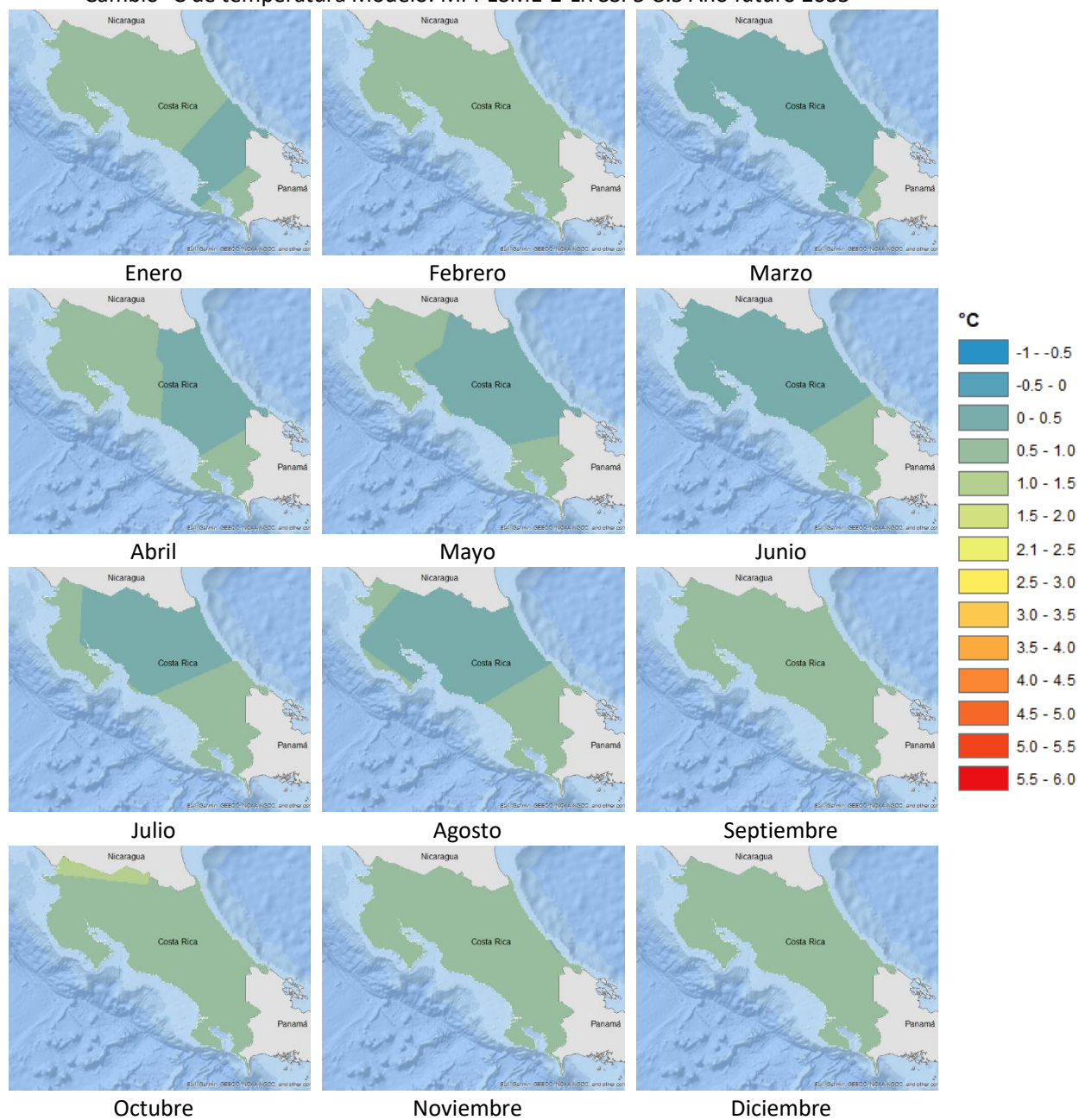
Cambio en °C de temperatura Modelo: GFDL-ESM4 SSP5-8.5 Año futuro 2050



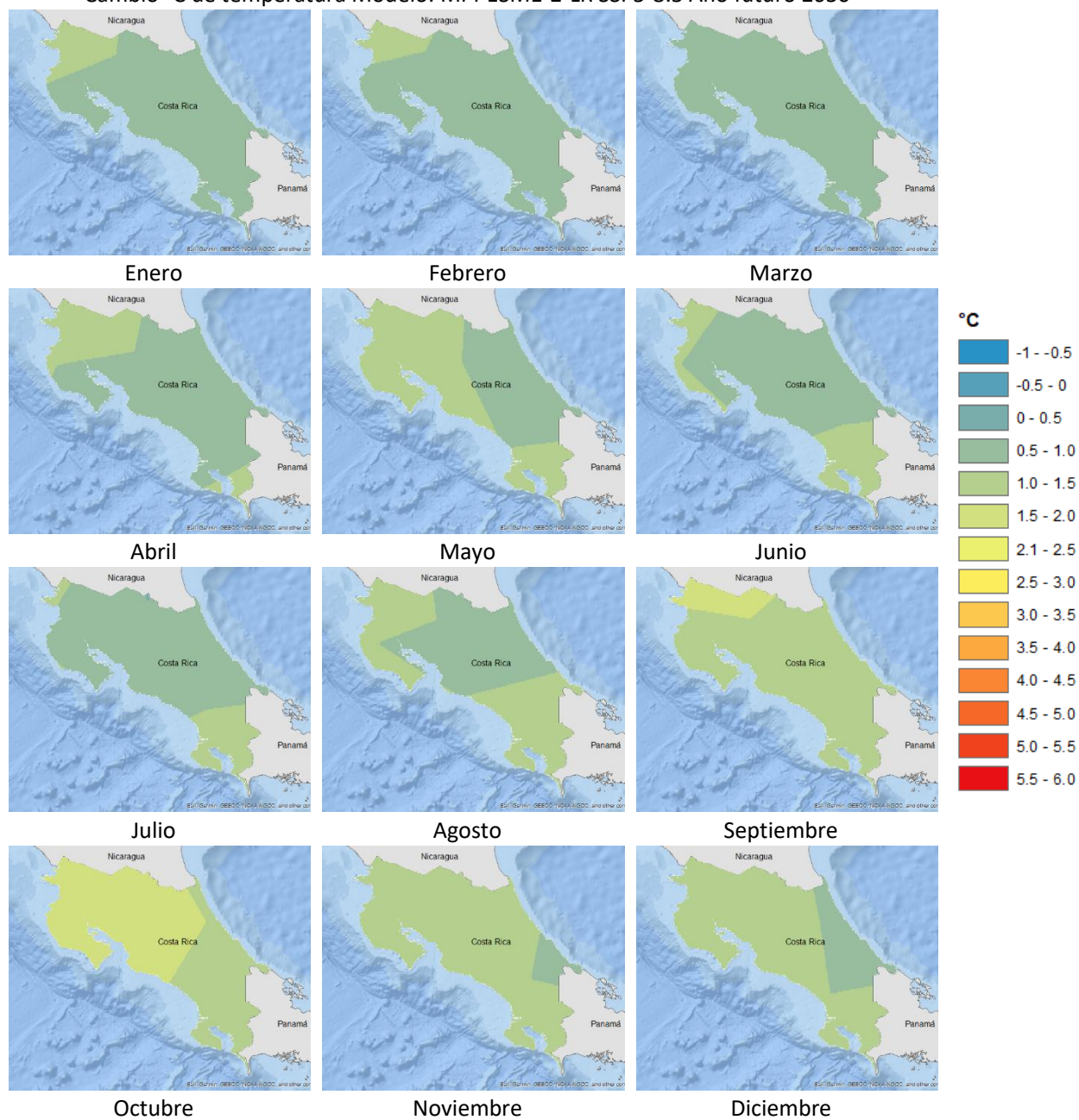
Cambio en °C de temperatura Modelo: GFDL-ESM4 SSP5-8.5 Año futuro 2100



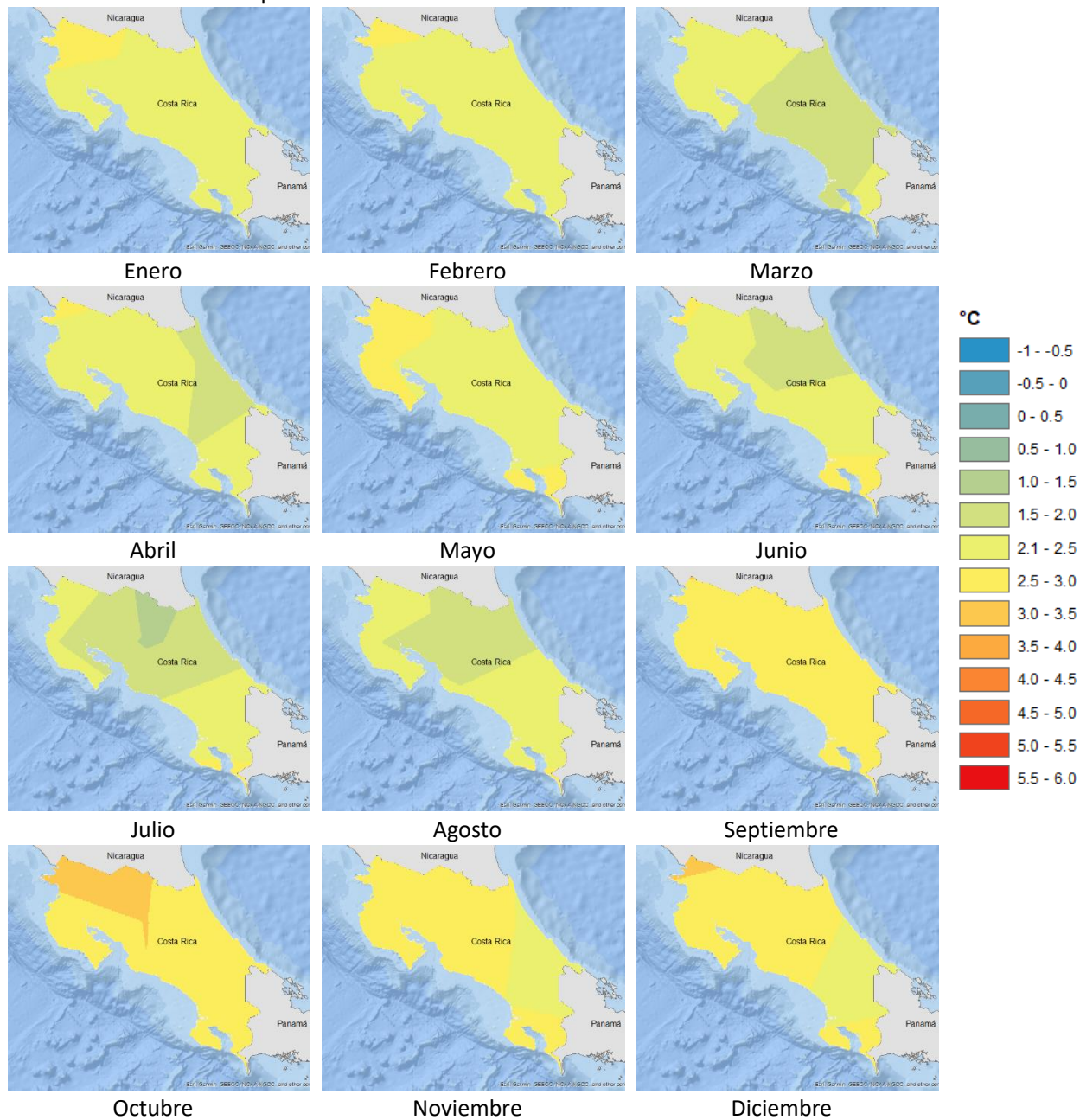
Cambio °C de temperatura Modelo: MPI-ESM1-2-LR SSP5-8.5 Año futuro 2035



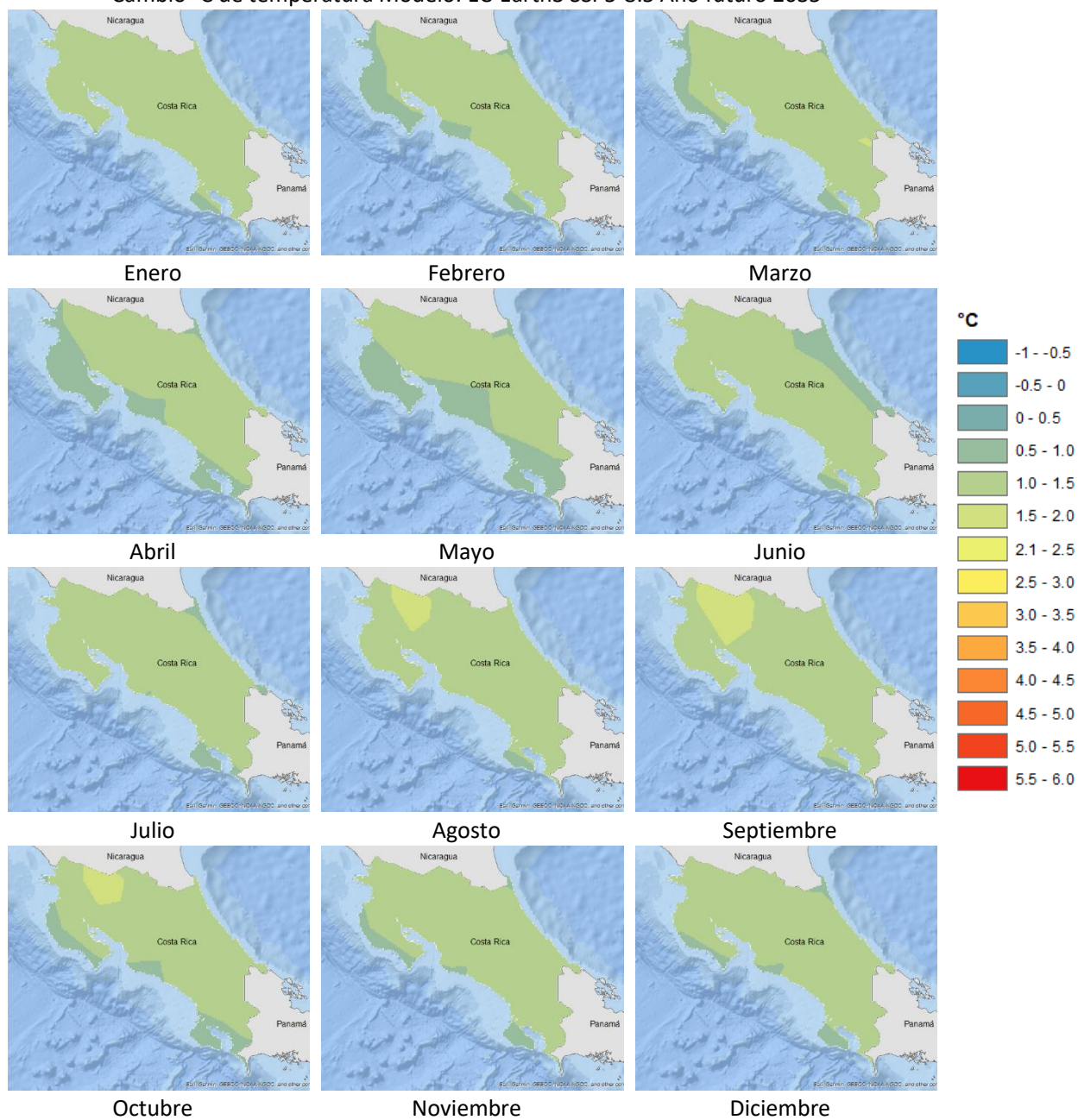
Cambio °C de temperatura Modelo: MPI-ESM1-2-LR SSP5-8.5 Año futuro 2050



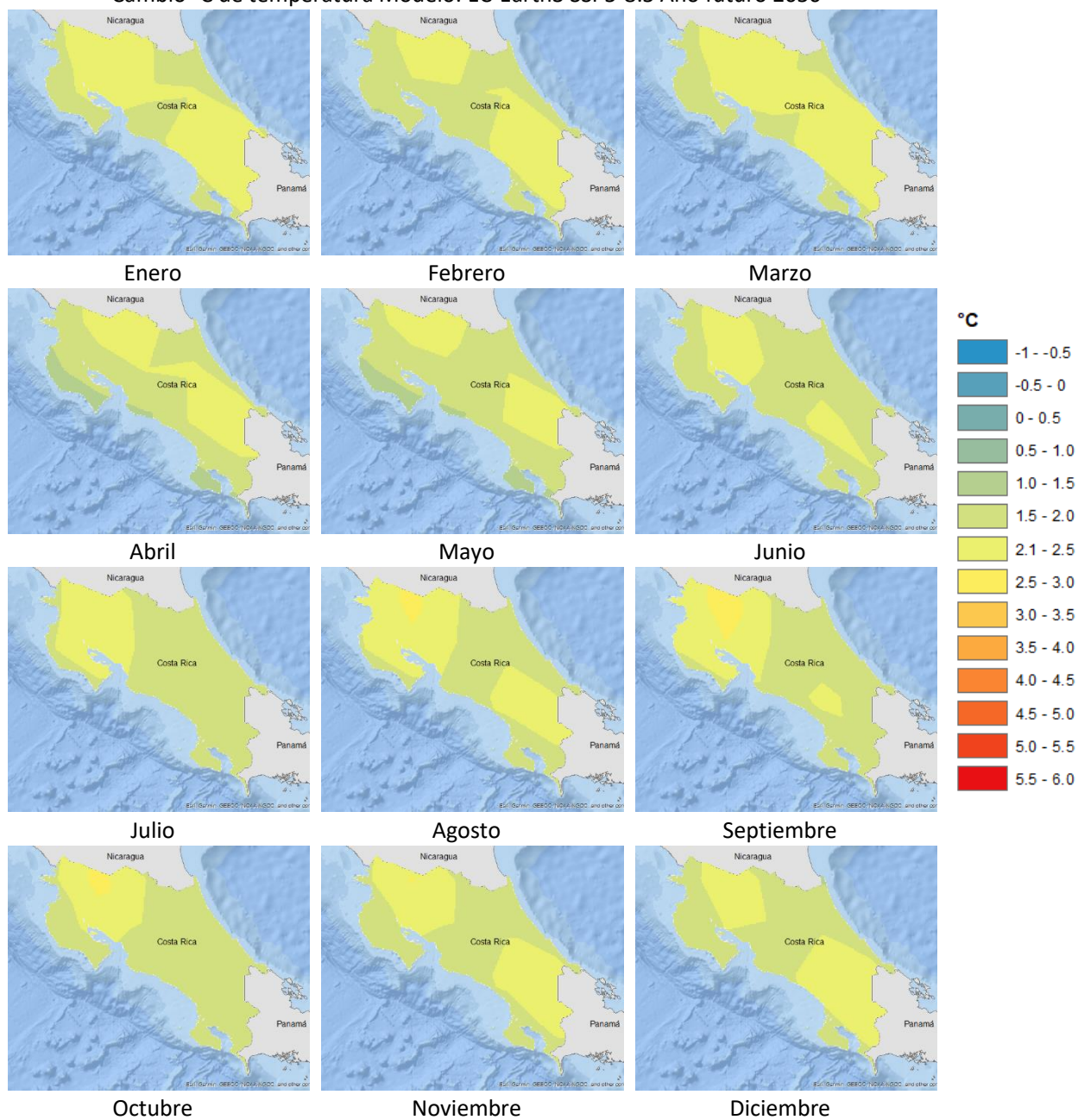
Cambio °C de temperatura Modelo: MPI-ESM1-2-LR SSP5-8.5 Año futuro 2100



