

INFORME DE INICIO

MARZO 2025



Preparado para



InsuResilience
Solutions Fund

Preparado por



CIMNE^R

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
Edifici C1 Campus Nord UPC
C/ Gran Capità, S/N 08034
Barcelona, España
www.cimne.com



Número de producto: INGENIAR-CIMNE-GRMA-01-v2

Citar como: Cardona, O.D., Bernal, G., Villegas, C., Rincón, D., Gonzalez, D., Grajales, S., Herrera, S., Molina, J. F., Acosta, M., Carreño, M.L., Marulanda, M.C., Marulanda, P., Brenes, A (2025). Inception Report– Risk Assessment and Capacity Building in Costa Rica. Global Risk Modelling Alliance – SUGESE.

TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN.....	9
2	PLAN DE TRABAJO.....	11
2.1	PROYECTO ESTRATÉGICO: DEMOSTRACIÓN DE MÉTODOS DE EVALUACIÓN DEL RIESGO PARA INFRAESTRUCTURA CRÍTICA EN HEREDIA.	11
2.2	PROYECTO OPERACIONAL 1: EVALUACIÓN DEL RIESGO DE DESASTRES Y CLIMÁTICO EN INFRAESTRUCTURA VIAL – RUTA NACIONAL 2 AUTOPISTA PANAMERICANA (RN2)	12
2.3	PROYECTO OPERACIONAL 2: RIESGO DE INUNDACIÓN Y SEQUÍA PARA PEQUEÑOS Y MEDIANOS PRODUCTORES AGROPECUARIOS	14
2.4	PROYECTO OPERACIONAL 3: EVALUACIÓN DE EXPOSICIÓN Y RIESGO DE PEQUEÑOS Y MEDIANOS HOTELES Y HOSTALES DEL PROGRAMA FU-TURISMO.....	15
2.5	PROGRAMA DE CAPACITACIÓN.....	16
2.5.1	TALLERES Y REUNIONES.....	16
2.5.2	CURSO DE CAPACITACIÓN EN MODELACIÓN DEL RIESGO.....	18
2.6	ACTIVIDADES DE CONTROL Y GESTIÓN DE LA CALIDAD	32
2.6.1	PLAN DE GARANTÍA DE CALIDAD.....	32
2.6.2	SEGUIMIENTO, MONITOREO Y CONTROL DE PROYECTOS.....	33
3	ESTADO DEL CONOCIMIENTO EN AMENAZA Y RIESGO EN COSTA RICA.....	35
3.1	CAMBIO CLIMÁTICO	35
3.1.1	HISTORIA DEL ESTUDIO DE LOS EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN COSTA RICA	36
3.1.2	INSTRUMENTOS DE ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA POLÍTICA PÚBLICA	40
3.1.3	BRECHAS EXISTENTES EN CONOCIMIENTO Y GESTIÓN	43
3.2	RIESGO POR LLUVIAS INTENSAS E INUNDACIONES.....	46
3.2.1	HISTORIA DEL ESTUDIO DEL RIESGO POR LLUVIAS INTENSAS EN COSTA RICA.....	47
3.2.2	INSTRUMENTOS DE GESTIÓN DEL RIESGO DE LLUVIAS INTENSAS EN LA POLÍTICA PÚBLICA.....	48
3.2.3	BRECHAS EXISTENTES EN CONOCIMIENTO Y GESTIÓN	49
3.2.4	INUNDACIONES COSTERAS EN COSTA RICA	50
3.3	RIESGO DE SEQUÍA	51
3.3.1	HISTORIA DEL ESTUDIO DEL RIESGO POR SEQUÍA EN COSTA RICA	52
3.3.2	INSTRUMENTOS DE GESTIÓN DEL RIESGO DE SEQUÍA EN LA POLÍTICA PÚBLICA	56
3.3.3	BRECHAS EXISTENTES EN CONOCIMIENTO Y GESTIÓN	58
3.4	RIESGO POR DESLIZAMIENTOS.....	61
3.4.1	HISTORIA DEL ESTUDIO DEL RIESGO POR DESLIZAMIENTOS EN COSTA RICA	62
3.4.2	INSTRUMENTOS DE GESTIÓN DEL RIESGO DE DESLIZAMIENTOS EN LA POLÍTICA PÚBLICA	63
3.4.3	BRECHAS EXISTENTES EN CONOCIMIENTO Y GESTIÓN	64
3.5	RIESGO SÍSMICO	65

3.5.1	HISTORIA DEL ESTUDIO DEL RIESGO SÍSMICO EN COSTA RICA	66
3.5.2	INSTRUMENTOS DE GESTIÓN DEL RIESGO SÍSMICO EN LA POLÍTICA PÚBLICA	68
3.5.3	BRECHAS EXISTENTES EN CONOCIMIENTO Y GESTIÓN	70
3.6	RIESGO POR TSUNAMIS	71
3.6.1	HISTORIA DEL ESTUDIO DEL RIESGO POR TSUNAMI EN COSTA RICA.....	72
3.6.2	INSTRUMENTOS DE GESTIÓN DEL RIESGO DE TSUNAMI EN LA POLÍTICA PÚBLICA.....	74
3.6.3	BRECHAS EXISTENTES EN CONOCIMIENTO Y GESTIÓN	75
3.7	RIESGO VOLCÁNICO.....	76
3.7.1	HISTORIA DEL ESTUDIO DEL RIESGO VOLCÁNICO EN COSTA RICA.....	77
3.7.2	INSTRUMENTOS DE GESTIÓN DEL RIESGO VOLCÁNICO EN LA POLÍTICA PÚBLICA.....	78
3.7.3	BRECHAS EXISTENTES EN CONOCIMIENTO Y GESTIÓN	80
4	ESTADO DE LA INFORMACIÓN DISPONIBLE	82
4.1	CLIMA	82
4.1.1	CHIRPS	84
4.1.2	ERA5 – COPERNICUS CLIMATE CHANGE SERVICE	85
4.2	CAMBIO CLIMÁTICO	85
4.3	AMENAZA POR INUNDACIÓN A NIVEL NACIONAL.....	86
4.4	AMENAZA POR INUNDACIÓN DEL RÍO VIRILLA (CANTÓN HEREDIA)	87
4.4.1	CAUCE	87
4.4.2	TOPOGRAFÍA	88
4.5	AMENAZA SÍSMICA	89
4.5.1	MODELO RESIS II.....	90
4.5.2	CAPRA.....	91
4.5.3	MODELO ASLAC	91
4.5.4	MODELO DE AMENAZA SÍSMICA DE COSTA RICA	92
4.5.5	MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA PARA EL ÁREA METROPOLITANA DE SAN JOSÉ	93
4.6	AMENAZA POR DESLIZAMIENTOS	94
4.6.1	CATÁLOGO DE DESLIZAMIENTOS	94
4.6.2	PROYECTO DE LA ESCUELA CENTROAMERICANA DE GEOLOGÍA DE LA UCR.....	96
4.6.3	PROYECTO RECLAIMM/CEPREDENAC-NORUEGA.....	96
4.6.4	MAPAS DE AMENAZA DEL CNE.....	97
4.6.5	MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD A DESLIZAMIENTOS A PARTIR DE IMÁGENES LIDAR.....	97
4.6.6	MODELO CDRI-GIRI	97
4.7	AMENAZA POR VOLCÁN	98
4.7.1	CAPRA.....	98
4.7.2	ESTUDIOS DE PELIGRO VOLCÁNICO NACIONALES	98
4.8	AMENAZA POR SEQUÍA	100
4.8.1	INDICADORES DE SEQUÍA	105
4.8.2	MAPA DE SUELOS.....	105
4.8.3	PLANES DE CONTINGENCIA.....	107

4.8.4	MEDIDAS NAMA	108
4.9	AMENAZA POR CICLONES TROPICALES (MAREA DE TORMENTA, LLUVIA E INUNDACIÓN)	108
4.9.1	TRAYECTORIAS HISTÓRICAS	108
4.9.2	TRAYECTORIAS SIMULADAS PARA CLIMA FUTURO	108
4.9.3	BATIMETRÍA.....	109
4.9.4	TOPOGRAFÍA	109
4.9.5	PRECIPITACIONES	109
4.10	AMENAZA POR TSUNAMI.....	110
4.10.1	CAPRA.....	110
4.10.2	MODELO GAR-GIRI	111
4.10.3	BATIMETRÍA.....	112
4.11	AMENAZA POR ELEVACIÓN DEL NIVEL DEL MAR	112
4.12	ELEMENTOS EXPUESTOS – EDIFICACIONES	112
4.12.1	UBICACIÓN GEOGRÁFICA	113
4.12.2	VALOR DE REPOSICIÓN O COMPENSACIÓN	115
4.12.3	NÚMERO DE PISOS	116
4.12.4	SECTOR DE USO	118
4.12.5	SISTEMA ESTRUCTURAL	124
4.12.6	INDICADORES DE PERSONAS EN RIESGO	125
4.13	ELEMENTOS EXPUESTOS DEL SECTOR TURISMO - EDIFICACIONES	125
4.13.1	CARTOGRAFÍA – EDIFICACIONES	125
4.13.2	OPENSTREETMAP	126
4.13.3	MANUAL DE VALORES BASE UNITARIOS POR TIPOLOGÍA CONSTRUCTIVA.....	127
4.14	ELEMENTOS EXPUESTOS DEL SECTOR INFRAESTRUCTURA.....	128
4.14.1	SECTOR VIAL	129
4.14.2	SECTOR FÉRREO	129
4.14.3	SECTOR ELÉCTRICO	130
4.14.4	SECTOR DE TELECOMUNICACIONES.....	133
4.14.5	SECTOR DE ACUEDUCTO Y ALCANTARILLADO	134
4.15	ELEMENTOS EXPUESTOS DE LA RED VIAL (RN2)	137
4.15.1	LABORATORIO NACIONAL DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES – UNIVERSIDAD DE COSTA RICA (LANAMMEUCR)	137
4.15.2	ENTIDADES DEL ORDEN NACIONAL (MOPT – CONAVI	139
4.15.3	OPEN STREET MAP (OSM)	140
4.15.4	IMÁGENES SATELITALES - GOOGLE STREET VIEW	140
4.16	ELEMENTOS EXPUESTOS DEL SECTOR AGRÍCOLA (CULTIVOS).....	141
4.16.1	ENCUESTA NACIONAL AGROPECUARIA - ENA (2023).....	141
4.16.2	VI CENSO NACIONAL AGROPECUARIO (2014).....	141
4.16.3	MAPA DE COBERTURA Y USOS DE LA TIERRA DE COSTA RICA - REDD+.....	145
4.16.4	ESTUDIO DE PRÁCTICAS EFECTIVAS PARA ADAPTACIÓN DE CULTIVOS PRIORITARIOS PARA SEGUROS EN COSTA RICA 147	
4.17	ELEMENTOS EXPUESTOS DEL SECTOR PECUARIO	150

4.17.1	ENCUESTA NACIONAL AGROPECUARIA - ENA (2023).....	150
4.17.2	VI CENSO NACIONAL AGROPECUARIO (2014).....	152
4.18	VULNERABILIDAD FÍSICA DE EDIFICACIONES	153
4.18.1	CAPRA ROBOT	153
4.18.2	GAR15.....	154
4.18.3	VULNERABILIDAD PARA LA AMENAZA DE TSUNAMI.....	155
4.19	VULNERABILIDAD FÍSICA DE INFRAESTRUCTURA	155
4.20	VULNERABILIDAD FÍSICA DE LA RED VIAL	156
4.21	VULNERABILIDAD FÍSICA DE LOS CULTIVOS	158
4.22	VULNERABILIDAD DEL SECTOR PECUARIO	161
4.22.1	MAPA DE UBICACIÓN DE PASTOS	163
4.23	RESUMEN DE FUENTES DE INFORMACIÓN Y DATOS ASOCIADOS.....	164
4.23.1	CLIMA.....	164
4.23.2	CAMBIO CLIMÁTICO	165
4.23.3	AMENAZA.....	165
4.23.4	TOPOGRAFÍA.....	168
4.23.5	PROYECTO ESTRATÉGICO: DEMOSTRACIÓN DE MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE RIESGOS PARA INFRAESTRUCTURA CRÍTICA EN HEREDIA	169
4.23.6	PROYECTO OPERACIONAL 1: EVALUACIÓN DEL RIESGO DE DESASTRES Y CAMBIO CLIMÁTICO PARA LA INFRAESTRUCTURA VIAL – RUTA NACIONAL 2 CARRETERA PANAMERICANA (RN2)	173
4.23.7	PROYECTO OPERACIONAL 2: RIESGO DE INUNDACIÓN Y SEQUÍA PARA PEQUEÑOS Y MEDIANOS PRODUCTORES AGRÍCOLAS.....	174
4.23.8	PROYECTO OPERACIONAL 3: EVALUACIÓN DE LA EXPOSICIÓN Y EL RIESGO PARA PEQUEÑOS Y MEDIANOS HOTELES Y HOSTALES EN EL PROGRAMA FU-TURISMO.	175
4.24	OTRAS INICIATIVAS	176
4.24.1	CCRIF SPC.....	176
4.24.2	GLOBAL RISK ASSESSMENT FRAMEWORK (GRAF)	176
4.24.3	ACCIONES DE MITIGACIÓN NACIONALMENTE APROPIADAS (NAMA)	177
4.25	BRECHAS DE DATOS IDENTIFICADAS	177
5	METODOLOGÍA DE MODELACIÓN DEL RIESGO CATASTRÓFICO	179
5.1	ENFOQUE CONCEPTUAL PARA LA MODELACIÓN DEL RIESGO	179
5.2	CUANTIFICACIÓN DEL RIESGO.....	182
5.3	MÉTRICAS DE RIESGO	187
5.3.1	PÉRDIDA ANUAL ESPERADA (PAE)	187
5.3.2	PÉRDIDA MÁXIMA PROBABLE (PML)	187
5.3.3	PROBABILIDAD DE OCURRENCIA EN UN TIEMPO DE EXPOSICIÓN.....	188
5.3.4	PROBABILIDAD DE EXCEDENCIA DE PÉRDIDAS EN EL PRÓXIMO EVENTO.....	188
5.4	INCORPORACIÓN DE TENDENCIAS DE FONDO	189
5.5	INCORPORACIÓN DE VARIABLES CON INCERTIDUMBRE PROFUNDA.....	190
5.6	TOMA DE DECISIONES DE GESTIÓN DEL RIESGO Y ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO.....	191

5.6.1	INGENIERÍA DE CONTROL DEL RIESGO (RISK CONTROL ENGINEERING)	192
-------	---	-----

6 MODELACIÓN PROBABILISTA DE AMENAZAS HIDROMETEOROLÓGICAS 197

6.1	MODELACIÓN DEL FORZAMIENTO METEOROLÓGICO	197
6.1.1	GENERACIÓN ESTOCÁSTICA DE SERIES CLIMÁTICAS	197
6.1.2	INCORPORACIÓN DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA GENERACIÓN DE SERIES CLIMÁTICAS	200
6.2	AMENAZA DE SEQUÍA	202
6.2.1	EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA	202
6.2.2	INDICADORES	203
6.2.3	DEFINICIÓN DE EVENTOS REGIONALES DE SEQUÍA	205
6.3	AMENAZA DE INUNDACIÓN PLUVIAL Y FLUVIAL	206
6.3.1	EVENTOS DE PRECIPITACIÓN (AGUACEROS)	207
6.3.2	ESTIMACIÓN DEL VOLUMEN DE ESCORRENTÍA	210
6.3.3	INUNDACIÓN PLUVIAL (ENCHARCAMIENTO)	211
6.3.4	RESPUESTA HIDROLÓGICA DE CUENCAS	214
6.3.5	INUNDACIÓN FLUVIAL (DESBORDAMIENTO DE RÍOS)	216
6.4	AMENAZA DE INUNDACIÓN COSTERA	218
6.4.1	PERTURBACIÓN DE LAS TRAYECTORIAS DE LOS HURACANES	219
6.4.2	MODELACIÓN DEL CAMPO DE VIENTO	220
6.4.3	MODELACIÓN DE LA MAREA DE TORMENTA	224

7 MODELACIÓN PROBABILISTA DE AMENAZAS GEOLÓGICAS 227

7.1	TERREMOTO	227
7.1.1	MODELACIÓN GEOMÉTRICA	227
7.1.2	MODELACIÓN DE LA SISMICIDAD	228
7.1.3	ATENUACIÓN DEL MOVIMIENTO FUERTE	229
7.1.4	CÁLCULO DE LA AMENAZA SÍSMICA	230
7.2	TSUNAMI	230
7.2.1	GENERACIÓN	230
7.2.2	PROPAGACIÓN	232
7.2.3	ARRIBO	233
7.3	ERUPCIONES VOLCÁNICAS	235
7.3.1	LOCALIZACIÓN DE PUNTOS DE EMISIÓN	235
7.3.2	MODELACIÓN DE LA CAÍDA DE PIROCLASTOS TRANSPORTADOS POR EL VIENTO	236
7.3.3	MODELACIÓN DE PROYECTILES BALÍSTICOS	240
7.3.4	MODELACIÓN DE CORRIENTES DE DENSIDAD PIROCLÁSTICA	243
7.3.5	MODELACIÓN DE FLUJOS DE LODO O ESCOMBROS VOLCÁNICOS (LAHARES)	248
7.4	AMENAZA POR DESLIZAMIENTOS	250
7.4.1	SUSCEPTIBILIDAD A LOS DESLIZAMIENTOS	250
7.4.2	UMBRALES LLUVIA-DESLIZAMIENTO	252

7.4.3	ACELERACIÓN CRÍTICA.....	252
8	MODELACIÓN DE LA EXPOSICIÓN	253
8.1	EXPOSICIÓN DE EDIFICACIONES	254
8.2	EXPOSICIÓN DE INFRAESTRUCTURA	255
8.3	EXPOSICIÓN DE CULTIVOS	256
8.4	EXPOSICIÓN DE SISTEMAS PRODUCTIVOS GANADEROS	259
9	MODELACIÓN DE LA VULNERABILIDAD	260
9.1	TIPOS DE REPRESENTACIÓN DE LA VULNERABILIDAD FÍSICA	260
9.1.1	MODELO PROBABILISTA DE LA PÉRDIDA.....	260
9.1.2	FUNCIONES DE VULNERABILIDAD	263
9.1.3	VULNERABILIDAD BINARIA	264
9.1.4	OTROS MODELOS DE VULNERABILIDAD	264
9.1.5	ASIGNACIÓN DE TIPOS DE MODELOS DE VULNERABILIDAD	265
9.2	VULNERABILIDAD DE EDIFICACIONES.....	265
9.2.1	VULNERABILIDAD SÍSMICA	265
9.2.2	VULNERABILIDAD DE EDIFICACIONES ANTE INUNDACIONES	268
9.3	VULNERABILIDAD DE ELEMENTOS DE INFRAESTRUCTURA.....	269
9.4	VULNERABILIDAD DE CULTIVOS A EXTREMOS METEOROLÓGICOS	270
9.5	VULNERABILIDAD DE LOS CULTIVOS AL ANEGAMIENTO	276
9.5.1	RESPUESTA DE LOS CULTIVOS A SUELOS SATURADOS.....	277
9.6	VULNERABILIDAD DE SISTEMAS PRODUCTIVOS GANADEROS.....	277
9.6.1	RENDIMIENTO DE PASTURAS NATURALES.....	278
9.6.2	CONSUMO DE PASTO COMO ALIMENTO PRINCIPAL DE LOS ANIMALES	279
10	BIBLIOGRAFÍA	283
A. 1	CÁLCULO DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA	300
A. 1.1	MÉTODO DE PENMAN-MONTEITH.....	300
A. 1.2	PARÁMETROS ATMOSFÉRICOS	301
A. 1.2.1	PRESIÓN ATMOSFÉRICA P	301
A. 1.2.2	CONSTANTE PSICROMÉTRICA Γ	301
A. 1.3	TEMPERATURA DEL AIRE.....	301
A. 1.4	HUMEDAD DEL AIRE	302
A. 1.4.1	PRESIÓN MEDIA DE VAPOR DE LA SATURACIÓN E_s	302
A. 1.4.2	PENDIENTE DE LA CURVA DE PRESIÓN DE SATURACIÓN DE VAPOR Δ	302
A. 1.4.3	PRESIÓN REAL DE VAPOR E_a	303

A. 1.5	RADIACIÓN	304
A. 1.5.1	RADIACIÓN EXTRATERRESTRE	304
A. 1.5.2	DURACIÓN MÁXIMA DE LA INSOLACIÓN (N).....	305
A. 1.5.3	RADIACIÓN SOLAR O DE ONDA CORTA.....	305
A. 1.5.4	RADIACIÓN NETA DE ONDA LARGA	306
A. 1.5.5	RADIACIÓN NETA	307
A. 1.6	VELOCIDAD DEL VIENTO	307
A. 1.7	VARIABLES CLIMÁTICAS A PARTIR DE BASE DE DATOS UNIVERSIDAD DE PRINCETON	308

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.

En el contexto de Costa Rica, el GRMA ha establecido una colaboración con el gobierno – a través de sus instituciones con el liderazgo de SUGESE - para fortalecer sus capacidades en la gestión de riesgos climáticos. Esta alianza proporcionará modelos y herramientas relevantes que informarán las estrategias nacionales de financiamiento y mitigación de riesgos. El programa se implementa en fases, comenzando con la identificación de necesidades específicas y culminando en la integración de herramientas avanzadas de modelización de riesgos en las políticas públicas del país. Este proyecto es financiado con fondos del KfW de Alemania, y administrado por Frankfurt School en nombre de GRMA.

El consorcio INGENIAR-CIMNE fue seleccionado para proveer los servicios de modelación del riesgo enmarcados en la colaboración entre GRMA y el Gobierno de Costa Rica, mediante una aplicación enfocada en 4 proyectos de evaluación del riesgo:

- Proyecto estratégico: Demostración de métodos de evaluación del riesgo para infraestructura crítica en Heredia.
- Proyecto Operacional 1: Evaluación del riesgo de desastres y climático en infraestructura vial – Ruta Nacional 2 Autopista Panamericana (RN2)
- Proyecto Operacional 2: Riesgo de inundación y sequía para pequeños y medianos productores agropecuarios
- Proyecto Operacional 3: Evaluación de exposición y riesgo de pequeños y medianos hoteles y hostales del programa Fu-turismo.

La implementación se realizará mediante el uso de la plataforma de modelación CAPRA-ROBOT, desarrollada por INGENIAR, y que será empleada también como herramienta educativa en el Programa de Capacitación que se lleva a cabo de forma transversal a lo largo de toda la duración de la consultoría.

Este informe corresponde al Entregable 1 – Informe de inicio, el cual contiene el plan de trabajo de actividades, incluyendo la evaluación de calidad, los procedimientos de control y las fechas en las que se presentarán los entregables; la información de amenazas y riesgo en Costa Rica, así como la revisión del estado del conocimiento en amenaza, riesgo y gestión de riesgo a nivel nacional y regional; la revisión de los datos existentes relevantes para la evaluación del riesgo, sus fuentes, escala y accesibilidad, así como la descripción de iniciativas existentes en la región, particularmente CCRIF y GRAF, buscando la complementariedad en relación con los modelos y datos potencialmente disponibles; y finalmente, la descripción técnica detallada de las metodologías que se van a aplicar en las diferentes actividades que componen los proyectos.

Este informe se estructura en diferentes secciones como se detalla a continuación:

- Sección 1. Esta introducción
- Sección 2. Se presenta el plan de trabajo, con las actividades y cronograma de cada proyecto.
- Sección 3. Se presenta una síntesis del estado actual del conocimiento en materia de evaluación y gestión de amenaza y riesgo en Costa Rica.
- Sección 4. Se incluye una descripción del estado de la información disponible para la conformación de los modelos de riesgo.
- Sección 5. Presenta aspectos teóricos y metodológicos básicos de la modelación probabilista del riesgo.
- Sección 6. Contiene las metodologías para la modelación del forzamiento meteorológico, la incorporación del cambio climático y la evaluación de amenazas hidrometeorológicas.
- Sección 7. Presenta las metodologías a emplear en la evaluación de las amenazas geológicas incluidas en este estudio.
- Sección 8. Trata sobre las características requeridas para los modelos de exposición de los diferentes sectores considerados.
- Sección 9. Esta sección resume diferentes los modelos de vulnerabilidad a ser aplicados en este estudio.

2 PLAN DE TRABAJO

El plan de trabajo que se presenta a continuación ha sido planteado con el fin de darle cumplimiento a todo lo establecido en los Términos de Referencia del proyecto GRMA – Costa Rica, así como a lo indicado en la propuesta técnica presentada por INGENIAR-CIMNE. Todas las actividades se desarrollan en coordinación con el Grupo Técnico de Trabajo (GTT), conformado por las diferentes instituciones costarricenses interesadas y coordinado por SUGESE.

2.1 Proyecto estratégico: Demostración de métodos de evaluación del riesgo para infraestructura crítica en Heredia.

El objetivo de este proyecto estratégico es realizar una modelación en múltiples sectores de infraestructura en el cantón de Heredia¹. Este proyecto involucra la evaluación del riesgo sísmico y por inundación en el portafolio de edificaciones e infraestructura de Heredia, de acuerdo con la información disponible por parte del cantón. El proyecto se desarrolla mediante las actividades presentadas en la Tabla 1. El cronograma correspondiente se presenta en la Figura 1. Todos los valores agregados presentados fueron acordados directamente con el GTT de este proyecto.

Tabla 1. Tareas del Proyecto Estratégico

Actividad	Descripción	Tarea en los TdR	Entregable en los TdR
Modelo de clima	Se refiere a la modelación de forzamiento meteorológico y la incorporación de proyecciones de cambio climático	T2.1, T2.2	D2.1a-f, D2.2a-e
Modelo inundación río Pirro	Se desarrollará un modelo detallado de inundación en el río Pirro, para ser usado como insumo de amenaza para el cantón de Heredia.	T2.1	D2.1a-f
Modelo amenaza sísmica	Se consultará la información disponible con el fin de obtener el mejor modelo de amenaza sísmica nacional disponible, que permita su directa aplicación en modelación catastrófica, tanto para este proyecto como para los otros proyectos que involucran riesgo sísmico.	T3.3	D3.3a-b
Efectos de sitio Heredia	Se generará una capa de información de efectos de sitio, que permita considerar, de forma aproximada, la respuesta de los suelos al interior del cantón con el fin de obtener mejores resultados en la evaluación del riesgo sísmico.	Valor agregado	
Modelo amenaza deslizamientos	Se desarrollará un modelo de susceptibilidad y amenaza a los deslizamientos a escala del cantón de Heredia.	Valor agregado	
Exposición edificios Heredia	Se construirá una capa de exposición a nivel de edificaciones individuales al interior del cantón, caracterizando por altura, uso, nivel socioeconómico, sistema estructural, costo de reposición, entre otras características relevantes.	T5.1, T5.2	D5a
Exposición infraestructura	Se construirá una base de exposición de infraestructura en múltiples sectores (como, por ejemplo, vías, agua y saneamiento, energía; de acuerdo con la información disponible), a nivel de elementos individuales o por medio de modelos distribuidos, según se requiera.	T5.1, T5.2	D5a
Vulnerabilidad edificios	Se refiere a la definición de curvas de vulnerabilidad para las edificaciones de Heredia.	T4.1, T5.3	D4a-d

¹ Se refiere a infraestructura crítica existente en el cantón, de acuerdo con las definiciones dadas en el Decreto N° 42465 de MOPT-MINAE-MIVAH.

Actividad	Descripción	Tarea en los TdR	Entregable en los TdR
Vulnerabilidad infraestructura	Se refiere a la construcción de curvas de vulnerabilidad por medio de un modelo de arquetipos de elementos de infraestructura.	T4.1, T5.3	D4a-d
Evaluación riesgo	Aplicación de las metodologías acá presentadas para evaluar el riesgo por medio de métricas actuariales de modelación catastrófica.	T5.4	D5b-c
Calibración resultado	Se comparará la curva de excedencia de pérdidas analítica calculada con el modelo, con una construida a partir de información histórica de eventos previos para establecer su correspondencia.	T5.4	D5b-c
Curva de inversión	Como valor agregado, se evaluarán una colección de acciones de gestión del riesgo con el fin de determinar la combinación óptima que permita reducir el riesgo para montos de inversión fijos y crecientes.	Valor agregado	
Evaluación resiliencia	Se evaluará la resiliencia del cantón por medio de la incorporación de sus capacidades de absorber, responder y recuperarse, para lograr una métrica de resiliencia de su infraestructura.	Valor agregado	

Tarea	Mes														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Proyecto estratégico: Demostración de métodos de evaluación del riesgo para infraestructura crítica en Heredia.															
Modelo de clima															
Modelo inundación río Pirro															
Modelo amenaza sísmica															
Efectos de sitio Heredia															
Modelo de amenaza deslizamientos															
Exposición edificios Heredia															
Exposición infraestructura															
Vulnerabilidad edificios															
Vulnerabilidad infraestructura															
Evaluación riesgo															
Calibración resultado															
Curva de inversión															
Evaluación resiliencia															

Figura 1. Cronograma de actividades el Proyecto Estratégico. (Las celdas azules indican ejecución. Las celdas verdes indican entrega de productos)

2.2 Proyecto Operacional 1: Evaluación del riesgo de desastres y climático en infraestructura vial – Ruta Nacional 2 Autopista Panamericana (RN2)

Este proyecto consiste en la evaluación del riesgo en infraestructura vial, en particular la ruta RN2 (Autopista Panamericana), ante múltiples amenazas, incluyendo: sismo, inundación, erupciones volcánicas y deslizamientos. Si bien se desarrollará el modelo para la vía RN2, como valor agregado se dará acompañamiento al Grupo Técnico de Trabajo de este proyecto con el fin de modelar el riesgo de otra Ruta Nacional seleccionada por LanammeUCR, y para las amenazas de inundación, sismo y deslizamientos. El proyecto se desarrolla mediante las actividades presentadas en la Tabla 2. El cronograma correspondiente se presenta en la Figura 2. Todos los valores agregados presentados fueron acordados directamente con el GTT de este proyecto.

Tabla 2. Tareas del Proyecto Operacional 1

Actividad	Descripción	Tarea en los TdR	Entregable en los TdR
Modelo de clima	Se refiere a la modelación de forzamiento meteorológico y la incorporación de proyecciones de cambio climático	T2.1, T2.2	D2.1a-f, D2.2a-e
Modelo nacional inundación	Se desarrollará un modelo de inundación nacional para ser aplicado en la modelación del portafolio vial completo.	T2.1	D2.1a-f
Modelo susceptibilidad deslizamientos	Se desarrollará un modelo de susceptibilidad a los deslizamientos, compatible con la modelación del riesgo, a nivel nacional.	T3.1	D3.1a-b
Modelos volcán	Se revisará la información disponible y se propondrán modelos aproximados de amenaza volcánica probabilista	T3.2	D3.2a-b
Modelo amenaza sísmica	Se consultará la información disponible con el fin de obtener el mejor modelo de amenaza sísmica nacional disponible, que permita su directa aplicación en modelación catastrófica, tanto para este proyecto como para los otros proyectos que involucran riesgo sísmico.	T3.3	D3.3a-b
Exposición Ruta nacional	Se conformará una base de elementos expuestos de tramos viales para la evaluación del riesgo.	T6.1	D6a
Vulnerabilidad red vial	Se construirán modelos de vulnerabilidad vial en base a arquetipos de segmentos viales.	T4.2	D4a-d
Evaluación del riesgo	Aplicación de las metodologías acá presentadas para evaluar el riesgo por medio de métricas actuariales de modelación catastrófica.	T6.2	D6b-d
Evaluación determinista (stress-test)	Se reportarán los resultados de algunos eventos simulados de gran tamaño con el fin de ilustrar el estado de la infraestructura ante eventos extremos.	T6.3	D6b-d
Calibración resultado	Se comparará la curva de excedencia de pérdidas analítica calculada con el modelo, con una construida a partir de información histórica de eventos previos para establecer su correspondencia.	T6.2	D6b-d
Curva de inversión	Como valor agregado, se evaluarán una colección de acciones de gestión del riesgo con el fin de determinar la combinación óptima que permita reducir el riesgo para montos de inversión fijos y crecientes.	Valor agregado	
Evaluación resiliencia	Se evaluará la resiliencia de la infraestructura vial por medio de la incorporación de las capacidades del país para absorber, responder y recuperarse.	Valor agregado	

Tarea	15 Ene 25	Mes														15 Abr 26
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
Proyecto Operacional 1: Evaluación del riesgo de desastres y climático en infraestructura vial – Ruta Nacional 2 Autopista Panamericana (RN2)																
Modelo de clima																
Modelo nacional inundación																
Modelo susceptibilidad deslizamientos																
Modelo amenaza sísmica																
Modelos volcán																
Exposición RN2																
Vulnerabilidad vial																
Evaluación del riesgo																
Evaluación determinista (stress-test)																
Calibración resultado																
Curva de inversión																
Evaluación resiliencia																

Figura 2. Cronograma de actividades el Proyecto Operacional 1. (Las celdas azules indican ejecución. Las celdas verdes indican entrega de productos)

2.3 Proyecto Operacional 2: Riesgo de inundación y sequía para pequeños y medianos productores agropecuarios

Este proyecto consiste en la evaluación del riesgo climático, considerando inundación, lluvias intensas y sequía, en el portafolio nacional de café, caña de azúcar y ganadería extensiva, principalmente orientado a pequeños y medianos productores, en particular aquellos que implementan prácticas NAMA. No obstante se modelará, como valor agregado, todo el portafolio nacional de los productos mencionados, con el fin de visualizar el contraste entre productores NAMA y productores no-NAMA. El proyecto se desarrolla mediante las actividades presentadas en la Tabla 3. El cronograma correspondiente se presenta en la Figura 3. Todos los valores agregados presentados fueron acordados directamente con el GTT de este proyecto.

Tabla 3. Tareas del Proyecto Operacional 2

Actividad	Descripción	Tarea en los TdR	Entregable en los TdR
Modelo de clima	Se refiere a la modelación de forzamiento meteorológico y la incorporación de proyecciones de cambio climático	T2.1, T2.2	D2.1a-f, D2.2a-e
Modelo nacional inundación	Se desarrollará un modelo de inundación nacional para ser aplicado en la modelación del portafolio vial completo.	T2.1	D2.1a-f
Eventos de sequía	Selección de eventos de sequía a partir de las simulaciones realizadas, para clima base y climas futuros con cambio climático	T2.2	D2.2b
Eventos de lluvias intensas	Selección de eventos de muy alta precipitación a partir de las simulaciones realizadas, para clima base y climas futuros con cambio climático	Valor agregado	
Exposición cultivos	Se conformará una base de exposición de cultivos, distribuida a nivel nacional en unidades de tierra cultivada por cada producto considerado.	T7.1	D7a
Exposición ganadería	Se generará una base de exposición de ganadería extensiva, distribuida en unidades de producción ganadera	T7.1	D7a
Vulnerabilidad cultivos	Se refiere a la parametrización de modelos de respuesta al agua de cultivos para los productos incluidos.	T4.3	D4a-d
Vulnerabilidad ganadería	Se refiere a la modelación de las variaciones en carga animal por unidad productiva en función de variaciones en la materia seca disponible para alimentación.	T4.3	D4a-d
Vulnerabilidad inundación (cultivos y ganadería)	Se refiere a la modelación del anegamiento del suelo y su impacto en la producción de biomasa (de cultivo o pastura).	T4.3	D4a-d
Evaluación del riesgo	Aplicación de las metodologías acá presentadas para evaluar el riesgo por medio de métricas actuariales de modelación catastrófica.	T7.2	D7b-d
Evaluación determinista (stress-test)	Se reportarán los resultados de algunos eventos simulados de gran tamaño con el fin de ilustrar el estado de la infraestructura ante eventos extremos.	T7.3	D7b-d
Calibración de rendimientos	Se compararán los rendimientos simulados con lo reportado en encuestas o anuarios estadísticos agropecuarios disponibles para establecer su correspondencia.	T7.2	D7b-d
Curva de inversión	Como valor agregado, se evaluarán una colección de acciones de gestión del riesgo con el fin de determinar la combinación óptima que permita reducir el riesgo para montos de inversión fijos y crecientes.	Valor agregado	
Dimensionamiento de un seguro agrícola	Se realizará un ejercicio de dimensionamiento de un seguro agrícola, con el fin de demostrar el uso de la evaluación del riesgo en el diseño de instrumentos de protección financiera.	Valor agregado	

Tarea	15 Ene 25		Mes														15 Abr 26
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15		
Proyecto Operacional 2: Riesgo de inundación y sequía para pequeños y medianos productores agropecuarios																	
Modelo de clima																	
Modelo nacional inundación																	
Eventos de sequía																	
Exposición cultivos																	
Exposición ganadería																	
Vulnerabilidad cultivos																	
Vulnerabilidad ganadería																	
Vulnerabilidad inundación (cultivos y ganadería)																	
Evaluación del riesgo																	
Evaluación determinista (stress-test)																	
Calibración de rendimientos																	
Curva de inversión																	
Dimensionamiento de un seguro agrícola																	

Figura 3. Cronograma de actividades el Proyecto Operacional 2. (Las celdas azules indican ejecución. Las celdas verdes indican entrega de productos)

2.4 Proyecto Operacional 3: Evaluación de exposición y riesgo de pequeños y medianos hoteles y hostales del programa Fu-turismo.