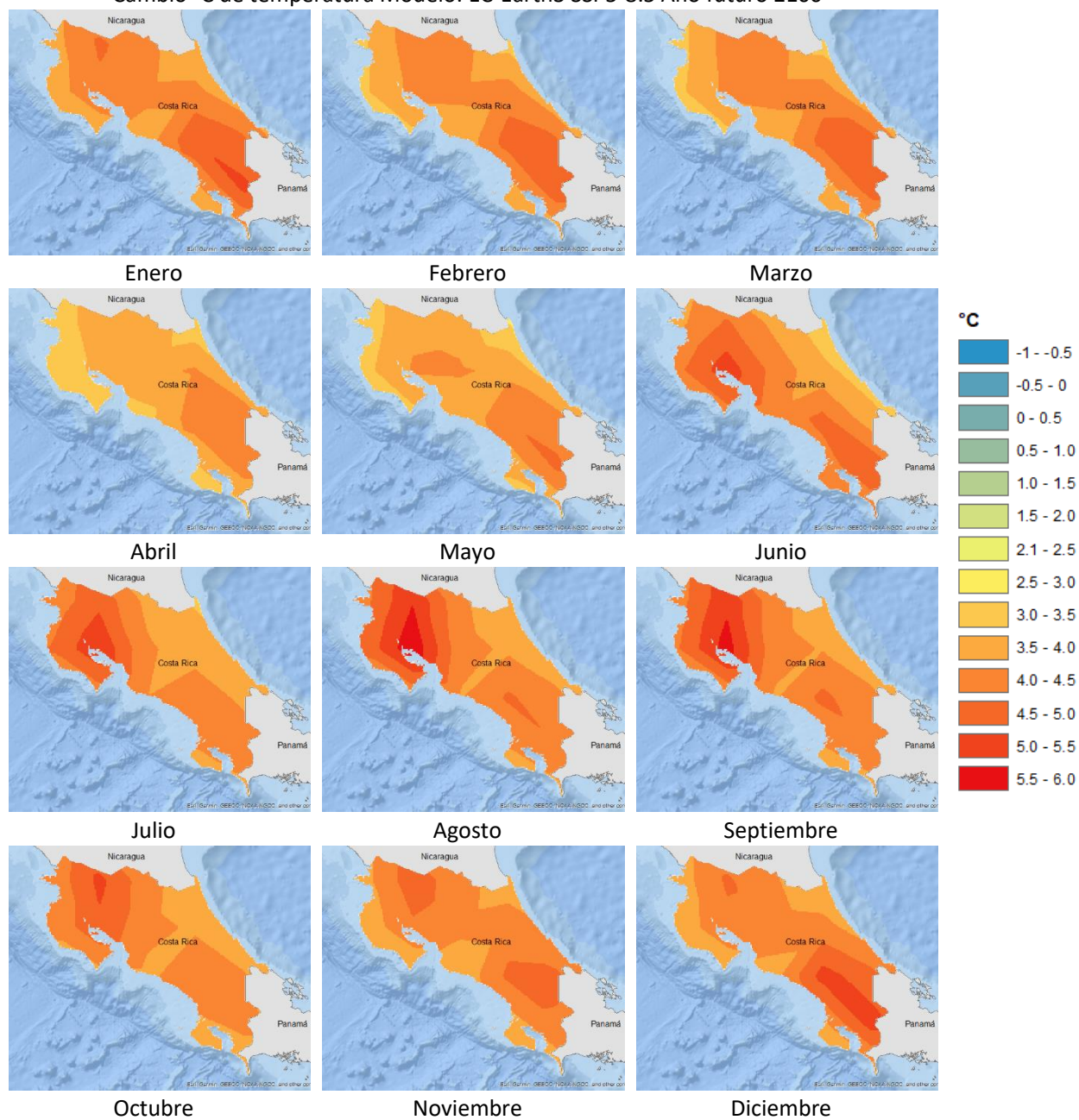
Cambio °C de temperatura Modelo: EC-Earth3 SSP5-8.5 Año futuro 2035



Cambio °C de temperatura Modelo: EC-Earth3 SSP5-8.5 Año futuro 2050



Cambio °C de temperatura Modelo: EC-Earth3 SSP5-8.5 Año futuro 2100



A.3 METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN DE LA AMENAZA POR INUNDACIÓN

La metodología acá presentada se encuentra también incluida en el Informe de Inicio de esta consultoría (sección 6.3). Se incluye de nuevo aquí para facilidad del lector.

Las inundaciones pueden ser de diferentes tipos, en función del origen del fenómeno que las detona. Esta sección se enfoca en la evaluación de inundaciones pluviales (por encharcamiento del terreno) y fluviales (por desbordamiento de ríos). El enfoque de modelación de amenaza acá implementado sigue una estructura clásica compuesta por la modelación del forzamiento meteorológico (es decir, los aguaceros), la modelación de la respuesta hidrológica de las cuencas, y la modelación hidráulica.

Eventos de precipitación (aguaceros)

De las series de precipitación obtenidas en diferentes estaciones dentro del territorio es posible obtener eventos de lluvias fuertes generados sintéticamente, con valores totales y patrones espaciales que respetan las características de la lluvia histórica. La generación de estos eventos de lluvia se realiza por medio de la aplicación de criterios sencillos de selección a las series simuladas de precipitación. Por ejemplo, pueden emplearse los siguientes criterios:

- Un número mínimo de estaciones que registren un determinado aguacero (e.g., que el 70% de las estaciones del área de una cuenca se haya registrado un valor de precipitación para ese evento).
- Un valor umbral mínimo para la selección de un evento considerado como significativo, es decir que, además que el evento esté registrado en el número mínimo de estaciones definido, la precipitación registrada en cada una de estas estaciones supere dicho valor umbral (e.g. que la precipitación sea mayor a 10 mm en 24 horas).
- Un valor umbral medio que considera un valor mínimo para el promedio de precipitación en el número de estaciones que superan el umbral mínimo (e.g. que el valor promedio en las estaciones con registro sea de, por lo menos, 50 mm en 24 horas).

A partir de la aplicación de estos criterios, u otros similares, es posible encontrar eventos de lluvias fuertes sobre la serie de valores diarios simulados. Los valores recuperados de las series, son interpolados espacialmente aplicando el método de Kriging.

Los aguaceros simulados cuentan implícitamente con patrones realistas de precipitación, obtenidos directamente de los datos de las series individuales, lo cual le confiere una ventaja especial al método al no requerirse el uso de patrones espaciales sintéticos. Así mismo, la distribución de la lluvia fuerte en la cuenca cambia considerablemente en magnitud y distribución espacial. En el conjunto de eventos no hay entonces dos eventos idénticos. Estos eventos indican la precipitación total diaria en un escenario de lluvia fuerte. Sin embargo, la precipitación no cae uniformemente a lo largo de 24 horas, por lo cual se requiere simular, adicionalmente, su distribución en el tiempo (lluvia intradiaria). Esto se realiza mediante el uso de curvas Huff (Huff, 1967).

Las curvas Huff pueden ser usadas para distribuir temporalmente la precipitación total del día en valores horarios. La derivada con respecto al tiempo de las curvas Huff es el hietograma, es decir, la función de intensidad versus tiempo, como se ilustra en la Figura 121. Esto hace de las curvas Huff una poderosa

herramienta al permitir sintetizar hietogramas. De esta manera, los aguaceros identificados pueden ser distribuidos en valores horarios haciendo uso de las curvas Huff, como se ilustra en la Figura 122.

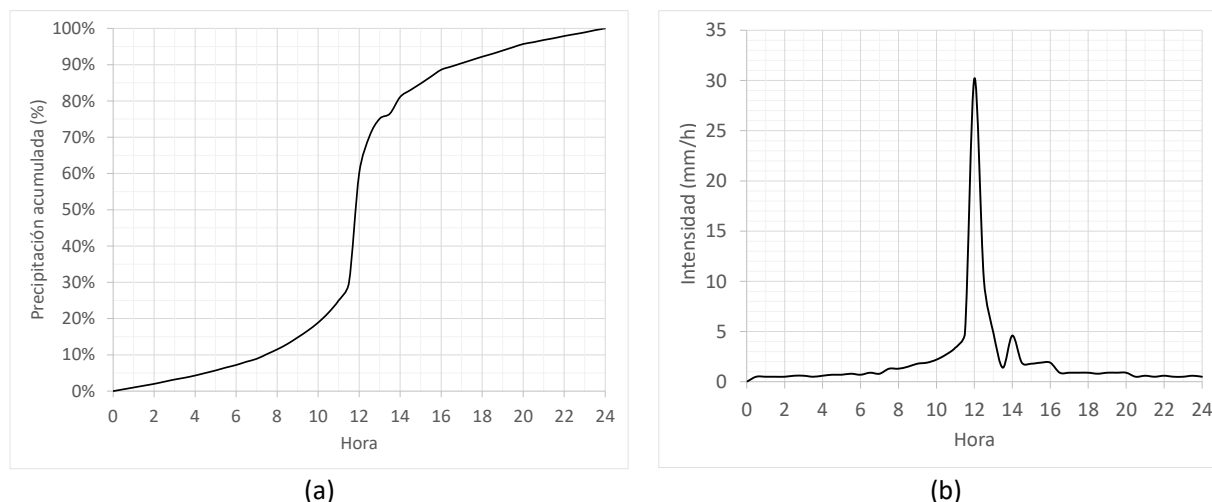


Figura 121. (a) Curva Huff. (b) Derivada temporal de la curva Huff presentada.

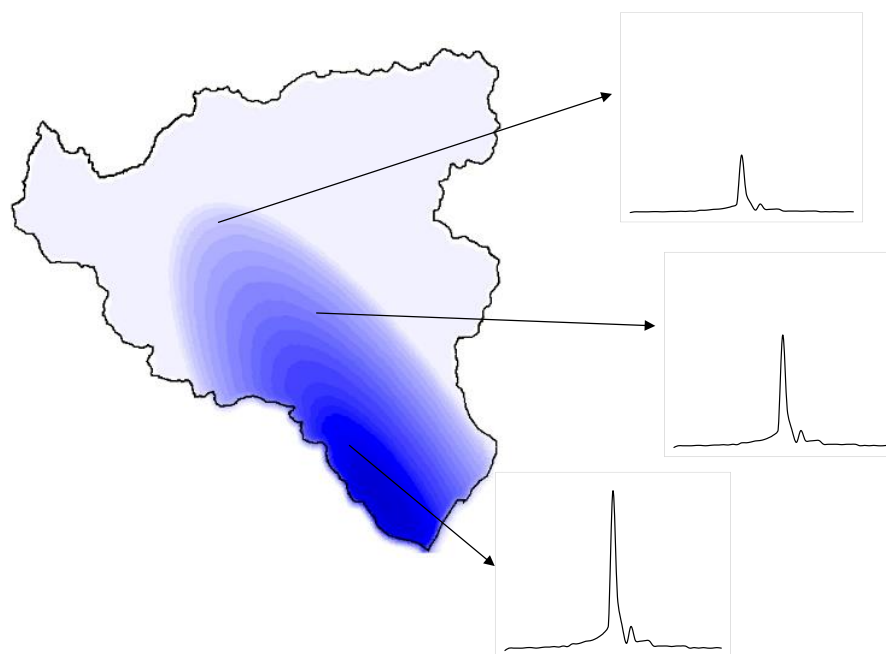


Figura 122. Ilustración de la distribución temporal de la lluvia diaria para un aguacero simulado.

Estimación del volumen de escorrentía

Una vez definidos los eventos de precipitación, es necesario establecer los hidrogramas de entrada a la modelación hidráulica. Estos hidrogramas se determinan, primero, en función del volumen efectivo de precipitación que se convierte en escorrentía superficial, pudiendo así alcanzar los cauces de ríos y quebradas. Como método para determinar los volúmenes de escorrentía se emplea el número de curva

dado por el *Soil Conservation Service* de los Estados Unidos, y que es un modelo estándar y simplificado de infiltración.

La precipitación efectiva corresponde a la intensidad de lluvia remanente, luego que, del volumen total de precipitación aportada por la tormenta, se ha gastado una porción en procesos hidrológicos de infiltración, interceptación y evapotranspiración. Ésta escorrentía se calcula en función del valor total de precipitación y el número de curva en determinado punto, de la siguiente manera:

$$P_e = \frac{\left[P_m - \frac{508}{CN} + 5.08 \right]^2}{P_m - \frac{2032}{CN} - 20.32} \quad \text{Ecuación 5}$$

En donde P_e es la precipitación efectiva en cm, P_m es la precipitación de la tormenta en cm, y CN es el *número de curva*, el cual se obtiene como función del uso de la tierra, la cobertura vegetal y las condiciones de infiltración del suelo superficial. En la Tabla 22 se presentan los valores de CN usados para diferentes coberturas y grupos hidrológicos del suelo, según la clasificación dada Chow et al., 1994. El rango de aplicación de la Ecuación 5, es para valores de:

$$P_m > \frac{508}{CN} + 5.08 \quad \text{Ecuación 6}$$

Fuera de este intervalo se considera que la precipitación efectiva es igual a cero. También se debe garantizar que la precipitación efectiva no sea mayor que la precipitación de la tormenta.

Tabla 22. Valores de CN para diferentes coberturas (usos de la tierra) y tipos de suelo⁸. (Soil Conservation Service, 1986)

Tipo de cobertura y condición	A	B	C	D
Cultivos en surco recto - Buena	67	78	85	89
Bosques - Buena	30	55	70	77
Pastizal - Aceptable	49	69	79	84
Superficie impermeable	100	100	100	100
Distrito residencial. 1/8 acre	77	85	90	92
Bosques - Aceptable	36	60	73	79
Combinación bosques y pastizales - Buena	32	58	72	79
Combinación bosques y pastizales - Aceptable	43	65	76	82
Distrito residencial. 1 acre	51	68	79	84
Cereales en surco recto	63	75	83	87
Terrenos recién adecuados	77	86	91	94
Bosques - Buena	30	55	70	77
Distrito urbano. Industrial	81	88	91	93
Superficie impermeable. Calles. Pavimentada. Cunetas abiertas	83	89	92	93

⁸ Los tipos de suelo mencionados corresponden a los Grupos Hidrológicos del Suelo definidos por el Soil Conservation Service de los Estados Unidos.

Tipo de cobertura y condición	A	B	C	D
Descanso (sin cultivo)	77	86	91	94
Superficie impermeable. Calles. Pavimentada	98	98	98	98
Potrero	30	58	71	78

Inundación pluvial (encharcamiento)

El problema de inundación pluvial se modela a partir del potencial de encharcamiento del terreno, determinado en función de la topografía, en términos de un potencial topográfico de acumulación de agua, y la cantidad de infiltración en cada punto del territorio. El volumen de agua disponible para la inundación se determina como se indica en la sección anterior (el modelo de infiltración).

El Potencial de Acumulación Topográfico (PAT) de agua es evaluado a través de la identificación de mayor y menor susceptibilidad topográfica en un Modelo de Elevación Digital (DEM), como se ilustra en la Figura 123.

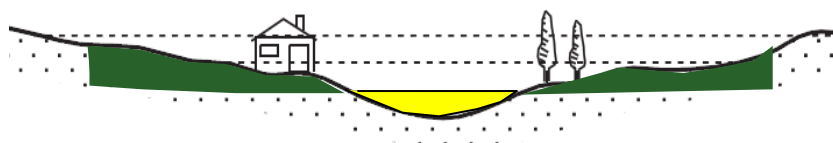


Figura 123. Ilustración de zonas de potencial de acumulación alto (amarillo), medio (verde) o nulo (sin color).

El PAT es clasificado en tres categorías, como:

- Alto. Corresponde a depresiones topográficas.
- Medio. Corresponde a un sitios relativamente planos.
- Bajo. Corresponde a regiones escarpadas o cimas de colinas.

Para cada nodo en el DEM, dada su ubicación geográfica (X, Y), se cuantifica su potencial de acumulación buscando en las cuatro direcciones cardinales (norte, sur, este y oeste). Esta búsqueda es delimitada estableciendo los siguientes parámetros:

- N_{max} : Distancia máxima horizontal en la cual se evaluará el potencial de acumulación con respecto a una ubicación fija.
- m : Pendiente topográfica de referencia, utilizada para evaluar el potencial de acumulación del sitio con respecto a los terrenos adyacentes.

Entonces, para cada sitio (X, Y) en el DEM, se busca un sitio (K, L) hasta que la siguiente condición no se cumpla:

$$Z_{K,L} \geq Z_{X,Y} + Z_{Lim}$$

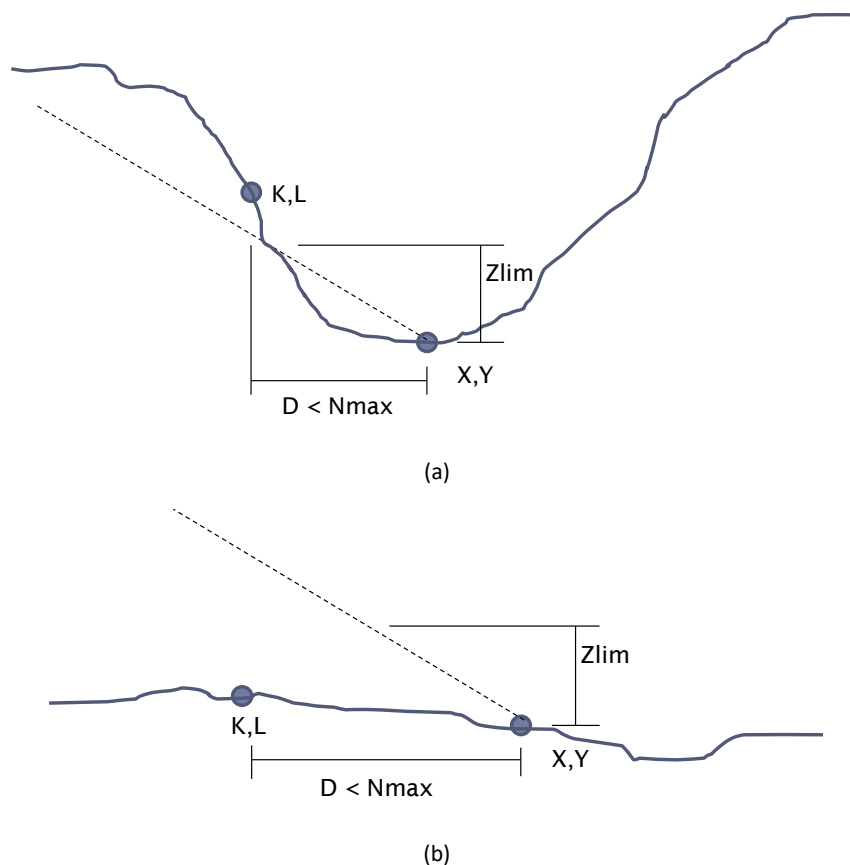
Ecuación 7

donde Z_{Lim} es la diferencia de altura requerida entre los sitios (X, Y) y (K, L) para obtener una pendiente m .

Si el sitio (K, L) existe, entonces el sitio (X, Y) se clasifica como de alta acumulación, que corresponde a una depresión topográfica. Si esta condición no se cumple, entonces la pendiente media topográfica (m_T) entre el sitio (X, Y) y el sitio (K, L) se calcula como

$$m_T = \frac{Z_{X,Y} - Z_{K,L}}{D} \quad \text{Ecuación 8}$$

donde D es la distancia entre el sitio (X, Y) y el sitio (K, L) . Si $|m_T| \leq m$, entonces el sitio (X, Y) se clasifica como de acumulación media. Finalmente, si $|m_T| > m$ entonces el sitio (X, Y) se clasifica como de baja acumulación. La Figura 124 ilustra la identificación del potencial de acumulación sobre perfil de terreno.



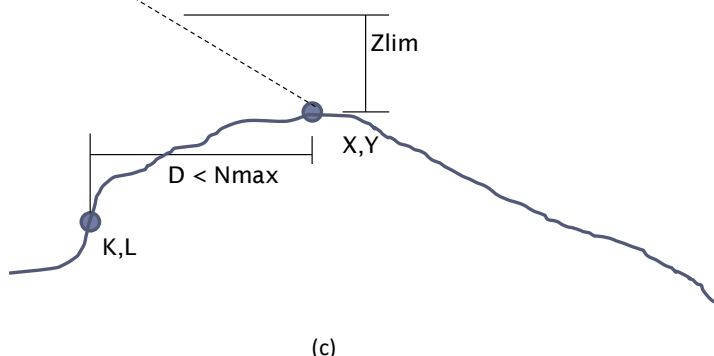


Figura 124. Ilustración de la identificación del PAT. a) Terreno con alta acumulación. b) Terreno con acumulación intermedia. c) Terreno con baja acumulación.

Una vez evaluado el potencial de acumulación topográfico (PAT), se calcula el tirante de inundación como función de la precipitación efectiva (P_e), usando los multiplicadores presentados en la Tabla 23.

Tabla 23. Multiplicadores de la precipitación efectiva según el potencial de acumulación topográfica (PAT)

PAT	Multiplicador de P_e
Alto	1.2
Medio	1.0
Bajo	0.0

Respuesta hidrológica de cuencas

Los hidrogramas se calculan en este proyecto por medio del modelo de Clark modificado (Mod Clark; Kull & Feldman, 1998), el cual es un modelo distribuido de respuesta de cuencas hidrográficas que tiene en cuenta, de forma explícita, los procesos de traslación (i.e. el movimiento del exceso de precipitación a lo largo de los drenajes de la cuenca) y atenuación (i.e. la disminución de la magnitud de descarga a medida que el exceso de precipitación es almacenado en el suelo, superficie y canales de la cuenca) (Brunner & Bonner, 1994). Esto significa que se tienen en cuenta las variaciones en el tiempo de viaje hacia el punto de concentración, desde todos los puntos de la cuenca de análisis.

El tiempo que le toma a una gota de agua llegar a la salida de la cuenca se modela mediante una malla de tiempos de viaje. Para cada celda del territorio, se determina el tiempo hasta la salida de la siguiente manera:

$$t_{celda} = t_c \frac{d_{celda}}{d_{m\acute{a}x}} \quad \text{Ecuación 9}$$

en donde t_{celda} es el tiempo de viaje del agua desde la celda en consideración, t_c es el tiempo de concentración de la cuenca, d_{celda} es la distancia de la celda en consideración a la salida de la cuenca, y $d_{máx}$ es la máxima distancia de alguna celda a la salida de la cuenca. Existen en la literatura diferentes relaciones para el cálculo del tiempo de concentración, las cuales son evaluadas y aplicadas de forma conjunta para establecer este parámetro.

Del área de cada celda se determina el volumen de escurrimiento en cada momento del tiempo. Estos volúmenes son enrutados usando el modelo de reservorio lineal dentro del proceso de atenuación. En un reservorio lineal aplica la ecuación de continuidad de la forma:

$$\frac{dS}{dt} = I_t - O_t \quad \text{Ecuación 10}$$

en donde dS/dt es la tasa de cambio del almacenamiento en la celda con respecto al tiempo, I_t es el caudal de entrada, y O_t es el caudal de salida. En el modelo de reservorio lineal, el caudal de salida está relacionado con el volumen almacenado de manera proporcional:

$$S = R \cdot O_t \quad \text{Ecuación 11}$$

en donde R es el parámetro de reservorio lineal. Al combinar y solucionar las ecuaciones anteriores mediante un enfoque sencillo de diferencias finitas, se obtiene que:

$$O_t = C_A I_t + C_B O_{t-1} \quad \text{Ecuación 12}$$

en donde C_A y C_B son coeficientes de enrutamiento, que se calculan como:

$$C_A = \frac{\Delta t}{R + 0.5\Delta t} \quad \text{Ecuación 13}$$

$$C_B = 1 - C_A \quad \text{Ecuación 14}$$

El caudal de salida promedio para el tiempo t es entonces:

$$\bar{O}_t = \frac{O_{t-1} + O_t}{2} \quad \text{Ecuación 15}$$

Para cada celda de la malla de cálculo, se calcula un caudal de salida promedio, para cada momento del tiempo. Al final, la suma de los caudales promedio, en cada paso de tiempo, totaliza el hidrograma de salida final (Q_t).

$$Q_t = \sum_{i=1}^{N_{celdas}} \bar{O}_{i,t} \quad \text{Ecuación 16}$$

El modelo Clark modificado se presenta esquemáticamente en la Figura 125.

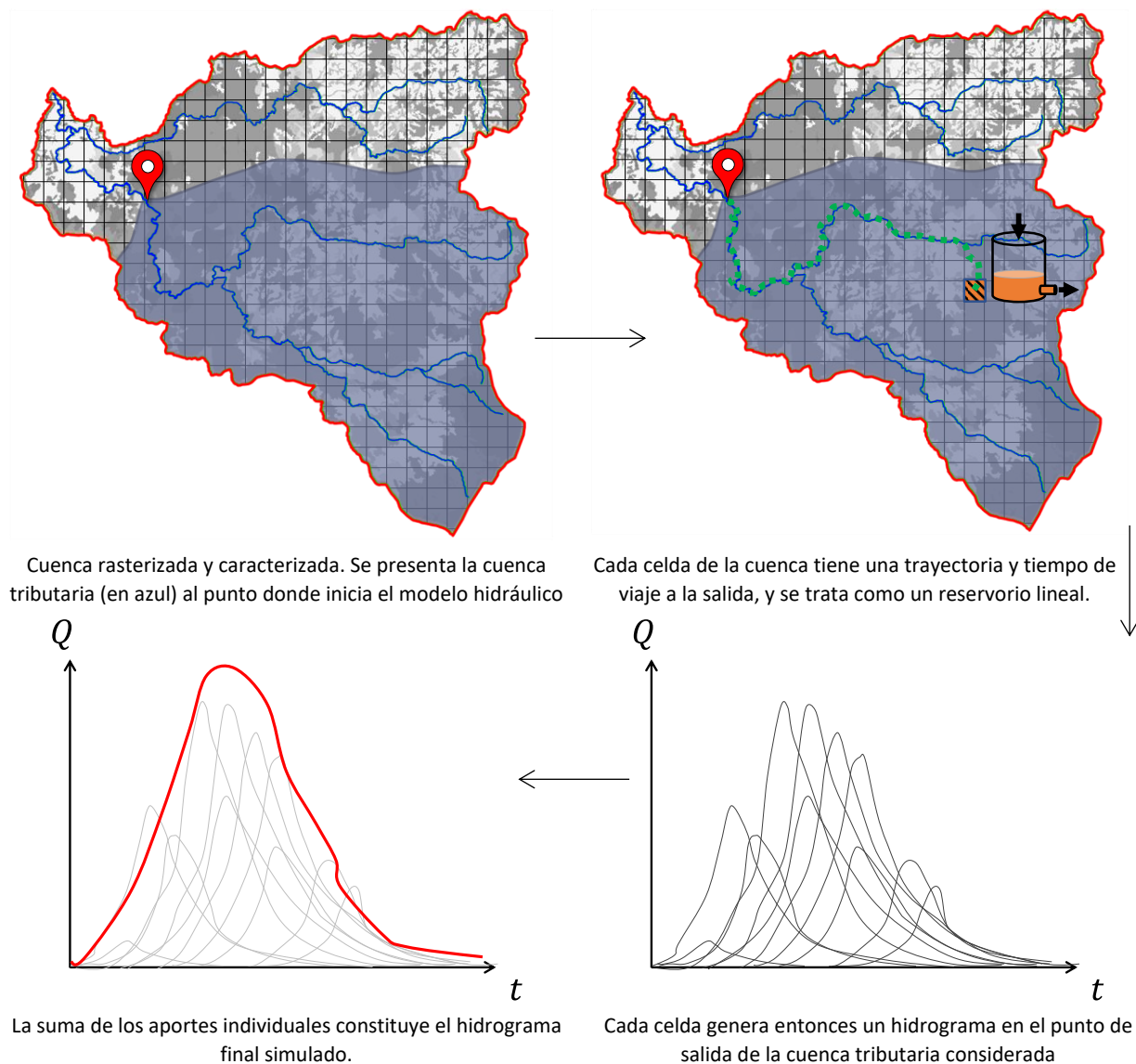


Figura 125. Ilustración del modelo lluvia-escorrentía de Clark modificado.

Inundación fluvial (desbordamiento de ríos)

En esta sección se describe la modelación hidráulica que permite transitar los hidrogramas calculados como respuesta de cuencas, dentro de los cauces de ríos y quebradas.

Modelo 1D

El objetivo del análisis unidimensional es la solución de los perfiles de profundidad de agua en secciones transversales a lo largo del cauce de un río. Se asume un flujo no permanente, gradualmente variado y unidimensional. La ecuación de energía, para dos secciones transversales adyacentes, ST_1 y ST_2 , es

$$Y_2 + Z_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} = Y_1 + Z_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + h_e \quad \text{Ecuación 17}$$

en donde Y_1 y Y_2 son la profundidad del agua en las secciones ST_1 y ST_2 respectivamente, Z_1 y Z_2 son las elevaciones del canal en ST_1 y ST_2 , V_1 y V_2 son las velocidades promedio del flujo (la descarga total dividida por el área total), α_1 y α_2 son coeficientes de ponderación, g es la aceleración de la gravedad y h_e es la cabeza de pérdida de energía. El término de la cabeza de pérdida de energía se define como:

$$h_e = L\bar{S}_f + C \left| \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \right| \quad \text{Ecuación 18}$$

en donde L es la distancia ponderada entre secciones transversales, S_f es la pendiente representativa de fricción entre las secciones transversales y C es un coeficiente de expansión o contracción. La distancia ponderada y la pendiente representativa de fricción se determinan como:

$$L = \frac{L_{lob}\bar{Q}_{lob} + L_{ch}\bar{Q}_{ch} + L_{rob}\bar{Q}_{rob}}{\bar{Q}_{lob} + \bar{Q}_{ch} + \bar{Q}_{rob}} \quad \text{Ecuación 19}$$

$$S_f = \left(\frac{Q_1 + Q_2}{K_1 + K_2} \right)^2 \quad \text{Ecuación 20}$$

en donde L_{lob} , L_{ch} y L_{rob} son las distancias en la margen izquierda, canal principal y margen derecha, disponibles para el flujo entre las secciones, respectivamente. $\bar{Q}_{lob}$, $\bar{Q}_{ch}$ y $\bar{Q}_{rob}$ son los caudales promedio entre secciones para la margen izquierda, el canal principal y la margen derecha, respectivamente, K_1 y K_2 son las conducciones de las secciones transversales.

El cálculo de la conducción y el caudal de una sección transversal, se realiza para cada subdivisión dentro de la sección (margen izquierda, canal principal, margen derecha), como:

$$Q = K\sqrt{S_f} \quad \text{Ecuación 21}$$

$$K = \frac{1.486}{n} AR^{2/3} \quad \text{Ecuación 22}$$

en donde K es la conducción para la subdivisión, n es el coeficiente de rugosidad de Manning, A es el área de flujo, y R el radio hidráulico.

Modelo 2D

El carácter dinámico de las inundaciones y la influencia del desplazamiento del agua hacia las zonas bajas, hacen necesario emplear modelos matemáticos que, por lo menos, incluyan ecuaciones de flujo en dos direcciones horizontales. El método propuesto considera un modelo numérico bidimensional con base en la ecuación de conservación de cantidad de movimiento y en la ecuación de continuidad; en ellas las velocidades corresponden a su valor promedio en la vertical. Se considera el flujo sobre una región con o sin agua. Las ecuaciones dinámicas que describen la conservación de cantidad de movimiento son:

$$\frac{1}{g} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{n^2 |u| u}{h^{4/3}} = - \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{\partial z}{\partial x} \quad \text{Ecuación 23}$$

$$\frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{n^2 |v| v}{h^{4/3}} = - \frac{\partial h}{\partial y} - \frac{\partial z}{\partial y} \quad \text{Ecuación 24}$$

en donde u y v son las componentes de la velocidad en las direcciones x y y respectivamente, n es el coeficiente de rugosidad según la fórmula de Manning, h es el nivel de la superficie libre del agua con respecto al nivel del terreno natural y t es el tiempo. El principio de la conservación de masa (ecuación de continuidad) en dos dimensiones horizontales establece que:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} uh + \frac{\partial}{\partial y} vh = 0 \quad \text{Ecuación 25}$$

El área (en proyección horizontal) de la llanura a inundarse se divide en celdas de forma rectangular de largo ∂x y ancho ∂y . Para calcular el flujo de agua en una planicie de inundación se debe resolver el sistema de ecuaciones diferenciales conformado por las ecuaciones anteriores y considerando ciertas condiciones iniciales y de frontera.

A.4 DESCRIPCIÓN DE CUENCAS PRINCIPALES Y PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS

Descripción de las principales cuencas

Las descripciones acá incluidas, se refieren a las cuencas presentadas en la Figura 68.

Sixaola: Ubicada en la vertiente del Caribe, esta cuenca sirve de límite natural entre Costa Rica y Panamá. Su principal río, el Sixaola, es navegable y tiene varios afluentes, incluyendo el Yorkín y el Coen. La cuenca es importante para la biodiversidad y la conectividad ecológica transfronteriza.

La Estrella: Situada en la vertiente del Pacífico, esta cuenca es conocida por su topografía montañosa y su biodiversidad. El río que le da nombre es de importancia para las comunidades locales y para la conservación de los ecosistemas.

Banano: Esta cuenca se caracteriza por su relieve montañoso y su importancia para la agricultura local. El río Banano es un afluente del río Sixaola y es crucial para las actividades económicas en la región.

Bananito: Ubicada en la vertiente del Caribe, esta cuenca es conocida por su biodiversidad y su importancia ecológica. El río Bananito es un afluente del río Sixaola y es vital para las comunidades locales.

Moín: Esta cuenca se encuentra en la provincia de Limón y es conocida por su actividad portuaria en el puerto de Moín. El río Moín es importante para el transporte y la economía de la región.

Matína: Situada en la vertiente del Caribe, esta cuenca es conocida por su biodiversidad y su importancia ecológica. El río Matína es un afluente del río Reventazón y es vital para las comunidades locales.

Madre de Dios: Esta cuenca se caracteriza por su relieve montañoso y su importancia para la conservación de los ecosistemas. El río Madre de Dios es un afluente del río Reventazón y es crucial para las actividades económicas en la región.

Pacuare: Conocida por su biodiversidad y su importancia ecológica, esta cuenca alberga al río Pacuare, famoso por sus rápidos y utilizado para el rafting. Es una de las principales cuencas de la vertiente del Caribe.

Reventazón: Es la tercera cuenca hidrográfica más grande del país, ubicada en la vertiente del Caribe. El río Reventazón es crucial para la generación de energía hidroeléctrica y para las actividades agrícolas en la región.

Tortuguero: Esta cuenca es conocida por su importancia ecológica y su biodiversidad. El río Tortuguero es vital para las comunidades locales y es un importante destino ecoturístico.

Sarapiquí: Ubicada en la vertiente del Caribe, esta cuenca es conocida por su biodiversidad y su importancia ecológica. El río Sarapiquí es un afluente del río San Juan y es vital para las comunidades locales.

Cureña: Esta cuenca se caracteriza por su relieve montañoso y su importancia para la conservación de los ecosistemas. El río Cureña es un afluente del río San Carlos y es crucial para las actividades económicas en la región.