El turismo es uno de los principales motores de la economía costarricense, contribuyendo de forma importante a la producción económica y a la generación empleo. Este proyecto pretende evaluar el riesgo de desastres para este sector, enfocándose en instalaciones hoteleras de pequeños y medianos empresarios principalmente², ante inundaciones fluviales y costeras, así como terremotos y tsunamis. El proyecto se desarrolla mediante las actividades presentadas en la Tabla 4. El cronograma correspondiente se presenta en la Figura 4. Todos los valores agregados presentados fueron acordados directamente con el GTT de este proyecto.

Tabla 4. Tareas del Proyecto Operacional 3

Actividad	Descripción	Tarea en los TdR	Entregable en los TdR
Modelo elevación del nivel del mar CC	Se incorporarán las proyecciones de elevación del nivel del mar para escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero compatibles con el forzamiento meteorológico futuro considerado.	T2.1, T8.2	D2.1a-f
Modelo ciclones (marea y lluvia)	Se modelará la influencia de los ciclones tropicales en las inundaciones costeras.	T2.1, T8.2	D2.1a-f
Modelo Tsunami	Se modelará la influencia de los tsunamis en las inundaciones costeras.	Valor agregado	
Exposición hoteles	Se conformará una base de exposición de edificaciones hoteleras, principalmente de pequeños y medianos empresarios.	T8.1, T8.3	D8a-b
Vulnerabilidad hoteles	Se establecerán funciones de vulnerabilidad de edificaciones hoteleras, considerando pérdidas en inmueble, contenidos y lucro, siempre que la información lo permita.	T4.4	D4a-d
Evaluación del riesgo	Aplicación de las metodologías acá presentadas para evaluar el riesgo por medio de métricas actuariales de modelación catastrófica.	T8.4	D8c-d

² No obstante, se acordó con el GTT de este proyecto, incluir como valor agregado el portafolio hotelero completo como valor agregado.

Indicadores de riesgo	Se crearán dos indicadores de riesgo, uno para instalaciones hoteleras individuales, y otro para el sector turismo (a nivel de cantón), para ser publicados en el portal de Fu-turismo.	Valor agregado	
Calibración resultado	Se comparará la curva de excedencia de pérdidas analítica calculada con el modelo, con una construida a partir de información histórica de eventos previos para establecer su correspondencia.	T8.4	D8c-d
Curva de inversión	Como valor agregado, se evaluarán una colección de acciones de gestión del riesgo con el fin de determinar la combinación óptima que permita reducir el riesgo para montos de inversión fijos y crecientes.	Valor agregado	

Tarea	15 Ene 25	Mes														15 Abr 26
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
Proyecto Operacional 3: Evaluación de exposición y riesgo de pequeños y medianos hoteles y hostales del programa Fu-turismo.																
Modelo de clima																
Modelo nacional inundación																
Modelo elevación del nivel del mar CC																
Modelo ciclones (marea de tormenta)																
Modelo Tsunami																
Exposición hoteles																
Vulnerabilidad hoteles																
Evaluación del riesgo																
Calibración resultado																
Indicadores de riesgo																
Curva de inversión																

Figura 4. Cronograma de actividades el Proyecto Operacional 3. (Las celdas azules indican ejecución. Las celdas verdes indican entrega de productos)

2.5 Programa de capacitación

Se desarrollará un programa exhaustivo de desarrollo de capacidades que aproveche al máximo el trabajo de modelación de los cuatro proyectos descritos anteriormente, a la vez que se transfieren los conocimientos y habilidades básicos. Este programa de capacitación incluye los siguientes grupos de actividades:

2.5.1 Talleres y reuniones

Los *talleres de socialización* son talleres presenciales cuyo objetivo es la socialización del avance de los trabajos y los resultados parcial o finales del proyecto mediante sesiones plenarias. Se realizarán 4 talleres de socialización:

- *Taller 1:* este es un taller de inicio de las actividades del programa de capacitación. Se realiza la socialización del plan de trabajo general y también específico de los proyectos, así como el lanzamiento del programa de capacitación y el curso virtual asincrónico. Se consolida la conformación de los Grupos Técnicos de Trabajo por cada proyecto.
- *Taller 2:* en este taller se presenta el estado general de avance del proyecto a todos los interesados, así como el avance de cada uno de los cuatro proyectos para los miembros del Grupo Técnico de Trabajo correspondientes, y otros actores interesados en el seguimiento. Este taller

tiene un enfoque hacia los resultados intermedios de la modelación de amenazas, exposición y vulnerabilidad. Se realiza también una práctica *hands-on* en la modelación del componente climático.

- **Taller 3:** en este taller se socializa el estado de avance de las actividades de evaluación del riesgo y se presentan los resultados de la modelación para cada uno de los proyectos individuales para los miembros del Grupo Técnico de Trabajo correspondientes, y otros actores interesados en el seguimiento. Se realiza también una práctica *hands-on* sobre evaluación e interpretación de métricas del riesgo.
- **Taller 4:** este es el taller final de cierre. Se realiza un recuento general de las actividades de todos los proyectos y se presentan las conclusiones y recomendaciones de la evaluación. Este taller tiene un enfoque hacia los usos de la modelación y las potenciales aplicaciones del resultado para el futuro, más allá del alcance de la consultoría. Así mismo, en las estrategias que se definan en conjunto con el Grupo Técnico de Trabajo para la sostenibilidad, replicabilidad y transferencia de los procesos de modelación a otras entidades territoriales, regiones o sectores de Costa Rica.

Por su parte, las *reuniones de trabajo* son espacios presenciales o virtuales (a ser definido según la conveniencia) entre el Consultor y el GTT para facilitar la colaboración en tareas específicas y la transferencia de conocimientos sobre cuestiones prácticas de recopilación, gestión y procesamiento de datos, así como sobre los aspectos científicos de la modelización climática y de riesgos.

Las reuniones de trabajo se acuerdan de forma individual con cada GTT de acuerdo con la disponibilidad de las personas interesadas y, por lo tanto, no ocurren simultáneamente con los diferente GTT, sino en una secuencia o ronda de reuniones en un lapso de una o dos semanas. El enfoque específico de cada reunión dependerá del avance que se tenga en cada evaluación, sin embargo, se prevé dar el siguiente enfoque a cada ronda de reuniones:

- **Ronda 1 de reuniones:** estas son las primeras reuniones con los GTT de los proyectos. Se socializa de nuevo el alcance del proyecto y se establecen los acuerdos necesarios acerca de detalles alrededor del alcance o valores agregados que se pacta realizar en beneficio del proyecto y para favorecer la apropiación de los resultados, el codesarrollo y la sostenibilidad futura de los procesos de modelación.
- **Ronda 2 de reuniones:** en esta segunda ronda de reuniones se revisa el avance de los proyectos, se resuelven dudas sobre detalles específicos de la modelación de amenazas, exposición y vulnerabilidad. También, se adelantan sesiones de capacitación en los modelos usados específicamente en cada proyecto, que complementan los contenidos del curso virtual asincrónico.
- **Ronda 3 de reuniones:** en esta tercera ronda de reuniones se revisan con los GTT los resultados preliminares de la evaluación del riesgo, y se pactan ajustes finales en los modelos de forma conjunta, de cara a consolidar los resultados. También, se adelantan sesiones de capacitación en los modelos usados específicamente en cada proyecto, que complementan los contenidos del curso virtual asincrónico.
- **Ronda 4 de reuniones:** en la ronda final de reuniones se definen en conjunto con los GTT las estrategias de cara al futuro de la modelación, posterior a la finalización de la consultoría, con el fin de garantizar la sostenibilidad en el tiempo de los procesos de modelación y su replicabilidad

en otras regiones o para otros sectores. Estas estrategias serán definidas en términos de un plan estratégico de trabajo y necesidades en el mediano plazo.

La Figura 5 muestra el cronograma previsto de Talleres y Reuniones de trabajo. Este cronograma no deja de ser indicativo dado que depende de la disponibilidad de instalaciones y de las mismas personas del GTT que participan en estas actividades.

Tarea	15 Ene 25	Mes													15 Abr 26
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Talleres y reuniones de trabajo															
Taller socialización 1															
Taller socialización 2															
Taller socialización 3															
Taller socialización 4															
Reunión de trabajo con GTT 1															
Reunión de trabajo con GTT 2															
Reunión de trabajo con GTT 3															
Reunión de trabajo con GTT 4															

Figura 5. Cronograma de talleres y reuniones de trabajo

2.5.2 Curso de capacitación en modelación del riesgo

Se desarrollará un curso de capacitación en modelación de riesgos climáticos y de desastres, virtual y asincrónico, para facilitar la transferencia de conocimientos sobre la base científica necesaria para la ejecución y comprensión del modelo y sus resultados. El programa está diseñado para capacitar en los aspectos teóricos de la modelación de riesgos, centrándose en los fundamentos físicos y matemáticos involucrados.

El objetivo principal de este curso es proveer a los participantes los fundamentos científicos necesarios para ejecutar y comprender la modelación del riesgo y sus resultados. Los participantes estarán en capacidad de realizar evaluaciones de riesgo de desastres ante diversas amenazas naturales empleando herramientas avanzadas del sistema CAPRA ROBOT.

Este curso está dirigido a profesionales, especialistas e investigadores vinculados al Grupo Técnico de Trabajo de cada uno de los proyectos, 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. Es recomendable que los participantes tengan formación previa en probabilidad y estadística de nivel universitario.

El curso 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. La Figura 6 presenta el plan de estudios correspondiente.

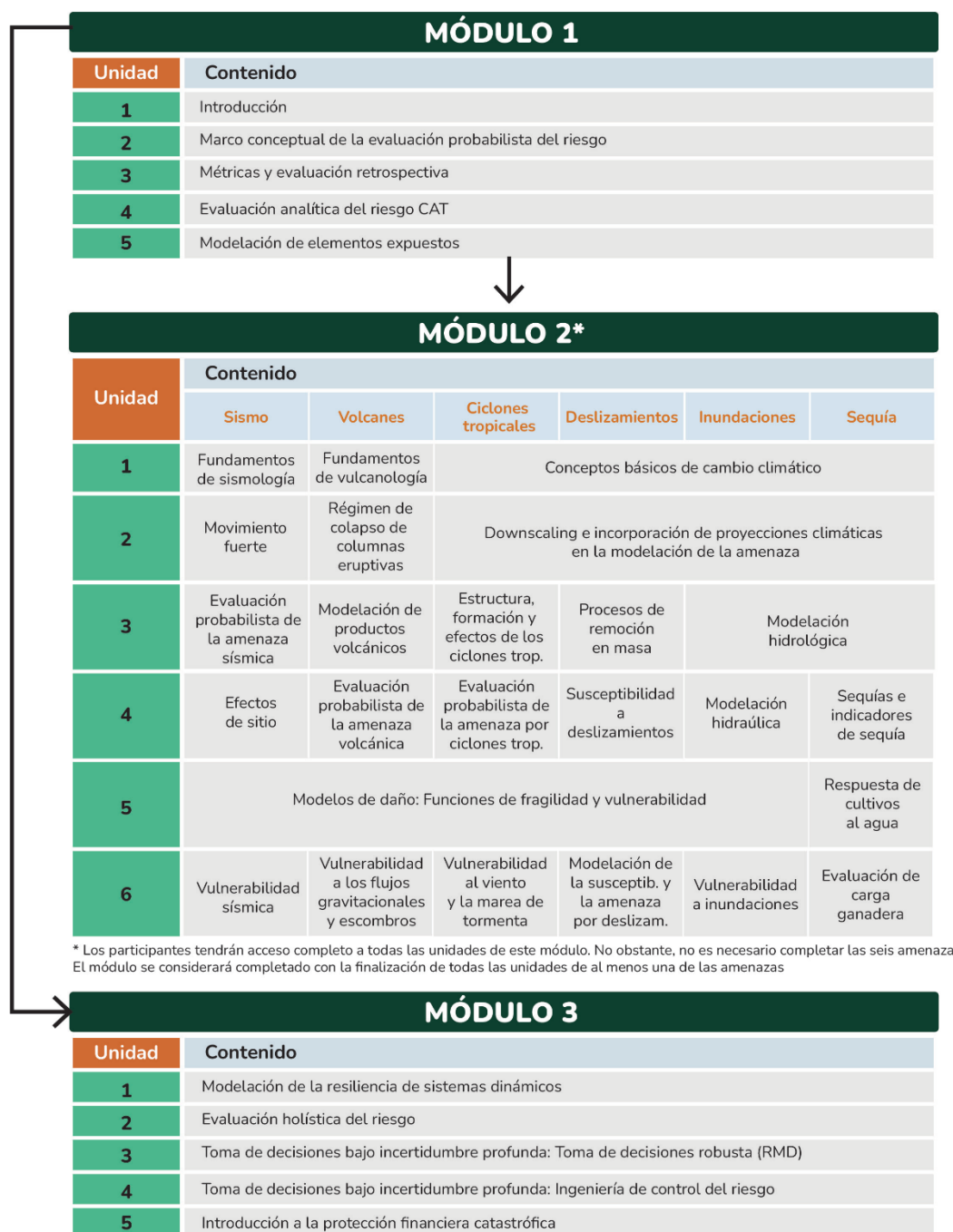


Figura 6. Plan de estudios del curso virtual asincrónico

2.5.2.1 Módulo 1 - Fundamentos

El Módulo 1 aborda los fundamentos generales de la evaluación probabilista del riesgo. Este módulo está compuesto por cinco unidades, que incluyen videos pregrabados con contenido teórico y un ejercicio práctico para reforzar el aprendizaje. El curso está diseñado para avanzar de forma asincrónica, a razón de

una unidad por semana, permitiendo que cada participante lo complete a su propio ritmo, de acuerdo con su disponibilidad personal de tiempo.

Este primer módulo introduce el enfoque del curso a través del análisis de la ocurrencia de desastres naturales y los fundamentos de la gestión del riesgo. También se presentan los conceptos teóricos de la evaluación probabilista del riesgo, incluyendo la teoría de ruina, métricas como la curva de excedencia de pérdidas, la pérdida máxima probable y la pérdida anual esperada. Se abordan también los enfoques retrospectivo y analítico para la evaluación del riesgo. Finalmente, se introduce la metodología para la construcción de inventarios de elementos expuestos, a partir de diversas fuentes de información que permiten su descripción, caracterización y valoración. La Tabla presenta en detalle los temas tratados en cada unidad.

Temario del Módulo 1

Unidad	Título	Temas
1	Introducción a los desastres y la gestión del riesgo	- Definición de riesgo - Riesgo extensivo y riesgo intensivo - Adaptación al cambio climático - Procesos de la gestión del riesgo - Conceptos de la evaluación del riesgo
2	Marco conceptual de la evaluación del riesgo	- Incertidumbre en la evaluación del riesgo - Proceso de ocurrencia de pérdidas - Teoría de ruina - Curva de excedencia de pérdidas
3	Métricas puntuales y evaluación retrospectiva	- Interpretación de tasas de excedencia - Curva de PML - Probabilidad de ruina - Pérdida anual esperada - Pérdidas de portafolio y pérdidas por ubicación - Estimación retrospectiva de la tasa de excedencia - Distribución del estimador - Incertidumbre en la estimación retrospectiva
4	Evaluación analítica	- Representación probabilista de la amenaza - Representación de la exposición y la vulnerabilidad - Evaluación analítica de la curva de excedencia de pérdidas
5	Elementos expuestos	- Tipos de exposición - Representación para evaluación del riesgo - Escalas de exposición

2.5.2.2 Módulo 2 – Componentes de la modelación del riesgo

Una vez completado satisfactoriamente el Módulo 1, los participantes podrán continuar con el Módulo 2, enfocado en la modelación de amenazas naturales y la evaluación de la vulnerabilidad de los elementos expuestos. En este módulo, cada participante podrá seleccionar la amenaza de interés entre las consideradas en el proyecto GRMA. Es decir, el módulo provee material relacionado con la modelación de la amenaza y la vulnerabilidad para todos los fenómenos incluidos en el proyecto GRMA.

A continuación, se presentan de forma resumida el alcance y contenidos de los módulos relacionados con las amenazas naturales cubiertas en esta fase del curso.

Sismo

Este módulo presenta las bases conceptuales para la evaluación probabilista de la amenaza y vulnerabilidad sísmica. Se estudian aspectos básicos de sismología, la caracterización del movimiento fuerte, la metodología de evaluación de la amenaza sísmica y la respuesta de los suelos ante un evento sísmico. Además, se aborda el análisis de la vulnerabilidad física, que debe ser evaluada y asignada a cada componente expuesto. La Tabla presenta en detalle los temas tratados en cada unidad.

Temario del módulo 2: Sismo

Unidad	Título	Temas
1	Aspectos básicos de sismología	• Tectónica de placas • Fallas geológicas • Modelo de fuente sísmica • Momento sísmico y magnitud • Distribución de la dislocación y liberación del momento sísmico • Ondas sísmicas • Mecanismo focal
2	Movimiento fuerte	• Acelerogramas • Espectro de fuente • Vibraciones aleatorias • Modelos de atenuación • Respuesta estructural
3	Evaluación probabilista de la amenaza sísmica	• Fuentes sismogénicas • Sismicidad • Atenuación • Catálogo estocástico • Integración de la amenaza • Evaluación determinista
4	Efectos de sitio	• Definición de efectos de sitio • Técnicas de estimación • Respuesta 1D elástica • Respuesta 1D no lineal • Efectos de sitio en regiones
5	Modelos de daño: Funciones de fragilidad y vulnerabilidad	• Curvas de fragilidad • Curvas de vulnerabilidad

6	Vulnerabilidad sísmica	• Comportamiento estructural ante cargas laterales cíclicas • Comportamiento de estructuras sensibles a la aceleración máxima • Comportamiento de estructuras sensibles a la deriva de entrepiso
---	------------------------	--

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

Strong Motion Analyst (SMA): es un programa para el procesamiento de información sísmológica. Implementa metodologías para el procesamiento de señales sísmicas, análisis de respuesta de sitio, atenuación de movimiento fuerte y procesamiento de catálogos sísmológicos.

R-CRISIS: es el módulo de amenaza sísmica de CAPRA-ROBOT, desarrollado principalmente por Mario Ordaz (UNAM, México). Es una herramienta versátil que permite realizar Análisis Probabilista de Amenaza Sísmica (PSHA), y ha sido usada en proyectos a nivel mundial, incluyendo aplicaciones en la industria nuclear, el sector asegurador, códigos de construcción y microzonificación sísmica.

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 sísmica 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 Estratégico, así como con los Proyectos Operacionales 1 y 3, fortaleciendo la integración de herramientas técnicas en la gestión del riesgo de desastres en los sectores de infraestructura vial y turismo.

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.

Adicionalmente, se desarrollará el análisis de la vulnerabilidad física por la ocurrencia de viento huracanado e inundación por marea de tormenta. La Tabla presenta en detalle los temas que serán tratados en cada unidad.

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 ustedes 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 de 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 alineadas con los objetivos del Proyecto Operacional 3, orientado al fortalecimiento de las capacidades técnicas para la evaluación del riesgo de desastres en el sector turismo.

Deslizamientos

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. El cambio climático se integra como un modificador de los forzamientos meteorológicos, lo que transforma las métricas tradicionales de riesgo en estimaciones de probabilidad imprecisas. Para abordar esta incertidumbre profunda, se introduce la teoría de conjuntos aleatorios, brindando una base matemática sólida que permite considerar de manera rigurosa los efectos del cambio climático en la evaluación del riesgo. Asimismo, se emplean proyecciones climáticas globales hasta el año 2100 para ilustrar el proceso de simulación de variables meteorológicas indexadas a múltiples escenarios futuros.

Posteriormente, se estudiarán los procesos de remoción en masa, la clasificación de los deslizamientos y la evaluación de la propensividad a su ocurrencia. También se introducirá el uso de redes neuronales artificiales como herramienta para la modelación de la susceptibilidad y la amenaza por deslizamientos detonados por lluvias y sismos. Adicionalmente, se desarrollará el análisis de la vulnerabilidad física con un enfoque binario. La Tabla presenta en detalle los temas que serán tratados en cada unidad.

Temario del módulo 2: Deslizamiento

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	Remoción en masa	• Procesos de remoción en masa. • Clasificación de deslizamientos. • Propensividad a la ocurrencia de deslizamientos. • Introducción a las redes neuronales
4	Susceptibilidad a los deslizamientos	• Modelación de la susceptibilidad de laderas
5	Modelos de daño: Funciones de fragilidad y vulnerabilidad	• Curvas de fragilidad • Curvas de vulnerabilidad • Vulnerabilidad binaria
6	Modelación de amenaza por deslizamientos	• 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 deslizamientos, 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.

Landslide Hazard Mapper (LHM): es una herramienta para la evaluación probabilista de la amenaza por deslizamientos. La susceptibilidad a deslizamientos se evalúa mediante un modelo de inteligencia artificial (Red Neuronal Artificial - ANN), entrenado para clasificar cada sitio como susceptible o no (en términos de

su probabilidad de ser susceptible) en función de sus características intrínsecas. Los factores detonantes se definen como un conjunto de eventos sísmicos o de lluvia, acompañados de umbrales para la aceleración sísmica y la intensidad de lluvia. LHM calcula la probabilidad de exceder dichos umbrales ante la ocurrencia de cada evento detonante, y luego agrega, para cada sitio, la probabilidad total de ocurrencia de deslizamientos.

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 deslizamientos 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 Operacional 1, orientado al fortalecimiento de las capacidades técnicas para la evaluación del riesgo de desastres en el sector de infraestructura vial.

Volcanes

El módulo presenta las bases conceptuales para la evaluación probabilista de la amenaza volcánica. Se estudiarán aspectos fundamentales de la vulcanología, así como la modelación probabilista de los diferentes productos volcánicos como caída de ceniza, flujos piroclásticos, lahares (o flujos de lodo) y flujos de lava. La Tabla presenta en detalle los temas que serán tratados en cada unidad.

Temario del módulo 2: Volcanes

Unidad	Título	Temas
1	Vulcanismo	• Origen y manifestación del vulcanismo • Tipos de volcanes • Estilos eruptivos • Índice de Explosividad Volcánica • Principales productos volcánicos
2	Régimen de colapso de columnas eruptivas	• Magnitud de erupciones • Forzamientos en las columnas eruptivas • Régimen de colapso • Distribución de material boyante y colapsado
3	Modelación de productos volcánicos	• Flujos de lava • Flujos piroclásticos (PDC) • Lahares • Caída de ceniza • Proyectiles balísticos
4	Amenaza volcánica	• Modelación probabilista de ocurrencia de erupciones • Periodos de recurrencia vs periodos de retorno

		Integración probabilista
5	Modelos de daño: Funciones de fragilidad y vulnerabilidad	- Curvas de fragilidad - Curvas de vulnerabilidad
6	Vulnerabilidad a flujos de gravedad	- Eventos de alta energía local - Vulnerabilidad binaria - Resistencia de cubiertas a depósitos de ceniza volcánica

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

VHAST (Volcanic Hazard Analysis and Simulation Tool): herramienta de modelación probabilista de amenazas volcánicas que cubre flujos de lava, flujos piroclásticos, caída de ceniza y lahares. VHAST permite la definición de sitios probables de emisión de productos volcánicos sobre una malla de topografía, desde donde se ejecutan modelos de distribución de productos volcánicos, evento por evento. VHAST incorpora modelos de colapso de columna eruptiva para representar de manera robusta la amenaza asociada a erupciones explosivas de volcanes de tipo vulcaniano o pliniano.

Vulnerability Studio: 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: 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.

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 1, orientado al fortalecimiento de las capacidades técnicas para la evaluación del riesgo de desastres en el sector de infraestructura vial.

Inundaciones

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, 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.

También se abordan los análisis hidrológicos e hidráulicos completos en la cuenca y en el cauce del río. Asimismo, se aborda el análisis de la vulnerabilidad física, que debe ser evaluada y asignada a cada componente expuesto. La Tabla presenta en detalle los temas que serán tratados en cada unidad.

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 cambio climático en la modelación de amenaza y riesgo por fenómenos hidrometeorológicos	• <i>Downscaling</i> • 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 • Acoplamiento con HEC-RAS
5	Modelos de daño: Funciones de fragilidad y vulnerabilidad	• Curvas de fragilidad • Curvas de vulnerabilidad
6	Vulnerabilidad ante inundaciones	• Modelo de arquetipos • Funciones de daño • Funciones de vulnerabilidad

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

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.

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.

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 están en línea con los objetivos del Proyecto Estratégico, así como con los Proyectos Operacionales 1, 2 y 3, fortaleciendo la integración de herramientas técnicas en la gestión del riesgo de desastres en el cantón Heredia, y en los sectores agrícola, de infraestructura vial y turismo del país.

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

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 cambio climático en la modelación de amenaza y riesgo por fenómenos hidrometeorológicos	• 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	• Estimación de la materia seca • Requerimiento energético de animales • Capacidad de carga

2.5.2.3 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 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.

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

2.6 Actividades de control y gestión de la calidad

Estas actividades se ejecutan de forma transversal al desarrollo de la consultoría, y tiene por objetivo garantizar la calidad esperada en todos los procesos y productos generados. Los proyectos desarrollados por INGENIAR-CIMNE se ejecutan bajo las especificaciones del Project Management Institute (PMI), siguiendo las directrices y estándares del PMBOK (última edición). Todos los miembros del equipo de INGENIAR adoptan las mejores prácticas y estándares recomendados por la metodología PMI.

2.6.1 Plan de garantía de calidad

La Gestión de Calidad del Proyecto abarca todas las actividades necesarias para lograr resultados, cumplir objetivos y asegurar la transferencia de conocimiento que contribuirá a la evolución futura del proyecto. Este plan servirá como guía para la gestión del proyecto, conteniendo las herramientas necesarias para brindar orientación a los equipos de proyecto para su ejecución.

Entendemos que la calidad es un factor crucial para el éxito de los proyectos y garantiza el logro de los objetivos establecidos. La Gestión de Calidad de Proyectos abarca todas las actividades necesarias para lograr resultados, cumplir objetivos y asegurar la transferencia de conocimiento para facilitar su desarrollo.

Los estándares de calidad que rigen el trabajo de INGENIAR-CIMNE incluyen:

- La gestión del proyecto y el liderazgo del equipo, encabezados por el líder del equipo, como máximo responsable de la calidad del servicio prestado.
- Experiencia: El equipo del proyecto está compuesto por profesionales con amplia experiencia en gestión de proyectos, modelación, evaluación y gestión de riesgos, desarrollo de sistemas de información, tecnologías de la información, transferencia de conocimiento, capacitación y gestión de partes interesadas.
- Revisión de documentos de trabajo: todos los documentos de trabajo son revisados por el líder del equipo.
- Reuniones periódicas de seguimiento interno: Nuestro equipo realiza reuniones de discusión para revisar los servicios prestados, identificar áreas de mejora y priorizar acciones de atención y seguimiento.
- Control de calidad: Nuestros programas de control de calidad nos permiten verificar el cumplimiento de los estándares de calidad de las Firmas en cada uno de nuestros proyectos.
- Capacitación profesional: Todos nuestros profesionales están capacitados en las políticas y estándares aquí mencionados, así como los señalados en los términos de referencia de este proceso.

Para garantizar la finalización del proyecto y el logro de los objetivos con altos niveles de calidad, satisfaciendo las expectativas de las partes interesadas, INGENIAR-CIMNE adoptará este Plan de

Aseguramiento de Calidad, el cual considera las fases de Planificación, Ejecución y Control, como se describe a continuación:

- La *planificación* de la calidad implica identificar los requisitos y estándares que el proyecto y sus productos deben cumplir, así como las herramientas para demostrar dicho cumplimiento. Esta planificación se realizará en paralelo a la planificación general del proyecto.
- La *ejecución* de las actividades es constantemente para evaluar el rendimiento del equipo y recomendar cambios si es necesario. Los resultados no conformes se registrarán y gestionarán, se debatirán en reuniones de seguimiento y se definirán planes de acción correctiva, todo ello dentro de un proceso iterativo de mejora continua.
- El *control* de calidad implica supervisar los entregables para validar el cumplimiento de los requisitos de calidad. Esta responsabilidad recae en el líder del equipo.

2.6.2 Seguimiento, monitoreo y control de proyectos

Para garantizar el cumplimiento de los objetivos y el alcance del proyecto, se implementará el monitoreo interno de las actividades y la gestión de contingencias. Para ello, se utilizarán las siguientes herramientas de gestión de proyectos:

Gestión del cambio

El control de cambios del proyecto se basa en la supervisión, el seguimiento y el control de las actividades y los entregables. Se realizará en sesiones de supervisión. Los cambios se documentarán, y una vez completados, se registrarán como cambios permanentes en el proyecto.

Gestión de riesgos del proyecto

Se identifican los riesgos que puedan afectar al proyecto para reducir la probabilidad de pérdida de valor. El equipo de gestión del proyecto revisa constantemente los riesgos proyectados al inicio del proyecto y los actualiza a medida que este evoluciona.

Gestión del conocimiento

En este proyecto, la gestión del conocimiento busca recopilar información de la experiencia y sistematizarla para que sirva de base para la mejora en fases posteriores. Se buscarán espacios de diálogo para identificar información en sesiones de socialización y reuniones de seguimiento.

Plan de Gestión de Integración del Proyecto

La gestión de la integración de actores se producirá en todas las fases del proyecto:

- En la planificación: mediante la definición del alcance (amenazas y sectores por proyecto) con la participación activa de todas las partes interesadas.
- En ejecución: ejecutar las actividades cumpliendo el cronograma y presupuesto, ajustándose según sea necesario como resultado de las revisiones y la evolución del proyecto.

- En seguimiento y control: Cumplir con el plan de aseguramiento de la calidad y el esquema de seguimiento y control establecido. Mantener un registro de los cambios.
- En cierre: asegurar la finalización de todas las actividades antes de la aprobación de los productos entregados y documentar adecuadamente el proceso para llegar a esta etapa.

Documentación del proyecto

- Estructura del Documento: Se presentarán versiones preliminares de los entregables para su validación con el equipo GRMA y entidades contrapartes, promoviendo ajustes en fases tempranas y evitando retrabajos en etapas finales de cada actividad.
- Identificación: Se establecerá un protocolo de etiquetado de archivos para identificar su contenido y versión.
- Almacenamiento: Se dispondrá de un sitio virtual para el almacenamiento de documentos y la entrega de los productos se realizará de acuerdo a los requisitos de los términos de referencia.

Plan de Gestión de las Comunicaciones

El sistema de comunicación y enlace será gestionado por el líder del equipo, y su cumplimiento es responsabilidad de todas las partes involucradas. Las herramientas de comunicación y enlace que se utilizarán durante la ejecución del proyecto incluyen:

Tabla 5. Herramientas de comunicación del proyecto

Documento	Objetivo	Frecuencia
Minutas	Informar a los interesados sobre los temas tratados, conclusiones y compromisos resultantes de las reuniones.	Un conjunto de actas para cada reunión
Solicitud de información	Solicitar información adicional a la proporcionada al inicio del proyecto.	Según sea necesario
Invitación a reuniones	Según sea necesario.	Según sea necesario
Entrega de productos	Entregar informes resultantes de las actividades programadas.	Según cronograma

3 ESTADO DEL CONOCIMIENTO EN AMENAZA Y RIESGO EN COSTA RICA

Como parte de la revisión de literatura y estudios existentes requerida en este proyecto, se presenta una descripción del estado del conocimiento en materia de evaluación de la amenaza y el riesgo de desastres en Costa Rica, enfocada a los fenómenos que componen esta evaluación. Se trata de una revisión documental en la cual se presenta una descripción de los fenómenos y los casos históricos más relevantes, el desarrollo del conocimiento en Costa Rica en años recientes, el estado de implementación de políticas e instrumentos para gestión y las brechas identificadas en investigación hacia el futuro.

3.1 Cambio climático

Costa Rica enfrenta un clima tropical diverso influido por patrones estacionales complejos y fenómenos globales como El Niño-Oscilación del Sur. En las últimas décadas se han observado tendencias claras atribuidas al cambio climático: la temperatura promedio ha aumentado de forma sostenida ($\sim 0,2-0,3^{\circ}\text{C}$ por década desde 1970). La prolongación de la estación seca y el incremento en la frecuencia de días y noches cálidos corroboran esta tendencia (World Bank, 2021). Por contraste, el número de días lluviosos ha disminuido en algunas regiones, indicando cambios en el régimen hídrico. La precipitación es naturalmente variable dependiendo de la topografía y el ENSO, pero se han identificado alteraciones en sus patrones: episodios breves de lluvia extrema son más frecuentes, mientras que también aumentan los períodos consecutivos sin lluvia (Castro-Vincenzi, 2024). Estas variaciones sugieren un fortalecimiento del ciclo hidrológico, con mayor irregularidad intra e interanual en las lluvias y temperaturas más elevadas en todo el territorio (World Bank, 2021; IPCC, 2022).

Asimismo, Costa Rica es cada vez más vulnerable a eventos meteorológicos extremos potenciados por el calentamiento global, como sequías intensas, inundaciones repentinas y tormentas tropicales (Castro-Vincenzi, 2024). Aunque históricamente la influencia directa de huracanes era muy rara en el país, el aumento de la temperatura del mar y la atmósfera ha ampliado la amenaza de ciclones en latitudes bajas, evidenciado por la incursión excepcional del huracán Otto en 2016 (Castro-Vincenzi, 2024). El nivel medio del mar en las costas caribeña y pacífica muestra una tendencia ascendente acorde con el promedio global, lo que eleva el riesgo de erosión costera, inundación de zonas bajas y salinización de acuíferos costeros (IPCC, 2022). Además, se observan efectos sistémicos en los ecosistemas: la aridización progresiva de la región del Pacífico norte (zonas que históricamente ya eran secas) apunta a un proceso de desertificación incipiente, mientras que ecosistemas sensibles como los bosques nubosos y arrecifes coralinos han mostrado señales de deterioro asociadas al cambio climático (Pounds et al., 2006). Un caso emblemático fue la desaparición del sapo dorado en Monteverde a finales de los 80, uno de los primeros eventos vinculados a variaciones climáticas inusuales en el país (Pounds et al., 2006).

Costa Rica ha experimentado impactos climáticos desde antes de que el cambio climático antropogénico se reconociera plenamente, aunque la magnitud de los eventos recientes supera a la de épocas pasadas. En las décadas de 1980 y 1990, eventos extremos asociados a la variabilidad natural ya causaban estragos: por ejemplo, la severa sequía de 1982-1983 vinculada a un fuerte episodio de El Niño provocó pérdidas agrícolas significativas y racionamiento de agua en la región Chorotega (IPCC, 2022). Asimismo, la tormenta tropical César en 1996 generó inundaciones y deslizamientos notables en la zona atlántica, marcando uno de los primeros desastres hidrometeorológicos de gran escala documentados en el país.

Paralelamente, se observaron indicios biológicos del cambio ambiental: en 1987-1988 desapareció el sapo dorado en Monteverde y decayeron poblaciones de ranas arlequín, fenómenos que científicos atribuyeron posteriormente al estrés combinado de enfermedades y anomalías climáticas inusuales en las montañas (Pounds et al., 2006). Estos eventos históricos sugieren que, si bien Costa Rica siempre ha sido vulnerable a amenazas naturales, el clima más extremo de fines del siglo XX comenzó a ejercer impactos sin precedentes en ecosistemas y sectores productivos locales. Estudios retrospectivos confirman un aumento paulatino en la frecuencia de inundaciones y sequías desde los años 70, junto con tendencias de calentamiento que sobrepasaban la variabilidad histórica. En respuesta, ya en ese período inicial el país debió fortalecer su capacidad de respuesta a emergencias y sentar bases científicas para entender estas nuevas condiciones (Fernández et al., 2006).

En las últimas dos décadas, el impacto del cambio climático se ha vuelto más manifiesto y cuantioso en Costa Rica, superando con creces los registros históricos. Eventos extremos recientes han batido récords de intensidad y daños: el huracán Otto (noviembre de 2016) fue el primero en impactar directamente el territorio costarricense en más de un siglo, desplazando a miles de personas y causando daños económicos estimados en al menos \$185 millones (Castro-Vincenzi, 2024). Apenas un año después, la tormenta tropical Nate (octubre de 2017) produjo inundaciones generalizadas y deslizamientos en casi todo el país, convirtiéndose en el desastre más costoso en la historia nacional con pérdidas cercanas a \$562 millones (~1% del PIB) (Castro-Vincenzi, 2024). Estos eventos contemporáneos ilustran cómo las manifestaciones actuales del cambio climático, combinadas con la alta exposición de comunidades e infraestructura, han incrementado la incidencia de desastres. Además de ciclones inéditos, las sequías severas se han intensificado: la sequía centroamericana de 2014-2016 afectó gravemente el corredor seco del Pacífico norte costarricense, provocando escasez de agua para más de medio millón de personas y pérdidas agrícolas (especialmente de granos básicos) de hasta 60-80% en algunas zonas. Estudios del IPCC (2022) señalan que la sequía de 2015 dejó a 2,5 millones de personas en necesidad de asistencia humanitaria en Mesoamérica, evidenciando la gravedad regional de estos episodios. Igualmente, los eventos lluviosos extremos son más frecuentes: se registran inundaciones importantes prácticamente cada año en distintos puntos del país (CNE, 2016). La infraestructura pública ha sufrido deterioros recurrentes; de hecho, la Contraloría General de la República estimó que para 2010 el costo anual de reparación de infraestructura por eventos hidrometeorológicos extremos se había multiplicado respecto a décadas previas (CGR, 2017).

3.1.1 Historia del estudio de los efectos del cambio climático en Costa Rica

El desarrollo del estudio científico sobre el cambio climático en Costa Rica ha sido progresivo desde los años 1980, acompañando la creciente conciencia global sobre el tema. Durante los 80 y principios de los 90, las investigaciones locales se enfocaron principalmente en documentar la variabilidad climática y sus efectos inmediatos. Por ejemplo, se robusteció la red de estaciones meteorológicas del Instituto Meteorológico Nacional (IMN) y se realizaron análisis de eventos extremos históricos para diferenciar señales de variabilidad natural de posibles tendencias emergentes (Fernández et al., 2006). Un hito temprano fue la colaboración de científicos costarricenses en el Proyecto Mondo (1987), que exploró las implicaciones del calentamiento global en Centroamérica, y estudios de caso como el de Fernández y Vega (1996) sobre el impacto del huracán Fifi, los cuales sentaron bases de datos históricas y metodologías para monitorear cambios. Para finales de los 90 ya se reconocían indicios locales de cambio climático; por ejemplo, investigadores del Centro Científico Tropical y la UCR documentaron cambios en la dinámica del

bosque nuboso de Monteverde coincidentes con aumentos de temperatura, lo que motivó algunas de las primeras publicaciones costarricenses ligando pérdida de biodiversidad con variabilidad climática anómala (Pounds et al., 2006). En paralelo, Costa Rica mostró liderazgo político en el tema al ser sede en 1994 de una de las primeras conferencias regionales sobre cambio global, reflejando la atención incipiente de la comunidad científica y gubernamental nacional.

La institucionalización formal del estudio del cambio climático inició a finales de los 90 e inicios de los 2000, cuando Costa Rica asumió compromisos internacionales y consolidó sus capacidades técnicas. En 1994 el país ratificó la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático, lo que condujo a la preparación de la Primera Comunicación Nacional ante la CMNUCC (entregada en 2000), documento que integró por primera vez un diagnóstico nacional de emisiones, tendencias climáticas observadas y vulnerabilidad sectorial (MINAE & IMN, 2000). Esa comunicación y estudios asociados compilaron décadas de datos meteorológicos, confirmando un incremento de aproximadamente 0,6°C en la temperatura desde los años 1970 y señales de cambios en patrones de lluvia, sentando un precedente importante en la región. A partir de entonces, el IMN y las universidades nacionales (como la UCR y el ITCR) fortalecieron líneas de investigación climática. Un avance notable fue la publicación *“El clima de Costa Rica: su variabilidad y cambio climático”* (IMN & MINAET, 2008), un estudio exhaustivo que documentó las características climáticas del país, tendencias históricas y posibles escenarios futuros, convirtiéndose en referencia obligada. En 2009, el gobierno lanzó la Estrategia Nacional de Cambio Climático (ENCC) que incorporó insumos científicos y delineó un programa de investigación aplicada en mitigación y adaptación (MINAET, 2009). Durante la década de 2010, la creación de la Dirección de Cambio Climático en el Ministerio de Ambiente institucionalizó el vínculo ciencia-política, coordinando esfuerzos entre la academia, entidades estatales y organismos internacionales. Costa Rica también ha contribuido activamente a la ciencia global del clima: expertos nacionales participaron como autores en informes del IPCC (ej., capítulo Centroamérica en el AR5) y lideran iniciativas regionales de generación de escenarios climáticos. En los años recientes, proyectos como *LatinoAdapta* han evaluado las brechas de conocimiento para la toma de decisiones (Morales, 2018), reflejando una madurez en la meta-ciencia del cambio climático en el país.

La investigación sobre cambio climático en Costa Rica se caracteriza por su enfoque multidisciplinario, su pertinencia local y su estrecha vinculación con la formulación de políticas. Un rasgo distintivo ha sido la integración de datos climatológicos de alta resolución con estudios de impacto sectorial. El IMN, en coordinación con universidades, mantiene registros detallados de variables climáticas y ha desarrollado análisis estadísticos de tendencias de temperatura y precipitación extremas a nivel nacional. Estos esfuerzos han permitido identificar, por ejemplo, incrementos significativos en las temperaturas mínimas (noches más cálidas) y una reducción en la amplitud térmica diaria desde mediados del siglo XX (IMN & MINAET, 2008; IPCC, 2022). Asimismo, la investigación costarricense ha puesto énfasis en la vulnerabilidad de sus ecosistemas megadiversos. Estudios ecológicos en bosques tropicales, páramos de altura y zonas costeras han evaluado cómo especies y hábitats responden a las variaciones climáticas (Pounds et al., 2006). En el ámbito agrícola, se han investigado cultivos clave (café, caña de azúcar, banano) bajo escenarios de clima futuro, combinando agronomía con proyecciones climáticas para anticipar desafíos productivos (Corrales, 2017). Otro rasgo importante es la consideración de aspectos socioeconómicos: la investigación no se limita a las ciencias naturales, sino que incluye estudios sobre la economía del cambio climático (costos de la inacción, análisis costo-beneficio de medidas de adaptación) y dimensiones sociales

(migraciones inducidas por clima, equidad de género en adaptación), reflejando un abordaje integral acorde con la complejidad del fenómeno (Morales, 2018).

En cuanto a enfoques metodológicos, Costa Rica ha adoptado técnicas variadas, combinando herramientas cuantitativas de modelación climática con enfoques cualitativos participativos. Un pilar fundamental es la elaboración de escenarios climáticos futuros regionalizados: investigadores nacionales utilizan modelos de circulación global ajustados a Centroamérica (mediante *downscaling* dinámico y estadístico) para proyectar posibles cambios en temperatura y precipitación a lo largo del siglo XXI (IMN & MINAET, 2009). Estos escenarios –generalmente basados en los reportes del IPCC– se actualizan periódicamente y alimentan la planificación nacional. De la mano con la climatología, se emplean evaluaciones de riesgo y vulnerabilidad. Costa Rica ha aplicado el marco conceptual del IPCC donde el riesgo se entiende como resultado de la amenaza climática, la exposición y la vulnerabilidad; así, muchos estudios desarrollan índices compuestos que integran variables biofísicas (ej. elevación, escorrentía, cobertura forestal) con socioeconómicas (densidad poblacional, pobreza, capacidad institucional) para mapear las zonas de mayor riesgo de inundación, deslizamiento o sequía (World Bank, 2021; UNDP, 2021). En el ámbito de recursos hídricos, por ejemplo, se han usado modelos hidrológicos para proyectar la disponibilidad de agua bajo diferentes escenarios y determinar cuencas críticas (IMN & MINAET, 2011). Técnicas de sistemas de información geográfica (SIG) son ampliamente utilizadas para estas evaluaciones, permitiendo superponer datos de amenazas con infraestructura y asentamientos, y generando mapas de riesgo que orientan la toma de decisiones en gestión territorial (CNE, 2016). También es relevante el enfoque de *soluciones basadas en ecosistemas*: muchos estudios evalúan el papel de la naturaleza en la adaptación, por ejemplo, cuantificando cómo la conservación de manglares mitiga el impacto de marejadas o cómo los bosques protegen contra deslizamientos, lo cual ha guiado iniciativas de restauración ecológica como medida adaptativa (MINAET, 2009). Por último, los enfoques participativos han cobrado importancia; proyectos piloto en comunidades rurales involucran a pobladores en la identificación de riesgos locales y en la co-creación de estrategias de adaptación, integrando conocimiento tradicional con información científica (Morales, 2018).

En la actualidad, Costa Rica continúa experimentando de forma palpable las manifestaciones directas del cambio climático en su territorio. Las temperaturas medias siguen en ascenso: la última década ha incluido varios de los años más cálidos registrados históricamente, con anomalías positivas en prácticamente todas las regiones. En promedio, la temperatura superficial del aire en Costa Rica se estima alrededor de 1°C por encima de los niveles de mitad del siglo XX, reflejando la tendencia global (World Bank, 2021). Las áreas de mayor altitud han mostrado incrementos térmicos particularmente pronunciados, lo que está alterando la dinámica de ecosistemas montanos (por ejemplo, reduciendo la cobertura de neblina en bosques nubosos) y favoreciendo la expansión altitudinal de ciertas especies de insectos y patógenos (IPCC, 2022). En cuanto a la precipitación, si bien la lluvia total anual nacional no exhibe un cambio monótono significativo, su distribución temporal se ha vuelto más irregular y extrema. Se evidencian estaciones secas más largas y acentuadas, interrumpidas por eventos de aguaceros intensos en cortos períodos. Estudios recientes confirman un aumento en la frecuencia de precipitaciones extremas diarias y una mayor variabilidad interanual de la lluvia. Consecuentemente, algunas regiones como Guanacaste han sufrido sequías recurrentes, mientras que zonas del Caribe experimentan inundaciones repentinas con mayor asiduidad (Castro-Vincenzi, 2024). Esta intensificación del ciclo hidrológico se refleja en eventos concurrentes de signo opuesto: por un lado, más episodios de déficit hídrico estacional que afectan la

agricultura y disponibilidad de agua; por otro, mayor incidencia de tormentas locales severas que provocan inundaciones en cuencas vulnerables (IPCC, 2022).

En los últimos 15 años, los riesgos de desastre asociados a estas manifestaciones climáticas se han vuelto más evidentes y preocupantes, a pesar de los avances en gestión de riesgos. La combinación de eventos hidrometeorológicos más intensos con la exposición de poblaciones e infraestructura ha resultado en emergencias recurrentes de gran magnitud. Según la Política Nacional de Gestión del Riesgo 2016-2030, alrededor del 80% de las emergencias atendidas en el país en la última década estuvieron relacionadas con eventos de origen hidrometeorológico –principalmente inundaciones y deslizamientos– una proporción mayor que en décadas anteriores (CNE, 2016). Entre 2010 y 2020, prácticamente cada año Costa Rica sufrió al menos un episodio de inundación severa a escala regional (Caribe, Pacífico central o Pacífico norte) que requirió declaración de alerta y movilización de recursos de emergencia. La ocurrencia de la tormenta tropical Nate en 2017 evidenció de forma dramática la vulnerabilidad acumulada: este evento afectó 76 de los 82 cantones del país, destruyendo caminos, puentes y viviendas, y cobrando la vida de 14 personas, a pesar de evacuaciones masivas llevadas a cabo (Castro-Vincenzi, 2024). Si bien el número de víctimas mortales por desastres se ha mantenido relativamente bajo en comparación con otros países (gracias a mejores sistemas de alerta y cultura de prevención), el impacto económico ha ido en ascenso. La tormenta Nate, por ejemplo, dejó daños estimados en ₡384 mil millones de colones, superando en costos a cualquier evento previo (Castro-Vincenzi, 2024). Igualmente, las sequías recientes en Guanacaste han provocado pérdidas millonarias en la ganadería y agricultura, e incluso racionamientos de agua potable en temporadas secas prolongadas (IPCC, 2022). En términos de tendencias, las estadísticas nacionales muestran un aumento en la frecuencia de eventos extremos anuales y en el monto de pérdidas económicas asociadas a desastres desde 2005 (CGR, 2017). Este aumento del riesgo se manifiesta especialmente en zonas costeras bajas –amenazadas por inundación marina y fluvial–, en asentamientos informales ubicados en laderas o cercanías de ríos, y en regiones secas propensas a incendios forestales en el verano. No obstante, la experiencia reciente también ha impulsado mejoras: el país ha fortalecido sus protocolos de respuesta y desarrollado de sistemas de alerta temprana más eficientes, mitigando parcialmente los impactos en vidas humanas.

La evaluación del riesgo de desastre relacionado con el cambio climático en Costa Rica se basa en metodologías integrales que combinan análisis científico del clima con herramientas de gestión del riesgo tradicionales. Una técnica ampliamente utilizada es la modelización climática regional para estimar la evolución de las amenazas. El IMN y centros académicos emplean modelos atmosféricos regionales (por ejemplo, usando el marco del CORDEX para Centroamérica) que parten de escenarios de emisiones globales y los ajustan a la geografía nacional, generando proyecciones de variables como lluvia extrema, temperatura y nivel del mar a mediano y largo plazo (IPCC, 2022; IMN & MINAET, 2009). Estas proyecciones sirven para anticipar cómo podrían cambiar la frecuencia e intensidad de eventos adversos en el futuro. Adicionalmente, se realizan análisis estadísticos de tendencias observadas y extrapolación de probabilidades: por ejemplo, utilizar registros históricos para calcular la recurrencia de precipitaciones intensas de cierto umbral y cómo ese patrón está cambiando, apoyándose en técnicas de *extreme value analysis*. Otra técnica clave es la elaboración de mapas de amenaza y riesgo a través de Sistemas de Información Geográfica (SIG). Entidades como la CNE integran capas de información topográfica, hidrológica, climática y socioeconómica para identificar las zonas críticas: se mapean las cuencas con mayores caudales esperados bajo lluvias extremas, las laderas susceptibles a movimientos en masa ante

umbrales de precipitación, o las comunidades costeras por debajo de determinada cota expuestas a inundación marina (CNE, 2016). Estos mapas probabilísticos de amenaza se combinan con datos de exposición (ubicación de viviendas, caminos, escuelas, etc.) y con índices de vulnerabilidad (calidad constructiva, nivel socioeconómico, preparación local) para estimar el riesgo. El resultado son herramientas visuales –muchas disponibles en plataformas públicas como el Sistema Nacional de Información Territorial (SNIT)– que permiten priorizar intervenciones en gestión de riesgo y adaptación climática. Un ejemplo es el atlas cantonal de riesgo climático que diversas municipalidades han elaborado con apoyo técnico, identificando sus principales amenazas (inundación fluvial en zonas bajas, deslizamientos en cerros, sequía en distritos rurales, etc.) bajo el clima actual y escenarios futuros.

También se emplean técnicas sectoriales especializadas para evaluar riesgos específicos. En recursos hídricos, se utilizan modelos hidrológicos (como HEC-HMS o WEAP) alimentados con escenarios de lluvia y temperatura para estimar la disponibilidad de agua futura en embalses y acuíferos, determinando riesgos de escasez o inundaciones bajo el cambio climático (IMN & MINAET, 2011). En agricultura, se han desarrollado análisis de *clima-productividad* que correlacionan rendimientos de cultivos con variabilidad climática, permitiendo proyectar pérdidas esperadas con el aumento de extremos (por ejemplo, modelaciones de cómo aumentaría la ocurrencia de roya del café con noches más cálidas y húmedas). Asimismo, Costa Rica participa en iniciativas de índices globales que evalúan la vulnerabilidad y preparación ante el cambio climático, como el ND-GAIN Index de la Universidad de Notre Dame y el Índice de Riesgo Climático Global de Germanwatch. Estos índices, basados en datos comparativos internacionales, han sido utilizados como referencia para evaluar el desempeño del país en gestión de riesgo climático: típicamente sitúan a Costa Rica con vulnerabilidad moderada, pero con alta capacidad adaptativa relativa en comparación con otros países en desarrollo (World Bank, 2021). Otra técnica empleada es la evaluación participativa de riesgos a nivel comunitario. Con el reconocimiento de que los datos cuantitativos deben complementarse con conocimiento local, diversos proyectos (especialmente en zonas rurales indígenas y comunidades costeras) implementan metodologías participativas como mapas comunitarios de riesgo, matrices de amenazas y talleres de escenarios, donde los residentes identifican cómo el clima cambiante les afecta y proponen soluciones adaptativas (Morales, 2018). Estas evaluaciones cualitativas se integran luego a planes locales de adaptación y gestión de riesgo, asegurando que las perspectivas socioculturales sean consideradas. Por último, en años recientes se han incorporado técnicas de modelación económica para estimar el riesgo de desastre: análisis de *daños evitados* mediante medidas de adaptación (p. ej., cuánto costo futuro se ahorra elevando tal carretera para evitar inundaciones) y uso de escenarios de costo-beneficio bajo distintas políticas públicas (UNDP, 2021). Esto ha apoyado la priorización de inversiones en adaptación desde un punto de vista financiero.

3.1.2 Instrumentos de adaptación al cambio climático en la política pública

Costa Rica ha desarrollado un marco normativo y de políticas públicas robusto para enfrentar el cambio climático, que abarca desde la legislación nacional hasta compromisos internacionales, con el fin de mitigar sus causas y reducir sus impactos. En el ámbito internacional, el país ha mostrado un temprano compromiso: ratificó la Convención Marco de la ONU sobre Cambio Climático (CMNUCC) en 1994 y el Protocolo de Kioto en 2002, asumiendo metas voluntarias de limitación de emisiones de gases de efecto invernadero. Más recientemente, en 2016 ratificó el Acuerdo de París, integrando sus Contribuciones Nacionalmente Determinadas (NDC) tanto de mitigación como de adaptación en su planificación nacional

(MINAET, 2009). Estos compromisos internacionales han sido internalizados mediante la formulación de estrategias y planes nacionales. Un instrumento pionero fue la Estrategia Nacional de Cambio Climático (ENCC), presentada en 2009, que estableció una visión de largo plazo y ejes estratégicos en mitigación, adaptación, métricas (MRV), desarrollo de capacidades y sensibilización (MINAET, 2009). La ENCC sentó lineamientos generales –como el objetivo de carbono neutralidad y la integración de la adaptación en la planificación sectorial– y promovió la creación de la institucionalidad específica (por ejemplo, la Dirección de Cambio Climático en 2014 para coordinar su implementación). En paralelo, Costa Rica fortaleció el marco legal de gestión ambiental y de riesgos: la Ley Orgánica del Ambiente (Ley 7554/1995) y la Ley Nacional de Emergencias y Prevención del Riesgo (Ley 8488/2006) proporcionan base jurídica para acciones climáticas. En particular, la Ley 8488 y sus reformas incorporan explícitamente el concepto de “variabilidad y cambio climático” como factor que agrava las amenazas naturales, mandatando a la CNE y demás instituciones a considerarlo en la planificación de emergencias (CNE, 2016). Asimismo, la política nacional de gestión del riesgo vigente (PNGR 2016-2030) alinea los objetivos de reducción del riesgo de desastres con las tendencias proyectadas de cambio climático, buscando un enfoque preventivo y adaptativo (CNE, 2016).

En años recientes, Costa Rica ha promulgado instrumentos de política pública específicos para potenciar la adaptación y la resiliencia climática, complementando sus esfuerzos de mitigación. Un hito importante fue la adopción de la Política Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PNACC) 2018-2030, publicada mediante decreto ejecutivo en 2018, que establece el marco rector para integrar la adaptación en los sectores económicos y en la gestión territorial (MINAE, 2018). La PNACC define objetivos y líneas de acción en áreas como recursos hídricos, agricultura, gestión costera, salud y infraestructura, e instruye a las instituciones sectoriales a incorporar consideraciones de riesgo climático en sus planes institucionales. Para operacionalizar esta política, el país formuló su Primer Plan Nacional de Adaptación (NAP), lanzado en 2022, que detalla acciones de corto y mediano plazo (2022-2026) para fortalecer la resiliencia en seis ejes prioritarios (conocimiento, planificación territorial, ecosistemas, infraestructura, sector productivo y financiamiento) (MINAE, 2022). En cuanto a mitigación, Costa Rica se ha destacado con su Plan Nacional de Descarbonización 2018-2050, que, aunque enfocado en reducir emisiones, también tiene co-beneficios adaptativos (ej., promover movilidad eléctrica mejora la calidad del aire urbano ante olas de calor). Otros instrumentos de política pública relevantes incluyen: el Programa de Pago por Servicios Ambientales (PSA) vigente desde 1997, que incentiva la conservación de bosques (contribuyendo a la captura de carbono y a la protección de cuencas hidrográficas críticas frente a sequías e inundaciones); los Planes Nacionales de Desarrollo recientes que integran la variable climática en la planificación plurianual (por ejemplo, el PND 2019-2022 incluyó metas de adaptación en agricultura y agua) (UNDP, 2021); y normas técnicas sectoriales actualizadas, como códigos de construcción resilientes (incorporando criterios para edificaciones resistentes a eventos extremos) y guías para infraestructura verde. Cabe mencionar que, a diferencia de otros países, Costa Rica aún no cuenta con una Ley Marco de Cambio Climático única (La Ruta del Clima, 2021). No obstante, esa ausencia se ha suplido con una combinación de leyes ambientales existentes y decretos ejecutivos que en conjunto cubren la acción climática. Por ejemplo, la Ley Forestal, la Ley de Biodiversidad y la Ley de Aguas incluyen disposiciones que apoyan la adaptación ecosistémica y la gestión sostenible de recursos ante cambios ambientales.

La implementación de las políticas climáticas en Costa Rica ha tenido avances significativos, convirtiendo al país en un referente internacional en algunos aspectos, aunque también enfrenta desafíos para lograr

plena efectividad. En materia de mitigación, Costa Rica ha cumplido o superado muchos estándares internacionales: por ejemplo, logró prácticamente decarbonizar su matriz eléctrica, generando en los últimos años más del 98% de su electricidad a partir de fuentes renovables (hidroeléctrica, eólica, geotermia), lo cual está en línea con las metas del Acuerdo de París (Castro-Vincenzi, 2024). Asimismo, ha mantenido políticas pioneras de conservación que le permitieron pasar de tener una de las tasas de deforestación más altas en los 1980s a registrar cobertura boscosa en aumento (superior al 52% del territorio hoy), cumpliendo con creces el Objetivo 15 de los ODS sobre ecosistemas terrestres (UNDP, 2021). Estos logros reflejan una alineación sólida con estándares internacionales de mitigación y desarrollo sostenible. En adaptación, la alineación también es notable en cuanto a planificación: el país formuló su Plan Nacional de Adaptación siguiendo las directrices metodológicas de la CMNUCC para los NAP, garantizando coherencia con las mejores prácticas globales (MINAE, 2022). Del mismo modo, la Política Nacional de Adaptación (2018) incorporó los principios del Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres, enfatizando la importancia de la prevención, la construcción resiliente y la recuperación mejorada (Build Back Better) en concordancia con dicho marco internacional (CNE, 2016). Costa Rica participa activamente en iniciativas globales de transparencia y rendición de cuentas climáticas: entregó tres Comunicaciones Nacionales y dos informes bienales actualizados ante la CMNUCC, reportando sus avances en mitigación y adaptación conforme a las exigencias del Acuerdo de París (MINAE, 2018). Además, sus metas de carbono neutralidad al 2050 están alineadas con la recomendación del IPCC de lograr emisiones netas cero a mitad de siglo para limitar el calentamiento a 1.5°C (IPCC, 2022). A nivel regional, Costa Rica suele liderar coaliciones en negociaciones climáticas –por ejemplo, co-presidió junto a Francia la *Coalición de Alta Ambición* para la naturaleza y las personas– impulsando estándares más estrictos de protección ambiental. Todo lo anterior evidencia que, en el papel y en muchos indicadores, la implementación de la política climática costarricense está bien encaminada y en sintonía con estándares internacionales.

No obstante, persisten brechas importantes entre las políticas diseñadas y la realidad de su ejecución, lo que afecta la efectividad de las mismas. Informes de la Contraloría General y evaluaciones independientes señalan que, si bien Costa Rica cuenta con un marco normativo robusto, la puesta en práctica de algunas acciones es deficiente o lenta (CGR, 2017). Por ejemplo, la incorporación del cambio climático en las instituciones públicas se ha concentrado más en la agenda de mitigación (reducción de emisiones) que en la de adaptación (CGR, 2017); muchas entidades han avanzado en inventarios de gases de efecto invernadero y planes de reducción, pero aún no integran plenamente la gestión del riesgo climático en su quehacer. Asimismo, la falta de una ley específica ha generado cierta dispersión institucional: múltiples ministerios y entidades trabajan el tema con enfoques propios, dificultando a veces la coordinación. En la práctica, algunos instrumentos como la ENCC 2009 quedaron parcialmente implementados por limitaciones presupuestarias y cambios de gobierno que restaron continuidad (Morales, 2018). Por otro lado, aunque existen planes nacionales de adaptación, su ejecución a nivel local es desigual. Solo una fracción de los municipios ha incorporado acciones adaptativas en sus planes reguladores o de desarrollo, debido en parte a recursos técnicos y financieros insuficientes en los gobiernos locales (Morales, 2018). Además, el seguimiento y evaluación de las políticas es un área débil: hasta fechas recientes no había un sistema consolidado de indicadores para medir la efectividad de las medidas de adaptación y pérdidas evitadas, lo que complica ajustar las estrategias con base en resultados (MINAE, 2018). Otro desafío es el financiamiento: la Contraloría (2017) destacó la carencia de mecanismos para rastrear los fondos nacionales destinados al cambio climático, dificultando comprobar cuánto se invierte realmente en

adaptación y reducción de riesgo. A pesar de estas brechas, Costa Rica mantiene un buen desempeño relativo: por ejemplo, en el Índice de Adaptación Global (ND-GAIN) ocupa una posición alta en capacidad de respuesta, aunque moderada en vulnerabilidad, lo que sugiere que institucionalmente está mejor preparado que muchos países de ingresos similares (World Bank, 2021).

3.1.3 Brechas existentes en conocimiento y gestión

A pesar del avance significativo en la comprensión e institucionalización del cambio climático en Costa Rica, subsisten importantes brechas en el conocimiento disponible y en la gestión práctica del fenómeno. En el plano científico, una de las principales brechas es la insuficiente resolución y aplicabilidad local de la información climática. Si bien existen proyecciones y datos a nivel nacional, la información sobre escenarios climáticos futuros a nivel local está disponible solo para algunas regiones y, cuando existe, raramente se utiliza de forma sistemática para orientar la planificación territorial (Morales, 2018). Esto se debe en parte a la falta de recursos para *downscaling* detallado y a la complejidad topográfica del país, que genera microclimas muy variados. También se identifica un débil aprovechamiento de las redes científicas internacionales: Costa Rica podría beneficiarse más de colaboraciones y transferencia tecnológica en materia de modelación climática avanzada, monitoreo satelital o investigación en adaptación, pero actualmente la participación en tales redes es limitada (Morales, 2018). Otra brecha de conocimiento radica en sectores poco estudiados; por ejemplo, los impactos del cambio climático en la salud pública (distribución de enfermedades tropicales, estrés térmico en ciudades) han sido poco investigados localmente, generando vacíos para la formulación de políticas de salud preventiva. De igual forma, en el frente marino-costero, aspectos como la acidificación oceánica y su efecto en corales o la elevación del nivel del mar sobre humedales costeros carecen de estudios longitudinales en Costa Rica. La ausencia de esta evidencia dificulta priorizar acciones en esos ámbitos. Además, aunque Costa Rica cuenta con series históricas climáticas largas, la gestión de datos presenta desafíos: no existe un repositorio nacional centralizado y abierto de información climática integrada (más allá del portal del IMN), lo que a veces limita el acceso de investigadores y tomadores de decisión a la mejor información disponible (World Bank, 2021).

En cuanto a la gestión del cambio climático, las brechas identificadas se relacionan con aspectos institucionales, normativos y de recursos. Un punto señalado frecuentemente es la ausencia de una legislación específica y comprehensiva de cambio climático. Actualmente, Costa Rica no cuenta con una Ley Marco de Cambio Climático que articule todos los esfuerzos; si bien esto no ha impedido la acción climática mediante otras normas y políticas, la falta de un instrumento legal unificador puede conducir a superposiciones o lagunas competenciales (La Ruta del Clima, 2021). Por ejemplo, varias instituciones comparten responsabilidades en materia de adaptación (MINAE, CNE, MAG, Ministerio de Salud), pero no siempre está claro el mandato de cada una ni existe un mecanismo legal fuerte que las obligue a coordinarse. Asociado a lo anterior, persiste la fragmentación institucional: aunque la Dirección de Cambio Climático actúa como ente rector técnico, no tiene rango de viceministerio ni autoridad sobre otras carteras, limitando su capacidad de exigir la integración del tema climático en todas las entidades (Morales, 2018). Otra brecha de gestión importante es el financiamiento. Costa Rica carece de un fondo nacional dedicado exclusivamente a cambio climático; las acciones se financian con partidas dispersas de diferentes instituciones y con cooperación internacional puntual. La Contraloría General (2017) ha advertido la dificultad de rastrear y evaluar la eficacia del gasto público en cambio climático, lo que indica

una brecha en transparencia y seguimiento financiero. Adicionalmente, a nivel subnacional, muchos gobiernos municipales aún no incorporan el cambio climático en su planificación debido a brechas de capacidad técnica y recursos. Solo 31 de los 82 municipios del país cuentan con planes reguladores actualizados, y pocos integran mapas de riesgo climático o consideraciones de desarrollo resiliente (Morales, 2018). Esta brecha en planificación local es crucial, pues es en el territorio donde se ejecutan muchas medidas adaptativas (ordenamiento de zonas inundables, manejo de acueductos, etc.). También existen brechas en la participación y sensibilización: aunque la conciencia pública sobre el cambio climático ha aumentado (encuestas indican que más del 90% de la población reconoce que el clima ya está cambiando), traducir esa conciencia en cambios de comportamiento y apoyo a políticas robustas sigue siendo un reto (MINAE, 2018). Finalmente, desde la perspectiva de gestión del conocimiento, se ha identificado que no hay suficiente integración entre la ciencia y la formulación de políticas: los investigadores a veces trabajan de manera aislada y sus hallazgos no siempre se traducen en directrices operativas; por otro lado, los tomadores de decisión pueden no comunicar claramente sus necesidades de información a la academia (Morales, 2018). Este divorcio parcial entre ciencia y política representa una brecha a subsanar para mejorar la efectividad de la respuesta al cambio climático.

Frente a las brechas identificadas y la aceleración de las manifestaciones del cambio climático, Costa Rica ha delineado varias prioridades de investigación y acción para los próximos años. En el ámbito de la investigación, una prioridad fundamental es el fortalecimiento del monitoreo y las proyecciones climáticas a escala fina. Esto implica expandir y modernizar la red de estaciones meteorológicas y oceanográficas, así como invertir en capacidades de modelación climática local para producir escenarios regionalizados de alta resolución (Morales, 2018). Información climática más detallada permitirá evaluar con mayor certeza impactos en microcuencas, ciudades específicas o ecosistemas particulares, cerrando la brecha de información local. Igualmente, se ha identificado como prioridad profundizar la investigación en áreas poco estudiadas pero vulnerables: por ejemplo, comprender mejor la relación entre clima y salud (incidencia de dengue, malaria y enfermedades emergentes bajo escenarios de calentamiento; impactos de olas de calor en población urbana) es crucial, y demanda estudios interdisciplinarios entre climatólogos y epidemiólogos. Lo mismo aplica para ecosistemas marinos: se requiere investigar el estado y resiliencia de los arrecifes coralinos del Caribe sur y el Pacífico (e.g., Isla del Coco) ante el calentamiento y la acidificación, con miras a diseñar estrategias de conservación adaptativa (MINAE, 2018). Otra línea prioritaria de investigación es la evaluación de medidas de adaptación y su eficacia. Para optimizar recursos, Costa Rica necesita más estudios piloto que cuantifiquen los beneficios de diferentes intervenciones adaptativas (p. ej., comparar la efectividad de soluciones basadas en ecosistemas vs. infraestructura gris en control de inundaciones). Esto incluye investigación socioeconómica, como análisis de costo-beneficio y retorno de inversión de medidas de adaptación en sectores clave –agricultura, pesca, turismo– para sustentar decisiones de política y financiamiento (IPCC, 2022). Asimismo, es prioridad generar indicadores y sistemas de monitoreo y evaluación (M&E) robustos para las acciones climáticas: la academia puede contribuir desarrollando métricas innovadoras de resiliencia comunitaria o sostenibilidad de ecosistemas bajo presión climática. Finalmente, se reconoce la necesidad de fortalecer la investigación orientada a la *comunicación* y cambio de comportamiento: entender mejor las percepciones sociales del riesgo climático y las barreras para la adopción de prácticas resilientes, con el fin de diseñar programas educativos y de extensión efectivos. En síntesis, las prioridades de investigación giran en torno a llenar vacíos de datos locales, estudiar sectores y ecosistemas críticos aún poco explorados, evaluar rigurosamente las opciones de adaptación disponibles y mejorar el seguimiento de las intervenciones,

todo ello con un enfoque interdisciplinario que vincule ciencias naturales, sociales y económicas (Morales, 2018; IPCC, 2022).

En el plano de la acción, Costa Rica ha establecido ejes estratégicos que requieren implementación urgente para reducir el riesgo climático y aumentar la resiliencia. Un primer eje prioritario es el fortalecimiento de la gestión del conocimiento y la capacidad institucional. Esto implica consolidar mecanismos permanentes de interacción ciencia-política, como comités asesores científicos que alimenten las decisiones nacionales (MINAE, 2022). También incluye capacitar a funcionarios de instituciones y gobiernos locales en el uso de información climática y en la incorporación de criterios de adaptación en proyectos de inversión pública. El Plan Nacional de Adaptación 2022-2026 destaca la necesidad de desarrollar servicios climáticos –por ejemplo, sistemas de alerta temprana mejorados y pronósticos estacionales– y de integrarlos en la planificación de sectores como agricultura y energía (MINAE, 2022). Un segundo eje es la integración de la adaptación en la planificación territorial y sectorial. En la práctica, esto se traduce en actualizar los planes reguladores municipales considerando escenarios de inundación y deslizamientos futuros, reasentando poblaciones de zonas de alto riesgo cuando sea necesario, y asegurando que nuevos desarrollos turísticos o de infraestructura se ubiquen fuera de áreas altamente expuestas (CNE, 2016). A nivel sectorial, significa, por ejemplo, ajustar las prácticas agrícolas (siembras escalonadas, variedades resistentes a sequía) en zonas donde se prevé menor lluvia, o rediseñar los sistemas de drenaje urbano en ciudades como San José para enfrentar lluvias más intensas. Un tercer eje prioritario de acción es la protección y restauración de ecosistemas como defensa natural. Dado que Costa Rica ha apostado por soluciones basadas en la naturaleza, es crucial acelerar programas de reforestación de cuencas hidrográficas, restauración de manglares costeros (que actúan como barreras contra marejadas) y conservación de arrecifes coralinos, lo cual simultáneamente contribuye a la adaptación y preserva la biodiversidad (MINAE, 2018). Estas acciones requieren financiamiento y participación local, por lo que se prioriza la creación de incentivos económicos y esquemas de pago por servicios ambientales orientados explícitamente a la adaptación (por ejemplo, compensaciones a comunidades por proteger bosques que reducen riesgo de deslizamientos). En cuarto lugar, la infraestructura resiliente es una prioridad: se deben rediseñar y construir obras públicas (carreteras, puentes, diques, sistemas de riego) con especificaciones que consideren los escenarios climáticos proyectados, evitando futuras pérdidas. El plan de adaptación nacional incluye metas concretas como garantizar que al 2030 el 100% de la infraestructura nueva crítica (hospitales, puertos, energía) incorpore evaluaciones de riesgo climático en su fase de diseño (MINAE, 2022). Para lograrlo, será necesario actualizar códigos de construcción y normas técnicas, otra tarea en la agenda inmediata. Asimismo, una prioridad transversal es el aseguramiento de financiamiento sostenible para la acción climática. Costa Rica buscará diversificar sus fuentes de financiamiento mediante mecanismos innovadores: acceso a fondos internacionales (Fondo Verde del Clima, Fondo de Adaptación), emisión de bonos verdes soberanos y desarrollo de seguros paramétricos contra desastres para transferir parte del riesgo (CGR, 2017). A nivel doméstico, se discute la creación de un fondo nacional climático que aglutine recursos de distintos sectores para inversión en resiliencia. Por último, pero no menos importante, está la prioridad de fortalecer la participación ciudadana y la educación. Empoderar a las comunidades locales como protagonistas de la adaptación –a través de comités comunitarios de emergencia, educación ambiental en escuelas, campañas de comunicación– es vital para lograr cambios desde la base y garantizar la sostenibilidad de las medidas en el tiempo (UNDP, 2021). El involucramiento del sector privado también se considera prioritario: encauzar al sector productivo hacia prácticas bajas en

carbono y resilientes (por ejemplo, promover la agroforestería, la ganadería sostenible, el ecoturismo responsable) de modo que la acción climática sea un esfuerzo de toda la sociedad.