San Carlos: La cuenca del río San Carlos es una de las más grandes del país, abarcando una amplia variedad de ecosistemas. El río San Carlos es esencial para las actividades agrícolas, industriales y urbanas en la región norte. La cuenca también es importante para la biodiversidad y para la regulación hídrica en la zona.

Pocosol: La cuenca del río Pocosol es conocida por su ubicación en la región norte de Costa Rica, cerca del Parque Nacional Volcán Arenal. El río Pocosol fluye a través de bosques tropicales y áreas agrícolas, siendo esencial para el riego y el abastecimiento de agua potable.

Frío: La cuenca del río Frío es relevante por su ubicación en la región norte de Costa Rica, cerca del Parque Nacional Tortuguero. El río Frío es conocido por su agua clara y por ser un importante hábitat para diversas especies acuáticas. La cuenca enfrenta desafíos relacionados con la conservación y el manejo sostenible de los recursos naturales.

Zapote: Esta cuenca se caracteriza por su relieve montañoso y su importancia para la conservación de los ecosistemas. El río Zapote es un afluente del río San Carlos y es crucial para las actividades económicas en la región.

Península de Nicoya: Esta cuenca es conocida por su actividad agrícola y su importancia ecológica.

Tempisque: Ubicada en la vertiente del Pacífico, esta cuenca es conocida por su actividad agrícola y su importancia ecológica. El río Tempisque es un afluente del río San Juan y es vital para las comunidades locales.

Bebedero: Esta cuenca se caracteriza por su relieve montañoso y su importancia para la conservación de los ecosistemas. El río Bebedero es un afluente del río Tempisque y es crucial para las actividades económicas en la región.

Abangares: Ubicada en la vertiente del Pacífico, esta cuenca es conocida por su actividad minera y su importancia ecológica. El río Abangares es un afluente del río Tempisque y es vital para las comunidades locales.

Barranca: Esta cuenca se caracteriza por su relieve montañoso y su importancia para la conservación de los ecosistemas. El río Barranca es un afluente del río Tempisque y La cuenca del río Barranca se localiza en el noroeste de Costa Rica, abarcando principalmente los cantones de San Ramón, Naranjo, Palmares y Esparza, en las provincias de Alajuela y Puntarenas.

Savegre: Ubicada en la vertiente del Pacífico, la cuenca del río Savegre destaca por su biodiversidad y belleza natural. El río Savegre es reconocido por su calidad de agua y es considerado uno de los ríos más limpios de América Central. La cuenca abarca áreas de bosques tropicales y montañas, siendo un importante recurso para la conservación y el ecoturismo.

Barú: Situada en la provincia de Puntarenas, la cuenca del río Barú es esencial para la región debido a su aporte hídrico y su influencia en la agricultura local. El río Barú atraviesa diversas zonas ecológicas, desde bosques húmedos hasta áreas agrícolas, lo que resalta su importancia en la conectividad ecológica y el manejo sostenible de los recursos hídricos.

Térraba: La cuenca del río Térraba es una de las más extensas de Costa Rica, abarcando una gran diversidad de ecosistemas, desde montañas hasta llanuras costeras. Es vital para las comunidades locales,

proporcionando agua para consumo, riego y actividades económicas. Además, el río Térraba es crucial para la biodiversidad regional, al albergar una variedad de especies en sus hábitats acuáticos y terrestres.

Esquinas: Localizada en la región sur del país, la cuenca del río Esquinas es conocida por su rica biodiversidad y su importancia en la conservación de ecosistemas tropicales. El río Esquinas fluye a través de bosques lluviosos, siendo esencial para la regulación hídrica y el mantenimiento de hábitats naturales. Su cuenca también es significativa para las actividades pesqueras y el ecoturismo en la zona.

Changuinola: Aunque parte de esta cuenca se encuentra en Panamá, la cuenca del río Changuinola es relevante para Costa Rica debido a su influencia en la región fronteriza. El río Changuinola es fundamental para las comunidades locales, proporcionando recursos hídricos y siendo un eje para la biodiversidad en la zona. Su cuenca abarca bosques tropicales y áreas protegidas, siendo esencial para la conservación transfronteriza.

Chirripó: La cuenca del río Chirripó es reconocida por su altitud y diversidad ecológica. El río Chirripó, que nace en las montañas más altas del país, atraviesa diversos ecosistemas, desde páramos hasta bosques tropicales. Es crucial para la conservación de especies endémicas y para la regulación hídrica en la región. La cuenca también es importante para las actividades recreativas y el ecoturismo.

Tárcoles: La cuenca del río Grande de Tárcoles es una de las más importantes en la vertiente del Pacífico central. El río Tárcoles es conocido por su caudal y por ser un hábitat para diversas especies acuáticas. La cuenca abarca áreas urbanas y rurales, siendo esencial para el abastecimiento de agua y la gestión de recursos hídricos en la región.

Naranjo: Ubicada en la región central del país, la cuenca del río Naranjo es vital para las actividades agrícolas y urbanas. El río Naranjo atraviesa zonas de cultivo y áreas residenciales, siendo esencial para el riego y el abastecimiento de agua potable. La cuenca también enfrenta desafíos relacionados con la contaminación y la gestión sostenible de los recursos hídricos.

Sarapiquí: La cuenca del río Sarapiquí es conocida por su biodiversidad y por ser un importante corredor biológico en la región norte del país. El río Sarapiquí fluye a través de bosques tropicales y áreas agrícolas, siendo esencial para la conservación de ecosistemas y para las actividades económicas locales. La cuenca también es significativa para la investigación científica y el ecoturismo.

Jesús María: La cuenca del río Jesús María se encuentra en la vertiente del Pacífico costarricense. Sus principales tributarios son los ríos Machuca y Cuarros, y su cauce desemboca en la ensenada de Tivives. La zona se caracteriza por un uso intensivo del suelo con cultivos de melón, caña y mango, lo que refleja la importancia agrícola de esta cuenca en el desarrollo económico regional.

Tusubres : La cuenca del río Tusubres también pertenece a la vertiente Pacífica y presenta un relieve con variaciones altitudinales que van desde casi el nivel del mar hasta más de 1 600 m. Sus principales afluentes son los ríos Chires y Tulín, conformando un sistema hidrográfico que drena hacia el océano Pacífico y que atraviesa paisajes de montaña y llanuras costeras.

Parrita: La cuenca del río Parrita-Pirris es una de las más extensas de la región Pacífica. Su cauce principal nace en el macizo de la Cordillera de Talamanca, específicamente en el Cerro de la Muerte, y fluye hasta desembocar en el océano Pacífico. Se caracteriza por su elevada dinámica sedimentaria, la cual enriquece las llanuras aluviales y favorece la fertilidad de los suelos agrícolas en la parte baja de la cuenca.

Damas: Sus afluentes nacen en la fila Chonta y en cerros circundantes, siguiendo un trayecto general noreste-suroeste hasta desembocar en el Pacífico central. La cuenca combina zonas montañosas y llanuras costeras, lo que le otorga un paisaje variado y de gran importancia ecológica y productiva.

Finalmente, la región hídrica de la península de Osa comprende un conjunto de cuencas de gran riqueza natural, en las que destacan los ríos Sierpe, Aguas, Riyito y otros menores que drenan hacia el golfo Dulce y el océano Pacífico. Se trata de un territorio de alta biodiversidad, con humedales, manglares y bosques tropicales que forman parte de ecosistemas únicos en el mundo. Estas cuencas desempeñan un papel fundamental en la regulación hídrica, la conservación ambiental y el sustento de actividades económicas como la pesca y el ecoturismo.

Parámetros morfométricos La tabla a continuación sintetiza las principales características físicas de las cuencas mencionadas previamente. Contiene datos como: Área (km²), Perímetro (P) (km), Índice de compacidad, Factor de forma, Altitudes máximas, mínimas y medias (msnm), Longitud del cauce principal (km), Pendiente media del cauce (%), Pendiente media de la cuenca (%). Los datos presentados fueron obtenidos de IMN (2011).

Cuenca	Área km ²	P km	Índice de compacidad	Factor de forma	Alt. máxima msnm	Alt. mínima msnm	Alt. media msnm	Longitud del cauce km	Pendiente media del cauce %	Pendiente media de la cuenca %
Sixaola	2309	-	1.97	0.41	3800	0	1249	153.4	8.16	40.97
La Estrella	1249	231	2.01	0.42	2240	0	411	65.7	14.39	27.31
Banano	207	86	1.66	0.49	2040	0	543	43.8	10.01	33.64
Bananito	225	73	1.36	0.93	980	0	150	32.3	10.37	17.99
Moín	163	61	1.34	0.66	520	0	97	25.1	4.72	11.41
Matina	1612	251	1.74	0.43	3800	0	983	112.5	16.5	36.24
Madre de Dios	255	78	1.4	0.46	620	0	55	44.0	2.89	4.32
Pacuare	573	236	2.18	0.21	3340	0	975	136.4	13.16	33.19
Reventazón	2810	1242	1.63	0.42	3460	0	1056	177.3	11.04	23.4
Tortuguero	1463	201	1.47	0.89	538	0	37	82.7	0.47	1.6
Sarapiquí	1721	219	1.48	0.54	2887	10	551	104.0	9.46	13.99
Cureña	359	92	1.39	0.98	340	10	51	32.8	1	3.69
San Carlos	3130	321	1.61	1.05	2320	20	534	142.1	5.02	17.39
Pocosol	1643	218	1.51	1.26	360	0	78	108.9	0.72	4.58
Frío	1686	192	1.27	0.57	1900	20	188	110.8	4.05	6.46
Zapote	2450	263	1.49	2.65	2020	20	308	51.8	6.77	10.47
Península de Nicoya	4165	750	3.24	-	1000	0	181	-	-	23.32
Tempisque	3382	365	1.76	0.56	1900	0	169	142.2	3.87	10.29
Bebadero	2068	652	1.38	1.14	2020	0	291	72.2	4.01	12.15
Abangares	1347	222	1.7	1.15	1840	0	374	47.2	4.32	20.91
Barranca	465	154	1.96	0.58	2180	0	792	68.8	12.43	25.7
Jesús María	377	99	1.42	0.62	1421	0	264	44.0	9.82	16.28
Grande de Tárcoles	3595	254	1.44	0.74	2960	0	1031	111.7	2.15	15.3
Tusubres	823	132	1.29	1.33	1633	0	258	53.2	20.43	25.1
Parrita	1273	207	1.61	1.29	3140	0	1167	97.5	19.11	39.76
Damas y otros	451	141	1.84	1.13	2100	0	307	17.1	12.07	25.78
Naranjo	425	122	1.9	0.49	3006	0	902	52.5	14.42	37.05
Savegre	607	129	1.46	0.48	3480	0	1327	70.6	18.88	45.28
Barú	544	145	1.75	3.46	1365	0	364	18.5	-	31.14
Térraba	5055	436	1.72	1.95	3760	0	1002	185.7	6.26	31.01

Cuenca	Área km2	P km	Índice de compacidad	Factor de forma	Alt. máxima msnm	Alt. mínima msnm	Alt. media msnm	Longitud del cauce km	Pendiente media del cauce %	Pendiente media de la cuenca %
Península de Osa	1943	372	2.36	-	1320	0	131	-	-	18.32
Esquinas	1786	348	2.32	2.55	1538	0	207	39.4	8.82	18.29
Changuinola	253	80	1.4	1.43	3340	1240	2419	16.7	21.28	39.44
Chirripó	2046	329	2.02	0.26	3400	0	500	140.0	4.7	16.29

A.5 METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN DE LA AMENAZA POR INUNDACIÓN COSTERA

La metodología acá presentada se encuentra también incluida en el Informe de Inicio de esta consultoría (sección 6.4). Se incluye de nuevo aquí para facilidad del lector.

Los eventos de inundación costera son usualmente detonados por fenómenos meteorológicos extremos, que tengan la capacidad de producir sobre elevaciones del nivel del mar en las costas. Eventos como los huracanes, que si bien no impactan directamente las costas costarricenses⁹, generan sobre elevaciones por marea de tormenta que se manifiestan como potenciales inundaciones costeras. En este trabajo las inundaciones costeras se modelan considerando a los huracanes como fenómeno desencadenante. También se consideran los tsunamis en la evaluación de la inundación costera, como se presenta en el Anexo A.6.

Las trayectorias de los huracanes se componen de avisos, los cuales se dan cada 6 horas e indican: fecha y hora del aviso, ubicación geográfica del centro del ciclón, presión central y velocidad del viento sostenida en 1 minuto a 10 metros sobre la superficie del mar. Estos avisos son usualmente emitidos por el Centro Nacional de Huracanes de los Estados Unidos para toda la cuenca del Atlántico Norte. La Figura 126 muestra la trayectoria, con sus diferentes avisos, del huracán Otto (noviembre de 2016).



Figura 126. Trayectoria y avisos del huracán Otto

Perturbación de las trayectorias de los huracanes

Para cada trayectoria de huracán se genera un conjunto de trayectorias “hijas” siguiendo un proceso bidimensional de Wiener en el cual la trayectoria histórica es perturbada artificialmente para crear una nueva trayectoria hija. Este proceso de perturbación es presentado en la Ecuación 26:

$$x_s(t_{k+1}) = x_s(t_k) + \Delta X_{k,k+1} + e \quad \text{Ecuación 26}$$

⁹ Con excepción del huracán Otto en 2016.

en donde $\mathbf{x}_s(t_k)$ es el vector de posición de un punto de la trayectoria en el instante t_k , $\mathbf{x}_s(t_{k+1})$ es el vector de posición en el instante t_{k+1} , $\Delta\mathbf{X}_{k,k+1}$ es el delta entre el instante k y $k+1$, y e es una variable aleatoria que sigue una distribución normal con $\mu=0.0$ y $\sigma=0.5$.

Los valores de presión central de las trayectorias simuladas se establecen inicialmente como iguales a los del huracán original, y luego son modificados de acuerdo con el modelo de balance propuesto por Emanuel (2006) considerando los parámetros del sistema atmosférico-oceánico que influyen en el ciclo de vida de un huracán, garantizando así la consistencia física de los valores simulados. Este procedimiento permite ampliar artificialmente el catálogo de huracanes en la región de cálculo, permitiendo así la simulación de trayectorias adicionales no incluidas en el catálogo original. Usualmente se simulan 100 trayectorias hijas por cada trayectoria histórica.

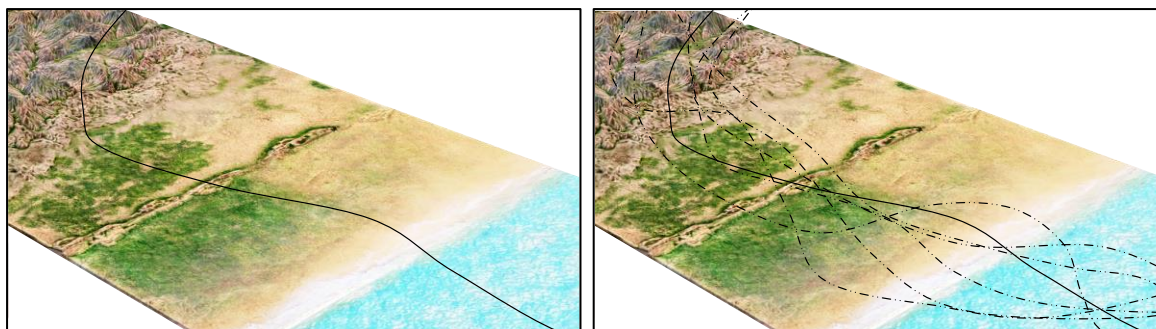


Figura 127. Ilustración de la perturbación de trayectorias sobre un territorio hipotético. De la trayectoria original (izq.) se obtiene una familia de trayectorias perturbadas (der.)

Modelación del campo de viento

La modelación del campo de viento es crucial para la evaluación de las mareas ciclónicas, dado que constituye el principal mecanismo de incremento del nivel del mar, especialmente en costas a una distancia intermedia de la trayectoria del huracán. La modelación del campo de viento es un proceso de tres pasos (Vickery et al., 2009a):

1. A partir de la presión central del huracán, se calcula la velocidad del viento de gradiente. La velocidad gradiente es la velocidad que resulta de asumir que el principal mecanismo que causa las corrientes de viento es el gradiente de presión. Los efectos del rozamiento superficial, así como los efectos no lineales del rozamiento entre capas de aire son despreciados en este punto.
2. Por medio de un modelo de capa límite planetaria, se calcula el perfil de velocidades en función de la rugosidad de la superficie, y el valor básico de velocidad de viento promediado en una hora a 10 metros de la superficie del terreno. En este punto, los efectos no lineales de rozamiento se incorporan como un campo de perturbación aleatorio en todo el dominio de evaluación.

La velocidad del viento de gradiente (v_G) se calcula en este estudio utilizando el modelo propuesto por Holland (1980):

$$v_G = \sqrt{\left(\frac{RMW}{r}\right)^B \cdot \frac{B \cdot \Delta P \cdot \exp\left(-\left(\frac{RMW}{r}\right)^B\right)}{\rho} + \frac{r^2 f^2}{4} - \frac{f \cdot r}{2}}$$

Ecuación 27

en donde RMW es la distancia a los máximos vientos, r es la distancia de observación (i.e. la distancia del sitio de cálculo al centro de la tormenta), ΔP es el gradiente de presión ($\Delta P = P_n - P_0$, donde P_n es la presión atmosférica nominal establecida como 1005 hPa), ρ es la densidad del aire, f es el parámetro de fuerza de Coriolis ($f = 2\Omega \sin\varphi$, donde Ω es la velocidad de rotación angular de La Tierra, y φ es la latitud del ojo del ciclón) y B es el parámetro adimensional de Holland, el cual es una constante que define la forma del perfil de velocidad gradiente y que toma valores usualmente entre 0.7 y 2.2.