3.2 Riesgo por lluvias intensas e inundaciones

Las lluvias extremas en Costa Rica se caracterizan por su alta intensidad y frecuencia, definidas como precipitaciones diarias superiores a 30 mm, influenciadas por fenómenos como la MJO, huracanes y sistemas de bajas presiones (Poleo et al., 2014; Retana, 2012). Estos eventos, que aportan hasta el 6% de la lluvia anual en el caso de huracanes, provocan inundaciones y deslizamientos, especialmente en áreas de alta saturación de suelos o cuencas alteradas como Guanacaste y el Pacífico Central (Retana et al., s.f.; Cruz Roja Costarricense, 2024a). La Niña, por ejemplo, generó excesos de hasta 110% en 2010, mientras que tormentas como Sara en 2024 intensificaron riesgos para docenas de comunidades (Brenes & Bonilla, 2012; Cruz Roja Costarricense, 2024b). Factores orográficos y convectivos amplifican su impacto en zonas montañosas, afectando infraestructura y comunidades vulnerables (CAPRA, s.f.). Esta combinación de condiciones climáticas y geográficas define su potencial destructivo.

El impacto de estas lluvias se agrava por la vulnerabilidad social y el uso inadecuado del suelo, generando efectos como erosiones e interrupciones en carreteras y servicios (Salgado, 2009; Orozco Montoya & Brenes Maykall, 2023). Históricamente, eventos como el huracán Tomás (2010) dejaron pérdidas por 142 mil millones de colones, destacando su capacidad para dañar sectores clave como la agricultura y la vialidad (Retana, 2012). En noviembre de 2024, la saturación de suelos entre 85% y 100% incrementó la probabilidad de desastres, con más de 1,900 personas evacuadas (Cruz Roja Costarricense, 2024b). Aunque frentes fríos son frecuentes (37% de los eventos), su aporte pluvial es menor (3%), contrastando con sistemas más intensos (Retana, 2012). Estas características exigen un enfoque integral que combine monitoreo climático con estrategias de adaptación para mitigar sus consecuencias en el país.

Históricamente, las lluvias extremas en Costa Rica han dejado huellas profundas, como las inundaciones del Río Reventado en 1951, que afectaron a más de 2,000 personas, o el huracán Mitch (1998), que detonó impactos severos en Limón y Talamanca (Vallejos Vásquez et al., 2012; CAPRA, s.f.). Eventos como el huracán Tomás (2010) generaron pérdidas de \$283.95 millones, impactando gravemente la infraestructura vial y el sector agroalimentario (Brenes & Bonilla, 2012; Retana, 2012). Estas lluvias han causado deslizamientos e inundaciones recurrentes, afectando comunidades vulnerables en zonas costeras y montañosas (Retana et al., s.f.; Salgado, 2009). Su impacto económico y humano resalta la necesidad de entender su evolución para diseñar respuestas efectivas, un desafío que persiste desde el siglo XX (Poleo et al., 2014).

Las lluvias extremas siguen siendo una amenaza significativa, con eventos como las de noviembre de 2024, que evacuaron a más de 1,900 personas en Guanacaste, o el triple episodio de La Niña (2020-2022), que afectó a 4,879 personas (Cruz Roja Costarricense, 2024b; Orozco Montoya & Brenes Maykall, 2023). La Tormenta Tropical Nicole (2010) y emergencias recientes sugieren un aumento en frecuencia e intensidad, exacerbado por el cambio climático y la falta de planificación territorial (CAPRA, s.f.; Brenes & Bonilla, 2012). Estos eventos han dañado viviendas, carreteras y servicios, destacando la vulnerabilidad de áreas urbanas y rurales (Salgado, 2009). La respuesta institucional, aunque mejorada, enfrenta retos logísticos que evidencian la urgencia de fortalecer la resiliencia comunitaria y la infraestructura (Cruz Roja Costarricense, 2024a).

3.2.1 Historia del estudio del riesgo por lluvias intensas en Costa Rica

El estudio de las lluvias extremas en Costa Rica ha evolucionado desde registros históricos, como los de 1723 documentados por la CNE, hacia análisis más sofisticados impulsados por el IMN y eventos como el huracán Mitch (1998) (Vallejos Vásquez et al., 2012; Retana et al., s.f.). Inicialmente centrado en la variabilidad climática, como la influencia de la MJO, ha incorporado la vulnerabilidad social como eje clave desde finales del siglo XX (Poleo et al., 2014; Salgado, 2009). Instituciones como el IMN y la CNE han liderado esta transición, usando datos históricos y tecnologías modernas para entender fenómenos como La Niña (2010-2012) y sus impactos (Brenes & Bonilla, 2012; Orozco Montoya & Brenes Maykall, 2023). Este enfoque refleja una creciente conciencia sobre la necesidad de prevención y adaptación al cambio climático.

En las últimas décadas, la investigación ha avanzado con aportes de entidades como CORBANA y CEPAL, integrando proyecciones climáticas y análisis socioeconómicos (CAPRA, s.f.; Retana, 2012). La gestión del riesgo se ha fortalecido tras eventos como Tomás (2010), impulsando políticas públicas y estudios de tendencias, como la disminución de frentes fríos (Retana, 2012). Aunque la documentación histórica es robusta, la falta de un Plan Nacional de Desarrollo Urbano (PNDU) integral limita su aplicación práctica (Brenes & Bonilla, 2012). La participación comunitaria y el monitoreo continuo, promovidos por la CNE, marcan un hito reciente, pero persisten brechas en la integración de saberes locales, esenciales para una gestión efectiva (Vallejos Vásquez et al., 2012; Orozco Montoya & Brenes Maykall, 2023).

El estudio de las lluvias extremas en Costa Rica se distingue por su enfoque multidisciplinario, integrando meteorología, ciencias sociales e ingeniería para analizar patrones y su relación con la vulnerabilidad social (Poleo et al., 2014; Retana et al., s.f.). La identificación de áreas críticas, como las cuencas de Bagaces o Pérez Zeledón, se basa en indicadores socioeconómicos y mapeo de riesgos, priorizando la participación comunitaria (Vallejos Vásquez et al., 2012; Orozco Montoya & Brenes Maykall, 2023). Este enfoque busca no solo prever eventos, sino mitigarlos mediante educación y planificación territorial, considerando factores como la saturación de suelos y el cambio climático (Cruz Roja Costarricense, 2024a; Retana, 2012). Así, se fomenta una gestión proactiva que trasciende la respuesta inmediata.

La combinación de datos históricos y modelos predictivos, como los usados para La Niña (2010-2012), permite evaluar tendencias y proyectar impactos en infraestructura y comunidades (Brenes & Bonilla, 2012; CAPRA, s.f.). La CNE y la Cruz Roja enfatizan sistemas de alerta temprana y coordinación institucional, mientras que estudios como los de Salgado (2009) abogan por manejar cuencas como unidades de planificación (Salgado, 2009; Cruz Roja Costarricense, 2024b). Aunque el enfoque es sólido, la integración de conocimientos locales sigue siendo un reto, al igual que la aplicación consistente de políticas en áreas urbanas vulnerables (Orozco Montoya & Brenes Maykall, 2023). Este marco busca equilibrar ciencia y acción comunitaria para reducir riesgos de manera más efectiva.

En los últimos 15 años, las lluvias extremas han incrementado su impacto en Costa Rica, con eventos como el huracán Tomás (2010) y el triple episodio de La Niña (2020-2022) causando inundaciones y deslizamientos masivos (Brenes & Bonilla, 2012; Orozco Montoya & Brenes Maykall, 2023). En 2022, el 80% de los desastres fueron hidrometeorológicos, afectando a 4,879 personas en cantones como Pérez Zeledón, mientras que en 2024, más de 1,900 fueron evacuadas por lluvias intensas en Guanacaste (Orozco Montoya & Brenes Maykall, 2023; Cruz Roja Costarricense, 2024b). El cambio climático ha

intensificado estos fenómenos, reduciendo frentes fríos y aumentando huracanes, lo que eleva el riesgo en áreas vulnerables (Retana, 2012; Poleo et al., 2014). La respuesta institucional ha mejorado, pero la saturación de suelos sigue siendo un factor crítico (Cruz Roja Costarricense, 2024a).

Aunque la CNE ha implementado alertas y reconstrucción, eventos como la Tormenta Tropical Nicole (2010) muestran que la infraestructura sigue siendo frágil (Vallejos Vásquez et al., 2012; Retana et al., s.f.). La gestión del riesgo ha avanzado con sistemas de monitoreo, pero persisten desafíos en comunidades de alta pobreza y exposición, como Cóbano o Mogote (Retana et al., s.f.).

La evaluación del riesgo por lluvias extremas en Costa Rica emplea modelos estadísticos y análisis de series temporales junto con mapeo de riesgos para prever inundaciones (Poleo et al., 2014; Vallejos Vásquez et al., 2012). El IMN usa datos climatológicos e indicadores como Necesidades Básicas Insatisfechas (NBI) para evaluar vulnerabilidad en cantones como Bagaces, mientras que la CNE integra modelos hidrológicos y sistemas de alerta temprana (Retana et al., s.f.; Cruz Roja Costarricense, 2024a). Análisis históricos, como los de CAPRA (s.f.), generan curvas de frecuencia para eventos desde 1861, apoyando proyecciones climáticas (CAPRA, s.f.; Retana, 2012). Estas técnicas buscan anticipar impactos y priorizar recursos en áreas críticas, combinando ciencia y necesidades sociales.

En emergencias como las de 2024, las EDAN y el monitoreo meteorológico son clave para la respuesta inmediata, mientras que estudios de La Niña (2010-2012) usan modelos climáticos y análisis económico para evaluar pérdidas sectoriales (Cruz Roja Costarricense, 2024b; Brenes & Bonilla, 2012). Aunque el enfoque es robusto, la falta de instrumentación detallada en algunas regiones limita su precisión (CAPRA, s.f.). La integración de datos históricos con herramientas modernas permite una gestión más informada, pero requiere mayor inversión en tecnología y capacitación comunitaria para ser plenamente efectiva (Orozco Montoya & Brenes Maykall, 2023; Salgado, 2009).

3.2.2 Instrumentos de gestión del riesgo de lluvias intensas en la política pública

Costa Rica ha implementado normativas como la Ley Nacional de Emergencias (N° 8488) y la Política Nacional de Gestión del Riesgo 2016-2030, promoviendo prevención y adaptación ante lluvias extremas (Retana et al., s.f.; Orozco Montoya & Brenes Maykall, 2023). La CNE utiliza decretos de emergencia, como los de 2022 y 2024, junto con planes de manejo de cuencas para mitigar impactos en áreas como Guanacaste (Vallejos Vásquez et al., 2012; Cruz Roja Costarricense, 2024b). El Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (2022-2026) y el Marco Global para la Evaluación del Riesgo (GRAF) buscan fortalecer la resiliencia, mientras que la Cruz Roja coordina con el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo (Orozco Montoya & Brenes Maykall, 2023; Cruz Roja Costarricense, 2024a). Estas políticas priorizan la planificación territorial y la respuesta institucional.

Sin embargo, instrumentos como los planes reguladores y la gestión de mancomunidades municipales enfrentan retos de implementación, especialmente en áreas urbanas vulnerables (Salgado, 2009; Vallejos Vásquez et al., 2012). Aunque las declaratorias de emergencia facilitan recursos, su efectividad depende de la coordinación y la inversión en infraestructura resiliente (Cruz Roja Costarricense, 2024b). La alineación con estándares internacionales es evidente, pero la falta de un enfoque integral que evite la ocupación de zonas de riesgo limita los resultados (Orozco Montoya & Brenes Maykall, 2023). Estas

normativas reflejan un avance, pero requieren mayor ejecución y monitoreo para reducir significativamente los impactos de las lluvias extremas en el país.

La implementación de políticas como la Ley N° 8488 ha permitido respuestas rápidas, como las de 2024 con más de 570 voluntarios desplegados, pero su efectividad varía por limitaciones de recursos (Cruz Roja Costarricense, 2024a, 2024b; Retana et al., s.f.). Planes de manejo de cuencas y el Plan Nacional de Adaptación han reducido impactos en algunas áreas, alineándose con estándares internacionales como el GRAF, aunque la capacitación comunitaria sigue siendo insuficiente (Orozco Montoya & Brenes Maykall, 2023; Vallejos Vásquez et al., 2012). La Cruz Roja sigue protocolos globales, pero enfrenta retos logísticos que afectan la reposición de insumos (Cruz Roja Costarricense, 2024b). Estos esfuerzos muestran avances, pero brechas en coordinación persisten.

Aunque la gestión del riesgo ha mejorado, la falta de infraestructura resiliente y la implementación desigual limitan su éxito, especialmente en regiones vulnerables como Guanacaste (Retana et al., s.f.; Salgado, 2009). La colaboración con organizaciones internacionales fortalece la respuesta, pero la efectividad depende de mayor inversión y participación local (Cruz Roja Costarricense, 2024a). La alineación con estándares globales es un objetivo en curso, con progresos en monitoreo y alertas, pero la adaptación a contextos locales requiere más recursos y consenso institucional para maximizar la resiliencia ante lluvias extremas (Orozco Montoya & Brenes Maykall, 2023).

3.2.3 Brechas existentes en conocimiento y gestión

Entre las brechas en el estudio de lluvias extremas en Costa Rica destaca la limitada predicción precisa de eventos y la integración insuficiente de saberes locales (Poleo et al., 2014; Retana et al., s.f.). La falta de datos detallados sobre intensidad y efectos específicos, junto con la escasa coordinación entre municipalidades, dificulta la gestión efectiva, especialmente en cuencas alteradas (CAPRA, s.f.; Salgado, 2009). La vulnerabilidad social, aunque reconocida, no siempre se aborda con estrategias adaptadas, y la infraestructura de respuesta necesita fortalecimiento (Cruz Roja Costarricense, 2024a; Orozco Montoya & Brenes Maykall, 2023). Estas lagunas reflejan un desafío en la aplicación práctica del conocimiento.

La ausencia de un PNDU que integre la reducción de riesgos agrava la exposición en áreas urbanas, mientras que la educación comunitaria y el apoyo psicosocial son insuficientes tras eventos como los de 2024 (Brenes & Bonilla, 2012; Cruz Roja Costarricense, 2024b). La comprensión de tendencias futuras, como el aumento de huracanes, requiere más investigación, y los recursos limitados obstaculizan sistemas de alerta temprana (Retana, 2012; Vallejos Vásquez et al., 2012). Aunque hay avances, cerrar estas brechas exige mayor inversión en datos, capacitación y políticas que combinen ciencia y acción local para una gestión más robusta (Orozco Montoya & Brenes Maykall, 2023).

Las prioridades incluyen mejorar modelos predictivos de lluvias extremas y fortalecer la recolección de datos climáticos para anticipar impactos (Poleo et al., 2014; Retana, 2012). Desarrollar estrategias de adaptación basadas en vulnerabilidad social, como en Bagaces o Guanacaste, y fomentar la participación comunitaria son esenciales para la resiliencia (Retana et al., s.f.; Cruz Roja Costarricense, 2024a). La investigación sobre efectos ambientales y sociales, junto con la implementación de sistemas de alerta temprana, puede reducir riesgos, mientras que el ordenamiento territorial debe evitar ocupaciones en

zonas peligrosas (Vallejos Vásquez et al., 2012; Salgado, 2009). Estas acciones buscan una gestión más proactiva y efectiva.

Fortalecer la capacidad institucional y la infraestructura resiliente, como propone el proyecto de 2022, es clave, al igual que integrar enfoques comunitarios en la planificación (Orozco Montoya & Brenes Maykall, 2023; Cruz Roja Costarricense, 2024b). La mejora de la coordinación entre gobiernos locales y la adopción de políticas públicas que aborden causas estructurales, como la pobreza, son urgentes para mitigar desastres (Salgado, 2009; Brenes & Bonilla, 2012). Invertir en tecnologías de monitoreo y educación garantizará una respuesta más preparada, reduciendo la vulnerabilidad ante eventos extremos que siguen en aumento (CAPRA, s.f.; Retana et al., s.f.).

3.2.4 Inundaciones costeras en Costa Rica

Las costas de Costa Rica enfrentan una creciente amenaza por inundaciones, un fenómeno que se manifiesta con particularidades distintivas en sus litorales Caribe y Pacífico. Estas inundaciones no son un evento aislado, sino el resultado de una compleja interacción de procesos oceanográficos y atmosféricos exacerbados por cambios ambientales a escala global (Lizano, 2014). Se ha observado un incremento en la frecuencia e intensidad de estos eventos, afectando tanto a comunidades vulnerables como a infraestructura crítica y ecosistemas sensibles. Por ejemplo, proyecciones indican que para el año 2030, el nivel del mar en Puntarenas podría aumentar hasta 20 centímetros, y para 2050, podría alcanzar los 30 centímetros, lo que resultaría en la inundación de aproximadamente 1.325 hectáreas solo en esta provincia (Chacón Soto, 2023). Estas cifras subrayan la urgencia de comprender y abordar los factores que impulsan la vulnerabilidad costera del país, que se ve agravada por un desarrollo urbano en expansión y una planificación territorial a menudo insuficiente (Quesada-Román et al., 2024).

Los procesos que explican las inundaciones costeras son multifactoriales. El aumento del nivel medio del mar, consecuencia de la expansión térmica del agua y el derretimiento de los casquetes polares (Lizano, 2014; Nicholls y Cazenave, 2010), es un motor fundamental. A esto se suma la intensificación de las marejadas ciclónicas y el incremento en la altura y energía del oleaje, fenómenos que pueden estar ligados a una mayor frecuencia o intensidad de tormentas y ciclones tropicales (Alfaro, 2007; Lizano, 2013). La erosión costera es otro proceso íntimamente ligado, donde se estima que un 70% de las playas arenosas del mundo están experimentando retroceso (Gornitz, 1995, citado en Lizano, 2014). En Costa Rica, esta erosión compromete la estabilidad de la línea de costa, reduce la capacidad de amortiguamiento natural y facilita una mayor penetración del mar tierra adentro, especialmente durante eventos de marea alta y tormentas (Lizano y Gutiérrez, 2011).

Las consecuencias de estas inundaciones se extienden a diversos sectores. La infraestructura vial y portuaria, como en el caso de Caldera, es particularmente susceptible, donde el oleaje ya ha superado rompeolas y amenaza las actividades comerciales (Chacón Soto, 2023). El sector turístico, vital para la economía costarricense, enfrenta riesgos significativos por la pérdida de playas y daños a instalaciones en zonas como Guanacaste (Lizano Araya et al., 2023). Comunidades costeras, muchas de ellas con altos índices de vulnerabilidad social, sufren pérdidas de viviendas, medios de subsistencia y un aumento en la exposición a enfermedades (Villalobos-Sequeira et al., 2024). Los ecosistemas costeros, como los manglares del Humedal Nacional Térraba-Sierpe, también se ven afectados, perdiendo su capacidad de

protección y biodiversidad (Lizano, 2014b). Las pérdidas económicas directas e indirectas asociadas a estos eventos son considerables, impactando sectores como la agricultura y la infraestructura fluvial (Quesada-Román et al., 2024).

A pesar de los avances en la comprensión de estos fenómenos, persisten brechas importantes en su estudio y gestión. Se requiere una mayor inversión en sistemas de monitoreo continuo y de alta resolución del nivel del mar, oleaje y topografía costera para mejorar los modelos predictivos y los sistemas de alerta temprana (World Bank, 2021). Si bien existen estudios de escenarios de inundación para áreas específicas (Lizano Araya et al., 2023), es crucial desarrollar evaluaciones de riesgo y vulnerabilidad integradas a escala nacional que consideren proyecciones actualizadas y la interacción de múltiples amenazas. La planificación del uso del suelo en zonas costeras necesita ser fortalecida y rigurosamente aplicada, limitando el desarrollo en áreas de alto riesgo (Quesada-Román et al., 2024). Finalmente, es fundamental mejorar la coordinación interinstitucional y la asignación de recursos para implementar medidas de adaptación efectivas, que combinen soluciones basadas en la naturaleza con infraestructura gris resiliente, y que involucren activamente a las comunidades locales en la toma de decisiones (Watson et al., 2022).

3.3 Riesgo de sequía

La sequía en Costa Rica se define usualmente en tres categorías interrelacionadas: meteorológica (déficit de lluvia), agrícola (falta de humedad en suelo) e hidrológica (disminución de caudales) (Soto, 2013). Si bien la sequía es parte natural del clima en el país, se considera una amenaza cuando la ausencia de precipitaciones supera lo normal por periodos prolongados, causando escasez hídrica para actividades humanas (Soto, 2013). Las regiones más propensas a sequías son la vertiente del Pacífico, especialmente la provincia de Guanacaste en el Pacífico Norte, y zonas del norte colindantes con Nicaragua (Soto, 2013; Quesada-Hernández *et al.*, 2020). Estas áreas presentan una marcada estacionalidad con un periodo seco largo y cálido, a diferencia de la vertiente del Caribe que es húmeda todo el año (Birkel, 2006; Waylen *et al.*, 1996). Un factor climatológico clave es El Niño-Oscilación del Sur (ENOS): durante eventos El Niño se reducen significativamente las lluvias en el Pacífico costarricense, explicando hasta un 90% de las sequías meteorológicas históricas (Soto, 2013). En consecuencia, Guanacaste muestra la señal más fuerte de sequía asociada a El Niño, con frecuentes “veranillos” y prolongados periodos secos intraanuales (Bonilla, 2014; FAO, 2014).

La distribución espacial y temporal de la sequía en Costa Rica refleja la compleja interacción entre factores climáticos regionales y locales. Estudios climáticos han documentado que la variabilidad interanual de la precipitación está dominada por ciclos de ENOS, lo que provoca años extremadamente secos en el Pacífico Norte seguidos de años más húmedos bajo condiciones La Niña (Waylen *et al.*, 1996; IPCC, 2014). Las zonas de vida de bosque seco tropical en Guanacaste experimentan sequías recurrentes prácticamente cada período El Niño fuerte, mientras que en el Valle Central y Pacífico Central las sequías son menos frecuentes, pero pueden ocurrir en veranos atípicamente secos (Hidalgo & Alfaro, 2012; Soto, 2013). A nivel de cantón, todos los cantones de Guanacaste han registrado eventos de sequía desde mediados del siglo XX, evidenciando que esta provincia concentra los eventos más extensos y severos (Quesada-Hernández *et al.*, 2020). En contraste, la región Caribe tiene alta pluviosidad anual y raramente sufre sequías meteorológicas, salvo en casos extremos asociados a alteraciones del ciclo de los vientos alisios (Birkel, 2006). Las sequías costarricenses se caracterizan por su ocurrencia cíclica ligada a ENOS, su

concentración geográfica en la vertiente Pacífico (especialmente Guanacaste) y sus efectos multiescala (meteorológicos, agrícolas e hidrológicos) en un contexto de marcada estacionalidad climática.

Costa Rica ha experimentado impactos significativos por sequías a lo largo de su historia, principalmente en la agricultura, los recursos hídricos y los medios de vida rurales. Desde la década de 1970 se documentan eventos severos asociados a El Niño que ocasionaron pérdidas de cosechas en la región Chorotega (noroeste) y obligaron a racionamientos de agua (Waylen *et al.*, 1996; Soto, 2013). Un evento destacado ocurrió en 1997-1998, durante un fuerte Niño, cuando la producción de granos básicos (maíz, frijol) en América Central sufrió pérdidas generalizadas; Costa Rica no fue la excepción, reportándose disminuciones importantes en rendimientos agrícolas en Guanacaste (van der Zee *et al.*, 2013; Calvo-Solano *et al.*, 2018). A nivel regional, la sequía de 1997-98 afectó la seguridad alimentaria de miles de familias y encendió las alertas sobre la vulnerabilidad de las zonas secas (ACAPS, 2015). Durante la primera década de los 2000, se repitieron episodios de sequía: en 2001 y 2009-2010 nuevamente El Niño redujo las lluvias, generando pérdidas en cultivos de subsistencia y mortandad de ganado en el Pacífico Norte (Calvo-Solano *et al.*, 2018; Soto, 2013).

Históricamente, el sector agropecuario ha sido el más afectado, con recurrentes daños en arrozales, frijolares y pastizales, y consecuentes impactos socioeconómicos locales (Calvo-Solano *et al.*, 2018). Estos eventos evidencian que la sequía, aunque de evolución lenta, ha detonado emergencias importantes en Costa Rica a lo largo del tiempo.

En el contexto contemporáneo, los impactos de la sequía se han intensificado en percepción y en registro, en parte debido al cambio climático y al aumento de la exposición de la población. El periodo 2014-2016 destaca por la sequía más severa de los últimos 75 años en el país, atribuida a un evento El Niño prolongado y exacerbado por las tendencias de calentamiento global (Astorga, 2019). Esta sequía extraordinaria afectó gravemente la provincia de Guanacaste y otras zonas del Pacífico, provocando pérdidas agrícolas millonarias, muerte de más de 2.000 cabezas de ganado y obligando a racionamientos de agua potable en decenas de comunidades (Astorga, 2019; Soto, 2013). Estudios económicos reportan que, entre 2005 y 2011, los eventos de sequía y otros fenómenos asociados al clima causaron pérdidas acumuladas de aproximadamente \$168 millones en el sector agropecuario costarricense (Soto, 2013). Infraestructuras hidráulicas y generación eléctrica también resintieron estos impactos: la sequía redujo niveles en embalses hidroeléctricos, requiriendo generación térmica de emergencia (Soto, 2013). En términos sociales, se observó inseguridad alimentaria en hogares rurales, lo que motivó asistencia gubernamental y cooperación internacional, especialmente durante las sequías regionales de 2015 que afectaron a comunidades del Corredor Seco Centroamericano (WFP, 2015; Calvo-Solano *et al.*, 2018).

3.3.1 Historia del estudio del riesgo por sequía en Costa Rica

El estudio científico de la sequía en Costa Rica tiene sus orígenes en la creciente preocupación por los extremos climáticos desde mediados del siglo XX. Inicialmente, la sequía fue abordada de forma descriptiva por meteorólogos y geógrafos, quienes documentaron los patrones climáticos regionales y su variabilidad interanual. Por ejemplo, análisis tempranos de registros pluviométricos en las décadas de 1970 y 1980 ya identificaban la relación entre el fenómeno de El Niño y déficits de precipitación en el Pacífico costarricense (Waylen *et al.*, 1996). Sin embargo, fue a partir de los años 1990 cuando se

sistematizó el estudio de las sequías como amenaza específica. Investigadores nacionales colaboraron en proyectos regionales para cuantificar y delimitar las zonas áridas de Centroamérica, introduciendo el concepto de “Corredor Seco Centroamericano” que abarca Guanacaste y otras áreas secas de la región (van der Zee *et al.*, 2012). En esta época se publicaron trabajos pioneros sobre tendencias de sequía; por ejemplo, Birkel (2006) examinó series históricas de caudales en 17 cuencas de Costa Rica aplicando métodos de umbral e índices de duración, encontrando patrones espaciales de tendencia en eventos de sequía hidrológica. Estas investigaciones tempranas sentaron las bases para reconocer la sequía no solo como fluctuación climática, sino como amenaza natural recurrente con impacto socioeconómico, marcando el inicio de un enfoque más integral.

Durante las últimas dos décadas, el estudio de la sequía en Costa Rica ha evolucionado hacia enfoques multidisciplinarios y una estrecha vinculación con la gestión del riesgo y el cambio climático. En los 2000s, académicos costarricenses comenzaron a evaluar la sequía en el contexto de la variabilidad y cambio climático regional, contribuyendo a informes internacionales como el IPCC que resaltaron la vulnerabilidad del país a eventos secos más frecuentes e intensos (Hidalgo & Alfaro, 2012; IPCC, 2014). Simultáneamente, el fortalecimiento institucional en gestión del riesgo —particularmente tras la Ley Nacional de Emergencias y Prevención del Riesgo de 2006— impulsó estudios aplicados sobre sequía, auspiciados por entidades como la Comisión Nacional de Emergencias y el Instituto Meteorológico Nacional (CNE, 2016; Soto, 2013). Estos esfuerzos promovieron la recopilación de bases de datos de desastres (DesInventar) y la realización de análisis de impacto histórico de las sequías en diversos sectores. Hacia la década de 2010, los enfoques se tornaron más integrales: proyectos de investigación combinan climatología, hidrología y ciencias sociales para entender la sequía en términos de riesgo (Hidalgo & Alfaro, 2015; Quesada-Hernández *et al.*, 2020). Un hito en esta trayectoria fue la generación de estudios específicos sobre la correlación entre índices de sequía y daños observados, lo que ha permitido afinar la comprensión predictiva de sus efectos (Quesada-Hernández *et al.*, 2020). La trayectoria histórica va desde descripciones climatológicas básicas en el siglo XX, pasando por análisis físicos más rigurosos a inicios del XXI, hasta investigaciones actuales que integran variables sociales, económicas y de cambio climático para abordar la sequía como una amenaza multifacética en Costa Rica.

Las investigaciones sobre la sequía en Costa Rica comparten ciertos rasgos metodológicos centrales orientados a caracterizar su ocurrencia y severidad. Uno de los enfoques más utilizados es el análisis de índices climáticos estandarizados. En particular, el Índice de Precipitación Estandarizado (SPI) en escalas de 6 a 12 meses ha sido ampliamente aplicado para cuantificar déficits pluviométricos y compararlos con eventos históricos (Quesada-Hernández *et al.*, 2020). Estudios recientes han evaluado múltiples índices (SPI, índice de Palmer, Rainfall Anomaly Index, entre otros) para determinar cuál correlaciona mejor con los impactos observados en el país (Quesada-Hernández *et al.*, 2020). Los resultados sugieren que el SPI de 6 y 12 meses es el más apropiado, pues presenta alta probabilidad de asociación con pérdidas agrícolas y escasez de agua cuando sus valores indican condiciones secas moderadas o severas (Quesada-Hernández *et al.*, 2020). Este hallazgo es consistente con recomendaciones internacionales y respalda el uso de SPI como métrica estándar en la región. Adicionalmente, los científicos costarricenses emplean métodos estadísticos de tendencia y frecuencia para evaluar cambios a lo largo del tiempo: pruebas no paramétricas como Mann-Kendall se han aplicado a series de caudal y precipitación para detectar aumentos o disminuciones en la incidencia de sequías (Birkel, 2006). Estos análisis no encontraron tendencias significativas en la mayoría de las cuencas entre 1973-2003, salvo en la Zona Norte donde se observó un

incremento en frecuencia y severidad de sequías hidrológicas (Birkel, 2006). Enfoques de modelación climática también se utilizan para entender mecanismos causales; por ejemplo, estudios de patrones atmosféricos relacionan la intensificación del Jet Centroamericano y subsidencia del aire con la ocurrencia de sequías prolongadas en el Pacífico Norte (Bonilla, 2014; Hidalgo & Alfaro, 2015).

Otro rasgo distintivo es la creciente integración de factores socioeconómicos y geoespaciales en el estudio de la amenaza de sequía. Más allá de la caracterización física del fenómeno, las investigaciones actuales incorporan análisis de vulnerabilidad y exposición para estimar el riesgo de desastre asociado. Por ejemplo, el IMN y otras entidades han realizado mapeos de riesgo que combinan la frecuencia histórica de eventos secos extremos con indicadores de vulnerabilidad socioeconómica (Soto, 2013; CNE, 2016). De esta manera, se identificaron “zonas calientes” de riesgo donde confluyen alta incidencia de sequía y poblaciones susceptibles (pobreza, agricultura de temporal, limitado acceso a agua potable). En términos metodológicos, se emplean sistemas de información geográfica para delimitar estas áreas críticas e incluso para monitorear la evolución espacial de las sequías mediante imágenes satelitales (GWP, 2020). Asimismo, los enfoques interdisciplinarios son cada vez más frecuentes: se han realizado estudios participativos con comunidades rurales para documentar impactos locales de las sequías y contrastarlos con datos meteorológicos, enriqueciendo la comprensión cualitativa del fenómeno (Calvo-Solano *et al.*, 2018). En el ámbito de cambio climático, equipos de investigación costarricenses han evaluado la habilidad de modelos de circulación general (CMIP5/CMIP6) en reproducir el clima de la región y proyectar escenarios de sequía futura (Hidalgo & Alfaro, 2015; IPCC, 2022). Estos estudios aprovechan técnicas de *downscaling* para refinar la resolución espacial de las proyecciones globales, generando insumos más útiles a nivel nacional. Los enfoques van desde el uso de índices climáticos cuantitativos y análisis estadísticos de series históricas, hasta la integración de sistemas de información geográfica y variables sociales, todo con el fin de construir una visión más completa del peligro de sequía y su comportamiento en Costa Rica.

En los últimos 15 años Costa Rica ha enfrentado reiteradas manifestaciones de sequías de diversa magnitud, confirmando que el riesgo asociado sigue vigente e incluso podría estar aumentando. El evento de 2014-2016 marcó un antes y un después: fue una sequía prolongada que abarcó tres años consecutivos anormalmente secos, con 2015 como el año pico de mayor déficit hídrico (Astorga, 2019). Durante este periodo, las precipitaciones en zonas del Pacífico estuvieron hasta un 50% por debajo de lo normal, ocasionando la declaratoria de emergencia en Guanacaste y afectando a más de 500 mil personas por escasez de agua potable y pérdidas agrícolas (Astorga, 2019; Rodríguez, 2019). Desde entonces, si bien no se ha repetido una sequía de igual severidad a nivel nacional, se han registrado temporadas secas intensas asociadas a eventos El Niño más recientes, como en 2019 y 2020, que produjeron sequedad anómala especialmente en la región norte (WMO, 2023). De hecho, el año 2023, influenciado nuevamente por El Niño, presentó condiciones de sequía agrícola en Centroamérica incluyendo Costa Rica, resaltando la tendencia a episodios extremos en el contexto de calentamiento global (WMO, 2023). La variabilidad climática intra-anual también se refleja en eventos cortos pero marcados: por ejemplo, prolongaciones inusuales de la canícula (sequía de mitad de año) han ocurrido en algunos veranos recientes, exacerbando el estrés hídrico de cultivos (FAO, 2014). En general, el patrón en el último decenio muestra sequías recurrentes en el Pacífico Norte, con impactos acumulativos en suelos y acuíferos, lo que sugiere que las manifestaciones de esta amenaza tienden a ser más frecuentes o intensas de lo que solían ser a mediados del siglo XX (Soto, 2013; IPCC, 2022).

El riesgo de desastre asociado a estas sequías recientes se evidencia en diversos sectores y niveles. En el agropecuario, la persistencia de condiciones secas ha traducido el peligro climático en desastres socioeconómicos, como la pérdida de cosechas de subsistencia (maíz, frijol) y una consecuente inseguridad alimentaria temporal en comunidades campesinas del Pacífico Norte (Calvo-Solano *et al.*, 2018). Durante la sequía 2014-2016, Costa Rica debió importar granos básicos para suplir la caída en la producción interna y se implementaron programas de apoyo alimentario y forrajero a pequeños productores (Astorga, 2019). En cuanto al abastecimiento de agua, varias ciudades intermedias y comunidades rurales de Guanacaste enfrentaron racionamientos prolongados; sistemas locales de agua potable (ASADAS) vieron secar sus pozos o disminuciones drásticas en caudal, forzando la distribución de agua en cisternas como medida de emergencia (Rodríguez, 2019). Este tipo de interrupciones muestran cómo un fenómeno natural de sequía puede escalar a desastre cuando la población afectada carece de resiliencia hídrica. Incluso los ecosistemas han sufrido estrés: por ejemplo, se han reportado incendios forestales más frecuentes y pérdida de cobertura vegetal asociada a las condiciones excepcionalmente secas en áreas protegidas del noroeste, lo cual agrava el riesgo de degradación ambiental (Programa Estado de la Nación, 2022). Las sequías no causan habitualmente muertes inmediatas, pero su impacto difuso se refleja en indicadores de salud y bienestar – brotes de enfermedades por falta de agua, problemas nutricionales o migración temporal desde zonas afectadas (UNOCHA, 2015). Costa Rica ha vivido la amenaza de sequía de forma tangible, traducéndose en emergencias agrícolas, crisis de agua potable y daños económicos considerables. Esto confirma que el riesgo de desastre por sequía es una realidad vigente para el país, especialmente bajo escenarios de variabilidad climática acentuada, y subraya la importancia de mantener e incrementar las medidas de adaptación y reducción de riesgo frente a este peligro.

La evaluación del riesgo de desastre por sequía y otros eventos climáticos en Costa Rica se apoya en un conjunto de técnicas que combinan análisis científico del peligro con evaluación de la vulnerabilidad socioeconómica. Una de las herramientas fundamentales es la construcción de escenarios climáticos futuros mediante modelos de simulación. Instituciones y académicos costarricenses emplean modelos de circulación global y regional (del programa CMIP6 del IPCC) para proyectar cómo el cambio climático podría alterar los patrones de lluvia y sequía en el territorio (Hidalgo & Alfaro, 2015; IPCC, 2022). Estas proyecciones, a menudo obtenidas por técnicas de *downscaling* estadístico o dinámico, permiten estimar la probabilidad de sequías más frecuentes o intensas hacia mediados y finales de siglo. Complementariamente, se usan análisis de series históricas de datos hidrometeorológicos para calcular la recurrencia de eventos extremos. Por ejemplo, con registros de precipitación de décadas pasadas se calculan periodos de retorno de sequías de cierta magnitud, utilizando distribución de probabilidad y estimación de cuantiles (Birkel, 2006). Asimismo, se ha institucionalizado el uso de sistemas de monitoreo y alerta temprana: el IMN emite pronósticos estacionales (trimestrales) que indican la probabilidad de déficit de lluvia en diferentes regiones, lo cual sirve de insumo para activar planes preventivos en agricultura y abastecimiento de agua (FAO, 2014). Herramientas como la plataforma DesInventar han sido utilizadas para analizar históricamente la ocurrencia de desastres por sequía en cada cantón, permitiendo a los evaluadores determinar patrones espaciales de impacto y estimar riesgos potenciales a futuro basados en tendencias pasadas (Quesada-Hernández *et al.*, 2020). En la actualidad, también se recurre a técnicas de teledetección (imágenes satelitales) para evaluar la severidad de la sequía en tiempo casi real, mediante índices de vegetación (NDVI, EVI) que reflejan el estrés hídrico de la cobertura vegetal, complementando así la información meteorológica tradicional.

En la evaluación integral del riesgo, Costa Rica aplica metodologías consistentes con marcos internacionales de reducción del riesgo de desastres, adaptándolos a su realidad local. Un enfoque común es el análisis multicriterio de riesgo, que considera tres componentes: amenaza, vulnerabilidad y exposición. Para la amenaza de sequía, se mapea la severidad esperada (por ejemplo, mediante el SPI máximo probable) y la duración de eventos secos extremos. Luego, se incorporan indicadores de vulnerabilidad: acceso a fuentes de agua seguras, dependencia de la agricultura de secano, niveles de pobreza, entre otros (Soto, 2013; CNE, 2016). La combinación espacial de estas capas en sistemas de información geográfica permite generar mapas de riesgo de sequía a nivel cantonal o regional, identificando zonas críticas donde un evento de sequía puede derivar en desastre humanitario. Técnicas como la vulnerabilidad socioeconómica indexada son empleadas por investigadores; por ejemplo, CEPAL (2010) desarrolló índices compuestos para Centroamérica que ponderan variables socioeconómicas (salud, educación, ingreso) y de capacidad adaptativa, a fin de anticipar qué poblaciones sufrirían más ante sequías prolongadas. En el ámbito sectorial, se han aplicado modelos específicos: en agricultura, por ejemplo, modelos agroclimáticos simulan el rendimiento de cultivos bajo distintos escenarios de lluvia, ayudando a evaluar pérdidas potenciales y riesgos para la seguridad alimentaria (Imbach *et al.*, 2017). En recursos hídricos, modelos hidrológicos de cuenca (tipo WEAP o VIC) se utilizan para proyectar caudales y niveles de embalses bajo escenarios de cambio climático, identificando riesgo de desabastecimiento hídrico o racionamiento en ciertas cuencas durante sequías extremas (Hidalgo & Alfaro, 2015). Adicionalmente, la evaluación de riesgo incluye aspectos institucionales: Costa Rica realiza periódicamente evaluaciones nacionales de riesgos climáticos en sus comunicaciones a la CMNUCC, considerando la eficacia de medidas existentes y brechas, lo cual es una técnica de autoevaluación cualitativa crucial para retroalimentar políticas (MINAE, 2018; Programa Estado de la Nación, 2022). Las técnicas van desde modelos cuantitativos y estadísticos para estimar la amenaza de sequía bajo cambio climático, hasta herramientas participativas y de índices para valorar la vulnerabilidad, integrándose en mapas y sistemas de alerta que concretan la evaluación del riesgo de desastre por sequía de manera pragmática y alineada con estándares internacionales.

3.3.2 Instrumentos de gestión del riesgo de sequía en la política pública

Costa Rica cuenta con un marco normativo e instrumental robusto, orientado a reducir los impactos de amenazas naturales como la sequía, integrando tanto leyes específicas como políticas públicas de alcance general. En el plano legal, la Ley Nacional de Emergencias y Prevención del Riesgo N°8488 (2006) establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo, definiendo roles para la anticipación y atención de desastres por eventos hidrometeorológicos, incluyendo la sequía (CNE, 2016). Esta ley y su política derivada (Política Nacional de Gestión del Riesgo 2016-2030) enfatizan la necesidad de incorporar la reducción del riesgo en la planificación del desarrollo, reconociendo explícitamente al cambio climático como factor agravante de amenazas como las sequías (CNE, 2016). En paralelo, el sector hídrico cuenta con normativas y planes específicos: aunque la Ley de Aguas vigente data de 1942, en años recientes se han implementado instrumentos complementarios como la Política Nacional de Agua Potable y Saneamiento 2017-2030, que busca fortalecer la gestión integrada del recurso hídrico (Rodríguez, 2019). Asimismo, a raíz de las sequías intensas de la última década, el gobierno costarricense lanzó programas especiales como el Programa Integral de Abastecimiento de Agua para Guanacaste (PIAAG), destinado a construir y mejorar infraestructura de riego, acueductos y almacenamiento de agua en la región más seca del país (Rodríguez,

2019). En el sector agropecuario, el Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG) ha adoptado protocolos de alerta y respuesta temprana frente a la sequía; por ejemplo, desde 2015 emite declaratorias preventivas de emergencia agrícola ante pronósticos de El Niño, activando apoyos como suministros de melaza y ensilaje para ganado en Guanacaste (Soto, 2013). Todos estos instrumentos normativos y programáticos muestran la articulación de esfuerzos para mitigar el impacto de la sequía, abordando tanto la oferta de agua (infraestructura, manejo de cuencas) como la demanda (eficiencia en uso, organización comunitaria) y la atención de emergencias inmediatas.

En cuanto a políticas públicas estratégicas, Costa Rica ha incorporado la adaptación al cambio climático y la gestión de sequías en su planificación nacional, de forma alineada con compromisos internacionales. Destaca la Política Nacional de Adaptación al Cambio Climático (2018) y su reciente Plan Nacional de Adaptación 2022-2026, los cuales identifican al sistema hídrico y al sector agropecuario como prioritarios dada su alta vulnerabilidad a eventos de sequía intensificados por el cambio climático (MINAE, 2018; MINAE, 2022). Estas políticas contemplan medidas como la promoción de sistemas de riego eficientes, cosecha de agua de lluvia, protección de acuíferos y diversificación de medios de vida para poblaciones rurales, con metas cuantitativas (hectáreas bajo riego tecnificado, reservorios construidos, productores capacitados) a corto y mediano plazo (Nap Global Network, 2023). Por otro lado, en el marco de los compromisos de la Convención de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, Costa Rica incluyó en su Contribución Nacional Determinada (NDC) acciones para reducir la vulnerabilidad hídrica y agrícola, situándose entre los países líderes en integrar la adaptación basada en ecosistemas y la seguridad hídrica en dichas metas (Programa Estado de la Nación, 2022). En el ámbito internacional y regional, el país participa en iniciativas de cooperación para enfrentar las sequías: es parte del Consejo Agropecuario Centroamericano y de la CCAD (Comisión Centroamericana de Ambiente y Desarrollo), que han impulsado lineamientos comunes de políticas contra la sequía en Centroamérica (GWP, 2020). Asimismo, Costa Rica suscribió el Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015-2030, comprometiéndose a fortalecer sistemas de alerta temprana y resiliencia de comunidades ante amenazas como la sequía (UNISDR, 2015). Esto se refleja en instrumentos nacionales como la Estrategia Nacional de Cambio Climático (ENCC) y el Plan Nacional de Desarrollo, que transversalizan la gestión del riesgo climático. El entramado institucional y normativo costarricense para afrontar la sequía abarca leyes marco de gestión de riesgo, políticas específicas de agua y adaptación climática, y programas focalizados en las regiones más afectadas.

La implementación de las políticas y normas frente a la sequía en Costa Rica ha tenido avances importantes, aunque persisten desafíos en términos de efectividad plena en la reducción del riesgo. En el plano institucional, se ha mejorado la coordinación multisectorial: la Comisión Nacional de Emergencias activa comités locales de emergencia en zonas secas cuando se pronostican sequías fuertes, lo que ha permitido respuestas más rápidas y ordenadas que en décadas pasadas (CNE, 2016). También se han llevado a cabo obras de infraestructura delineadas en planes como el PIAAG, por ejemplo, la construcción de reservorios y la ampliación del embalse Los Ángeles para riego en Guanacaste, aunque a un ritmo más lento de lo esperado por las comunidades (Rodríguez, 2019). La efectividad de estas medidas aún se está poniendo a prueba; si bien durante la sequía de 2020 las pérdidas agrícolas fueron menores que en 2015, estudios sugieren que esto pudo deberse tanto a la preparación como a la menor severidad del evento (Programa Estado de la Nación, 2022). Un logro significativo es el fortalecimiento de las ASADAS: tras la sequía de 2014-2016, el Instituto de Acueductos y Alcantarillados impulsó desde 2016 una política para

mejorar la gestión comunitaria del agua, resultando en mejor capacitación y equipamiento de muchas ASADAS rurales (Astorga, 2019). Esto ha redundado en mayor resiliencia local, aunque aún hay comunidades que dependen de fuentes frágiles. Por otro lado, la falta de una nueva Ley de Aguas sigue siendo un obstáculo mencionado frecuentemente: a pesar de numerosos intentos, no se ha logrado actualizar el marco jurídico hídrico, lo que genera dispersión institucional y lentitud en la aplicación de soluciones a largo plazo (Rodríguez, 2019). Este rezago normativo limita la efectividad de las políticas recientes, ya que instrumentos como la Política Nacional de Agua Potable (2017) no tienen el peso vinculante suficiente para resolver conflictos de uso o sancionar extracciones en tiempos de escasez (Rodríguez, 2019). La implementación de las medidas anti sequía en Costa Rica ha mostrado progreso, mejor preparación y respuestas más organizadas, pero la efectividad se ve moderada por brechas en recursos, coordinación legal y los impactos crecientes del cambio climático.

En términos de alineación con estándares internacionales, Costa Rica se destaca por incorporar las mejores prácticas globales en su marco de acción, aunque la traducción de esos compromisos en resultados tangibles presenta retos. El país ha adoptado enfoques integrales coherentes con el Marco de Sendai, enfatizando la reducción del riesgo ex ante y la construcción de resiliencia. Por ejemplo, la Política Nacional de Gestión del Riesgo (2016-2030) incorpora metas como desarrollar sistemas de alerta temprana multiamenaza y fortalecer la gobernanza local del riesgo, alineadas directamente con las prioridades de Sendai (CNE, 2016; UNISDR, 2015). Asimismo, la planificación de adaptación climática de Costa Rica cumple con estándares del Acuerdo de París: el Plan Nacional de Adaptación 2022-2026 fue formulado siguiendo guías metodológicas internacionales (NAP guidelines) e incluye un sistema de monitoreo y evaluación de acciones de adaptación (MINAE, 2022). De hecho, evaluaciones independientes ubican a Costa Rica entre los países líderes en la región en cuanto a la calidad de sus compromisos de adaptación, incluyendo consideraciones de salud, agua y agricultura coherentes con recomendaciones de organismos internacionales (Programa Estado de la Nación, 2022). No obstante, la implementación práctica de dichos estándares enfrenta limitaciones comunes a muchos países en desarrollo. Informes recientes señalan que la debilidad o fragmentación de algunas instituciones públicas y la escasez de financiamiento sostenido dificultan sostener los esfuerzos en adaptación y gestión del riesgo (Programa Estado de la Nación, 2022). Por ejemplo, la Dirección de Cambio Climático del MINAE, encargada de coordinar la adaptación, ha visto reducciones presupuestarias que amenazan la continuidad de proyectos esenciales (Lancet Countdown, 2022). Esto indica que, si bien Costa Rica está alineada normativamente con los estándares internacionales, la efectividad en alcanzar esos estándares depende de reforzar capacidades nacionales. En la práctica, la alineación internacional se evidencia también en la participación del país en iniciativas globales y regionales: Costa Rica comparte experiencias en foros como la Plataforma Regional para la Reducción del Riesgo de Desastres y colabora con agencias de la ONU en proyectos piloto de resiliencia hídrica (GWP, 2020; WMO, 2023). Estas alianzas han facilitado el acceso a asistencia técnica y fondos climáticos que mejoran la ejecución de medidas localmente.

3.3.3 Brechas existentes en conocimiento y gestión

A pesar del avance en el entendimiento de la sequía en Costa Rica, subsisten brechas significativas en el conocimiento científico del fenómeno y en la gestión práctica del riesgo que éste conlleva. Una de las brechas de conocimiento radica en la escala local: todavía es limitada la comprensión de cómo microclimas y factores geográficos locales modulan las sequías. Si bien se conoce el patrón general a nivel regional,

faltan estudios detallados de sequías en valles específicos, zonas de montaña o cuencas costeras que podrían comportarse de manera diferenciada (Hidalgo & Alfaro, 2015; Birkel, 2006). Esta carencia se relaciona con la densidad de datos: la red de estaciones meteorológicas y de aforos hidrológicos, aunque amplia, tiene coberturas desiguales y no todas las series históricas son lo suficientemente largas o continuas para analizar tendencias con alto nivel de confianza (Birkel, 2006; Soto, 2013). Asimismo, existe incertidumbre al atribuir cambios recientes en los patrones de sequía directamente al cambio climático. Estudios globales y regionales señalan que, si bien hay indicios de períodos secos más prolongados en Centroamérica, distinguir la señal de cambio climático de la variabilidad natural es complejo (IPCC, 2022). En Costa Rica, esta incertidumbre significa que no se sabe con precisión cuánto han influido las emisiones globales en la severidad de eventos recientes como la sequía 2014-2016, lo que representa una brecha de conocimiento crítico para afinar proyecciones futuras. Otro vacío se encuentra en la intersección con otros sistemas: por ejemplo, falta investigación sobre los impactos ambientales de las sequías prolongadas en ecosistemas como humedales, bosques secos y manglares del Pacífico Norte. Si bien se infiere que el estrés hídrico extremo puede llevar a mortalidad de especies o incendios, hay pocos estudios ecológicos longitudinales que cuantifiquen estos efectos y sus repercusiones a largo plazo (Imbach *et al.*, 2017). En el ámbito socioeconómico, apenas comienzan a explorarse las dimensiones menos visibles de la sequía, como sus efectos en la salud pública (desnutrición, enfermedades relacionadas con agua) o en la migración interna, lo cual constituye una brecha de conocimiento para integrar plenamente la sequía en análisis de riesgo social (UNOCHA, 2015; Lancet Countdown, 2022).

En cuanto a la gestión de la sequía, se identifican brechas importantes que limitan la eficacia de las medidas implementadas. Una de las brechas principales es de carácter institucional y normativo: la ausencia de una ley de recursos hídricos moderna y unificada ha sido señalada como el “cuello de botella” en la gestión integral del agua en contextos de cambio climático (Rodríguez, 2019). La coexistencia de más de 200 normas y reglamentos desconectados dificulta la toma de decisiones coherentes y ágiles para prevenir y mitigar sequías, generando conflictos entre usuarios (Rodríguez, 2019). Mientras no se apruebe una nueva Ley de Aguas que reemplace la de 1942, persiste una brecha en la gobernanza que ningún instrumento de política aislado puede llenar completamente. Otra brecha de gestión es la limitada articulación entre la información científica y la acción local. A pesar de contar con pronósticos climáticos y alertas, muchas comunidades rurales y agricultores aún no reciben o no logran aprovechar a tiempo esa información para prepararse ante una sequía (FAO, 2014). Esto señala una falla en los sistemas de alerta temprana y comunicación de riesgo, que deben fortalecerse para traducir el conocimiento técnico en decisiones preventivas en campo. Asimismo, persisten brechas financieras: la inversión en proyectos de adaptación (p. ej. nuevos sistemas de riego, pozos, reforestación de cuencas) es insuficiente frente a la magnitud del problema. Costa Rica destina recursos notables a la protección ambiental en general, pero los fondos específicos para adaptación climática y gestión de sequías son limitados y dependen en parte de cooperación externa (Programa Estado de la Nación, 2022). Esto puede dejar iniciativas a medio camino, como ha ocurrido con ciertas obras del PIAAG que avanzan lentamente por falta de presupuesto sostenido (KAS, 2017). También hay brechas de participación y equidad: comunidades indígenas y territorios alejados con problemas de agua pueden quedar fuera de las intervenciones principales, evidenciando la necesidad de enfoques más inclusivos en la gestión de la sequía. Por último, una brecha emergente es la falta de integración de la planificación de sequía con la de otros riesgos climáticos; por ejemplo, en ciertos casos se aborda la sequía y las inundaciones por separado, cuando una planificación

óptima de cuenca requeriría soluciones conjuntas (p.ej., embalses multipropósito) (Hidalgo & Alfaro, 2012).

La literatura científica y los informes técnicos convergen en señalar múltiples prioridades para profundizar la investigación sobre sequías en Costa Rica, de modo que el país esté mejor preparado ante este desafío. Una prioridad destacada es el refinamiento de las proyecciones climáticas locales enfocados en eventos secos. Se requiere impulsar estudios que utilicen modelos regionales de alta resolución para capturar con mayor detalle cómo podrían comportarse las lluvias en regiones montañosas y costeras específicas bajo distintos escenarios de calentamiento global (Hidalgo & Alfaro, 2015; IPCC, 2022). Esto permitiría reducir la incertidumbre en torno a las futuras sequías y planificar medidas adaptativas más precisas. Igualmente, es prioritario investigar los mecanismos climáticos regionales que modulan las sequías en Costa Rica: por ejemplo, entender mejor la interacción entre ENOS y otros factores como el Monzón de Norteamérica o la Oscilación del Atlántico Norte, y cómo el cambio climático podría alterar dichas interacciones (Hidalgo & Alfaro, 2012; Imbach *et al.*, 2017). En el ámbito hidrológico, se considera esencial profundizar en el estudio de los acuíferos y aguas subterráneas en zonas secas –su capacidad de recarga, su comportamiento ante sequías prolongadas– dado que son la última barrera antes del desabastecimiento hídrico (MINAE, 2018). Asimismo, varios autores subrayan la necesidad de desarrollar indicadores compuestos de sequía que integren variables físicas con socioeconómicas (Quesada-Hernández *et al.*, 2020). Esto implicaría investigación innovadora para incorporar en un mismo índice factores como déficits de lluvia y suelos, junto con indicadores de vulnerabilidad (pobreza, dependencia agrícola), logrando métricas multidisciplinarias de “sequía socio-ecológica”. Otro tema prioritario es estudiar las medidas de adaptación en marcha para evaluar su efectividad real: por ejemplo, analizar científicamente cómo la introducción de sistemas de riego tecnificado en ciertas comunidades ha modificado (o no) la resiliencia frente a las sequías recientes (Castellanos *et al.*, 2022). Finalmente, se destaca la importancia de investigar los impactos de las sequías en sectores menos estudiados, como la biodiversidad y la salud. Comprender cómo la sequía recurrente podría afectar la distribución de especies o la incidencia de enfermedades (por agua contaminada o escasez) ayudará a anticipar problemáticas emergentes y preparar respuestas integrales (Lancet Countdown, 2022).

En paralelo a las líneas de investigación, se han identificado prioridades clave para la acción pública y la gestión del riesgo de sequía en Costa Rica. Una prioridad transversal es el fortalecimiento de la gobernanza del agua: expertos y organismos nacionales insisten en la urgencia de actualizar el marco legal de recursos hídricos, lo cual dotaría al país de herramientas modernas para la gestión integrada de cuencas, la asignación equitativa del agua en periodos de escasez y la resolución de conflictos entre sectores (Rodríguez, 2019). En esa misma línea, es fundamental consolidar la coordinación interinstitucional e intersectorial; por ello, se propone formalizar mesas de trabajo permanentes entre instituciones como MINAE, MAG, AyA, CNE y gobiernos locales en las regiones propensas a sequía, asegurando una respuesta unificada y preventiva (Barrantes *et al.*, 2017). Otra prioridad de acción es invertir en infraestructura verde y gris para la resiliencia hídrica. Esto incluye desde proyectos de almacenamiento de agua (nuevos embalses, tanques comunitarios) y expansión de redes de riego eficiente, hasta iniciativas de restauración ecológica como la reforestación de zonas ribereñas para mejorar la retención hídrica del suelo (MINAE, 2022; Nap Global Network, 2023). Adicionalmente, se resalta la necesidad de fortalecer los sistemas de alerta temprana de sequía. Si bien existen pronósticos estacionales, se busca desarrollar indicadores de monitoreo continuo (por ejemplo, índices de sequía en tiempo real) y protocolos claros de activación de

ayudas cuando ciertos umbrales sean superados (UNISDR, 2015; WMO, 2023). En el plano comunitario, se plantea como prioridad empoderar a las organizaciones locales de agua y productores para la adaptación: esto mediante capacitación, asistencia técnica y financiamiento accesible para que implementen técnicas de cosecha de agua, agroforestería y diversificación de cultivos resistentes a la sequía (Astorga, 2019; FAO, 2014). Por último, una prioridad estratégica señalada es asegurar el financiamiento sostenible de las acciones de adaptación y gestión del riesgo de sequía. Ello implica movilizar recursos nacionales, pero también aprovechar mecanismos internacionales (fondos climáticos, cooperación) para cerrar la brecha entre las necesidades identificadas y los recursos disponibles (Programa Estado de la Nación, 2022). Las prioridades para enfrentar la amenaza de sequía en Costa Rica abarcan tanto profundizar el conocimiento científico (para anticipar mejor el fenómeno y sus impactos) como traducir ese conocimiento en acciones concretas de política, legislación, infraestructura y empoderamiento comunitario, de forma coordinada y sostenida en el tiempo.

3.4 Riesgo por deslizamientos

Los deslizamientos en Costa Rica son desencadenados por factores naturales como sismos y precipitaciones intensas, y antrópicos como la deforestación, clasificándose por velocidad y tipo de material (traslacionales, rotacionales, flujos de escombros) (Pérez Arrieta, 2013; CNE, s.f.; Salazar et al., 2019). Por ejemplo, en la cuenca del río Virilla, la geología volcánica y laderas inestables predominan, mientras que, en el Irazú, la actividad hidrotermal favorece eventos masivos (Sequeira-Arguedas, 2021; Alvarado Induni et al., 2020). Precipitaciones de 4000 mm anuales y suelos saturados, combinados con pendientes mayores a 25°, son determinantes, como en el deslizamiento de San Blas (60 millones de m³) (Quesada-Román, 2020; Alvarado Rojas et al., 2006). En el volcán Barva, los lahares no eruptivos, disparados por sismos o lluvias, alcanzan velocidades de 37 m/s (Salazar et al., 2019). Estos rasgos reflejan la interacción y variedad de procesos tectónicos y climáticos con la intervención humana.

La inestabilidad de laderas se agrava por la pérdida de consistencia de materiales y el aumento de peso por saturación, afectando infraestructura y asentamientos (CNE, s.f.; Umaña González & Blanco Picado, 2016). En Orosí, las zonas ribereñas son altamente susceptibles según análisis probabilísticos, mientras que, en San José, el cambio en el uso del suelo incrementa los riesgos (Consultores en Riesgos y Desastres, s.f.; Umaña González & Blanco Picado, 2016). La combinación de sismicidad, topografía y suelos meteorizados, como en el deslizamiento de 2006 del volcán Barva (20 km de recorrido), evidencia la magnitud de estos eventos (Salazar et al., 2019). Su estudio requiere integrar factores geológicos y antrópicos para diseñar estrategias efectivas de prevención y respuesta ante su impacto recurrente en el país.

Históricamente, los deslizamientos en Costa Rica han generado pérdidas significativas, como el sismo de Limón (1991, 48 muertes) y el deslizamiento de Fraijanes (1888), afectando cultivos y viviendas (CNE, s.f.; Sequeira-Arguedas, 2021). En Jucó de Orosi, los eventos de 2003 y 2005 dañaron infraestructura, mientras que el lahar de 1772 en el volcán Barva marcó un precedente en el estudio de estos fenómenos (Pérez Arrieta, 2013; Salazar et al., 2019). El deslizamiento de San Blas (60 millones de m³) y el de Calle Lajas (2010, 24 muertes) destacan su transporte de energía, agravada por sismos como el de Cinchona (2009) (Alvarado Rojas et al., 2006; Umaña González & Blanco Picado, 2016).

En la actualidad, la amenaza persiste con 145 deslizamientos activos en Puriscal y Turrialba, y eventos como el de las Torres del Irazú (2020), que requirió reubicar torres de comunicación (CNE, 2023; Alvarado Induni et al., 2020). La Tormenta Tropical Nate (2017) impactó a 40,000 personas en la cuenca del río General Superior, y en Orosí, los deslizamientos de Alto Loaiza (2002) y Nazareth (2007) destruyeron viviendas (Quesada-Román, 2020; Consultores en Riesgos y Desastres, s.f.). En San José y Cartago, la urbanización descontrolada aumenta la exposición, evidenciando la necesidad de sistemas de alerta y ordenamiento territorial para mitigar riesgos contemporáneos (Umaña González & Blanco Picado, 2016; Alvarado Rojas et al., 2006).

3.4.1 Historia del estudio del riesgo por deslizamientos en Costa Rica

El progreso reciente muestra una transición hacia estudios detallados y específicos. El estudio de deslizamientos en Costa Rica inició con registros como el lahar de 1772 en el volcán Barva, evolucionando desde mediados del siglo XX con informes del ICE (1965) y análisis geomorfológicos en los 80 (Salazar et al., 2019; Alvarado Induni et al., 2020; Alvarado Rojas et al., 2006). La UCR y la CNE han impulsado metodologías como Mora-Vahrson y PISA en la cuenca del río Virilla, mientras que en Jucó de Orosi se desarrollaron evaluaciones de vulnerabilidad estructural (Sequeira-Arguedas, 2021; Pérez Arrieta, 2013). Tecnologías como Lidar y GPS, aplicadas en San José y el Irazú, han mejorado el mapeo y la predicción desde los 2000, reflejando un enfoque más técnico (Umaña González & Blanco Picado, 2016; Alvarado Induni et al., 2020).

Recientemente, la cuenca del río General Superior y Orosí han incorporado análisis geomorfológicos y probabilísticos, apoyados por colaboraciones internacionales como el Banco Mundial (Quesada-Román, 2020; Consultores en Riesgos y Desastres, s.f.). Aunque el volcán Barva tiene menos investigación, los eventos de 1963-1964 y 2006 han impulsado su estudio desde finales del siglo XX (Salazar et al., 2019). La CNE ha fortalecido el monitoreo y las evaluaciones de riesgo, integrando datos históricos y tecnologías avanzadas para anticipar desastres (CNE, 2023). Esta trayectoria evidencia un enfoque interdisciplinario que combina ciencia y gestión, aunque persisten lagunas en áreas menos estudiadas, requiriendo mayor documentación y recursos.

El estudio de deslizamientos en Costa Rica se enfoca en identificar zonas vulnerables mediante análisis de estabilidad de taludes y curvas de fragilidad (Pérez Arrieta, 2013; Sequeira-Arguedas, 2021). La CNE prioriza la vigilancia y considera factores geológicos y antrópicos, mientras que en el Irazú se usan métodos predictivos como "velocidad inversa" (CNE, 2023; Alvarado Induni et al., 2020). En el volcán Barva, la geomorfología y la hidrotermalidad son clave, analizando estratigrafía y cicatrices para evaluar recurrencia (Salazar et al., 2019). En Orosí, enfoques probabilísticos como Mora-Vahrson clasifican riesgos, integrando modelos digitales para la planificación (Consultores en Riesgos y Desastres, s.f.).

En San José, el análisis litológico y el modelado de sismos evalúan susceptibilidad, mientras que en la cuenca del río General Superior y Cartago, el mapeo geomorfológico aborda vulnerabilidad social y económica (Umaña González & Blanco Picado, 2016; Quesada-Román, 2020; Alvarado Rojas et al., 2006). Aunque los enfoques varían, comparten el uso de SIG y tecnologías avanzadas para informar políticas de uso del suelo y prevención (Alvarado Induni et al., 2020). Este marco multidisciplinario adapta

herramientas globales a contextos locales, y destaca la necesidad de integrar datos geotécnicos y comunitarios para una gestión efectiva del riesgo ante deslizamientos.

En los últimos 15 años, la amenaza de deslizamientos en Costa Rica sigue siendo alta, con eventos como el de 2006 en el volcán Barva (0.05 km³, 37 m/s) y el de 2020 en el Irazú (25 millones de m³), afectando infraestructuras sin pérdidas humanas significativas (Salazar et al., 2019; Alvarado Induni et al., 2020). En Puriscal y Turrialba, 145 deslizamientos activos persisten, mientras que en San José, la expansión urbana agrava riesgos en Escazú y Mora (CNE, 2023; Umaña González & Blanco Picado, 2016). El cambio climático podría estar intensificando eventos como Nate (2017), impactando económicamente la cuenca del río General Superior (Quesada-Román, 2020). En Orosí, la amenaza en zonas ribereñas continúa, respaldada por sistemas de alerta (Consultores en Riesgos y Desastres, s.f.). Estos casos reflejan una exposición creciente.

La conectividad y la economía local enfrentan riesgos significativos. En Cartago, la ocupación de áreas de riesgo aumenta la vulnerabilidad, exacerbada por actividades humanas (Alvarado Rojas et al., 2006). Aunque la conciencia y la preparación han mejorado, la falta de datos sobre la efectividad de medidas mitigatorias limita la gestión (CNE, 2023). Este panorama requiere un enfoque integral que combine monitoreo, educación y planificación para reducir el impacto en comunidades e infraestructuras críticas.

Las técnicas de evaluación de riesgos de deslizamientos en Costa Rica incluyen análisis de estabilidad de taludes y curvas de fragilidad en Jucó de Orosí y la cuenca del río Virilla, estimando daños potenciales (Pérez Arrieta, 2013; Sequeira-Arguedas, 2021). La CNE usa mapas de zonificación y SIG, mientras que en el Irazú se aplican GPS, fotogrametría y modelos de elementos finitos para monitoreo continuo (CNE, 2023; Alvarado Induni et al., 2020). En el volcán Barva, fotografías aéreas y modelos digitales identifican cicatrices, y en Orosí, Mora-Vahrson y análisis probabilísticos evalúan amenazas (Salazar et al., 2019; Consultores en Riesgos y Desastres, s.f.). Estas herramientas buscan predecir y mitigar impactos en áreas vulnerables.

En San José, Lidar y revisiones de fallas modelan riesgos sísmicos, mientras que en la cuenca del río General Superior y Cartago, el análisis geomorfológico y el mapeo de peligros integran variables como pendientes y capacidad comunitaria (Umaña González & Blanco Picado, 2016; Quesada-Román, 2020; Alvarado Rojas et al., 2006). La combinación de tecnologías avanzadas y enfoques tradicionales permite adaptar las evaluaciones a contextos locales, priorizando la protección de infraestructuras y asentamientos mediante planes de contingencia y simulacros (CNE, s.f.). Este enfoque técnico fortalece la gestión del riesgo ante deslizamientos.

3.4.2 Instrumentos de gestión del riesgo de deslizamientos en la política pública

Las políticas en Costa Rica para mitigar deslizamientos incluyen la Ley 3459 (1964) y el Decreto 22384 (1994), que prohíben construir en áreas de riesgo y establecen regulaciones preventivas (Alvarado Rojas et al., 2006). La CNE impulsa la planificación del uso del suelo, reforestación y reubicación de asentamientos en Puriscal y Turrialba, complementadas con muros de contención (CNE, s.f.). En Orosí, los mapas de amenaza apoyan la zonificación, mientras que en la cuenca del río General Superior, la cartografía geomorfológica orienta el ordenamiento territorial (Consultores en Riesgos y Desastres, s.f.);

Quesada-Román, 2020). Estas medidas buscan reducir la exposición en regiones críticas, aunque su aplicación no está plenamente documentada en todas las áreas.

Aunque alineadas con estándares internacionales, la implementación varía, y la escasez de datos sobre efectividad limita su impacto. Un enfoque más uniforme y evaluado es esencial para maximizar la protección ante deslizamientos. La falta de normativas específicas para el volcán Barva o el Irazú contrasta con respuestas puntuales, como la reubicación tras el colapso de 2020 (Salazar et al., 2019; Alvarado Induni et al., 2020). En San José y la cuenca del río Virilla, la urbanización descontrolada desafía estas políticas, requiriendo mayor cumplimiento (Sequeira-Arguedas, 2021; Umaña González & Blanco Picado, 2016). Aunque alineadas con estándares internacionales, la implementación varía, y la escasez de datos sobre efectividad limita su impacto. Un enfoque más uniforme y evaluado es esencial para maximizar la protección ante deslizamientos.

La implementación de medidas en Costa Rica incluye sistemas de alerta temprana en Orosí y Puriscal, con colaboración internacional del Banco Mundial, alineándose con estándares globales de gestión de riesgos (Consultores en Riesgos y Desastres, s.f.; CNE, 2023). En el Irazú, el uso de GPS y fotogrametría refleja prácticas internacionales, aunque la efectividad de normativas como la Ley 3459 (1964) es incierta por falta de evaluación (Alvarado Induni et al., 2020; Alvarado Rojas et al., 2006). En la cuenca del río General Superior, la zonificación de riesgos apoya la planificación, pero su impacto es limitado por la urbanización desregulada (Quesada-Román, 2020). Estos esfuerzos muestran un compromiso con protocolos globales, pero con resultados mixtos.

Aunque hay avances, cerrar brechas en cobertura y evaluación es clave para alinear plenamente estas medidas con estándares globales y reducir el riesgo de desastres. La falta de aplicación uniforme de políticas y la insuficiente educación comunitaria reducen la eficacia, mientras que en el volcán Barva, la ausencia de datos históricos dificulta la prevención (Umaña González & Blanco Picado, 2016; Salazar et al., 2019; Alvarado Rojas et al., 2006). La CNE promueve simulacros y contingencias, prácticas estándar internacionalmente, pero la implementación requiere mayor consistencia y monitoreo para evaluar su éxito (CNE, s.f.).

3.4.3 Brechas existentes en conocimiento y gestión

Estas brechas exigen mayor inversión en investigación y coordinación para mejorar la comprensión y respuesta ante los deslizamientos, asegurando una gestión más efectiva del riesgo. Las brechas en la gestión de deslizamientos incluyen la falta de datos sobre la efectividad de medidas en Jucó de Orosí y Puriscal, y la necesidad de más estudios sobre estabilidad de taludes (Pérez Arrieta, 2013; CNE, 2023). En el volcán Barva, la escasa documentación histórica limita la comprensión de riesgos, mientras que, en el Irazú, los procesos geológicos subyacentes no están totalmente claros (Salazar et al., 2019; Alvarado Induni et al., 2020). En San José y Orosí, la ausencia de información detallada sobre suelos y la implementación ineficaz de políticas urbanas agravan la vulnerabilidad (Umaña González & Blanco Picado, 2016; Consultores en Riesgos y Desastres, s.f.). Estas lagunas obstaculizan una gestión integral.

En la cuenca del río General Superior y Cartago, la falta de estudios específicos y la baja participación comunitaria restringen la prevención, mientras que en la cuenca del río Virilla, se necesitan modelos digitales más precisos (Quesada-Román, 2020; Alvarado Rojas et al., 2006; Sequeira-Arguedas, 2021).

Aunque el monitoreo ha avanzado, la planificación territorial y la educación son insuficientes, especialmente en áreas urbanas (CNE, s.f.).

Las prioridades incluyen desarrollar mapas de vulnerabilidad y planes de evacuación en Jucó de Orosí y Puriscal, mejorando prácticas constructivas y monitoreo (Pérez Arrieta, 2013; CNE, 2023). En San José y la cuenca del río Virilla, se requieren estudios geológicos y políticas de uso del suelo, con énfasis en educación comunitaria (Umaña González & Blanco Picado, 2016; Sequeira-Arguedas, 2021). Para el volcán Barva, documentar eventos históricos y establecer alertas es esencial, mientras que, en el Irazú, el foco está en monitorear bloques inestables y reubicar infraestructuras (Salazar et al., 2019; Alvarado Induni et al., 2020). Estas acciones buscan reducir riesgos estructurales y humanos.