El radio a los máximos vientos (RMW) marca el punto en el cual el perfil de velocidad gradiente es máximo, medido desde el centro del huracán. Existen múltiples propuestas en la literatura para el cálculo de este parámetro. En este estudio se aplica la ecuación empírica propuesta por Vickery & Whadhera (2008),

$$RMW = 3.015 - 6.291 \cdot 10^{-5} \Delta P + 0.0337 \varphi$$

Ecuación 28

Para el cálculo del parámetro B de Holland, se emplea la formulación propuesta por Vickery & Wadhera (2008), quienes encontraron una correlación suficientemente buena entre B y un parámetro adimensional A definido por ellos:

$$B = 1.732 - 2.237\sqrt{A}$$

Ecuación 29

$$A = \frac{RMW \cdot f}{\sqrt{2R_d T_s \cdot \ln\left(1 + \frac{\Delta P}{P_0 \cdot e}\right)}}$$

Ecuación 30

en donde R_d es la constante de gases del aire, T_s es la temperatura de superficie del mar (dada en °K), y e es la constante de Euler. Con fines ilustrativos, la Figura 128. muestra un campo de viento calculado para un huracán estacionario (i.e. sin velocidad de avance), por medio del modelo de Holland (1980) aquí presentado. El perfil de velocidades que se muestra es simétrico, lo que resulta en un campo de viento con contornos circulares. La velocidad gradiente calculada corresponde a la velocidad sostenida en un tiempo muy largo, por lo que se asocia a un tiempo de una hora.

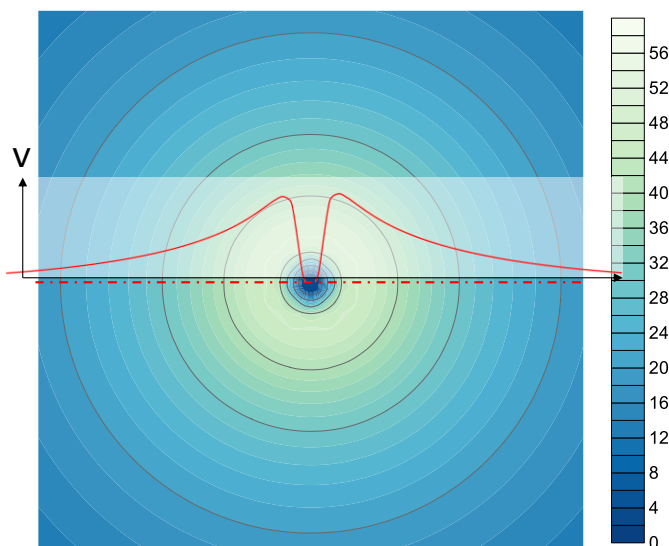


Figura 128. Campo de velocidad gradiente de una tormenta estacionaria con presión central de 950 hPa. El perfil de velocidad presentado es calculado con el modelo de Holland (1980).

La velocidad de gradiente (v_G) es modificada para obtener la velocidad a nivel de superficie del terreno (en realidad a 10 metros sobre la superficie) utilizando un modelo de capa límite planetaria. Vickery et al. (2009b) proponen un modelo de variación de la velocidad media del viento (en una hora), $u(z)$ como función de la altura desde la superficie z , dentro de la capa límite como:

$$u(z) = \frac{u_*}{k} \left[\ln \left(\frac{z}{z_0} \right) - 0.4 \left(\frac{z}{H^*} \right)^2 \right] \quad \text{Ecuación 31}$$

en donde k el coeficiente de von-Karman ($k = 0.4$), u_* es la velocidad de fricción, z_0 es la longitud de rugosidad aerodinámica y H^* es la altura de la capa límite, la cual puede modelarse de acuerdo con Vickery et al. (2009b) así:

$$H^* = 343.7 + \frac{0.26}{I} \quad \text{Ecuación 32}$$

en donde I es la estabilidad inercial, definida por Kepert (2001) como:

$$I = \sqrt{\left(f + \frac{2V_G}{r} \right) \left(f + \frac{V_G}{r} + \frac{\partial V_G}{\partial r} \right)} \quad \text{Ecuación 33}$$

La velocidad de fricción, u_* , se define como:

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}} \quad \text{Ecuación 34}$$

en donde τ es el cortante superficial del viento, definido como:

$$\tau = \rho \cdot C_d \cdot u^2$$

Ecuación 35

en donde C_d es el coeficiente de arrastre, y u es la velocidad del viento en superficie. La aplicación de este modelo de capa límite resulta en perfiles logarítmicos de variación de la velocidad sostenida en un minuto con la altura desde la superficie, los cuales han sido ampliamente validados con respecto a valores registrados en sondas de caída libre lanzadas sobre ciclones tropicales desde vuelos de reconocimiento (mayores detalles en Vickery et. al. 2009b). La Figura 129 muestra tres perfiles de velocidad calculados para diferentes distancias desde el centro de un ciclón con presión central de 930 hPa transitando sobre mar abierto.

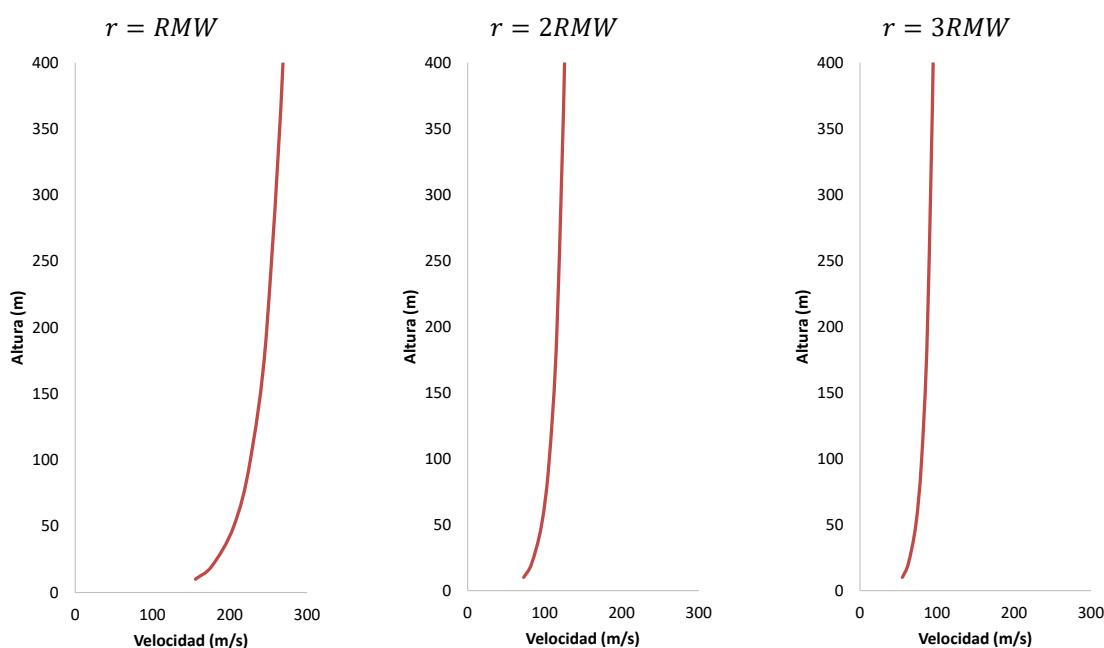


Figura 129. Perfiles de velocidad logarítmicos calculado a diferentes distancias del centro de la tormenta para un huracán con presión central de 930 hPa transitando sobre mar abierto.

La rugosidad superficial está asociada con el tamaño y densidad de obstáculos al flujo de viento, los cuales inducen flujo turbulento a nivel local, reduciendo la magnitud de la velocidad superficial. La rugosidad de la superficie es directamente incorporada en el modelo de capa límite por medio de los parámetros z_0 (longitud de rugosidad aerodinámica) y C_d (coeficiente de arrastre), cuya modificación tiene un efecto en el perfil logarítmico del viento como se ilustra en la Figura 130.

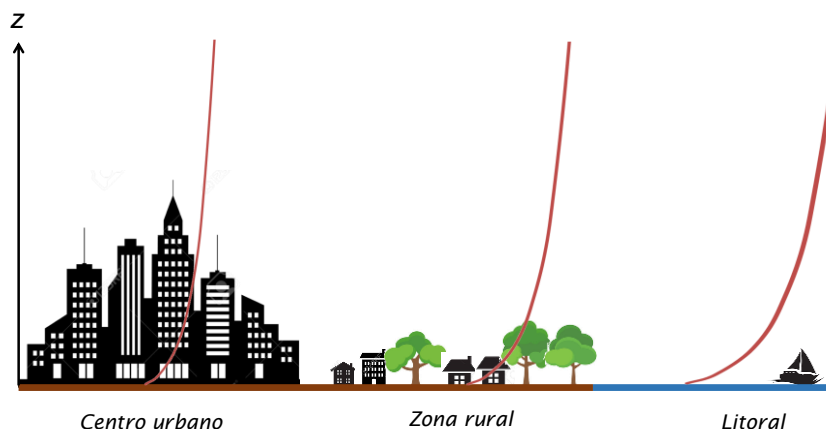


Figura 130. Ilustración del cambio inducido en el perfil logarítmico del modelo de capa límite por cuenta de la rugosidad superficial.

Los campos de viento están dados en términos de la distribución geográfica de v_{10} . Por lo tanto, para cada ciclón histórico se calculan múltiples campos de viento, cada uno correspondiente a una simulación de la trayectoria histórica. Para cada conjunto de campos de viento, se ajusta un modelo de probabilidad en cada ubicación de la malla, definiendo así campos de viento probabilistas en los cuales v_{10} es una variable aleatoria.

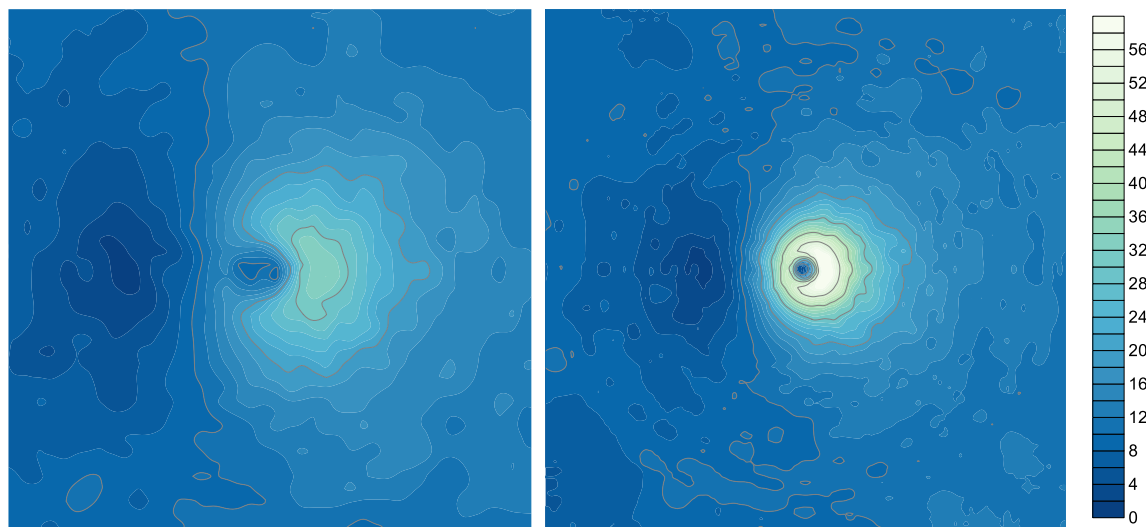


Figura 131. Ejemplos de campos de viento superficial, para huracanes con velocidad de avance de 10 m/s hacia el norte y presión central de 950 hPa (izq.) y 920 hPa (der.).

Modelación de la marea de tormenta

La marea de tormenta constituye un efecto altamente significativo de los ciclones tropicales en zonas costeras. La sobreelevación del mar en las costas se debe principalmente al cortante superficial de los vientos huracanados, que empujan la superficie causando una corriente oceánica que cambia de dirección con la profundidad por cuenta de la espiral de Ekman causada por el efecto Coriolis de la rotación terrestre.

También aporta la baja presión atmosférica en el centro de la tormenta, la cual produce una sobre elevación adicional. Al aproximarse a las costas, la batimetría local induce el aumento del nivel del mar, causando la inundación de grandes áreas costeras. La marea total (η) será simplemente la suma de la marea por cortante superficial del viento (η_c) y la marea por baja presión atmosférica (η_p).

$$\eta = \eta_c + \eta_p \quad \text{Ecuación 36}$$

El valor máximo de la sobre elevación de marea por viento se puede calcular usando el modelo de Tilburg y Garvine de 2003, el cual está basado en las ecuaciones de circulación oceánica de Ekman. La marea por viento se calcula en un punto específico sobre la línea de costa. En la aplicación de este modelo, la dirección x se considera paralela a la plataforma continental siendo la dirección y perpendicular.

$$\eta_c = \int_0^L -\frac{fU_x}{g} \sqrt{\frac{\rho_a c_a U}{\rho \cdot c_b |U_x|}} + \frac{\rho_a c_a U_y U}{\rho g D(y)} dy \quad \text{Ecuación 37}$$

En donde L es el ancho de la plataforma continental, ρ_a es la densidad del aire, c_a es el coeficiente de arrastre superficial, U es la velocidad del viento, ρ es la densidad del agua de mar, c_b es el coeficiente de arrastre del lecho marino, $|U_x|$ es la componente del viento que sopla en dirección paralela a la plataforma continental, U_y es la componente transversal a la plataforma y $D(y)$ es la función de forma del lecho marino (perfil batimétrico).

La marea por baja presión atmosférica se modela haciendo uso del efecto barométrico inverso, según el cual, para agua de mar, podemos asociar una sobre elevación de 1 cm por cada hPa de diferencial de presión (ver Ecuación 38). Esto requiere de la estimación del campo de presión asociado al ciclón, el cual se puede considerar simétrico y descrito por la ecuación presentada, como función de la presión central y el radio a los máximos vientos (Ecuación 39).

$$\eta_p = \frac{\Delta P}{\rho \cdot g} \quad \text{Ecuación 38}$$

$$P(r) = P_0 + (P_n - P_0) \exp\left(-\frac{RMW}{r}\right) \quad \text{Ecuación 39}$$

La modelación hidráulica de la inundación por marea en las costas es un proceso que se aborda comúnmente por medio de simulación computacional, la cual, incluso en el caso bidimensional, implica altísimos costos computacionales, así como procesos complejos de preparación de la información, como capas continuas de topografía y batimetría o enmallados generados sobre el terreno a evaluar. Por tal razón, se ha optado en este caso por la implementación de un modelo aproximado basado en un algoritmo de clasificación de celdas mojadas y secas, que resuelve una versión simplificada de la ecuación de flujo bidimensional en la cual se desprecia el aporte de la inercia de la cantidad de agua en cada celda del terreno (ver Gao et al 2024):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\eta + \frac{v^2}{2g} \right) = \frac{\tau_a - \tau_b}{\rho g d}$$

Ecuación 40

En donde v es la velocidad de flujo costa adentro, τ_a es el cortante por fricción del viento, τ_b es el cortante por fricción del fondo, d es la altura de inundación en la celda. Por medio de un enfoque de diferencias finitas es posible simplificar la derivada parcial presentada y evaluar de forma discreta sobre un modelo digital de elevación. La Figura 132 ilustra el procedimiento iterativo de evaluación propuesto para la inundación por marea.

El modelo propuesto ha sido comparado con observaciones de campo, así como con simulaciones con sistemas de modelación hidrodinámica, mostrando un muy buen ajuste y alta eficiencia computacional, por lo cual es la solución preferida para la modelación de múltiples eventos dentro del enfoque de evaluación de riesgo catastrófico.

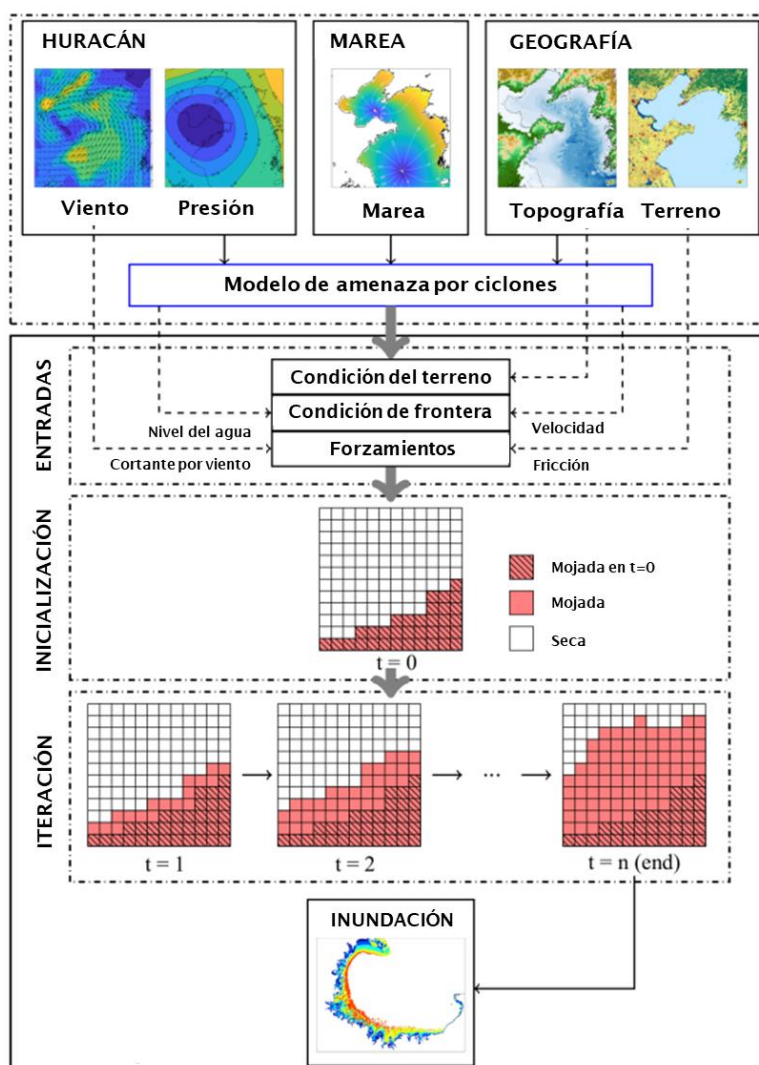


Figura 132. Marco conceptual del modelo de inundación por marea. Modificado de Gao et al. 2024.

A.6 METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN DE LA AMENAZA POR TSUNAMI

La metodología acá presentada se encuentra también incluida en el Informe de Inicio de esta consultoría (sección 7.2). Se incluye de nuevo aquí para facilidad del lector.

Los tsunamis son ondas gravitacionales generadas en el océano cuando un fenómeno detonante desplaza verticalmente una gran masa de agua. Esta onda puede viajar por miles de kilómetros e impactar las costas de varios continentes. Existen diferentes tipos de tsunamis los cuales se diferencian principalmente en el mecanismo detonante que los genera. En esta consultoría se consideran únicamente los asociados a procesos de la tectónica de la corteza terrestre, conocidos comúnmente como tsunamis tectónicos.

Es posible identificar tres procesos principales que participan en la amenaza de tsunami: i) generación, ii) propagación, y iii) arribo. La generación tiene que ver con las condiciones en las cuales se induce el movimiento vertical de la masa de agua oceánica, generando ondas gravitacionales. La propagación tiene que ver con la manera como dichas ondas se propagan por el océano hasta alcanzar las costas. El arribo involucra la amplificación de las amplitudes de onda de tsunami por efecto de la disminución de la batimetría.

Generación

En la modelación del mecanismo de generación de tsunamis tectónicos se deben involucrar dos aspectos relevantes. Estos son: i) el acoplamiento entre el medio sólido elástico que representa la corteza terrestre y el medio líquido que representa el océano y ii) la relación entre los desplazamientos verticales en la superficie del océano y el lecho marino.

Acoplamiento tierra-océano

El problema de generación está asociado con el comportamiento del sistema agua-lecho, y la manera como las ondas sísmicas influyen en las ondas hidrodinámicas que se generan. Es posible aproximar este problema por medio de dos planteamientos diferentes:

- a) *Sistema acoplado*: Un sistema agua-lecho acoplado significa que las ondas sísmicas que viajan por la corteza, influyen en el comportamiento de la masa de agua. Se trata de un sistema complejo en el cual deben tenerse en cuenta las variaciones en la forma del lecho marino dentro del análisis de propagación del tsunami.
- b) *Sistema desacoplado*: El sistema desacoplado indica que no existe una relación directa entre la deformación del lecho y el movimiento de la masa de agua. En otras palabras, las deformaciones elásticas de la corteza por efecto del paso de las ondas sísmicas se consideran despreciables. En caso que el desplazamiento cosísmico del lecho marino sea de dimensiones apreciables, es común suponer un lecho rígido de geometría igual a la máxima deformación elástica inducida por el sismo.

Estos enfoques han sido evaluados por diferentes autores haciendo uso de formulaciones basadas en la teoría de ondas de Ralyleigh. Ward (1980) y Okal (1988) extendieron el enfoque de oscilaciones esféricas libres de Ralyleigh para solucionar la generación y propagación de tsunamis en un sistema de coordenadas esféricas.

Desplazamiento del lecho marino y la superficie del océano

La manera común de abordar el problema del desplazamiento inicial de la superficie libre del agua es mediante la suposición que el desplazamiento del fondo del lecho marino es igual al desplazamiento de la columna de agua. En esta consultoría, se hace uso de la formulación de Odaka (1985) para determinar la deformación del lecho marino ante la ocurrencia de una ruptura en la corteza terrestre. Okada (1985) se basó en la teoría de las dislocaciones de Volterra para determinar una formulación que permite calcular el desplazamiento ocurrido en un medio elástico por efecto de una dislocación. Esta formulación ha sido usada por diferentes autores como punto de partida para el problema de propagación. El campo de deformación vertical z se determina como:

$$\zeta = \left(-\frac{U_\phi}{2\pi} \left[\frac{3xdq}{R^5} + I_\phi \sin \delta \right] - \frac{U_\delta}{2\pi} \left[\frac{3dpq}{R^5} + I_\delta \sin \delta \cos \delta \right] \right) \Delta\Sigma$$

Ecuación 41

En donde, U_ϕ es la dislocación de la ruptura en la dirección del lineamiento (strike), U_δ es la dislocación en la dirección del buzamiento (dip), d es la profundidad p y q son funciones que dependen del ángulo de buzamiento, I_ϕ e I_δ son funciones que dependen de la ubicación del sitio de cálculo y de las constantes elásticas de Lamé, y $\Delta\Sigma$ es el área de ruptura. La Figura 133 muestra un ejemplo del campo de deformación vertical del lecho marino obtenido con la formulación de Odaka (1985), calculado para un sismo de desplazamiento vertical con lineamiento al este, $M_w=7.0$ y profundidad de 5Km.

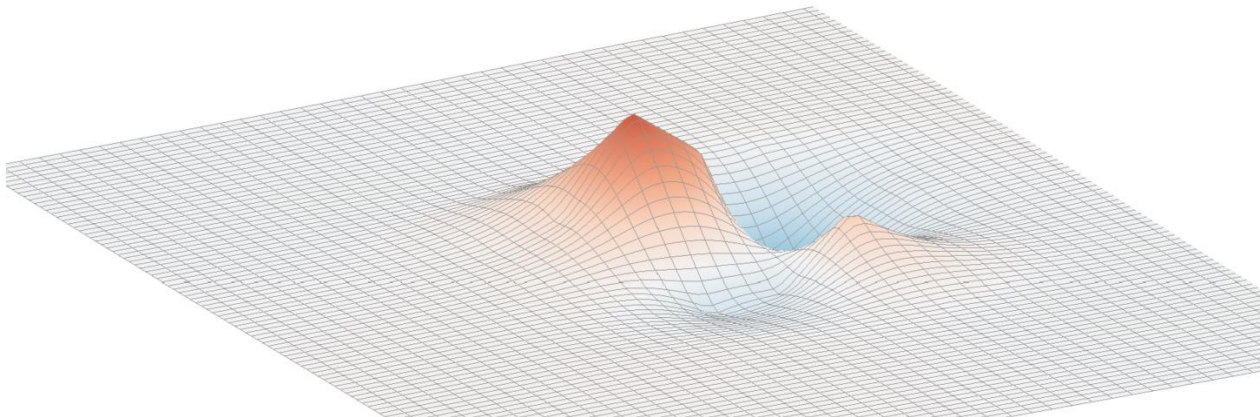


Figura 133. Deformación vertical del lecho marino para un sismo de desplazamiento vertical con lineamiento al este, de $M_w=7.0$ y profundidad de 5Km.

Propagación

En el estudio de la propagación de las ondas de tsunami por el océano se aplica generalmente la teoría de ondas en aguas poco profundas. A este tipo de ondas se les conoce también como gravitacionales, dado que la gravedad es la que controla el mecanismo de restauración del medio. Cuando transitan ondas gravitacionales por un medio para el cual la longitud de onda es mucho mayor que su profundidad, la aceleración vertical resultante es despreciable en comparación con la gravedad. Esto implica que el movimiento de la masa de agua, en dirección horizontal, es prácticamente constante desde el fondo hasta la superficie. Esta es la característica primordial de las ondas largas u ondas en aguas poco profundas (*shallow-water waves*). Para el caso de los tsunamis, la profundidad de los océanos se encuentra

típicamente alrededor de los 5 km, mientras que la longitud del frente de ondas puede ser de varios cientos de kilómetros, razón por la cual la aproximación de onda larga es suficientemente válida para caracterizar el tránsito de la energía del tsunami en mar abierto.

El desarrollo matemático de la teoría de ondas en aguas poco profundas se basa en la formulación de Stokes, la cual describe el movimiento unidimensional de un fluido no viscoso, sujeto a fuerza gravitacional constante, y limitado por un fondo rígido y una superficie libre. A pesar de ser conocidas desde hace más de 150 años, las ecuaciones asociadas a la formulación de Stokes no tienen aún una solución establecida para el caso general. Por este motivo se han desarrollado formulaciones específicas para ser aplicadas en diferentes casos en los cuales algunas suposiciones pueden simplificar el problema. Para el caso de los tsunamis se requiere solucionar la formulación de Stokes únicamente para el caso de ondas largas con amplitudes bajas en la superficie libre, propagándose en una dirección, en un medio incompresible y de profundidad somera y constante. Diferentes formulaciones asociadas a estas condiciones han sido propuestas. Entre las más estudiadas se encuentran las propuestas por Boussinesq (1871), Kortewg y deVries (1895), Kadomtsev y Petviashvili (1970) y Camassa y Holm (1993).

Usando el marco conceptual propuesto en la formulación de Kortewg y deVries (1895), el modelo dislocación de fuentes sísmicas desarrollado por Okada (1985) y las ecuaciones no lineales de propagación de ondas en aguas poco profundas, Dutykh & Dias (2007) determinaron una formulación integral para la solución del problema conjunto de generación y propagación. Esta formulación permite determinar la amplitud del agua sobre su nivel normal, la velocidad de la onda y la presión en el fondo del océano, para diferentes instantes y en diferentes ubicaciones geográficas alrededor del epicentro, en función de las características geométricas de la fuente sísmica, el espesor medio del océano, y una función de dislocación que define la manera como se genera el desplazamiento cosísmico en la fuente.

$$\eta(x, y, t) = \frac{1}{(2\pi)^2} \iint_{\mathbb{R}^2} \frac{e^{i(kx+ly)}}{\cosh(mH)} \int_0^t (1 - \omega \sin \omega \tau) \bar{\zeta}(k, l, t - \tau) d\tau dk dl \quad \text{Ecuación 42}$$

En donde k y l son los números de onda en las direcciones x y y respectivamente, $m = \sqrt{k^2 + l^2}$, $\omega = \sqrt{gm \tanh(mH)}$, H es el espesor del océano, y $\bar{\zeta}$ es la transformada combinada de Fourier y Laplace de la función de deformación del lecho marino. La Figura 134 muestra ilustra el resultado del modelo de Dutykh & Dias (2007) aplicado al sismo de la Figura 134.

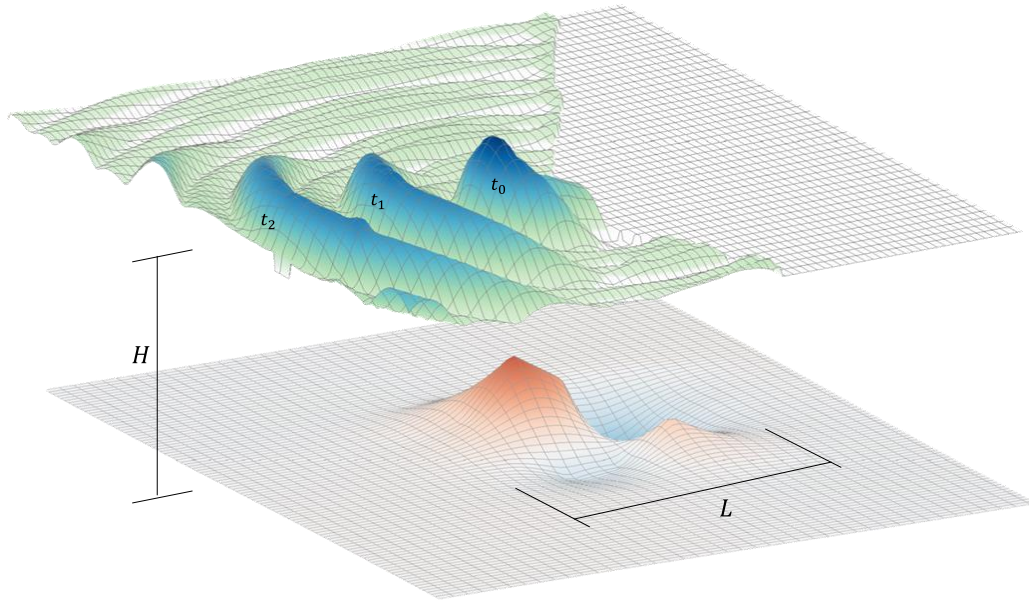


Figura 134. Simulación del progreso de la onda de sobreelevación η , en 3 tiempos diferentes (t_0 , t_1 , t_2), para el sismo de la Figura 133, calculada con el modelo de Dutykh & Dias (2007).

Arribo

En mar abierto la amplitud de las ondas de tsunami es baja y prácticamente imperceptible. Sin embargo, al acercarse a la costa la amplitud aumenta significativamente hasta romper en forma de una ola destructiva. Esta amplificación se debe a la disminución de la profundidad del agua en las zonas costeras.

En mar abierto, las ondas gravitacionales viajan a una velocidad igual a $\sqrt{gH}$, en donde H es la profundidad del lecho marino y g la aceleración de la gravedad. Como se trata de ondas largas, es decir, que tienen longitudes de onda muy grandes en comparación a la profundidad del medio de tránsito, la velocidad de avance se mantiene prácticamente constante. A medida que la profundidad del lecho marino empieza a disminuir, también disminuye la velocidad del frente de onda. Sin embargo, la parte posterior de la onda se encuentra una longitud de onda mar adentro con relación al frente de onda, por lo cual su velocidad sigue siendo controlada por la profundidad del lecho marino en ese punto. En consecuencia, la longitud de onda empieza a recortarse, es decir, que la onda se comprime horizontalmente para compensar el cambio de velocidad. Debido a la muy baja compresibilidad del agua, la amplitud de la superficie del mar aumenta en el frente de onda por efecto de la compresión, lo cual genera olas de gran tamaño que rompen contra las zonas costeras.

En la actualidad existen modelos analíticos para la solución del arribo de las ondas de tsunami a la costa. Algunos de estos modelos han sido ampliamente usados para determinar alturas de ola por efecto de la ocurrencia de tsunamis. Estas formulaciones se basan en las siguientes suposiciones:

- Los efectos del rompimiento de olas en la costa son despreciables.
- Los efectos de la disipación de energía en el fondo son despreciables.

- Se asume reflexión total de las ondas en la línea de costa. Esto quiere decir que se considera que la línea de costa no se modifica en ningún momento.
- Se consideran ondas gravitacionales periódicas, es decir, que se ignora la naturaleza transiente de los tsunamis.
- Se asume que la pendiente batimétrica es constante.

Siguiendo estos preceptos, es posible calcular la altura de la ola en la línea de costa y su velocidad de ingreso, por medio de la ecuación de Madsen & Fuhrman (2007),

$$\frac{R}{a_0} = 2\pi^{3/4} \left(\frac{a_0}{h_0} \right)^{-1/4} \xi^{-1/2} \quad \text{Ecuación 43}$$

$$\frac{U}{\sqrt{g \cdot a_0}} = \frac{\sqrt{\pi}}{\xi} \left(\frac{R}{a_0} \right) \quad \text{Ecuación 44}$$

en donde R es la amplitud de la ola en la línea de costa, U es la velocidad de ingreso de la ola, a_0 es la amplitud en la superficie libre mar adentro, h_0 es la profundidad del lecho marino mar adentro, y ξ es el *parámetro de surf*, también conocido como *número de Iribarren*, y definido por Iribarren & Nogales (1948) como,

$$\xi \equiv \frac{s}{\sqrt{\frac{h_0}{L}}} \quad \text{Ecuación 45}$$

En donde L es la longitud de onda de tsunami en mar abierto y s la pendiente batimétrica promedio. Para valores bajos de s , las ecuaciones anteriores tienen a infinito. Esto quiere decir que cuando la batimetría es extremadamente pendiente la solución deja de ser válida, básicamente debido a que la amplitud de las olas no puede crecer indefinidamente. Esta característica fue definida por Carrier y Greenspan (1958) como el *criterio de rompimiento*. Madsen y Fuhrman (2007) describieron el criterio de rompimiento en función del número de Iribarren como:

$$\frac{R}{a_0} \leq \frac{R_{max}}{a_0} = \frac{1}{\pi} \xi^2 \quad \text{Ecuación 46}$$

en donde R_{max} corresponde a la máxima amplitud que pueden alcanzar las olas para las características implícitas en ξ . La Figura 135 muestra la variación de las funciones de amplitud (Ecuación 43) y velocidad (Ecuación 44) con el número de Iribarren y la manera como interviene el criterio de rompimiento.

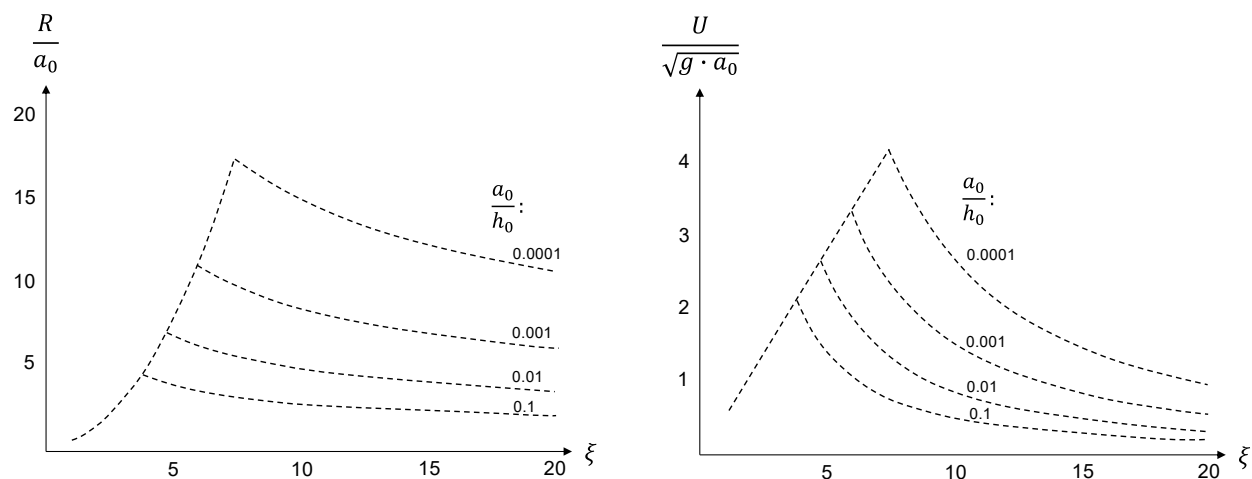


Figura 135. Variación de la amplitud de ola R y la velocidad de ingreso U con el número de Iribarren, incluyendo como límite de aplicación el criterio de rompimiento. Tomado de Madsen y Fuhrman (2007)

El tránsito hidráulico de la amplitud de ola se modelará haciendo uso el marco conceptual del modelo iterativo de clasificación de celdas mojadas y secas que se presentó en el Anexo A.5, eliminando el término asociado al cortante superficial del viento que no aplica en este contexto.