En la cuenca del río General Superior y Orosí, mejorar la cartografía y los datos geotécnicos, junto con fortalecer la colaboración institucional, es clave (Quesada-Román, 2020; Consultores en Riesgos y Desastres, s.f.). En Cartago, el ordenamiento territorial y la organización comunitaria son fundamentales para mitigar la ocupación de zonas peligrosas (Alvarado Rojas et al., 2006). Integrar la gestión del riesgo en la planificación urbana y rural, con apoyo internacional, permitirá abordar la creciente vulnerabilidad, asegurando una respuesta más efectiva ante los deslizamientos mediante investigación y acción coordinada.

3.5 Riesgo sísmico

Costa Rica se asienta sobre un entorno tectónico altamente complejo y activo, determinado por la interacción de cuatro placas: la placa del Coco subduce debajo de la placa del Caribe y la microplaca de Panamá a lo largo de la Zona de Subducción de América Central, también conocida como la trinchera Mesoamericana (Burbach et al., 1984). En el norte del país, cerca de la península de Nicoya, la placa del Coco se hunde a una velocidad aproximada de 83 mm/año, aumentando hasta ~89 mm/año hacia el sureste, en la zona de Osa y Panamá (DeMets et al., 2010). Esta subducción rápida y la colisión de relieves oceánicos, como la Elevación del Coco y la Cordillera de Cocos, generan una sismicidad frecuente y de alta magnitud. Adicionalmente, existen fallas corticales dentro de la placa Caribe, especialmente en la Faja Deformada de Costa Rica central y la Faja Deformada de Panamá al sur, asociadas al límite entre la placa Caribe y la microplaca de Panamá (Marshall et al., 2000). Esta configuración tectónica produce diversos tipos de sismos: interplaca (en la zona de contacto entre placas), intraplaca o de profundidad intermedia (dentro de la placa subducida, hasta ~200 km de profundidad), y sismos corticales superficiales en la corteza de la placa Caribe.

La actividad sísmica se distribuye principalmente a lo largo del margen del Pacífico, donde ocurre la subducción, y en menor medida en el Caribe. Las zonas sísmicamente más activas corresponden a las penínsulas de Nicoya y Osa (sobre el contacto interplaca) y las regiones del Pacífico central y norte, incluyendo fallas activas en el Valle Central (Hidalgo-Leiva et al., 2023). Por el contrario, la costa Caribe presenta menor frecuencia de temblores moderados debido a una corteza más estable; sin embargo, puede generar eventos importantes, como evidenció el terremoto de Limón de 1991 (Mw 7,7) (Montero et al., 1998). Estudios sismológicos y geodésicos han detallado la geometría de la zona de subducción: la placa del Coco se inclina más pronunciadamente bajo Guanacaste y Nicaragua, y más suavemente hacia el sur, influenciada por la cuña de la Elevación del Coco (Kolarsky et al., 1995). Esta variación se asocia a diferencias en la profundidad y frecuencia de sismos interplaca e intraplaca (Protti et al., 1995). Además,

la presencia de estructuras como la Falla de Panamá y el Bloque Forearc de América Central condiciona la ocurrencia de sismos corticales a lo largo del país (LaFemina et al., 2009). En conjunto, estas condiciones definen una amenaza sísmica significativa a nivel nacional, con liberación frecuente de energía sísmica.

Costa Rica ha experimentado numerosos terremotos destructivos a lo largo de su historia, dejando huella en pérdidas humanas y daños materiales. Uno de los eventos más devastadores fue el terremoto de Cartago de 1910 (Mw 6,4), que destruyó la entonces capital colonial Cartago y causó alrededor de 700 fallecidos (Alonso-Henar et al., 2013). Este sismo marcó la mayor tragedia sísmica del país, arrasando prácticamente con la ciudad y evidenciando la vulnerabilidad de las edificaciones de adobe de la época (Montero, 1989). En décadas posteriores ocurrieron otros eventos significativos: el terremoto de Puerto Armuelles de 1934 (Mw 7,6) afectó la Zona Sur y generó incluso un tsunami local en la costa del Pacífico sur (Montero et al., 1998). Hacia mediados del siglo XX, destacan el sismo de Nicoya de 1950 (Mw 7,3) con daños en Guanacaste (Linkimer & Alvarado, 2014), y el terremoto de Limón de 1991 (Mw 7,7), el mayor registrado instrumentalmente en Costa Rica (Peraldo & Montero, 1994). El evento de Limón ocurrió el 22 de abril de 1991 en la costa Caribe y causó 48 muertes en Costa Rica (79 adicionales en Panamá), más de 7,000 personas sin hogar y daños severos en amplias zonas del Caribe costarricense (Gutiérrez, 2012).

En tiempos más recientes, Costa Rica continuó experimentando sismos fuertes, aunque con preparativos que han mitigado en parte sus consecuencias. El terremoto de Parrita de 2004 (Mw 6,4) sacudió la región central del Pacífico, causando 8 fallecidos y la destrucción de más de 500 viviendas (Linkimer et al., 2018). Un evento fue el terremoto de Cinchona de 2009 (Mw 6,2), ocurrido en las montañas al norte del Valle Central; aunque su magnitud fue moderada, produjo deslizamientos masivos en la zona de Sarapiquí y Alajuela. Este sismo dejó alrededor de 25 muertos y más de 2,300 damnificados que perdieron sus hogares en comunidades rurales (Protti et al., 2014). Por otra parte, el esperado terremoto de Nicoya de 2012 (Mw 7,6) ocurrió el 5 de septiembre de 2012 en la península de Nicoya, liberando tensión acumulada desde 1950 en esa zona de subducción. A pesar de su gran magnitud y de sentirse en todo el país, sus efectos fueron relativamente contenidos: se reportaron dos fallecimientos, daños considerables, pero no generalizados en edificaciones, y cortes temporales de servicios (Linkimer et al., 2018). En la última década, otros sismos moderados han recordado la persistente amenaza: por ejemplo, el terremoto de noviembre de 2017 (Mw 6,5) en la costa del Pacífico central provocó sacudidas fuertes en el Valle Central, pero con daños menores.

3.5.1 Historia del estudio del riesgo sísmico en Costa Rica

La investigación sismológica en Costa Rica tiene sus inicios formales en la segunda mitad del siglo XX, en paralelo con el desarrollo institucional del país. Antes de contar con instrumentos locales, los grandes sismos históricos eran documentados en crónicas y reportes empíricos. Por ejemplo, Peraldo y Montero (1994) recopilaban información sobre temblores registrados en la época colonial, basándose en documentos históricos. Sin embargo, el verdadero impulso técnico ocurrió tras el destructivo sismo de 1972 en Managua (Nicaragua) y eventos locales en los años setenta, lo que motivó la creación de la primera red sismológica nacional. En 1973 se constituyó el Comité de Código Sísmico y, poco después, en 1974, se publicó el primer Catálogo de Sismos instrumentales del país (UCR, 1974). Durante las décadas de 1970 y 1980, el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) y la Universidad de Costa Rica instalaron los primeros sismógrafos de forma sistemática, especialmente para monitorear zonas geotérmicas y represas

hidroeléctricas. Estos esfuerzos culminaron en 1983 con la formalización de la Red Sismológica Nacional (RSN), una alianza entre la UCR y el ICE dedicada a registrar la sismicidad local y mantener un catálogo continuo (Kerwa, 2020).

Paralelamente, en 1984 se fundó el Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica (OVSICORI-UNA), adscrito a la Universidad Nacional, con un enfoque más amplio en la vigilancia de terremotos y volcanes. La RSN y el OVSICORI han operado de forma complementaria, ampliando progresivamente la cobertura de estaciones en todo el territorio. Para 1990, el país ya contaba con decenas de sismómetros analógicos, lo que permitió localizar con mayor precisión sismos significativos como el de Limón en 1991. La digitalización plena llegó en la década de 2000, mejorando notablemente la calidad de los datos registrados. En la actualidad, Costa Rica cuenta con una infraestructura moderna de monitoreo sísmico y una comunidad científica activa en sismología. La RSN informa que su catálogo acumulado abarca cerca de 123,000 eventos registrados desde 1974 hasta la actualidad (Kerwa, 2020), un acervo fundamental para el análisis estadístico de la sismicidad. Actualmente, más de 150 estaciones sísmicas, entre acelerógrafos y sismógrafos de corto y largo período, transmiten datos en tiempo real, cubriendo incluso regiones remotas. Desde 2010, la densificación de la red en el Valle Central incluyó la instalación de 70 sensores adicionales, reduciendo los umbrales de detección y mejorando la localización epicentral (Kerwa, 2020). Estos avances han permitido generar modelos de amenaza sísmica más precisos, contribuyendo a la planificación del desarrollo y la seguridad estructural en el país.

El estudio científico de la sismicidad en Costa Rica se ha abordado desde múltiples enfoques, combinando la sismología, la geología estructural y la geodesia. Un elemento clave ha sido la compilación y análisis de catálogos sísmicos históricos, integrando datos desde la época colonial hasta el presente (Peraldo & Montero, 1994; Montero, 1989). Estos catálogos han permitido caracterizar la recurrencia de sismos mayores y calcular parámetros estadísticos como la relación Gutenberg-Richter, que vincula la magnitud de los sismos con su frecuencia. Con más de 120,000 eventos catalogados, los estudios espaciales han identificado variaciones en la tasa de sismicidad y en el valor "b" de la ley de Gutenberg-Richter, lo que aporta información sobre la acumulación de esfuerzos en distintas regiones del país (Hidalgo-Leiva et al., 2023). Además, el monitoreo instrumental detallado ha posibilitado la identificación de secuencias sísmicas y enjambres asociados a fallas locales, contribuyendo al mapeo de estas estructuras.

En el ámbito de la geodesia, la instalación de redes GPS permanentes en la península de Nicoya y otras zonas ha sido crucial para medir la acumulación de deformación en la interfaz de subducción. Antes del terremoto de 2012, estos datos revelaron zonas fuertemente bloqueadas ("locked patches") bajo Nicoya, lo que permitió anticipar correctamente un sismo de magnitud $\sim 7,7$ en ese segmento (Protti et al., 2014). Este caso se convirtió en un ejemplo exitoso de investigación predictiva, mostrando el valor de integrar observaciones geodésicas a largo plazo con modelado numérico. Otro enfoque importante ha sido el estudio de efectos secundarios de los sismos, como los deslizamientos en laderas: investigadores han utilizado escenarios sísmicos determinísticos para estimar la susceptibilidad a deslizamientos en distintas zonas montañosas del país (Scielo, 2021), lo que vincula la sismología con la geomorfología en la evaluación de amenazas compuestas. En la evaluación de la amenaza sísmica propiamente dicha, Costa Rica ha adoptado metodologías tanto deterministas como probabilísticas, en línea con las mejores prácticas internacionales. Enfoques deterministas han sido utilizados para definir escenarios de diseño, como considerar un "sismo máximo creíble" en cierta falla o subducción para diseñar obras críticas

(represas, puentes, hospitales). Por otro lado, la evaluación probabilística de amenaza sísmica (PSHA, por sus siglas en inglés) se ha convertido en la herramienta estándar para cuantificar la amenaza a nivel nacional. La primera evaluación PSHA en Costa Rica se realizó en 1977 con apoyo del centro John A. Blume (Stanford), sentando las bases para incluir la amenaza sísmica en el código de construcción (IISEE, 2021). Desde entonces, se han refinado estos modelos incorporando nuevas fuentes sísmicas y datos actualizados de catálogos. En la actualización más reciente del Modelo de Amenaza Sísmica (2022), se diferenciaron por separado las zonas de falla cortical en la placa superior, la zona de subducción interplaca y la sismicidad de intraslab dentro de la placa del Coco (Kerwa, 2022), asignando a cada dominio funciones de atenuación de movimiento (GMPes) calibradas para la región. Este enfoque modular mejora la representación de la amenaza sísmica y permite diseñar mejores estrategias de mitigación.

En los últimos 25 años, Costa Rica ha experimentado una intensa actividad sísmica, caracterizada por la ocurrencia de varios terremotos de magnitud superior a 6.0, principalmente asociados a la zona de subducción del Pacífico y a fallas corticales en el interior del país. Entre los eventos más relevantes destacan el terremoto de Parrita en 2004 (Mw 6,4), el de Cinchona en 2009 (Mw 6,2) y el de Nicoya en 2012 (Mw 7,6), que ha sido el más grande en este período. Aunque la frecuencia de estos eventos no ha cambiado significativamente en comparación con décadas anteriores, sí se ha observado una disminución en el número de víctimas fatales y daños estructurales catastróficos, en gran medida gracias a la aplicación de normativas sísmicas más estrictas y a una mejor preparación institucional y comunitaria (Linkimer et al., 2018). En el Valle Central, la sismicidad reciente ha incluido eventos moderados pero cercanos a zonas pobladas, como el sismo de Alajuela en 2018 (Mw 6,4) y numerosos enjambres sísmicos en la Faja de Fallas del Valle Central.

El riesgo sísmico en Costa Rica sigue siendo significativo debido a la interacción entre la actividad sísmica persistente y la exposición de infraestructuras y comunidades vulnerables. Según estudios recientes de modelación probabilista del riesgo sísmico, las pérdidas económicas anuales esperadas por terremotos en el país rondan los \$45 millones de dólares, aunque eventos mayores pueden generar impactos significativamente más altos (Kerwa, 2022). La zonificación sísmica del país clasifica aproximadamente el 41% del territorio en categoría de amenaza “alta” y un 16% en niveles de amenaza “muy alta” o “extremadamente alta”, principalmente en las penínsulas de Nicoya y Osa, donde se esperan aceleraciones del suelo superiores a 0,6 g para un periodo de retorno de 475 años (Kerwa, 2022). En el Valle Central, donde se concentra la mayor parte de la población y actividad económica, la amenaza se considera de “moderada a alta”, con valores de aceleración entre 0,4 y 0,5 g. Aunque las construcciones modernas han reducido el riesgo de colapso estructural, aún persisten edificios antiguos, infraestructuras críticas expuestas y sectores socioeconómicamente vulnerables que podrían verse gravemente afectados en caso de un evento sísmico mayor. En este contexto, la reducción del riesgo de desastre sigue siendo un desafío prioritario para el país.

3.5.2 Instrumentos de gestión del riesgo sísmico en la política pública

La reducción del impacto de los terremotos en Costa Rica ha sido una prioridad sostenida, plasmada en un marco normativo robusto y en diversas políticas públicas. El pilar central de la regulación sísmica en el país es el Código Sísmico de Costa Rica, cuya primera edición se publicó en 1974 (IISEE, 2021). Este código, elaborado por el Colegio Federado de Ingenieros y de Arquitectos (CFIA) en colaboración con sismólogos

e ingenieros estructurales, estableció requisitos obligatorios para el diseño sismorresistente en edificaciones, incorporando lecciones aprendidas de sismos previos, como los de Managua en 1972 y Tilarán en 1973. Desde entonces, el código ha sido actualizado en varias ocasiones (1986, 2002 y 2010) para incorporar avances en ingeniería sísmica y nuevos datos de amenaza sísmica (CFIA, 2014). La versión vigente, CSCR-2010, es reconocida internacionalmente por su enfoque moderno, alineado con estándares como el Eurocode 8 y el ASCE 7 de Estados Unidos, estableciendo espectros de diseño basados en la zonificación de amenaza, criterios de ductilidad estructural y metodologías de cálculo basadas en la evaluación probabilística de sismos (EIRD, 2021).

Además del código sísmico, existen normativas complementarias que regulan infraestructuras críticas. Por ejemplo, los reglamentos de diseño sísmico para puentes y represas, así como los protocolos de inspección post-sísmica de edificaciones, aseguran que estructuras estratégicas puedan soportar terremotos severos sin comprometer la seguridad pública (CFIA, 2014). En el ámbito de la gestión del riesgo, Costa Rica ha desarrollado un marco institucional sólido. La Ley Nacional de Emergencias y Prevención del Riesgo (Ley 8488, 2005) define el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo, coordinado por la Comisión Nacional de Emergencias (CNE), que integra prevención, respuesta y recuperación ante desastres (CNE, 2016). A nivel estratégico, el país ha formulado la Política Nacional de Gestión del Riesgo 2016-2030, alineada con el Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015-2030 de Naciones Unidas, priorizando la reducción de vulnerabilidades estructurales y el fortalecimiento de capacidades locales (UNDRR, 2022). En el nivel municipal, la ley 8488 exige que los planes reguladores incorporen mapas de amenaza sísmica, aunque su implementación ha sido desigual. Asimismo, existen esfuerzos para fomentar la resiliencia comunitaria, incluyendo simulacros nacionales anuales de terremoto y campañas de sensibilización en escuelas y comunidades (CADRI, 2021).

La implementación del marco normativo sísmico en Costa Rica ha sido clave para reducir la vulnerabilidad estructural y mejorar la respuesta ante terremotos. En términos de infraestructura, la aplicación del Código Sísmico ha sido efectiva en la reducción del colapso estructural en edificaciones construidas bajo las regulaciones modernas. Por ejemplo, hospitales y edificios diseñados con el código actualizado han resistido sismos recientes sin fallas críticas, como el Hospital de Puntarenas, que permaneció operativo tras el terremoto de Nicoya en 2012 (Mora, 2013). Comparaciones regionales indican que, pese a compartir niveles de amenaza sísmica similares con sus vecinos, Costa Rica ha reducido significativamente la mortalidad y las pérdidas económicas gracias a la aplicación rigurosa de sus normas de construcción (Benito & Torres, 2009). Sin embargo, persisten desafíos en la supervisión de edificaciones informales y en la fiscalización de construcciones en zonas rurales y de bajos ingresos, donde muchas viviendas aún no cumplen con los estándares adecuados (CFIA, 2014).

En términos de alineación con estándares internacionales, el Código Sísmico costarricense es comparable a regulaciones avanzadas como el Eurocode 8 (Europa) y el ASCE 7-22 (Estados Unidos), incluyendo requisitos modernos como espectros de diseño inelásticos y criterios de confinamiento en estructuras de hormigón (EIRD, 2021). A nivel de políticas públicas, Costa Rica ha sido pionera en la región en la integración del riesgo sísmico dentro de la planificación del desarrollo, participando en iniciativas internacionales como el Global Risk Assessment Framework (GRAF), impulsado por la ONU, que promueve la evaluación integrada del riesgo en múltiples sectores (UNDRR, 2022). No obstante, existen brechas en la implementación, particularmente en la actualización de normativas para infraestructuras críticas

antiguas, muchas de las cuales requieren reforzamiento estructural para cumplir con los estándares actuales. Otro aspecto pendiente es el fortalecimiento de la descentralización de la gestión del riesgo, ya que solo el 60% de los municipios cuenta con unidades operativas de prevención y respuesta (REPOSITORIO CONARE, 2022). En general, la normativa y políticas de Costa Rica reflejan una alta alineación con estándares internacionales, pero su efectividad dependerá de la continuidad en su aplicación y la asignación de recursos para cerrar brechas en fiscalización y preparación comunitaria.

3.5.3 Brechas existentes en conocimiento y gestión

A pesar de los avances en el conocimiento de la sismicidad costarricense y en la gestión del riesgo sísmico, aún persisten brechas significativas que limitan una reducción más efectiva del riesgo de desastre. En términos científicos, una de las principales lagunas es la comprensión incompleta de la actividad de ciertas fallas geológicas y su recurrencia sísmica. Si bien las fallas más evidentes han sido identificadas y monitoreadas, existen estructuras secundarias en el Valle Central, Guanacaste y Talamanca cuya capacidad de generar terremotos destructivos sigue siendo incierta (Montero et al., 1998). Estudios geológicos han mapeado más de 40 fallas activas, pero en muchos casos se desconocen sus tasas de deslizamiento y el intervalo de tiempo entre eventos mayores. La paleosismología, disciplina que estudia terremotos prehistóricos a través de análisis de sedimentos y evidencias geológicas, ha sido poco aplicada en Costa Rica, lo que representa una brecha en la estimación precisa de la amenaza sísmica en fallas corticales críticas (Kerwa, 2022).

Otra brecha importante en el conocimiento es la falta de instrumentación en zonas oceánicas de la subducción, especialmente en la trinchera Mesoamericana frente a la costa del Pacífico. La instalación de sensores geodésicos y sísmicos en el fondo marino permitiría monitorear con mayor precisión el acoplamiento de la interfaz de subducción y la acumulación de esfuerzos que pueden desencadenar grandes terremotos interplaca (Arroyo-Solórzano et al., 2024). Asimismo, la influencia de los eventos de deslizamiento lento (*slow slip events*) en la zona de subducción sigue siendo un área poco estudiada en Costa Rica. Se ha documentado que estos procesos, en los que la placa del Coco se desliza sin generar grandes sismos, pueden alterar la probabilidad de ocurrencia de terremotos mayores, pero aún no se han incorporado plenamente en los modelos de amenaza sísmica (Protti et al., 2014).

Desde la perspectiva de la gestión del riesgo, persisten brechas relacionadas con la implementación desigual de las políticas de prevención y con la vulnerabilidad de ciertas infraestructuras. A pesar de la existencia de un código sísmico moderno y regulaciones estrictas, miles de edificaciones construidas antes de la implementación de normativas sismorresistentes siguen en uso sin haber sido reforzadas. Escuelas, hospitales y viviendas en comunidades vulnerables representan puntos críticos de riesgo ante un gran terremoto (CFIA, 2014). Aunque existen programas de reforzamiento estructural, la cobertura ha sido limitada por restricciones presupuestarias. También se han identificado desafíos en la fiscalización de la construcción informal, que en muchas áreas rurales y barrios marginales se realiza sin supervisión técnica, aumentando la exposición a daños severos en caso de sismo (Repositorio CONARE, 2022).

Otra brecha es la descentralización de la gestión del riesgo: aunque la Ley 8488 establece la obligación de incorporar la reducción del riesgo sísmico en los planes municipales, menos del 50% de los gobiernos locales ha implementado mecanismos efectivos para restringir el desarrollo urbano en zonas de alta

amenaza sísmica (CNE, 2021). Asimismo, la cobertura de seguros para viviendas y empresas sigue siendo baja, lo que implica que los costos de reconstrucción tras un desastre recaerían principalmente en los afectados y el Estado. Finalmente, Costa Rica aún no cuenta con un Sistema de Alerta Temprana Sísmica plenamente operativo, lo que representa una desventaja frente a países como México o Japón, donde estos sistemas han permitido reducir el impacto de terremotos mediante avisos segundos antes de la llegada de las ondas destructivas (Kerwa, 2022).

3.6 Riesgo por tsunamis

Los tsunamis en Costa Rica son eventos infrecuentes pero documentados en ambas costas del país (Chacón-Barrantes et al., 2021a; Fernández et al., 2000). Se han registrado aproximadamente 40 tsunamis desde mediados del siglo XVIII, casi todos de magnitud y alcance moderados (Chacón-Barrantes et al., 2021a; Soloviev & Go, 1984); La mayoría han sido generados por grandes terremotos en zonas sísmicas regionales: en el litoral del Pacífico por sismos de subducción en la Fosa de Centroamérica (Middle America Trench) y en el Caribe por eventos asociados al Cinturón Deformado de Panamá (Lindholm et al., 2017; O'Loughlin & Lander, 2003). Adicionalmente, algunos tsunamis lejanos originados por mega terremotos en otras partes del Pacífico (Chile, Japón) han alcanzado las costas costarricenses con amplitudes típicamente menores a un metro (NOAA/NCEI, 2021; Angove et al., 2019). Los registros sugieren que Costa Rica es una zona de amenaza tsunámica moderada dentro del contexto del Pacífico americano (Brizuela et al., 2014; Fernández et al., 2000).

Costa Rica enfrenta una amenaza de tsunami real, pero de intensidad moderada en comparación con zonas del Pacífico noroccidental, caracterizada por olas de inundación localizadas y periodos de retorno largos (Chacón-Barrantes et al., 2021a; Lindholm et al., 2017). En términos de sus características físicas, los tsunamis locales en Costa Rica suelen tener tiempos de arribo muy cortos (15–30 minutos tras el sismo) y alturas de ola limitadas pero capaces de inundar zonas costeras bajas (Nishenko et al., 2021; Chacón-Barrantes & Arozarena-Llopis, 2021). Los máximos *runups* observados históricamente rondan los 2–7 metros, como ocurrió en el Golfo de Nicoya (Pacífico) en 1950 y en la costa de Guanacaste tras el tsunami de Nicaragua de 1992 (Chacón-Barrantes & Arozarena-Llopis, 2021; Geist, 2002). En el Caribe, la presencia de arrecifes y levantamientos co-sísmicos ha atenuado algunos tsunamis locales, limitando su impacto (Nishenko et al., 2021). No obstante, fenómenos particulares como los *tsunami-quakes* (terremotos de ruptura lenta) pueden generar olas inusualmente grandes respecto a la magnitud sísmica, como se evidenció en el tsunami de Nicaragua de 1992 (Geist, 2002). Dado que las costas históricamente estuvieron escasamente pobladas, es posible que tsunamis mayores hayan pasado desapercibidos en épocas pre-instrumentales (Thiel & Hoffmann, 2011).

Aunque ningún megatsunami catastrófico ha golpeado Costa Rica en tiempos modernos, varios tsunamis han causado afectaciones significativas a lo largo de la historia registrada. En el Pacífico, se reporta que el tsunami de 1854 impactó la región del Golfo Dulce y habría destruido la entonces pequeña población de Villa Golfo Dulce (Lindholm et al., 2017; Fernández et al., 2000). Asimismo, el terremoto de 1906 en Colombia generó un tsunami que provocó inundaciones menores en el Pacífico sur costarricense. En fechas más recientes, destaca el tsunami ocurrido tras el sismo de Limón (Mw 7.7) del 22 de abril de 1991, que afectó la costa Caribe. Este tsunami fue de pequeña magnitud, pero inundó hasta 100 metros tierra adentro en algunos sitios y se le atribuyen al menos dos fallecimientos por ahogamiento (Nishenko et al.,

2021). Las alturas de ola en 1991 alcanzaron ~2–3 m en la costa de Limón y Bocas del Toro, causando anegamiento ligero sin daños estructurales mayores (Nishenko et al., 2021; Chacón-Barrantes et al., 2021b). De manera similar, el terremoto de Nicaragua de 1992 generó un tsunami regional que afectó el Pacífico norte costarricense con runups de hasta 7 m en bahías abiertas, provocando inundación de campos y caminos, aunque sin cobrar vidas en Costa Rica (Chacón-Barrantes & Arozarena-Llopis, 2021; Fernández et al., 2000).

3.6.1 Historia del estudio del riesgo por tsunami en Costa Rica

Durante buena parte del siglo XX, la amenaza de tsunamis en Costa Rica recibió una atención limitada dentro de la comunidad científica y las instituciones nacionales, en comparación con otros peligros como los terremotos o erupciones volcánicas (Fernández et al., 2000). Los primeros esfuerzos sistemáticos por documentar eventos tsunamigénicos ocurrieron a finales de ese siglo: investigadores locales e internacionales compilaron catálogos históricos que evidenciaron decenas de tsunamis regionales previamente dispersos en crónicas y reportes (Fernández et al., 2000; Chacón-Barrantes et al., 2021a). Sin embargo, no fue sino hasta después del tsunami de 1992 en Nicaragua que Costa Rica intensificó la evaluación de su riesgo tsunámico (Brizuela et al., 2014). A inicios de la década de 2000 se realizaron las primeras simulaciones numéricas de tsunamis para costas costarricenses: por ejemplo, Ortiz et al. (2001) modelaron escenarios de inundación en Puntarenas ante tsunamis locales y lejanos, marcando un hito en la incorporación de herramientas computacionales (citado en Lindholm et al., 2017). En paralelo, geólogos y sismólogos nacionales comenzaron a investigar evidencias geológicas de paleotsunamis y a integrar la amenaza de maremotos en las evaluaciones multiamenaza del país (Camacho et al., 1994; Thiel & Hoffmann, 2011).

El estudio de los tsunamis en Costa Rica cobró mayor impulso tras los grandes tsunamis globales de 2004 (Océano Índico) y 2011 (Japón), que motivaron iniciativas internacionales de cooperación en las que el país participa (IOC-UNESCO, 2018; Angove et al., 2019). En 2013 se creó el Sistema Nacional de Monitoreo de Tsunamis (SINAMOT) en la Universidad Nacional, en coordinación con la Comisión Nacional de Emergencias, consolidando un programa dedicado a la investigación, vigilancia y capacitación sobre tsunamis (Chacón-Barrantes & Murillo-Gutiérrez, 2022). Desde entonces, Costa Rica se ha integrado plenamente a los mecanismos internacionales de alerta temprana: es miembro activo del Sistema de Alerta de Tsunamis del Pacífico y del Sistema CARIBE-EWS para el Caribe, colaborando en intercambios de datos y protocolos (IOC-UNESCO, 2018; Lindholm et al., 2017). En la última década se han publicado catálogos actualizados de tsunamis históricos (Chacón-Barrantes et al., 2021a) y numerosos estudios científicos sobre modelado de escenarios y evaluación de la amenaza local (Chacón-Barrantes, 2018; Chacón-Barrantes & Arozarena-Llopis, 2021). Esta evolución refleja un progreso significativo en el conocimiento de la amenaza de tsunamis en Costa Rica, pasando de ser un tema marginal a un campo activo de estudio interdisciplinario y con respaldo institucional durante los últimos 20 años.

El estudio de la amenaza de tsunami en Costa Rica se caracteriza por un abordaje integral: histórico, analítico y preventivo, utilizando técnicas modernas de modelación y mapeo, y alineado con estándares científicos internacionales para la evaluación de riesgos naturales (Angove et al., 2019; Geist, 2002). La aproximación al estudio ha sido tanto histórica como prospectiva. Inicialmente, el esfuerzo se centró en caracterizar la amenaza mediante la recopilación de eventos pasados, construyendo un catálogo histórico

detallado que abarca desde 1539 hasta la actualidad (Fernández et al., 2000; Chacón-Barrantes et al., 2021a). Esta línea de investigación documental permitió identificar fuentes sísmicas recurrentes y patrones de afectación, sirviendo de base para entender la amenaza. Posteriormente, con el advenimiento de mejores recursos computacionales, el énfasis se desplazó hacia la modelación numérica de tsunamis y la generación de mapas de inundación. Estudios recientes han empleado modelos hidrodinámicos validados internacionalmente (MOST/ComMIT de NOAA) para simular la propagación e inundación de tsunamis bajo distintos escenarios, tanto de sismos locales como lejanos (Chacón-Barrantes & Arozarena-Llopis, 2021; Brizuela et al., 2014). Un enfoque determinista común ha sido considerar terremotos máximos creíbles en las fuentes vecinas (Nicoya, Osa) y calcular la altura de ola y penetración tierra adentro en las comunidades costeras, identificando zonas de mayor peligro relativo (Chacón-Barrantes & Arozarena-Llopis, 2021). Complementariamente, se han realizado análisis probabilísticos a escala regional centroamericana para estimar la frecuencia de tsunamis de cierta magnitud, integrando la sismicidad histórica en modelos estadísticos (Brizuela et al., 2014). Sin dejar de lado que análisis probabilísticos aún conllevan incertidumbres elevadas por la escasez de datos, constituyen un primer acercamiento cuantitativo al riesgo de tsunami en el Pacífico americano.

Otro rasgo destacado del estudio de tsunamis en Costa Rica es la integración de múltiples disciplinas y fuentes de información. Por un lado, geofísicos han analizado la sismicidad y la tectónica local para delimitar las fuentes tsunamigénicas más relevantes, considerando la geometría de la zona de subducción y fallas locales (Lindholm et al., 2017; von Huene et al., 2004). Por otro lado, oceanógrafos físicos y modeladores han utilizado registros mareográficos y observaciones de campo de tsunamis recientes para calibrar los modelos numéricos, reproduciendo con éxito eventos como el tsunami de México 2017 en las costas costarricenses (Chacón-Barrantes, 2018; Chacón-Barrantes & Gutiérrez-Echeverría, 2017). Asimismo, el enfoque moderno enfatiza la elaboración de mapas de amenaza y rutas de evacuación para comunidades costeras, combinando resultados de simulaciones con sistemas de información geográfica (SIG) para visualizar las áreas potencialmente inundables (IOC-UNESCO, 2018). Estos mapas, junto con estudios de vulnerabilidad socioeconómica, permiten estimar escenarios de impacto y alimentar planes de emergencia locales. Cabe señalar que persisten brechas en el conocimiento —por ejemplo, la amenaza de tsunamis por deslizamientos submarinos o erupciones volcánicas no ha sido incorporada plenamente en los estudios nacionales—, por lo que el enfoque se mantiene en continua evolución (Chacón-Barrantes & Murillo-Gutiérrez, 2022; von Huene et al., 2004).

En el período reciente, Costa Rica no ha sufrido tsunamis devastadores; sin embargo, se han registrado varias manifestaciones menores de la amenaza que han puesto a prueba los sistemas de alerta y preparación. En 2012, el terremoto de Nicoya (Mw 7.6) generó un pequeño tsunami local en el Pacífico central, con alturas de pocos decímetros detectadas instrumentalmente, confirmando la capacidad tsunamigénica de la zona de subducción de Costa Rica (Chacón-Barrantes & Arozarena-Llopis, 2021). Asimismo, grandes terremotos ocurridos fuera del país activaron alertas preventivas: por ejemplo, el tsunami del terremoto de Chile de 2010 llegó al Pacífico costarricense con amplitudes <0.5 m, y el de Japón 2011 produjo corrientes anómalas en puertos como Caldera (NOAA/NCEI, 2021). Ambos eventos motivaron evacuaciones costeras temporales, pero no causaron daños locales (Lindholm et al., 2017). Más recientemente, en enero de 2022 la erupción del volcán Hunga-Tonga en el Pacífico produjo un tsunami atmosférico que se registró en múltiples puntos de ambas costas de Costa Rica —el segundo tsunami más ampliamente observado en la historia nacional— con fluctuaciones de nivel de mar de hasta ~50 cm y

corrientes fuertes en ciertas bahías (Chacón-Barrantes et al., 2023; Rivera-Cerdas et al., 2023). Aunque este evento no provocó inundaciones severas, sirvió para evaluar la capacidad de respuesta: las autoridades emitieron advertencias de precaución pese a no recibirse alarma oficial internacional, demostrando un nivel de preparación adquirido (Rivera-Cerdas et al., 2023).

Actualmente, el riesgo de desastre asociado a tsunamis en Costa Rica se considera moderado, condicionado por la baja probabilidad de ocurrencia, pero con potencial de alto impacto en comunidades costeras vulnerables (UNISDR, 2015; World Bank, 2016). El rápido crecimiento urbano y turístico en las zonas costeras durante las últimas décadas incrementa la exposición de personas e infraestructura, lo que podría agravar las consecuencias si un tsunami significativo ocurriera en el futuro cercano (World Bank, 2016). No obstante, simultáneamente se han fortalecido las capacidades de gestión del riesgo: hoy en día existen sistemas de monitoreo sísmico-oceánico en tiempo real, planes locales de evacuación en localidades clave y mayor conciencia pública gracias a campañas de educación (Chacón-Barrantes & Murillo-Gutiérrez, 2022; IOC-UNESCO, 2018). La implementación de simulacros anuales (ejercicios Caribe Wave y PacWave) y la instalación de señalización de rutas de evacuación en playas turísticas reflejan una mejora en la preparación colectiva ante tsunamis (IOC-UNESCO, 2018). A pesar de ello, el riesgo no es nulo: escenarios recientes de investigación indican que un terremoto submarino de magnitud ~7.8 en la costa Pacífica podría generar olas de varios metros que impactarían poblaciones como Puntarenas, donde la concentración poblacional en zonas bajas es significativa (Chacón-Barrantes & Arozarena-Llopis, 2021; Fernández et al., 2000). Adicionalmente, el cambio climático y la elevación progresiva del nivel medio del mar podrían ampliar la zona de inundación de futuros tsunamis, aumentando la cantidad de personas en riesgo en ausencia de medidas adaptativas (IPCC, 2019; World Bank, 2016).

3.6.2 Instrumentos de gestión del riesgo de tsunami en la política pública

Costa Rica cuenta con un marco normativo e institucional robusto orientado a la gestión integral del riesgo de desastres, dentro del cual se inscriben los esfuerzos para mitigar la amenaza de tsunamis. La Ley Nacional de Emergencias y Prevención del Riesgo No. 8488 (Costa Rica, 2006) establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo, definiendo responsabilidades a la CNE y otras instituciones para la prevención, preparación y atención de desastres, incluidos los tsunamis. En alineación con dicha ley, el país adoptó la Política Nacional de Gestión del Riesgo 2016–2030, que enfatiza el enfoque multisectorial y preventivo ante amenazas naturales (World Bank, 2016). Si bien esta política no menciona explícitamente los tsunamis de forma detallada, sí impulsa la evaluación de amenazas costeras y la incorporación de escenarios de cambio climático en la planificación territorial. A nivel más específico, la CNE junto con el SINAMOT han desarrollado procedimientos operativos estandarizados para la recepción de alertas de tsunami y la emisión de órdenes de evacuación, los cuales se actualizaron tras experiencias internacionales recientes (IOC-UNESCO, 2018). Además, Costa Rica es signataria del Marco de Sendai (2015–2030), comprometiéndose a mejorar los sistemas de alerta temprana y reducir la mortalidad por desastres; en consecuencia, ha alineado sus instrumentos de política pública con estos estándares, priorizando la educación comunitaria y la preparación local ante eventos de baja frecuencia, pero alto impacto como los tsunamis (UNISDR, 2015).