A.7 CONSIDERACIONES SOBRE LA VALIDACIÓN DE RESULTADOS DE AMENAZA

Limitaciones del proceso de validación

La validación de modelos probabilistas de amenaza, como los desarrollados en este trabajo, enfrenta limitaciones inherentes y ampliamente reconocidas, particularmente cuando se intenta realizar a escala nacional. Estas limitaciones no son específicas de este estudio, sino que responden a restricciones estructurales en la disponibilidad, calidad y consistencia de la información, que afectan la mayoría de los ejercicios de modelación de amenazas a gran escala a nivel mundial. En muchos países, incluido el caso aquí considerado, la infraestructura de observación y los registros históricos necesarios para sustentar una validación rigurosa y estadísticamente robusta de los campos de intensidad de la amenaza son incompletos, fragmentados o inexistentes. En consecuencia, la validación directa de los resultados de amenaza probabilista, entendida como la comparación sistemática entre intensidades modeladas y observadas en el espacio y el tiempo, no resulta factible en la práctica.

Un proceso de validación robusto requeriría, en primer lugar, la disponibilidad de mediciones georreferenciadas de la intensidad de la amenaza, expresadas en la misma métrica utilizada en el modelo. En el caso de inundaciones, esto corresponde típicamente a variables como la profundidad del agua, la velocidad de flujo o la extensión de la inundación; en el caso de sequías, a indicadores estandarizados como el SPI o el SPEI. Estas observaciones deberían estar disponibles en múltiples ubicaciones a lo largo del territorio y para múltiples eventos independientes. Sin embargo, en la práctica, este tipo de información rara vez existe con la densidad espacial y continuidad temporal requeridas. Las redes hidrométricas suelen ser limitadas y concentradas en regiones específicas, mientras que los levantamientos post-evento de profundidad o extensión de inundaciones no se realizan de manera sistemática. De forma similar, los indicadores de sequía suelen derivarse a resoluciones espaciales gruesas o mediante aproximaciones indirectas, lo que dificulta su comparación directa con los resultados del modelo.

Adicionalmente, es necesario contar con una caracterización consistente y espacialmente detallada del forzamiento meteorológico asociado a los eventos detonantes. Esto incluye, por ejemplo, campos de precipitación de alta resolución, trayectorias y campos de viento de ciclones tropicales, o anomalías de temperatura durante periodos prolongados. Dichos conjuntos de datos deben ser coherentes con las escalas espaciales y temporales de los fenómenos modelados. No obstante, en muchos contextos, la información meteorológica disponible no alcanza la resolución requerida o presenta niveles significativos de incertidumbre, especialmente para eventos históricos anteriores a la disponibilidad de sistemas modernos de observación o registros satelitales. Esta limitación dificulta establecer una relación confiable entre el forzamiento observado y las intensidades de amenaza resultantes.

Otro requisito fundamental para la validación es la existencia de un conjunto suficientemente amplio y diverso de eventos históricos para los cuales se disponga tanto de información de intensidad como de forzamiento. Estos eventos deben proporcionar una cobertura espacial adecuada del área de estudio, abarcando la totalidad de los contextos geográficos y climáticos relevantes representados en el modelo. Por ejemplo, la validación de inundaciones costeras requeriría observaciones a lo largo de toda la línea de costa, mientras que la validación de inundaciones fluviales debería cubrir todas las cuencas y regímenes hidrológicos principales. En la realidad, los registros históricos tienden a concentrarse en zonas con mayor

densidad poblacional o importancia económica, dejando amplias regiones sin información confiable. Esta falta de cobertura espacial introduce incertidumbres adicionales y limita la posibilidad de realizar una validación integral.

Igualmente importante es la necesidad de contar con un número suficientemente grande de eventos para poder validar las características probabilistas de la amenaza, y no únicamente eventos individuales. Los modelos probabilistas buscan reproducir la distribución estadística de la intensidad en cada ubicación, incluyendo su valor medio, su variabilidad y su comportamiento en los extremos. La validación de estos momentos estadísticos requiere series temporales largas y consistentes de observaciones, las cuales rara vez están disponibles. Incluso en contextos con mayor disponibilidad de datos, el número de eventos extremos observados suele ser insuficiente para caracterizar adecuadamente las colas de la distribución, que son precisamente las de mayor relevancia para la evaluación del riesgo.

Ante esta realidad, se realizó una comparación netamente visual entre la información cartográfica existente y publicada por la CNE, y los resultados de amenaza obtenidos en esta consultoría, haciendo la salvedad que la información provista por la CNE no corresponde a evaluaciones probabilistas, por lo cual ambos resultados no son realmente comparables. No se realiza una comparación para la inundación pluvial debido a que, para esta amenaza, no se encontró cartografía existente.

Inundación fluvial

La CNE cuenta con mapas de amenaza por inundación fluvial para todos los cantones de Costa Rica, en donde se presentan zonas con potencial de inundación, y que esencialmente corresponden a rondas hídricas alrededor de cauces principales. Estos mapas se compararon con la evaluación probabilista de la amenaza realizada en esta consultoría. La Figura 136 muestra la comparación entre el mapa de zonas con potencial de inundación de la CNE¹⁰, con el mapa de amenaza por inundación fluvial de 1,000 años de periodo de retorno.

El mapa de zonas con potencial de inundación muestra una delimitación amplia y continua de áreas susceptibles a inundarse, siguiendo principalmente la red hidrográfica y sus planicies asociadas, con una cobertura de carácter cualitativo. En contraste, el mapa de amenaza probabilista presenta una distribución en la cual la extensión y severidad de la inundación responden a procesos hidrológicos e hidráulicos modelados explícitamente. Esto se refleja en patrones espaciales coherentes con la dinámica de cuencas, incluyendo zonas donde la amenaza es más intensa o extensa y otras donde, aun existiendo cercanía a cauces, la inundación no se materializa bajo ese nivel de probabilidad. En consecuencia, ambos mapas no deben coincidir en sus patrones espaciales y, por lo tanto, compararlos como si fueran equivalentes puede llevar a interpretaciones erróneas sobre la extensión o severidad real de la amenaza de inundación.

A pesar de sus diferencias metodológicas, ambos mapas muestran coincidencias claras en la identificación de los principales patrones espaciales de la inundación en Costa Rica. Se observa consistencia en la localización de áreas extensas de afectación en regiones conocidas por su recurrencia de eventos, como las llanuras del Caribe y ciertos sectores del Pacífico, lo que sugiere que ambos capturan de manera coherente las zonas donde las condiciones físicas favorecen la acumulación y desbordamiento de agua.

¹⁰ Tomado del portal web: <https://cnecr.maps.arcgis.com/>

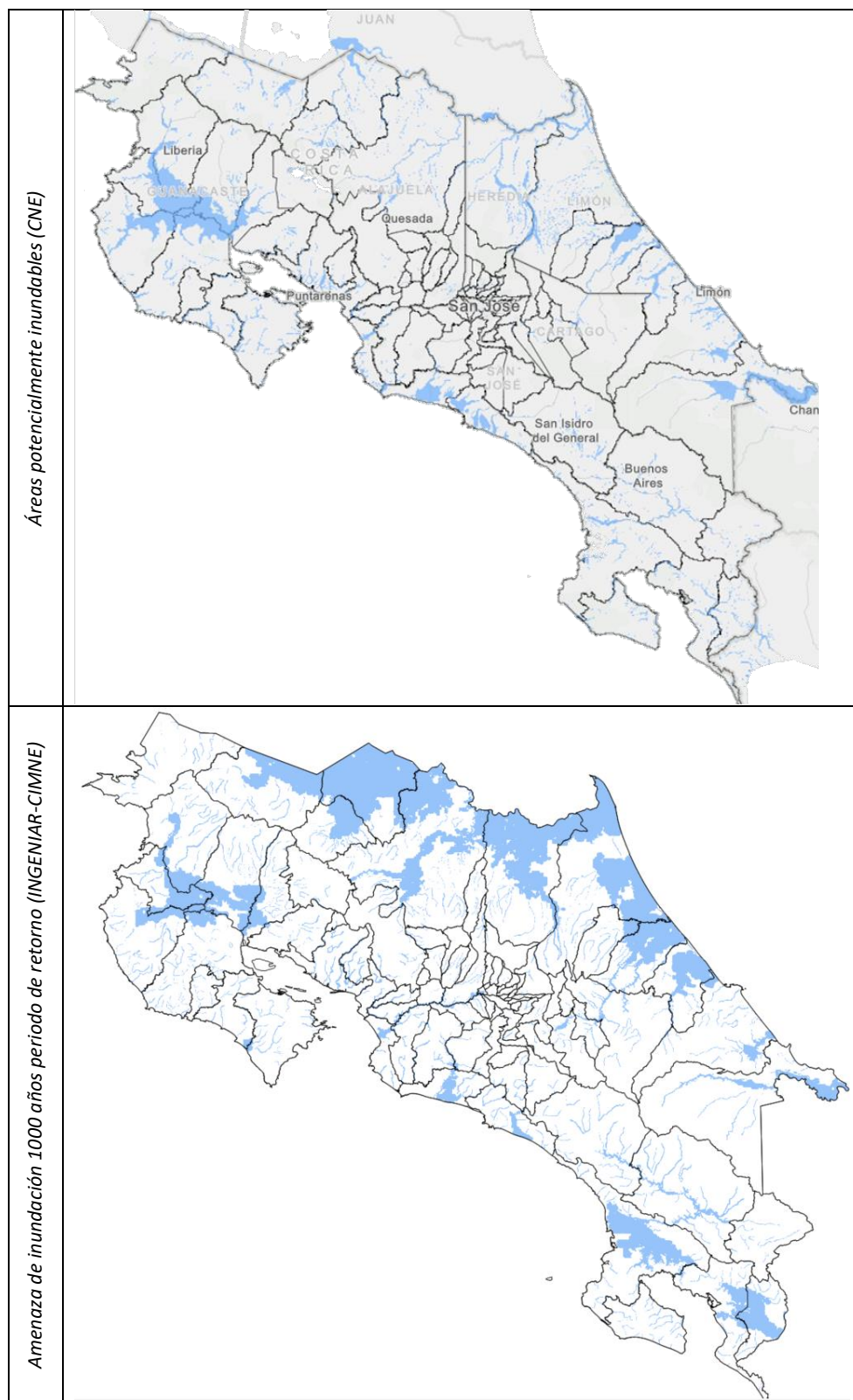


Figura 136. Comparación entre el mapa de zonas con potencial de inundación (CNE) y el mapa de amenaza por inundación fluvial de 1,000 años de periodo de retorno (INGENIAR-CIMNE)

Inundación costera

En el caso de la inundación costera, la información disponible de evaluaciones previas de amenaza o eventos históricos reconocidos es mucho más escasa. Si bien han existido eventos importantes con afectaciones costeras conocidas, como aquellas causadas por el Huracán Otto o la Tormenta Tropical Nate, no se cuenta con registros en terreno de la extensión de las inundaciones.

La CNE cuenta con un mapa de zonas costeras inundables en Costa Rica¹¹, el cual se compara con el mapa de amenaza por inundación costera de 1,000 años de periodo de retorno calculado en esta consultoría. Las comparaciones se presentan en la Figura 137 y Figura 138, para 2 sectores arbitrariamente escogidos en la costa Pacífica y Caribe. Como puede observarse, el resultado obtenido de la evaluación probabilista complementa los mapas preexistentes de zonas inundables, al considerar la posibilidad de ocurrencia de múltiples eventos no vistos en la historia. Geográficamente la coincidencia de ambos mapas es notable por razones obvias, pues se trata de inundaciones limitadas al litoral.

De manera similar a lo observado para las inundaciones fluviales, no se espera que ambos mapas presenten patrones espaciales coincidentes; en consecuencia, tratarlos como si fueran equivalentes puede inducir interpretaciones incorrectas respecto a la extensión o la intensidad real de la amenaza por inundación costera.



Figura 137. Comparación entre el mapa de zonas costeras inundables (CNE) y el mapa de amenaza por inundación costera de 1,000 años de periodo de retorno (INGENIAR-CIMNE), en un sector arbitrario de la costa Pacífica.

¹¹ Tomado del portal web: <https://cne.cr/maps.arcgis.com/>

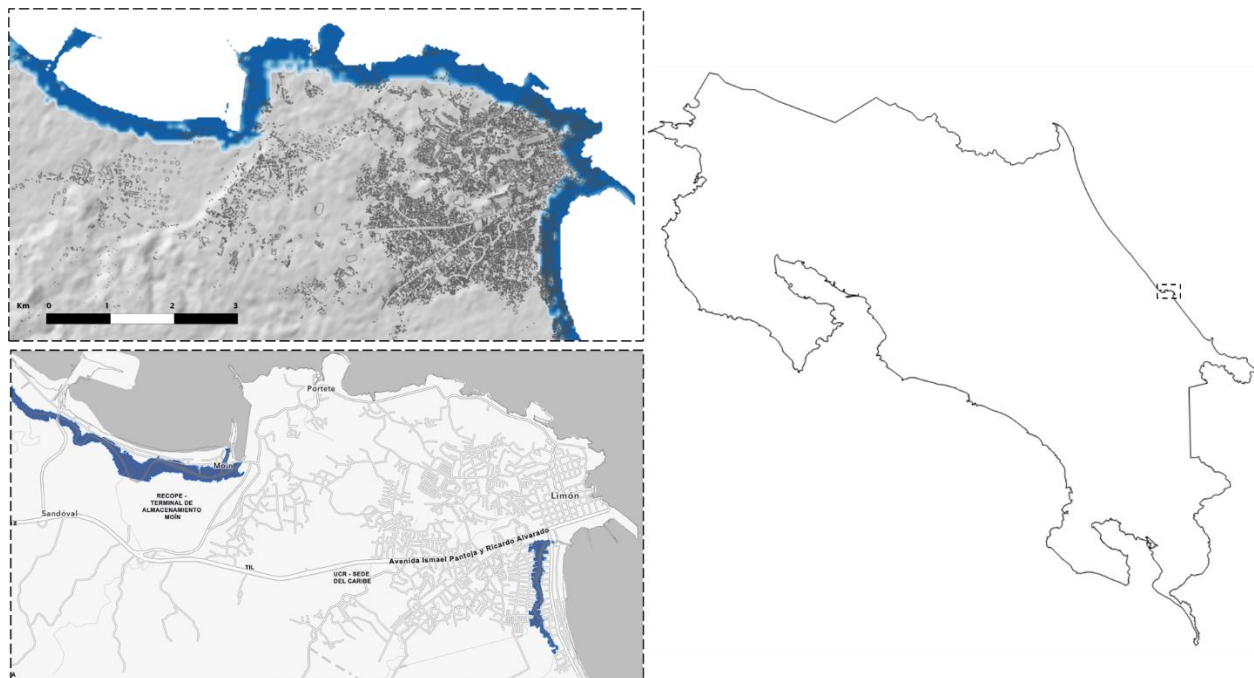


Figura 138. Comparación entre el mapa de zonas costeras inundables (CNE) y el mapa de amenaza por inundación costera de 1,000 años de periodo de retorno (INGENIAR-CIMNE), en un sector arbitrario de la costa Caribe.

Sequía

Para el caso de la sequía, no se identificó cartografía oficial equivalente que permitiera una comparación directa con mapas de indicadores como SPI o SPEI. En consecuencia, la validación se abordó de manera indirecta, contrastando los patrones espaciales de pérdidas anuales esperadas (PAE) a nivel cantonal con los cantones incluidos en las declaratorias de emergencia por déficit hídrico de 2019 (Decretos Ejecutivos 41852 y 41944), lo cual se ilustra en la Figura 139.

Este ejercicio no constituye una comparación estricta ni equivalente, ya que pone en relación resultados de riesgo modelado con registros administrativos de impactos, pero sí permite obtener una referencia cualitativa sobre la coherencia espacial de los resultados. Es importante destacar que en este caso ya no se está comparando amenaza, sino consecuencias y, por ende, riesgo, lo que introduce diferencias conceptuales adicionales que deben ser consideradas en la interpretación.

Los resultados de la evaluación del riesgo acá presentados corresponden a los obtenidos para el Proyecto Operacional 2: Riesgo de inundación y sequía para pequeños y medianos productores agropecuarios. Se presentan las PAE relativas específicamente para sequía. Mayores detalles sobre el proceso de modelación, así como el conjunto completo de resultados de riesgo, pueden consultarse en el documento: *Estimación probabilista del riesgo climático en producción de café, caña de azúcar y ganadería bovina extensiva* (INGENIAR-CIMNE 2026 para GRMA).

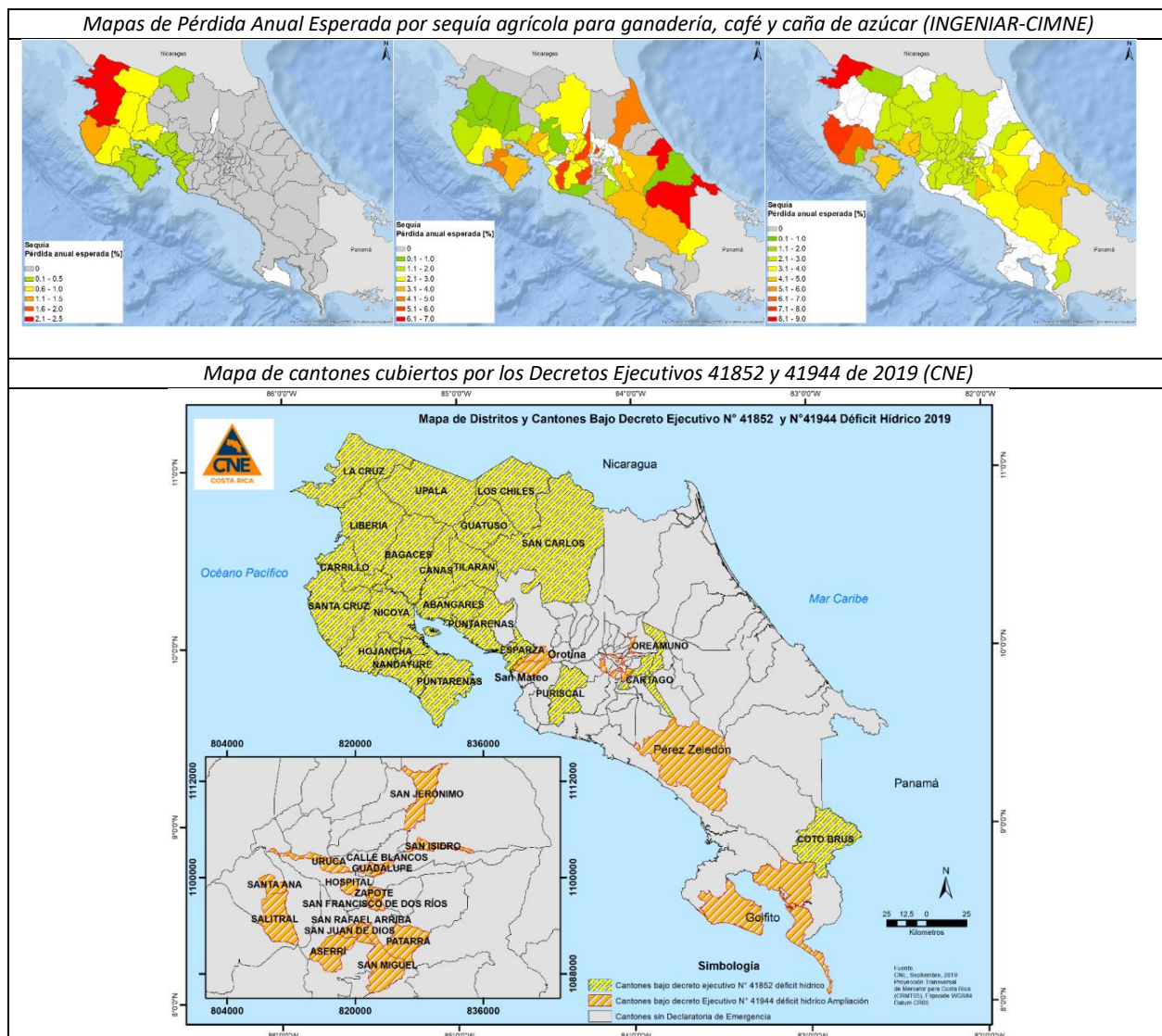


Figura 139. Comparación entre mapas de PAE en el sector agrícola (INGENIAR-CIMNE) y el mapa de cantones afectados por sequía en el 2019 (CNE).