3.6.3 Brechas existentes en conocimiento y gestión

A pesar del progreso alcanzado, subsisten importantes brechas en el conocimiento y la gestión de la amenaza de tsunamis en Costa Rica que podrían limitar la efectividad de la reducción del riesgo. En primer lugar, la información histórica y paleotsunámica es incompleta: la historia documentada de solo unos pocos siglos y la baja frecuencia de eventos implican que la estadística de tsunamis es poco robusta (Thiel & Hoffmann, 2011; Fernández et al., 2000). Posibles tsunamis antiguos anteriores al siglo XVIII – evidenciados indirectamente por depósitos sedimentarios o relatos indígenas– no han sido estudiados en detalle, lo que deja incertidumbres sobre la magnitud máxima posible de eventos en la región (Chacón-Barrantes et al., 2021a). Esta carencia de registros prolongados dificulta estimar con precisión periodos de retorno y niveles extremos de amenaza. En la dimensión científica, una brecha señalada por los expertos es la falta de incorporación de fuentes tsunamigénicas no sísmicas en las evaluaciones: hasta ahora, las amenazas consideradas se centran casi exclusivamente en terremotos, obviando el potencial de deslizamientos submarinos locales o erupciones volcánicas en islas del Pacífico que podrían generar tsunamis atípicos (von Huene et al., 2004; IOC-UNESCO, 2018). La ausencia de estudios detallados sobre inestabilidad de taludes marinos y posibles tsunamis causados por deslizamientos en el margen costarricense representa una brecha de conocimiento geológico por subsanar. De igual forma, persisten lagunas en la resolución de los datos de base: la cobertura de batimetría detallada y topografía LIDAR en zonas costeras todavía no es completa, limitando la precisión de algunos modelos de inundación (Chacón-Barrantes & Murillo-Gutiérrez, 2022). Esta limitación técnica puede traducirse en incertidumbre en los mapas de amenaza, especialmente en áreas donde pequeños cambios topográficos influyen en la penetración del agua.

En cuanto a la gestión del riesgo, las brechas se manifiestan en recursos, cobertura y articulación interinstitucional. Un desafío identificado es la insuficiente densidad de instrumentos de monitoreo: la costa Pacífica cuenta con pocos mareógrafos operativos y no existen sensores de fondo marino (sistemas DART) dedicados en las inmediaciones, lo que reduce la capacidad de detección temprana de tsunamis cercanos (Comfort et al., 2012; Angove et al., 2019). Aunque el SINAMOT ha instalado algunos equipos y aprovechado estaciones regionales, aún hay tramos costeros sin vigilancia directa en tiempo real. Otra brecha importante es la heterogeneidad en la preparación comunitaria: mientras ciertas localidades han logrado altos niveles de organización, en otras la sensibilización es baja o reciente (Chacón-Barrantes et al., 2021b). Esto puede deberse a limitaciones de recursos humanos para abarcar todo el litoral con programas educativos continuos. Además, la incorporación de la amenaza de tsunami en los instrumentos de ordenamiento territorial y ambiental es limitada; por ejemplo, la normativa de construcción en la zona marítimo-terrestre no contempla lineamientos específicos de protección ante tsunamis (World Bank, 2016). La coordinación entre instituciones científico-técnicas y tomadores de decisión podría fortalecerse para que la información de riesgo actualizada se traduzca más ágilmente en reglamentaciones y acciones locales. Por último, un aspecto crítico es la sostenibilidad financiera y de talento humano: mantener y expandir la red de monitoreo, así como realizar investigación aplicada (por ejemplo, estudios de paleotsunamis o actualización de modelos) requiere inversión constante y formación de especialistas en tsunamis, rubros en los que el país aún depende de cooperación internacional o esfuerzos académicos individuales (Chacón-Barrantes & Murillo-Gutiérrez, 2022). Esta fragilidad institucional puede ralentizar el cierre de las demás brechas mencionadas. Costa Rica enfrenta desafíos pendientes en completar su registro histórico-geológico de tsunamis, en diversificar las fuentes de amenaza consideradas, y en

garantizar que las mejoras en conocimiento y planes abarquen uniformemente todas las comunidades costeras en riesgo.

3.7 Riesgo volcánico

Costa Rica es uno de los países más volcánicamente activos del mundo debido a la subducción de la placa del Coco bajo la placa del Caribe (Alvarado, 2005). El país alberga aproximadamente diez complejos volcánicos y al menos cinco volcanes históricamente activos, incluyendo Rincón de la Vieja, Arenal, Poás, Irazú y Turrialba (Mora et al., 2021). Las amenazas volcánicas principales comprenden erupciones explosivas con caídas de ceniza, flujos piroclásticos, lahares y emisiones de gases volcánicos. Una franja densamente poblada, el Valle Central, se ubica cercana a cuatro de estos volcanes, exponiendo a más del 50% de la población a posibles erupciones (Stine & Banks, 1991). Los suelos fértiles de origen volcánico y los recursos hídricos geotérmicos atraen asentamientos humanos, incrementando la exposición al riesgo (Small & Naumann, 2001). El riesgo volcánico resulta del cruce entre la amenaza (tipo y magnitud de fenómenos volcánicos) y la vulnerabilidad de los elementos expuestos (población, infraestructura) (UNDRR, 2015). Factores como la expansión urbana no planificada hacia laderas volcánicas, deforestación y construcción de infraestructura crítica cerca de cráteres (por ejemplo, la planta de telecomunicaciones en Irazú) agravan la peligrosidad (Stine & Banks, 1991; Alvarado et al., 2014).

El riesgo volcánico en Costa Rica se caracteriza por alta exposición y recurrencia moderada de erupciones. Entre 1950 y 2020 ocurrieron decenas de erupciones de distinto tamaño, desde erupciones freáticas menores hasta episodios violentos que afectaron grandes áreas (Smithsonian GVP, 2013). Por ejemplo, Poás y Turrialba han producido columnas de ceniza que llegan hasta el Valle Central, afectando la calidad del aire y la salud pública (Campos-Durán & Barrantes-Castillo, 2020). La presencia de comunidades rurales en cercanías inmediatas de cráteres activos, como en las laderas de Turrialba y Arenal, aumenta la vulnerabilidad ante flujos de lodo y bombas volcánicas (Barquero, 2005; CNE, 2020). No obstante, las recientes mejoras en la resiliencia –como sistemas de monitoreo, planes de emergencia y educación comunitaria– han comenzado a reducir el riesgo relativo (Guimarães et al., 2021). Arenal, Irazú y Poás se destacan por contar con múltiples estrategias de reducción del riesgo, incluyendo monitoreo sísmico y de gases, restringiendo accesos en fases de alerta y reubicando infraestructura clave (Guimarães et al., 2021). Aun así, amenaza volcánica y población siguen en estrecho contacto: se estima que cerca del 11% de la población vive a menos de 100 km de un volcán activo del Holoceno (Small & Naumann, 2001), indicando la relevancia continua del riesgo volcánico en el país.

Históricamente, Costa Rica ha sufrido daños significativos por erupciones volcánicas. Tres erupciones en el siglo XX fueron consideradas emergencias nacionales: Irazú (1963-1965), Arenal (1968) y Poás (1990) (Aguilar & Alvarado, 2014). La erupción del Irazú (1963-65) cubrió de ceniza la Meseta Central durante dos años, afectando cultivos de café, ganado y la infraestructura de agua potable (Coto-Cedeño, 2018). Esta erupción causó pérdidas económicas directas por lluvia ácida, interrupciones de servicios básicos y la declaración de “estado de sitio” debido al colapso de techos y contaminación de ríos (Alvarado & Vega, 2013). Por su parte, Arenal, tras casi cinco siglos de inactividad, registró en 1968 una súbita erupción explosiva que mató al menos 78 personas (Melson & Sáenz, 1968, cit. en Aguilar & Alvarado, 2014) y destruyó tres pueblos (Tabacón, Pueblo Nuevo y San Luís). Estas tragedias marcaron un punto de inflexión en la percepción del riesgo volcánico y estimularon la creación de instituciones de vigilancia volcánica en

Costa Rica (Alvarado & Patiño, 2017). Más recientemente, el volcán Turrialba reanudó actividad eruptiva en 2014-2016 con numerosas emisiones de ceniza que afectaron la agricultura, la salud pública y obligaron al cierre temporal del Aeropuerto Internacional Juan Santamaría debido a la caída de ceniza (OVSICORI-UNA, 2016; Campos-Durán & Barrantes-Castillo, 2020).

En las últimas décadas, el impacto contemporáneo de la actividad volcánica en Costa Rica se manifiesta tanto en pérdidas económicas como en afectaciones sociales. Según Aguilar y Alvarado (2014), entre 1953 y 2005 el vulcanismo costarricense provocó al menos 103 muertes y pérdidas económicas directas por US\$48.7 millones (valor histórico), principalmente por destrucción de infraestructura, cultivos y evacuaciones masivas. Adicionalmente, eventos como la lluvia ácida derivada de erupciones freáticas han causado estragos: solo en la década de 1990, el Poás generó daños agrícolas valorados en más de US\$200 millones (Aguilar & Alvarado, 2014). Los impactos indirectos son notorios en el sector agropecuario; un estudio histórico señala que las cenizas de Turrialba (2010-2016) afectaron la producción lechera y cultivos de tubérculos en zonas altas de Cartago y San José, reduciendo rendimientos y contaminando fuentes de agua (Coto-Cedeño, 2018). Asimismo, la dimensión turística se ha visto afectada: cierres prolongados de parques nacionales volcánicos (como Poás en 2017-2018 tras una erupción freática) conllevaron pérdidas en economías locales dependientes del ecoturismo (OVSICORI-UNA, 2017). A pesar de estos efectos adversos, la mejora en sistemas de alerta temprana y la preparación comunitaria han reducido la mortalidad en eventos recientes. Por ejemplo, no se registraron víctimas mortales durante las erupciones de Turrialba y Poás en la última década, lo cual evidencia un progreso en la gestión del riesgo frente a amenazas volcánicas contemporáneas (Alvarado et al., 2014; Campos-Durán & Barrantes-Castillo, 2020).

3.7.1 Historia del estudio del riesgo volcánico en Costa Rica

El estudio sistemático de volcanes en Costa Rica inició con descripciones coloniales y exploraciones científicas en el siglo XIX. Sin embargo, fue a partir del siglo XX que la vulcanología costarricense se consolidó formalmente. Tras la erupción cataclísmica del Irazú (1963-65) y la del Arenal (1968), se impulsó la institucionalización de la investigación vulcanológica (Alvarado & Patiño, 2017). En 1967 se fundó la Escuela Centroamericana de Geología (Universidad de Costa Rica), y para 1973 estableció una sección de Sismología y Vulcanología, que posteriormente dio origen a la Red Sismológica Nacional (RSN) (Castillo & Peraldo, 2000). Paralelamente, el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) desarrolló programas de geociencia, como el Proyecto Geotérmico Miravalles, que incluyeron estudios volcánicos aplicados (Alvarado, 2011). La década de 1980 vio la creación de OVSICORI-UNA (Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica, en la Universidad Nacional) en 1986, como respuesta a la necesidad de monitoreo volcánico independiente (Alvarado & Patiño, 2017). Estas instituciones, RSN y OVSICORI, establecieron redes de vigilancia instrumental en los volcanes activos, sentando las bases para la investigación moderna de amenazas volcánicas en el país (Mora et al., 2021).

El desarrollo de la vulcanología costarricense puede dividirse en etapas (Alvarado & Patiño, 2017). Durante el periodo precolombino y colonial, predominaban las interpretaciones míticas y las primeras descripciones anecdóticas de erupciones. En la etapa republicana temprana (siglo XIX), naturalistas como Henri Pittier documentaron fenómenos volcánicos y recopilaron leyendas locales, iniciando la sistematización del conocimiento (Mora, 2024). A finales del siglo XIX y primera mitad del XX, científicos como José Fidel Tristán y Paul Biolley exploraron volcanes y publicaron en revistas nacionales, aunque sin

apoyo institucional fuerte (Mora, 2024). La tercera etapa (1926-1962) vio trabajos notables como los de Alfredo Petterson y Leónidas Pacheco en Irazú y Poás. La gran transformación llegó con la etapa cuarta (1963-presente), tras las erupciones de Irazú y Arenal, cuando se consolidaron las instituciones científicas nacionales (Alvarado & Patiño, 2017). Desde entonces, la investigación ha florecido, abarcando desde estudios geológicos básicos (mapas geológicos, petrografía de lavas) hasta monitoreo en tiempo real y modelado de riesgos (Alvarado, 2011). Cabe destacar la participación internacional, por ejemplo, la asistencia de la USGS a través del VDAAP (Volcano Disaster Assistance Program) en los años 1980 y 1990, que fortaleció capacidades de respuesta ante crisis eruptivas (Stine & Banks, 1991). La trayectoria histórica demuestra una creciente sofisticación en el estudio de la amenaza volcánica, evolucionando de observaciones cualitativas a análisis integrados de riesgo y resiliencia.

El estudio de la amenaza volcánica en Costa Rica se caracteriza por un enfoque multidisciplinario, que incluye geología, geofísica, geoquímica, tefroestratigrafía, vulcanología física y ciencias sociales. Un rasgo distintivo es la elaboración de mapas de peligros volcánicos para volcanes activos, identificando zonas expuestas a flujos de lodo, caídas de balísticos y depósitos de lava (Barquero, 1977; Alvarado & Schröder, 2011). Estos mapas, combinados con análisis históricos de erupciones, permiten delinear escenarios eruptivos probables (Barquero, 2005). La vigilancia instrumental es otro pilar: el país mantiene una densa red sísmica y de monitoreo en sus volcanes, con estaciones sismográficas, GPS, inclinómetros, sensores de gases (MultiGAS) y cámaras web, operada conjuntamente por OVSICORI-UNA y la RSN (Mora et al., 2021). Esto ha facilitado estudios detallados de precursores sísmicos, deformación y emisiones fumarólicas previas a erupciones, mejorando la comprensión de los ciclos eruptivos. Asimismo, la cooperación entre científicos locales e internacionales ha sido clave; por ejemplo, proyectos con el Instituto Smithsonian permitieron analizar la erupción del Arenal en 1968 en tiempo real, integrando petrología y observaciones de campo (Melson & Sáenz, 1968).

En las últimas décadas han emergido enfoques modernos en el estudio de la amenaza volcánica costarricense. La modelación numérica se ha aplicado para simular dispersión de cenizas y gases (Morales & Liao, 1999), utilizando modelos gaussianos de pluma que evalúan concentraciones de SO₂ y su impacto en la salud hasta decenas de kilómetros del volcán (Morales & Liao, 1999). Igualmente, se implementan técnicas de teledetección, por ejemplo, sensores satelitales para rastrear columnas eruptivas y detectar cambios térmicos en cráteres activos (VTN, 2019). En el enfoque social, se realizan estudios de vulnerabilidad y percepción del riesgo en comunidades cercanas a volcanes; Campos-Durán y Barrantes-Castillo (2020) desarrollaron un índice de vulnerabilidad comunal para Turrialba, integrando variables socioeconómicas y capacidad de gestión local. Esto refleja un cambio hacia un análisis de riesgo integral, donde la amenaza física se estudia en conjunto con la exposición humana, la vulnerabilidad social y la capacidad institucional (Alvarado et al., 2014). Los rasgos principales del estudio de la amenaza volcánica en Costa Rica son su enfoque preventivo y aplicado –desde cartografiar depósitos antiguos hasta diseñar escenarios de erupción para planes de contingencia– y una creciente alineación con metodologías internacionales de evaluación de riesgo volcánico (Ewert, 2007; Freitas Guimarães et al., 2021).

3.7.2 Instrumentos de gestión del riesgo volcánico en la política pública

Costa Rica cuenta con un marco normativo robusto en gestión del riesgo que abarca amenazas volcánicas y climáticas. La Ley Nacional de Emergencias y Prevención del Riesgo No. 8488 (2006) establece la política

pública transversal de reducción del riesgo de desastres, obligando a incorporar criterios de prevención en planes de desarrollo y ordenamiento territorial (República de Costa Rica, 2006). Bajo esta ley, la Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias (CNE) es el ente rector que coordina acciones para disminuir impactos de desastres, volcánicos incluidos. La Política Nacional de Gestión del Riesgo 2016-2030, lanzada en 2015, actualiza lineamientos estratégicos alineados con el Marco de Sendai, enfatizando la reducción de vulnerabilidad en infraestructura crítica, mejora de sistemas de alerta temprana y protección de medios de vida (CNE, 2015; UNDRR, 2015). En correspondencia, existen reglamentos técnicos como el Código Sísmico de Costa Rica (que contempla diseño resistente no solo a sismos sino también a cargas de ceniza sobre techos) y guías de planificación territorial que desalientan asentamientos en zonas de alto peligro volcánico (INVU, 2017). Instrumentos específicos incluyen los Planes Reguladores municipales que, con apoyo de la CNE, delimitan zonas de uso restringido cerca de volcanes activos e integran mapas de amenaza volcánica en la zonificación (CNE, 2020).

Además de las leyes y políticas, Costa Rica participa en acuerdos internacionales que refuerzan su marco de acción. Por ejemplo, es signataria del Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015-2030, reportando avances en su implementación (UNDRR, 2022). A nivel regional, colabora con iniciativas de CEPREDENAC (Centro de Coordinación para la Prevención de Desastres en Centroamérica) para armonizar protocolos de emergencia y compartir información sobre amenazas volcánicas transfronterizas (Alvarado et al., 2014). Instrumentos financieros como el Fondo Nacional de Emergencias proveen recursos inmediatos para atender erupciones, y más recientemente se han creado mecanismos innovadores como un fondo de emergencia para protección de animales en desastres, reconociendo impactos en medios de vida rurales (UNDRR, 2015). En materia de cambio climático, la Estrategia Nacional de Cambio Climático (2009, actualizada 2018) incorpora la gestión del riesgo como eje fundamental, buscando sinergias entre la adaptación al cambio climático y la reducción del riesgo de desastres (MINAE, 2018). La estructura normativa costarricense para disminuir impactos de amenazas naturales es integral, combinando leyes, políticas públicas, planes operativos y cooperación internacional, lo que proporciona un andamiaje consistente para enfrentar erupciones volcánicas.

La implementación de las políticas de reducción de riesgo en Costa Rica ha logrado importantes avances, aunque enfrenta desafíos. En cuanto a amenazas volcánicas, destaca la efectividad de los protocolos de vigilancia y alerta. Por ejemplo, durante la crisis del Poás en 2017 se aplicaron procedimientos estandarizados de evacuación preventiva y cierre de áreas de acceso, en coordinación con la CNE, lo que resultó en cero víctimas a pesar de explosiones súbitas (OVSICORI-UNA, 2017). Este caso evidencia alineación con estándares internacionales de alerta temprana promovidos por la ONU, integrando monitoreo científico con comunicación rápida a autoridades y población (Mora et al., 2021). Adicionalmente, Costa Rica ha fortalecido la educación comunitaria en zonas de riesgo: simulacros volcánicos anuales en escuelas alrededor del Rincón de la Vieja y Turrialba preparan a la población siguiendo las buenas prácticas de Esfera y Sendai sobre sensibilización pública (UNDRR, 2015). A nivel institucional, la articulación entre OVSICORI-UNA, RSN y CNE refleja un enfoque interagencial similar al que recomienda la UNESCO en sus protocolos de gestión de volcanes activos (Avaró et al., 2021). La reciente creación de un Centro de Operaciones en Emergencias Volcánicas ha mejorado la capacidad de respuesta coordinada, demostrando efectividad en la atención de erupciones cortas pero peligrosas (CNE, 2020).

En cuanto a la alineación con estándares internacionales, Costa Rica destaca en la región por integrar la reducción del riesgo en sus compromisos de cambio climático y desarrollo sostenible. La Política Nacional de Gestión del Riesgo 2016-2030 fue reconocida por su coherencia con el Marco de Sendai y por incluir aspectos innovadores como la protección de animales y medios de vida en desastres (UNDRR, 2015). El país presenta informes bienales voluntarios sobre avances en Sendai, evidenciando cumplimiento en áreas como evaluación de riesgos, fortalecimiento de gobernanza y preparación para la respuesta (UNDRR, 2022). No obstante, persisten brechas en implementación: estudios señalan que la incorporación efectiva de mapas de amenaza en el ordenamiento local es heterogénea, y que algunos municipios rezagados en la aplicación de regulaciones permiten construcciones en zonas de amenaza alta (Campos & Barrantes, 2020; CNE, 2020). A pesar de ello, la tendencia general es positiva, con mejora continua y cooperación técnica internacional (proyectos del Banco Mundial y BID para resiliencia ante desastres). La efectividad de las medidas se refleja en indicadores como la reducción de pérdidas humanas por eventos volcánicos en los últimos 30 años, cumpliendo así con el objetivo global de Sendai de disminuir la mortalidad por desastres (Aguilar & Alvarado, 2014; UNDRR, 2022).

3.7.3 Brechas existentes en conocimiento y gestión

Pese al notable progreso, existen brechas en el conocimiento científico de amenazas volcánicas y en la gestión del riesgo en Costa Rica. En términos de conocimiento, no todos los volcanes han sido estudiados con igual profundidad. Algunos volcanes potencialmente activos, como Platanar, Tenorio o Barva, carecen de estudios geológicos recientes y mapas de amenaza detallados (Stine & Banks, 1991; Alvarado, 2021). La falta de información actualizada sobre su historial eruptivo y estructura interna dificulta evaluar su peligro real. Asimismo, persisten limitaciones en la instrumentación: aunque los volcanes más peligrosos (Poás, Turrialba) tienen monitoreo continuo, otros solo cuentan con vigilancia esporádica por restricciones presupuestarias (Mora et al., 2021). En la gestión, una brecha notoria es la capacidad local desigual. Mientras algunas comunidades cercanas a volcanes tienen comités locales de emergencia bien entrenados, otras zonas rurales aisladas, expuestas a caídas de ceniza o lahares, muestran menor preparación y recursos de respuesta (Campos-Durán & Barrantes-Castillo, 2020). También se ha señalado la necesidad de mejorar los sistemas de comunicación de alertas: en eventos recientes hubo dificultades para difundir información técnica en lenguaje accesible y combatir rumores en redes sociales, lo que evidencia una brecha en comunicación de riesgo (CNE, 2020).

Otra área con brechas es la integración de escenarios de cambio climático en la planificación de riesgo volcánico y viceversa. Si bien el cambio climático no genera erupciones volcánicas, puede influir en amenazas secundarias (por ejemplo, lluvias extremas aumentando lahares). Los planes actuales aún no incorporan plenamente proyecciones climáticas en la microzonificación de riesgo volcánico (Adrián & Chacón, 2019). En el ámbito normativo, aunque existe la Ley 8488 y la Política Nacional de Riesgo, la aplicación práctica a nivel cantonal enfrenta brechas de financiamiento y fiscalización. Algunos planes reguladores siguen sin reflejar las últimas actualizaciones de mapas de amenaza volcánica, permitiendo asentamientos en sitios expuestos (CNE, 2020). Adicionalmente, la gestión de riesgo en Costa Rica enfrenta el reto de datos históricos dispersos: gran parte de la información de erupciones pasadas está en archivos o publicaciones antiguas no digitalizadas, dificultando su acceso para análisis comparativos (Coto-Cedeño, 2018). Por último, se identifica una brecha en la atención psicosocial post desastre; Aguilar y Alvarado (2014) enfatizan que los impactos psicológicos de las erupciones no han sido bien evaluados, lo que sugiere

un vacío en la comprensión holística del riesgo volcánico. Abordar estas brechas es crucial para robustecer la resiliencia frente a futuros eventos.

Con base en la revisión, surgen varias prioridades de investigación y acción para fortalecer la gestión del riesgo volcánico en Costa Rica. En investigación, se prioriza realizar estudios integrales en volcanes menos conocidos (Tenorio, Platanar, Barva) para elaborar sus perfiles de amenaza. Esto incluye datación de erupciones pasadas, modelado de posibles flujos de lava y lahares, y evaluación de impactos a escenarios actuales de uso de suelo (Alvarado, 2021). Igualmente, profundizar en la relación entre factores climáticos y procesos volcánicos es relevante: investigar cómo la variabilidad en precipitación podría influir en la ocurrencia de deslizamientos en flancos volcánicos o en la generación de lahares tras erupciones moderadas, permitiendo integrar hallazgos en la planificación sectorial (Adrián & Chacón, 2019). Otra prioridad científica es el desarrollo de modelos numéricos locales más precisos de dispersión de ceniza para volcanes como Turrialba y Poás, calibrados con datos reales de erupciones recientes (OVSICORI-UNA, 2016). Ello mejorará las predicciones de caída de ceniza sobre la GAM y facilitará la toma de decisiones (por ejemplo, cierres aeroportuarios). También se identifica la necesidad de estudios sobre resiliencia comunitaria: evaluar qué prácticas tradicionales o redes locales han sido eficaces históricamente ante erupciones (p. ej., evacuar ganado, proteger fuentes de agua) para incorporarlas a estrategias oficiales (Villalobos, 2015).

4 ESTADO DE LA INFORMACIÓN DISPONIBLE

Se han identificado bases de datos, documentos e información relevantes para llevar a cabo evaluaciones de riesgo en los cuatro subproyectos en Costa Rica. Las fuentes de información y los datos asociados se presentan en esta sección.

Para amenazas específicas, también se utilizarán estudios existentes sobre inundaciones a nivel nacional y local, particularmente para el río Pirro. Para evaluar amenazas por deslizamientos, se aprovecharán datos LiDAR y catálogos locales, mientras que las evaluaciones de amenaza volcánica se basarán en información derivada del modelo CAPRA. Se emplearán modelos reconocidos internacionalmente, como RESIS II, CAPRA y ASLAC, para la evaluación del riesgo sísmico. Se considera que la información sectorial disponible relacionada con infraestructura, agricultura y hoteles es adecuada. Por último, los modelos de vulnerabilidad existentes, principalmente CAPRA y GAR, proporcionan una base sólida para iniciar las evaluaciones.

4.1 Clima

El Instituto Meteorológico Nacional (IMN) de Costa Rica es la entidad encargada de la observación, estudio y registro del clima en el país. Fundado en 1952, su misión es proporcionar información meteorológica, climatológica y sísmica de calidad para contribuir al bienestar y seguridad de la población.

El IMN opera una red de estaciones meteorológicas automáticas distribuidas estratégicamente en todo el territorio nacional. Estas estaciones permiten la recolección en tiempo real de datos meteorológicos esenciales, como temperatura, humedad relativa, presión atmosférica, velocidad y dirección del viento, y precipitación. La información recopilada es fundamental para la emisión de pronósticos y alertas, así como para el estudio de fenómenos climáticos.

En el enlace <https://www.imn.ac.cr/web/imn/estaciones-automaticas> está disponible la información de estas estaciones. Este sitio Web permite el monitoreo en tiempo real de las estaciones, proporcionando datos actualizados constantemente y permitiendo un seguimiento preciso de las condiciones meteorológicas actuales.

La red de estaciones abarca diversas regiones, incluyendo el Pacífico Norte, Pacífico Central, Pacífico Sur, Zona Norte, Valle Central, Caribe Norte y Caribe Sur.

Estaciones automáticas

Advertencia: Las estaciones meteorológicas aquí mostradas se actualizan permanentemente; en algún momento, podrían presentar problemas de atraso o dejar de transmitir por diferentes circunstancias técnicas. Se recuerda al usuario la responsabilidad de corroborar que la estación esté brindando los datos actualizados. El IMN no asume responsabilidad alguna, por el uso de esta información para ningún tipo de aplicación dado que es preliminar y no ha recibido el control de calidad correspondiente. Su publicación es con el único objetivo de informar a la ciudadanía en relación a los datos meteorológicos en tiempo real.

Pacífico Norte Pacífico Central Pacífico Sur Zona Norte Valle Central Caribe Norte Caribe Sur WebCam

Pacífico Norte

Nombre	Ubicación (Cantón - Provincia)	Estado	Acceso
Aeropuerto Daniel Oduber 07	Liberia - Guanacaste	Activa	Entrar
Aeropuerto Daniel Oduber 07 (DA)	Liberia - Guanacaste	Activa	Entrar
Aeropuerto Daniel Oduber 25	Liberia - Guanacaste	Activa	Entrar
Aranjuez, Pitahaya	Puntarenas - Puntarenas	Activa	Entrar

Figura 7. Visor de estaciones meteorológicas de Costa Rica.

En el sitio Web <https://www.imn.ac.cr/web/imn/mapa#c29tZUhhc2hUaGF0RG9lc250RXhpc3Q> del IMN también está disponible un mapa interactivo. Este mapa permite consultar información promedio mensual de variables como precipitación, temperatura y viento.

Mapa

Capas del mapa

- Q
- ☒ Estado actual del tiempo
 - ☒ Temperatura (°C)
 - ☐ Lluvia (mm)
 - ☐ Viento (km/h)
 - ☐ Estaciones aeronáuticas
 - ☐ Imágenes satelitales
 - ☐ Pronóstico del tiempo por regiones
 - ☐ Pronóstico del tiempo por ciudades
 - ☐ Pronóstico marino
 - ☐ Pronóstico del Índice Ultravioleta
 - ☐ Datos climáticos
 - Pronóstico del tiempo por regiones (imprimible)

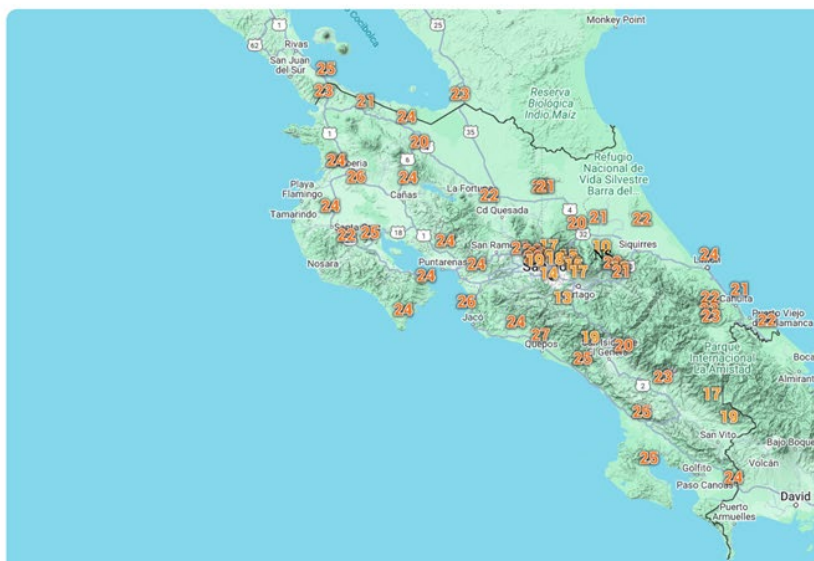


Figura 8. Mapa interactivo de estaciones meteorológicas.

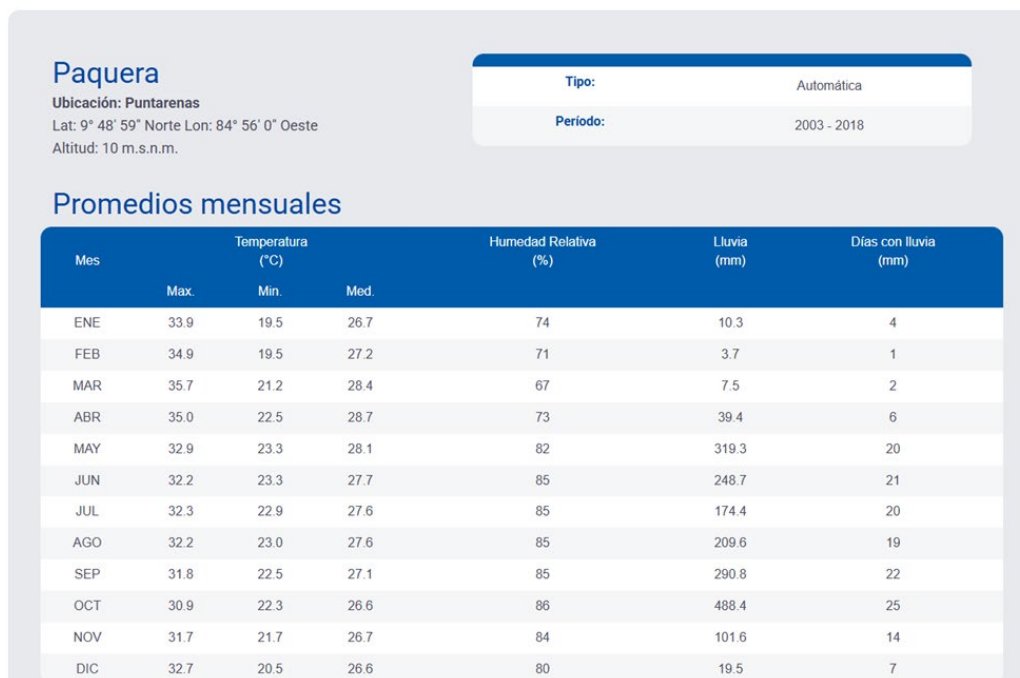


Figura 9. Visor de promedios mensuales.

Adicionalmente, además de los datos obtenidos de las estaciones terrestres, se dispone de información proveniente de bases satelitales como CHIRPS y Copernicus.

4.1.1 CHIRPS

La base de datos CHIRPS (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data) es reconocida globalmente como una fuente confiable para el análisis de precipitaciones. Esta base de datos cubre una amplia extensión geográfica, desde los 50°S hasta los 50°N en todas las longitudes, y proporciona registros diarios de precipitación desde 1981 hasta la fecha. Combina datos satelitales con observaciones de estaciones meteorológicas terrestres, generando series temporales de alta precisión que facilitan el análisis de tendencias climáticas y el monitoreo de sequías estacionales.

Una característica destacada de CHIRPS es su capacidad para integrar datos satelitales con mediciones in situ, mejorando significativamente la precisión y confiabilidad de los registros. Esto la convierte en una herramienta invaluable para investigadores y profesionales dedicados al análisis climático, la gestión de recursos hídricos y la evaluación de riesgos asociados a eventos hidroclimáticos.

Los datos globales diarios, disponibles en su versión 2.0, pueden descargarse gratuitamente desde su sitio web oficial: <https://www.chc.ucsb.edu/data/chirps>. Los archivos están disponibles en formato ráster (.tiff) con una resolución espacial de 0.05° x 0.05°, lo que permite realizar análisis detallados a nivel nacional y regional, e identificar patrones espaciales y temporales de precipitación con alta precisión.

4.1.2 ERA5 – Copernicus Climate Change Service

El Servicio de Cambio Climático Copernicus, proporciona un conjunto integral de datos meteorológicos globales destinados a la modelación y monitoreo del clima. Estos datos se generan mediante procesos de reanálisis llevados a cabo por el Centro Europeo para las Previsiones Meteorológicas a Medio Plazo (ECMWF), reconocido por su liderazgo en predicciones meteorológicas a nivel mundial.

La base de datos de Copernicus ofrece información histórica y casi en tiempo real, con registros que datan desde 1940 y actualizaciones con un retraso mínimo de 5 días respecto a la fecha actual. Además, los datos están disponibles con frecuencia horaria, lo que facilita análisis detallados de las variaciones climáticas tanto a corto como a largo plazo.

Los datos de Copernicus pueden descargarse gratuitamente desde su portal oficial: <https://cds.climate.copernicus.eu>. Los formatos disponibles incluyen archivos ráster tipo grid y NetCDF, ampliamente utilizados en aplicaciones de modelización ambiental y análisis espacial. Estos formatos facilitan la integración de los datos en sistemas de información geográfica (SIG) y herramientas de análisis climático.

En particular, la base de datos ERA5, la quinta generación de reanálisis climático desarrollado por el ECMWF, se destaca por su alta resolución espacial y temporal. Entre las múltiples variables meteorológicas clave que ofrece se encuentran: precipitación, temperatura (media, mínima y máxima), radiación solar, humedad específica, presión superficial del aire y velocidad del viento.

Una ventaja significativa de ERA5 es que estas variables están ajustadas a los cambios de elevación, mejorando la precisión en regiones con topografía compleja.