Al comparar los mapas de PAE para ganadería, café y caña de azúcar con el mapa de cantones incluidos en las declaratorias de emergencia por déficit hídrico de 2019, se observa que, en términos generales, los resultados probabilistas logran reproducir patrones espaciales coherentes con las zonas efectivamente afectadas durante ese evento. En particular, existe una correspondencia notable en regiones del Pacífico Norte y partes del Pacífico Central, donde tanto los valores elevados de PAE como la inclusión en los decretos de emergencia reflejan una mayor susceptibilidad a impactos por sequía. Asimismo, algunas áreas del sur del país muestran señales consistentes entre ambos enfoques, aunque con variaciones dependiendo del sector productivo analizado, lo cual es esperable dada la distinta sensibilidad de cada actividad frente al déficit hídrico.

No obstante, esta comparación debe interpretarse con cautela, ya que los mapas de PAE no representan un evento específico, sino el resultado de la simulación de miles de sequías factibles, integrando su frecuencia e impacto esperado en el tiempo. En cambio, el mapa de cantones cubiertos por decretos de emergencia es específico de un único episodio particular, el evento de 2019, y está condicionado por las condiciones climáticas, sociales y productivas de ese momento. Por esta razón, aunque la coincidencia espacial observada aporta confianza en la capacidad del modelo para capturar patrones estructurales del riesgo, ambos productos no son directamente comparables, pues uno refleja riesgo promedio de largo plazo y el otro una materialización puntual de ese riesgo.

Uso de resultados de riesgo como mecanismo de validación

Las comparaciones presentadas ilustran la dificultad propia de la implementación de procesos de validación sobre estimaciones probabilistas de la amenaza. Si bien es posible visualizar similitudes entre las fuentes de información existentes, asociadas típicamente a eventos anteriores, y los resultados de amenaza, dicha comparación no es directa y, por lo tanto, no es suficiente para emitir juicios sobre la pertinencia o no de una modelación probabilista de la amenaza. Es más, mucha de la información reportada se refiere típicamente a las consecuencias, y no a las intensidades de los fenómenos, por lo cual tiene más sentido comparar en términos del riesgo, y no de las amenazas, de forma similar a como se presenta en este documento para el caso de la sequía, pero no comparando para un evento específico, sino verificando el ajuste de la relación severidad-frecuencia de las pérdidas modeladas con las pérdidas observadas.

Por lo tanto, la estrategia de validación adoptada en esta consultoría, y que se presenta en detalle en los productos de evaluación del riesgo de los proyectos que componen el programa GRMA en Costa Rica, sigue un enfoque que se centra en la evaluación del desempeño del modelo a nivel de resultados de riesgo. La validación propuesta se realiza mediante el uso del método de curvas híbridas de excedencia de pérdidas (Loss Exceedance Curves, LEC). Este enfoque utiliza la información disponible de pérdidas históricas para evaluar la capacidad del modelo de riesgo de reproducir la relación observada entre la magnitud de las pérdidas y su frecuencia de ocurrencia.

El método de LEC híbrida permite comparar el comportamiento modelado y observado de las pérdidas en el rango donde existen datos empíricos, típicamente asociados a eventos de alta frecuencia y pérdidas bajas a moderadas. Al lograr consistencia en este dominio, se fortalece la confianza en la representación de los procesos subyacentes en el modelo. A partir de esta base, el enfoque proporciona un marco estructurado para extrapolar la relación frecuencia-pérdida hacia el dominio de eventos de baja frecuencia y alto impacto, es decir, eventos extremos o catastróficos que no están representados en los registros históricos.

Es importante destacar que la validación a nivel de riesgo captura de manera implícita el comportamiento conjunto de todos los componentes del modelo. La curva de excedencia de pérdidas refleja no solo la calidad del modelo de amenaza, sino también la adecuación de la caracterización de la exposición y el realismo de las funciones de vulnerabilidad. Si bien este enfoque no permite aislar condiciones específicas en componentes individuales, sí garantiza que el modelo sea evaluado en términos de su objetivo final: la estimación del riesgo.

A.8 CONJUNTO DE DATOS DE MODELOS DE AMENAZAS CLIMÁTICAS

Como parte de los productos incluidos en este entregable, se estableció un repositorio web (Drive) para alojar todos los archivos de amenazas climáticas para Costa Rica, incluyendo sequía, inundación fluvial y pluvial, e inundación costera (por ciclones y tsunamis). Este repositorio compila los entregables D2.1a, D2.1b, D2.1c, D2.1d, D2.1e, D2.1f, D2.1g, D2.2a, D2.2b, D2.2c, D2.2d, D2.2e y D2.2f.

A continuación, se presenta la lista de los archivos que componen este conjunto de datos.

El enlace para acceder al dataset es:

<https://onedrive.live.com/?redeem=aHR0cHM6Ly8xZHJ2Lm1zL2YvYy85ZjZmNTQ4ZGFkMDc1MzQzL0VyTWNDRIkV3psTmdaZ0k2YTk5eWdNQIBINERfYThVTFV4QnN3Y2RFZi1ta3c%5FZT1qQ2RIZzU&id=9F6F548DAD075343%21s1a0ebc5a7f4a47f5abb1fa31022ed9ba&cid=9F6F548DAD075343&sb=name&sd=1>

Amenaza de inundación

Inundación Fluvial

Este directorio contiene archivos que representan la profundidad del agua, expresada en metros, para diferentes períodos de retorno.

File	Format	
Fluvial 100	.grd	.tif
Fluvial 1000	.grd	.tif
Fluvial 200	.grd	.tif
Fluvial 25	.grd	.tif
Fluvial 50	.grd	.tif
Fluvial 500	.grd	.tif

Los archivos con extensión *.grd son archivos de datos ráster generados y utilizados por el software Surfer, desarrollado por Golden Software. Estos archivos contienen una malla regular de valores numéricos que representan una variable continua en el espacio, típicamente utilizada para modelar superficies topográficas, distribuciones geofísicas o resultados de interpolaciones espaciales.

Los archivos *.tif representan la misma información espacial y los mismos valores que los archivos *.grd y se proporcionan en dos sistemas de referencia espacial: WGS 84 y CR-SIRGAS / CRTM05.

Inundación Heredia

Cauces

Los archivos incluidos corresponden a datos espaciales en formato shapefile (*.shp), georreferenciados en dos sistemas de coordenadas, que representan los cauces principales de Heredia.

File	Format
QuebradaSeca	.shp
QuebradaSeca_CRTM05	.shp

File	Format
RíoBermudez	.shp
RíoBermudez_CRTM05	.shp
RíoBurio	.shp
RíoBurio_CRTM05	.shp
RíoPirro	.shp
RíoPirro_CRTM05	.shp

Cuencas

Los archivos corresponden a datos espaciales en formato shapefile (*.shp), georreferenciados en dos sistemas de coordenadas, que representan las cuencas de los cauces principales de Heredia.

File	Format
Quebrada_Seca	.shp
QuebradaSeca_CRTM05	.shp
Río_Bermudez	.shp
Río_Bermudez_CRTM05	.shp
Río_Burio	.shp
Río_Burio_CRTM05	.shp
Río_Pirro	.shp
Río_Pirro_CRTM05	.shp

DEM

Estos archivos representan la elevación del terreno, expresada en metros sobre el nivel del mar, con una resolución espacial de 5 m.

File	Format
DEM_Heredia	.grd .tif

Los archivos se proporcionan en dos sistemas de referencia espacial: WGS 84 y CR-SIRGAS / CRTM05.

Inundación

Este directorio contiene archivos que representan la profundidad del agua, expresada en metros, para diferentes períodos de retorno.

File	Format
Tr100	.grd .tif
Tr1000	.grd .tif
Tr250	.grd .tif
Tr50	.grd .tif
Tr500	.grd .tif

Inundación Pluvial

Este directorio contiene archivos que representan la profundidad del agua, expresada en metros, para diferentes períodos de retorno.

File	Format	
Pluvial 100	.grd	.tif
Pluvial 1000	.grd	.tif
Pluvial 20	.grd	.tif
Pluvial 200	.grd	.tif
Pluvial 50	.grd	.tif
Pluvial 500	.grd	.tif

Modelo de elevación digital (DEM)

Estos archivos representan la elevación del terreno, expresada en metros sobre el nivel del mar, con una resolución espacial de 12.5 m.

File	Format
demCR	.tif
Dem_CR-SIRGAS	.tif

Amenaza de Inundación Costera

Amenaza

File	Format
Marea_CC	.shp
Marea_CC_CRTM05	.shp
Marea_Clima_base	.shp
Marea_Clima_base_CRTM05	.shp
Tsunami CR	.shp
Tsunami CR_CRTM05	.shp

Marea

Este directorio contiene los mapas de amenaza uniforme de altura de *run-up* generados por marejada ciclónica a lo largo de la costa de Costa Rica, para períodos de retorno de 50, 100, 250, 500 y 1000 años, bajo el escenario de clima base.

File	Format
Coastal 100 East	.grd
Coastal 100 West	.grd
Coastal 1000 East	.grd
Coastal 1000 West	.grd
Coastal 250 East	.grd
Coastal 250 West	.grd
Coastal 500 East	.grd
Coastal 500 West	.grd
CRTM05_Coastal 100 East	.tif
CRTM05_Coastal 100 West	.tif
CRTM05_Coastal 1000 East	.tif
CRTM05_Coastal 1000 West	.tif

File	Format
CRTM05_Coastal 250 East	.tif
CRTM05_Coastal 250 West	.tif
CRTM05_Coastal 500 East	.tif
CRTM05_Coastal 500 West	.tif
WGS84_Coastal 100 East	.tif
WGS84_Coastal 100 West	.tif
WGS84_Coastal 1000 East	.tif
WGS84_Coastal 1000 West	.tif
WGS84_Coastal 250 East	.tif
WGS84_Coastal 250 West	.tif
WGS84_Coastal 500 East	.tif
WGS84_Coastal 500 West	.tif

Batimetría

Este directorio contiene los datos batimétricos utilizados en el proyecto. El dataset corresponde a la versión 2024 de GEBCO (General Bathymetric Chart of the Oceans), que proporciona un modelo batimétrico global continuo con una resolución espacial de 15 segundos de arco, equivalente a aproximadamente 500 metros en el ecuador.

File	Format
Batimetria_CRI	.grd
gebco_2024_CRTM05	.tif
Gebco_2024_n12.0_s8.0_w-86.0_w-82.0	.tif

Topografía

Este directorio contiene los datos topográficos utilizados en el proyecto. La topografía corresponde a un dataset ráster con una resolución espacial de 12.5 m.

File	Format
DEM_CR_30m	.tif
DEM_CR_30m_CRTM05	.tif

Trayectorias

Este directorio contiene las trayectorias para las condiciones de clima base y los escenarios de cambio climático.

Amenaza de sequía

Indicadores de sequía

El presente dataset incluye dos archivos *.csv que contienen las series temporales de los indicadores de sequía meteorológica SPI-12 ("SPI 12 Simulated") y SPEI-12 ("SPEI 12 Simulated"), calculados bajo condiciones de clima base.

File	Format
SPEI 12 Simulated	.csv

SPI 12 Simulated	.csv
------------------	------

Mapas de amenaza uniforme

El dataset incluye mapas de amenaza uniforme asociados a los indicadores de sequía SPI-12 y SPEI-12, calculados a una escala temporal de 12 meses. Los archivos se presentan en formato ráster GeoTIFF (*.tif) y contienen la representación espacial de los valores del índice correspondientes a diferentes períodos de retorno.

SPEI 12 Clima base

File	Format
speiTR10	.tif
speiTR10_CR-SIRGAS	.tif
speiTR100	.tif
speiTR100_CR-SIRGAS	.tif
speiTR1000	.tif
speiTR1000_CR-SIRGAS	.tif
speiTR2	.tif
speiTR2_CR-SIRGAS	.tif
speiTR25	.tif
speiTR25_CR-SIRGAS	.tif
speiTR250	.tif
speiTR250_CR-SIRGAS	.tif
speiTR5	.tif
speiTR5_CR-SIRGAS	.tif
speiTR50	.tif
speiTR50_CR-SIRGAS	.tif
speiTR500	.tif
speiTR500_CR-SIRGAS	.tif

SPI 12 Clima base

File	Format
spiTR10	.tif
spiTR10_CR-SIRGAS	.tif
spiTR100	.tif
spiTR100_CR-SIRGAS	.tif
spiTR1000	.tif
spiTR1000_CR-SIRGAS	.tif
spiTR2	.tif
spiTR2_CR-SIRGAS	.tif
spiTR25	.tif
spiTR25_CR-SIRGAS	.tif

File	Format
spiTR250	.tif
spiTR250_CR-SIRGAS	.tif
spiTR5	.tif
spiTR5_CR-SIRGAS	.tif
spiTR50	.tif
spiTR50_CR-SIRGAS	.tif
spiTR500	.tif
spiTR500_CR-SIRGAS	.tif

Modelación del Forzamiento Meteorológico

File	Format
Stations	.csv
Stations	.shp
BaseSimulations	.rar
CCSimulations	.rar

La carpeta comprimida *.rar contiene archivos correspondientes a 1.000 años de simulaciones climáticas diarias tanto para condiciones de clima base como para escenarios de cambio climático.

Anexo 2

Cada archivo contiene la comparación estadística diaria, mensual y anual entre la estación de tierra más cercana y el punto correspondiente en la malla climática para precipitación y temperatura.

File	Format
ppt_AEROPJUANSANTAMARIA_vs_P66	.xlsx
ppt_AEROPLIBERIAOESTE_vs_P30	.xlsx
ppt_AEROPLIMON_vs_P71	.xlsx
ppt_ALTAMIRA_vs_97	.xlsx
ppt_CANTAGALLO_vs_P48	.xlsx
ppt_CHIRRIPO_vs_P86	.xlsx
ppt_CIGEFL_vs_P67	.xlsx
ppt_COMANDOLOSCHILES_vs_P16	.xlsx
ppt_FABIOAUDRIT_vs_P66	.xlsx
ppt_FINCALACEIBA_vs_P52	.xlsx
ppt_HDAMOJICA_vs_P42	.xlsx
ppt_HITOYCERERE_vs_P80	.xlsx
ppt_IMNARANJUEZ_vs_P67	.xlsx
ppt_ITCRCARTAGO_vs_P68	.xlsx
ppt_LAREBUSCA_vs_P46	.xlsx
ppt_LASBRISSASSABALITO_vs_P98	.xlsx
ppt_PINDECO_vs_P91	.xlsx

File	Format
ppt_RECOPELAGARITA_vs_P66	.xlsx
ppt_RECOPEOCHOMOGO_vs_P68	.xlsx
ppt_SANTACRUZ_vs_P40	.xlsx
ppt_SIXAOLA_vs_P82	.xlsx
ppt_UPALA_vs_P23	.xlsx
tmed_AEROPJUANSANTAMARIA_vs_P66	.xlsx
tmed_AEROLIBERIAOESTE_vs_P30	.xlsx
tmed_AEROLIMON_vs_P71	.xlsx
tmed_ALTAMIRA_vs_97	.xlsx
tmed_CANTAGALLO_vs_P48	.xlsx
tmed_CHIRRIPO_vs_P86	.xlsx
tmed_CIGEFL_vs_P67	.xlsx
tmed_COMANDOLOSCHILES_vs_P16	.xlsx
tmed_FABIOBAUDRIT_vs_P66	.xlsx
tmed_FINCALACEIBA_vs_P52	.xlsx
tmed_HDAMOJICA_vs_P42	.xlsx
tmed_HITOYCERERE_vs_P80	.xlsx
tmed_IMNARANJUEZ_vs_P67	.xlsx
tmed_ITCRCARTAGO_vs_P68	.xlsx
tmed_LAREBUSCA_vs_P46	.xlsx
tmed_LASBRISSASSABALITO_vs_P98	.xlsx
tmed_PINDECO_vs_P91	.xlsx
tmed_RECOPELAGARITA_vs_P66	.xlsx
tmed_RECOPEOCHOMOGO_vs_P68	.xlsx
tmed_SANTACRUZ_vs_P40	.xlsx
tmed_SIXAOLA_vs_P82	.xlsx
tmed_UPALA_vs_P23	.xlsx

Metadatos RDLS

Este directorio contiene los metadatos siguiendo el estándar Risk Data Library, proporcionando información estructurada para describir, organizar y asegurar la consistencia de los conjuntos de datos utilizados en el proyecto.

File	Format
Haz_CoastalFlood	.json
Haz_Drought	.json
Haz_Flood_fluvial	.json
Haz_Flood_Heredia	.json
Haz_Flood_pluvial	.json

El archivo *.json puede contener información relacionada con amenaza, exposición, vulnerabilidad o pérdidas, dependiendo del tipo de datos representados dentro del proyecto.