4.2 Cambio climático

El Instituto Meteorológico Nacional (IMN) de Costa Rica, a través de su portal <http://cglobal.imn.ac.cr/>, proporciona información detallada sobre los escenarios de cambio climático en el país. Estos escenarios son fundamentales para anticipar y planificar las posibles variaciones en las condiciones climáticas futuras, permitiendo una mejor preparación y adaptación a los desafíos que el cambio climático presenta.

La Cuarta Comunicación Nacional de Costa Rica ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), publicada en 2021, está disponible en el portal del Instituto Meteorológico Nacional (IMN). Este informe presenta la evaluación de las emisiones de gases de efecto invernadero del país, describe las políticas y medidas de mitigación y adaptación implementadas, y aborda las necesidades de apoyo financiero y tecnológico para cumplir con los compromisos climáticos internacionales.

En cuanto a las proyecciones climáticas, el documento analiza dos trayectorias de concentración de gases de efecto invernadero (RCP): RCP2.6 y RCP8.5. Estas proyecciones se presentan para tres periodos climáticos: 2010-2039, 2040-2069 y 2070-2099, proporcionando una visión detallada de las posibles variaciones climáticas en el país bajo diferentes escenarios de emisión.

Adicionalmente a esta información, se cuenta con los modelos del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP), que en su sexta fase (CMIP6) contribuye al Sexto Informe de Evaluación (AR6)

del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) que se pueden descargar de la base Copernicus <https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/projections-cmip6?tab=download>

Estos modelos climáticos son herramientas fundamentales para comprender y proyectar los efectos del cambio climático. La plataforma proporciona datos diarios y mensuales de proyecciones climáticas globales, abarcando una amplia gama de experimentos, modelos y períodos temporales.

Las variables clave que se pueden obtener con estos modelos son precipitación, temperatura, velocidad y dirección del viento, evapotranspiración, humedad y nivel del mar.

4.3 Amenaza por inundación a nivel nacional

El Sistema Nacional de Información Territorial (SNIT) cuenta con el Visor de Capas de Agua y Saneamiento para Costa Rica, donde es posible acceder a información del Sistema Nacional de Información para la Gestión Integrada del Recurso Hídrico (SINIGIRH) sobre el sector hídrico, incluyendo las cuencas hidrográficas. Esta información es útil tanto para la modelación de la amenaza por inundación a nivel nacional como para el análisis específico de la cuenca del río Virilla.

En el enlace <https://www.arcgis.com/apps/dashboards/71b40ee586b6439ba343ad1af1ebee1c> pueden visualizarse los datos.



Figura 10. Cuencas hidrográficas.

Adicionalmente, en el portal del SNIT está disponible la capa vectorial de los cauces, que incluye las líneas de drenaje principales y secundarias del país.

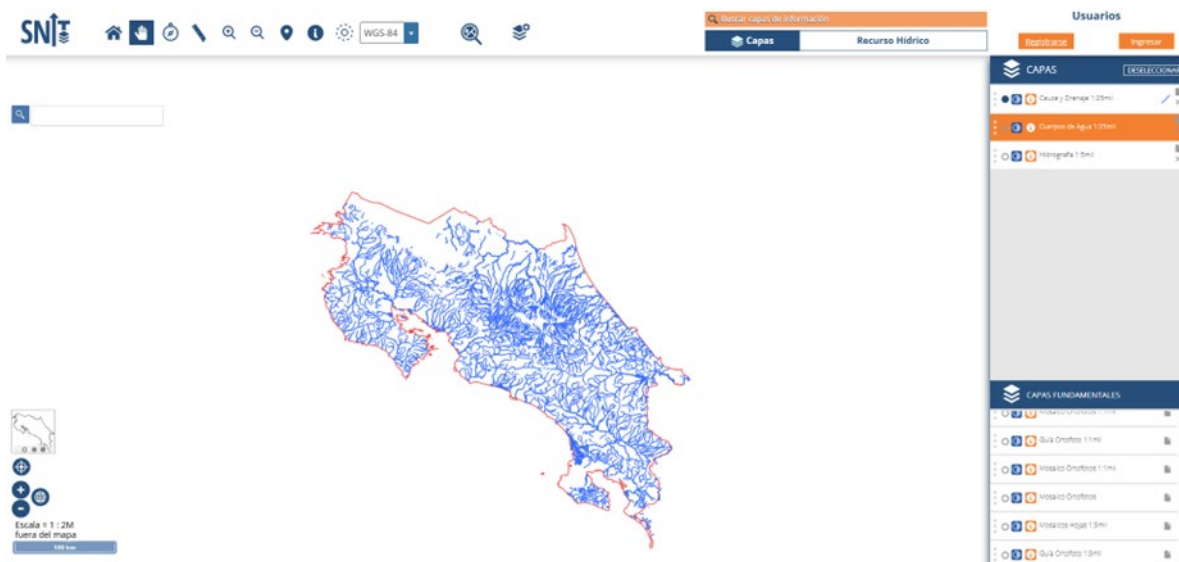


Figura 11. Líneas de cauces y drenajes.

A partir de esta información, en combinación con los datos climáticos, el modelo de elevación digital, la capa de suelos y la capa de cobertura vegetal (que se presentan más adelante), se realiza la respectiva modelación.

4.4 Amenaza por inundación del río Virilla (cantón Heredia)

Como parte del Proyecto Estratégico se realizará la evaluación de riesgo por inundación en el cantón Heredia, para esto se han identificado las siguientes fuentes de información que permitirán complementar el modelo de amenaza.

4.4.1 Cauce

El cauce principal del río Virilla hace parte fundamental tanto para el modelo hidrológico como para el modelo hidrodinámico. La capa vectorial del cauce principal se obtuvo del Sistema Nacional de Información Territorial (SNIT). La Figura 12 muestra el cuerpo de agua.



Figura 12. Cuerpo de agua - San Jose, *shape* Río Virilla

4.4.2 Topografía

Dentro del modelo de inundación local, es importante contar con la topografía de la cuenca aferente al río o cauce en estudio, tanto para la parte hidrológica como para el modelo hidrodinámico.

Aunque existen diferentes bases de datos con información topográfica, la selección final dependerá del nivel de detalle para el respectivo análisis, teniendo en cuenta el costo/beneficio entre el nivel de detalle y el tiempo de cómputo, asociado a la capacidad computacional.

La Tabla 6 presenta un resumen de las fuentes de información generalmente usadas para la descarga de modelos digitales de elevación.

Tabla 6. Fuentes de descarga de modelos digitales de elevación.

Fuente	Nombre	Resolución	Enlace de descarga
GTOPO 30	Regional Low Resolution Elevation Data	30 arc-seg (1 km)	https://earthexplorer.usgs.gov/
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission	3 arc-seg (90 m)	https://search.earthdata.nasa.gov/

ASTER	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection	1 arc-seg (30 m)	https://search.earthdata.nasa.gov/
ALOS-PALSAR	Advanced Land Observing Satellite-1 - Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar	12.5 m	https://search.asf.alaska.edu/#/

La Figura 13 muestra como referencia la topografía del área por donde transcurre el río Virilla.

Mapa topográfico Río Virilla

> Costa Rica > Provincia San José > San José > Río Virilla

Mapa interactivo

Haga clic en el mapa para ver la altitud.

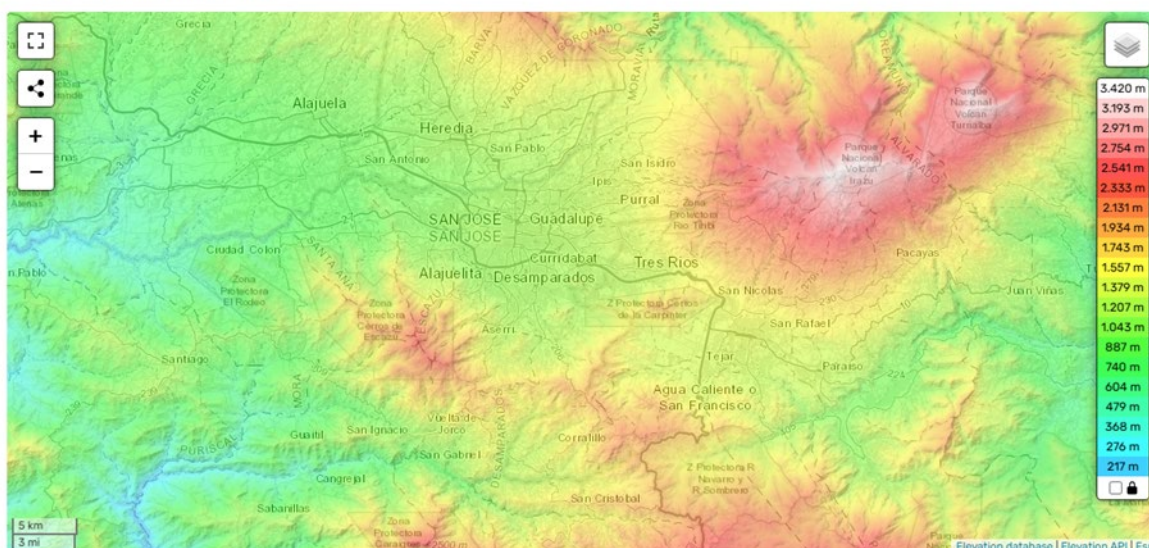


Figura 13. Mapa topográfico Río Virilla. Fuente: <https://es-co.topographic-map.com/map-c74ccz/R%C3%ADo-Virilla/?center=9.89919%2C-84.03168&zoom=11&base=4>

Junto con la información de clima en cuanto a precipitaciones, la información expuesta en este ítem, así como la información de coberturas y suelos expuesta más adelante en este documento, se completa la información o *datasets* requeridos para el modelo de inundación en el río Virilla.

4.5 Amenaza sísmica

En el marco del proyecto, no es necesario realizar una modelación adicional de la amenaza sísmica; en su lugar, se trabajará con la información disponible proveniente de esfuerzos previos. A continuación, se presentan los estudios más relevantes y completos que han sido identificados.

4.5.1 Modelo RESIS II

El proyecto de Evaluación de la Amenaza Sísmica en Centroamérica RESIS II (NORSAR et. al. 2008) fue una iniciativa regional que buscó evaluar la amenaza sísmica en los países centroamericanos, incluyendo Costa Rica. Este proyecto se llevó a cabo con la colaboración de instituciones locales como la Red Sismológica Nacional y la Escuela Centroamericana de Geología de la Universidad de Costa Rica y el Instituto Costarricense de Electricidad y expertos internacionales en sismología y geotecnia de la Universidad Politécnica de Madrid, Centroamérica y Europa.

En el caso de Costa Rica, el estudio se enfocó en la evaluación probabilística de la amenaza sísmica, considerando la sismicidad histórica y reciente del país. Para ello, se recopiló y analizó un catálogo sísmico que abarcó eventos significativos, permitiendo la identificación y caracterización de las principales fuentes sismogénicas. Además, se utilizaron modelos de atenuación adecuados para la región, con el fin de estimar la aceleración sísmica esperada en diferentes localidades.

Los resultados de RESIS II proporcionaron mapas de amenaza sísmica, como el que se muestra en la Figura 14, que han sido fundamentales para el desarrollo de códigos de construcción sismo-resistentes y para la planificación territorial en Costa Rica. Estos mapas indican las zonas con diferentes niveles de amenaza sísmica, lo que permite a las autoridades y a la población en general tomar medidas preventivas y de mitigación adecuadas.

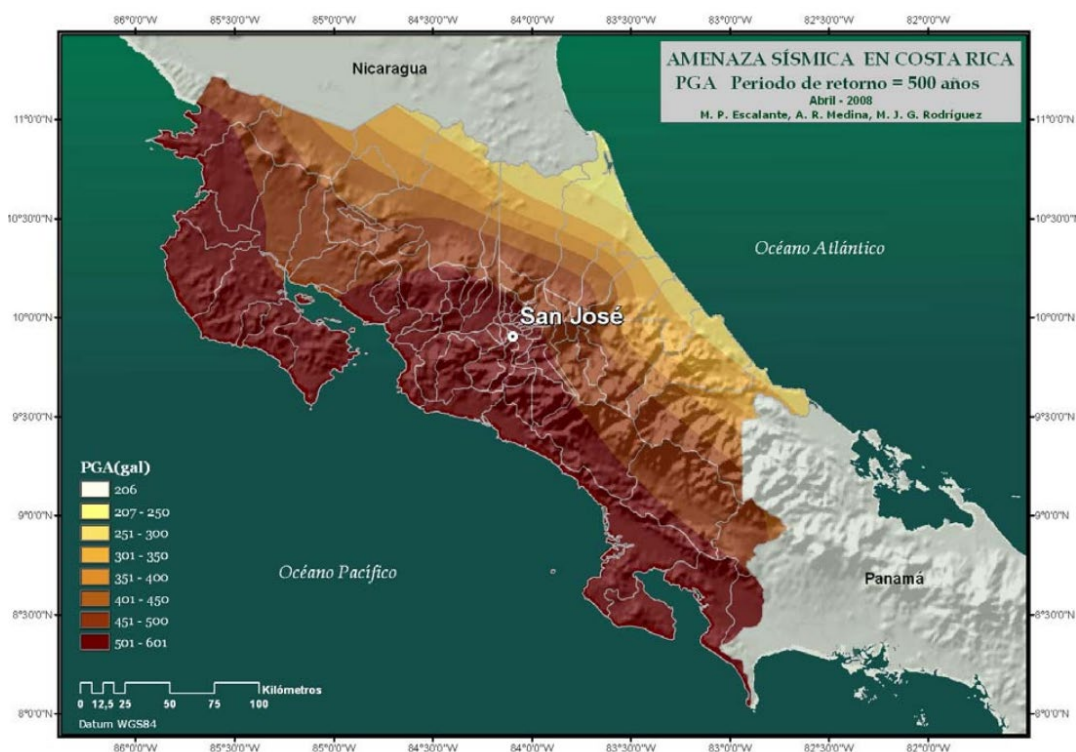


Figura 14. Mapa de amenaza sísmica en términos de PGA para un período de retorno de 500 años. (Tomado de NORSAR et. al. 2008)

Es importante destacar que, desde la realización de RESIS II, se han llevado a cabo esfuerzos adicionales para actualizar y mejorar la evaluación de la amenaza sísmica en Costa Rica.

4.5.2 CAPRA

La iniciativa CAPRA (Comprehensive Approach to Probabilistic Risk Assessment) fue una plataforma para la evaluación probabilística de riesgos desarrollada en Centroamérica con el apoyo del Banco Mundial, el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) y otras instituciones internacionales. Su objetivo fue proporcionar herramientas para la evaluación y gestión integral de riesgos asociados a amenazas naturales, utilizando un enfoque probabilístico para estimar posibles pérdidas y facilitar la toma de decisiones orientadas a la reducción del riesgo de desastres.

En el marco de esta iniciativa, se llevó a cabo la evaluación del riesgo sísmico de la ciudad de San José (ERN-AL, 2009). La amenaza sísmica se calculó empleando los avances presentados en el proyecto regional RESIS II (NORSAR et al., 2008), el cual, en ese momento, representaba el estudio más avanzado sobre la evaluación de amenaza sísmica en América Central.

La Figura 15 presenta el mapa de amenaza sísmica para el territorio costarricense en términos de aceleración máxima del terreno para un período de retorno de 500 años.

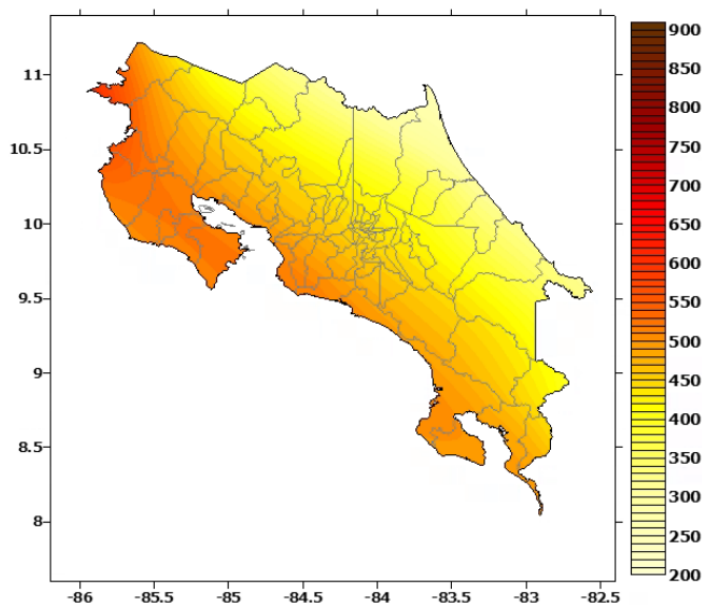


Figura 15. Mapa de amenaza sísmica en términos de PGA para un período de retorno de 500 años (Tomado de ERN 2009)

4.5.3 Modelo ASLAC

El modelo ASLAC (Salgado-Gálvez et al. 2018) es el primer modelo probabilista de amenaza sísmica armonizado (PSHA, por sus siglas en inglés) que cubre de manera completa, continua, homogénea y exhaustiva la región de América Latina y el Caribe (LAC), con un nivel de resolución suficientemente alto a escala nacional.

Para su desarrollo, se ensambló un catálogo sísmico actualizado utilizando fuentes de información locales, regionales e internacionales, complementado con una revisión de eventos históricos específicos para mejorar la precisión en la magnitud y localización. Se seleccionaron modelos de atenuación de movimiento fuerte ajustados a las características sismo-tectónicas de la región y se emplearon modelos híbridos para asignar una combinación de modelos de atenuación a las diferentes fuentes sismogénicas.

La evaluación de la amenaza sísmica se realizó con el software CRISIS2015 (Ordaz et al. 2015), una herramienta reconocida a nivel mundial que permite obtener resultados en términos de curvas de excedencia de intensidades, espectros de amenaza uniforme y mapas para diferentes períodos estructurales y de retorno.

El modelo ASLAC es considerado el modelo de amenaza sísmica más avanzado y actualizado para América Latina y el Caribe, y actualmente se utiliza en modelos de riesgo por catástrofes para la evaluación de pérdidas en el sector asegurador, como en el caso del CCRIF, por ejemplo. El modelo ASLAC ha sido certificado por el regulador de seguros de Colombia (Superintendencia Financiera de Colombia) para ser utilizado por las compañías de seguros colombianas en la evaluación de solvencia y fijación de precios.

La Figura 16 presenta los mapas de amenaza sísmica obtenidos del modelo ASLAC. A la izquierda se muestra el mapa de 500 años de período de retorno y a la derecha se muestra el mapa de 2500 años de período de retorno en términos de PGA.

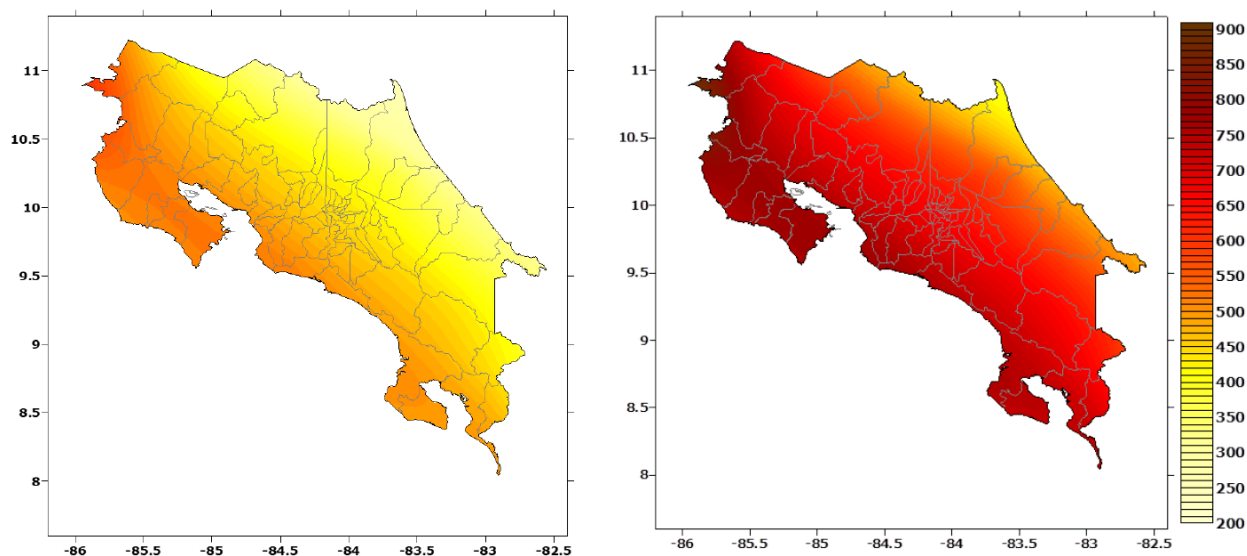


Figura 16. Mapas de amenaza sísmica para Costa Rica. Izquierda: PGA y 500 años de período de retorno. Derecha: PGA y 2500 años de período de retorno. Calculado por INGENIAR usando CAPRA-ROBOT. Unidades en cm/s^2 .

4.5.4 Modelo de amenaza sísmica de Costa Rica

Este modelo, desarrollado por Hidalgo Leiva et al. (2022), contiene la evaluación probabilista de amenaza sísmica más reciente para Costa Rica. Fue calculado con la base de datos de terremotos más completa y actualizada, tomada de Arroyo-Solórzano y Linkimer (2021), la cual proviene tanto del Laboratorio de

Ingeniería Sísmica como de la Red Sismológica Nacional de la Universidad de Costa Rica, además de agencias sismológicas de Panamá y Nicaragua.

En este estudio, se actualizaron los parámetros de sismicidad para los dominios tectónicos de la placa superior, la zona de subducción interplaca y la zona *intraslab*. También se caracterizaron las zonas de la placa superior según los porcentajes de tipos de falla y se emplearon modelos de movimiento del suelo ponderados para cada uno de los dominios tectónicos.

De acuerdo con el estudio, los mapas resultantes de aceleración máxima del suelo (PGA, por sus siglas en inglés) (Figura 17), para períodos de retorno de 475 años y 2475 años, así como las aceleraciones espectrales, muestran tendencias geográficas que permiten dividir el país en cuatro niveles de amenaza sísmica:

1. Extremadamente alta: para las penínsulas de Nicoya, Osa y Burica, situadas directamente sobre la zona de subducción interplaca.
2. Muy alta: para la mayor parte de la provincia de Guanacaste.
3. Alta: para la mayor parte del país (~41%), incluyendo el centro de Costa Rica y San José.
4. Moderada: para la Cordillera de Talamanca y el norte de Costa Rica.

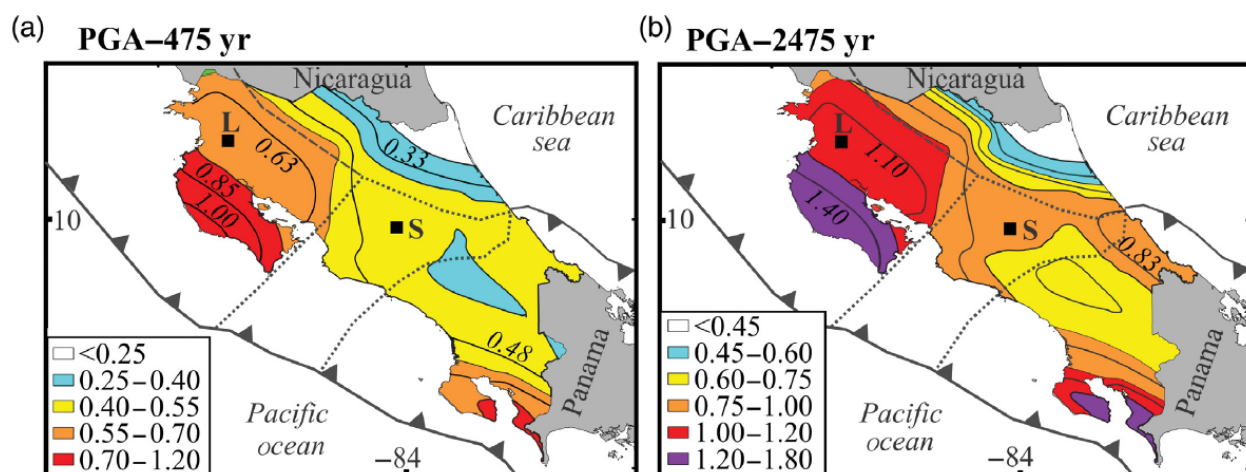


Figura 17. Resultados del modelo de amenaza sísmica de Costa para medidas de intensidad seleccionadas de la aceleración máxima del suelo (PGA) para un período de retorno de (a) 475 y (b) 2475 años. (Tomado de Hidalgo Leiva et al. 2022)

4.5.5 Microzonificación sísmica para el área metropolitana de San José

Dado que los efectos de sitio son de suma importancia para el riesgo sísmico en zonas urbanas, se construirá un modelo de efectos de sitio para Heredia como un valor agregado a este proyecto. Este modelo se basará en el estudio de microzonificación para el área metropolitana de San José (Schmidt et al., 2005) y en el trabajo de modelación de riesgo sísmico de Arroyo-Solórzano (2023).

El estudio de Schmidt et al. (2005) se basó en la respuesta dinámica de los suelos blandos de la ciudad (de hasta 50 m de profundidad), caracterizados a partir de mediciones geofísicas y de la mejor información disponible en ese momento.

Por su parte, Arroyo-Solórzano (2023) desarrolló una microzonificación de la Gran Área Metropolitana de Costa Rica (GAM), utilizando información geológica, geotécnica y geofísica, así como mediciones de velocidades de onda de cortante (V_{s30}) en 42 sitios. En el caso del cantón de San José y sus alrededores, la microzonificación se realizó con un nivel de resolución más alto.

La Figura 18 muestra una indicación de los tipos de suelo existentes en el área metropolitana de San José, incluyendo Heredia.

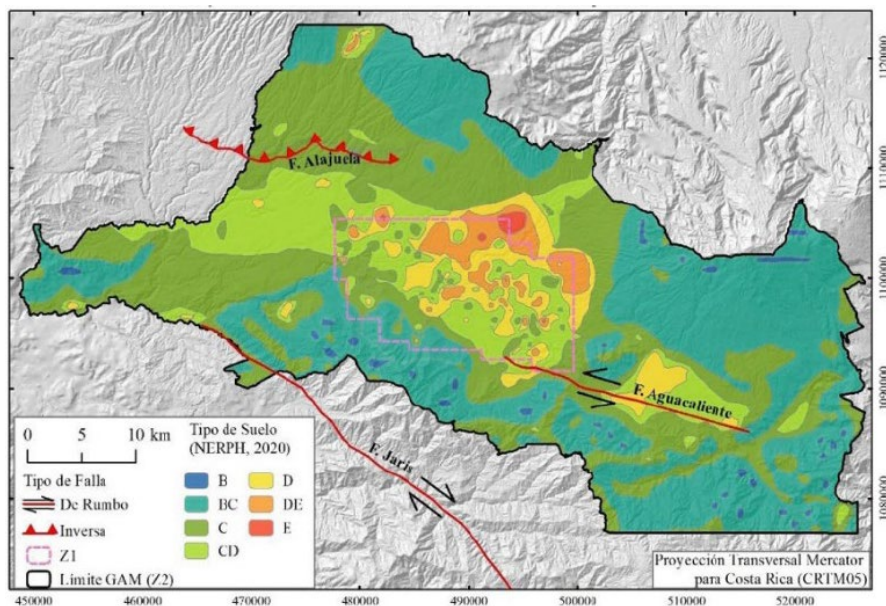


Figura 18. Tipos de suelo en el área metropolitana de San José para considerar los efectos de sitio por terremotos. (Tomado de Arroyo-Solórzano, 2023)

4.6 Amenaza por deslizamientos

Aunque queda claro en los Términos de Referencia que no se debe realizar una nueva modelación para la amenaza por deslizamientos, esperamos complementar y mejorar nuestro modelo de deslizamientos actualmente disponible para Costa Rica. Nuestro modelo se basa en investigaciones y experiencia local (utiliza parcialmente el método de Mora y Vahrson de 1994 para evaluar la susceptibilidad a deslizamientos, desarrollado por Sergio Mora de la Universidad de Costa Rica). A partir de esta base, proponemos ampliar el nivel de detalle en el modelo mediante la incorporación de nuevas y actualizadas capas de factores de propensión, con el fin de mejorar la cuantificación de la susceptibilidad a deslizamientos.

A continuación, se describen los estudios y fuentes de información más relevantes y completos que han sido identificados.

4.6.1 Catálogo de deslizamientos

El catálogo de deslizamientos es un inventario de los eventos históricos que contiene información del tipo de actividad de los procesos de remoción en masa, su distribución espacial, el tipo de proceso, así como

sus características. Se identificaron en el portal del Sistema Nacional de Información Territorial (SNIT) capas de amenaza natural del dominio de la Comisión Nacional de Prevención de Riesgo y Atención de Emergencias que corresponden a dos capas vectoriales con información georreferenciada de deslizamientos ocurridos en el territorio costarricense.

En el enlace https://www.snitcr.go.cr/ico_servicios_ogc_info?k=bm9kbzo6NDU=&nombre=CNE están disponibles las capas para descarga y pueden ser visualizadas en el Visor de Mapas del SNIT en el enlace <https://www.snitcr.go.cr/Visor/visor>.

La capa *Deslizamientos*, presentada en la Figura 19, contiene 1,126 registros que corresponden a información de eventos hidrometeorológicos y sísmológicos que han generado la inestabilidad de laderas y afectaciones por deslizamientos. Además de la localización de los eventos la capa contiene información del área y el perímetro afectados para la mayoría de los registros, sin embargo, no se diferencia por tipo de proceso de remoción en masa ni características específicas del evento. En los metadatos de la capa se menciona que se utiliza para la actualización de las zonas de amenazas del país, para ubicar las áreas más propensas a deslizamientos y facilitar la toma de decisión para el Sistema Nacional de Gestión de Riesgo.

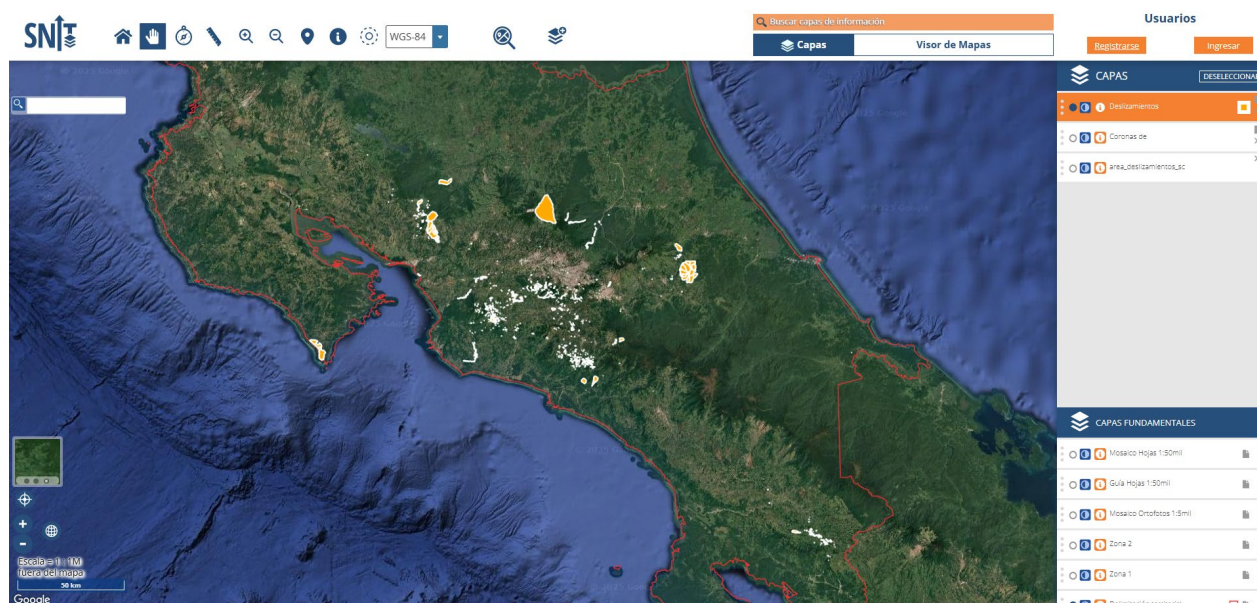


Figura 19. Visualización de la capa Deslizamientos en el visor de mapas del SNIT

La capa *Coronas de deslizamientos*, presentada en la Figura 20, contiene información de eventos hidrometeorológicos y sísmológicos que puedan generar deslizamientos y afectaciones, y contempla las zonas con potencial a deslizamientos

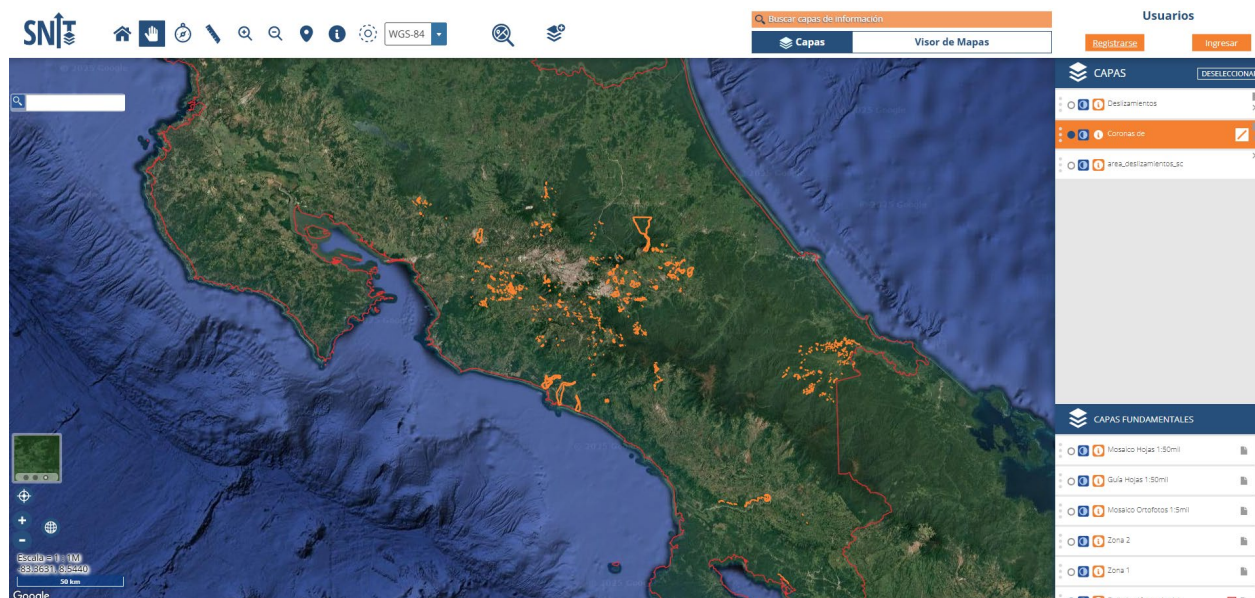


Figura 20. Visualización de la capa Corona de deslizamientos en el visor de mapas del SNIT

4.6.2 Proyecto de la Escuela Centroamericana de Geología de la UCR

Se identificó en el Sistema de Información y Gestión de Proyectos, Programas y Actividades de la Universidad de Costa Rica el proyecto "Amenaza de deslizamientos en Costa Rica", liderado por la Escuela Centroamericana de Geología de la UCR y desarrollado entre 1996 y 2003. Sus objetivos principales fueron generar mapas de amenaza de deslizamientos para gran parte del territorio costarricense, crear una base de datos regional sobre deslizamientos y monitorear eventos críticos para las comunidades cercanas. Sin embargo, aunque se identificó el proyecto, no se ha logrado acceder a los productos o informes generados.

4.6.3 Proyecto RECLAIMM/CEPREDENAC-Noruega

El Proyecto RECLAIMM (Fortalecimiento de Capacidades para el Manejo de Riesgos por Deslaves en Países Centroamericanos) fue una iniciativa conjunta entre el Centro de Coordinación para la Prevención de los Desastres en América Central (CEPREDENAC) y el gobierno de Noruega (Instituto Noruego de Geotecnia). Su objetivo principal fue fortalecer las capacidades de los países centroamericanos en la gestión y mitigación de riesgos por deslizamientos de tierra.

En Costa Rica, el proyecto se enfocó en la creación de mapas de susceptibilidad a deslizamientos, considerando factores como geología, pendiente, uso del suelo y patrones de precipitación. La metodología empleada se basó en la recopilación y análisis de datos geoespaciales, lo que permitió una representación precisa de las zonas vulnerables.

Aunque el proyecto RECLAIMM se implementó en varios países de la región, la información específica sobre su ejecución en Costa Rica es limitada y no se ha logrado acceder a productos como el mapa de susceptibilidad generado. No obstante, este tipo de iniciativas ha contribuido significativamente al fortalecimiento de las capacidades nacionales en la gestión del riesgo por deslizamientos.

4.6.4 Mapas de amenaza del CNE

El CNE ha elaborado mapas preliminares de amenaza para todo el país. Los mapas, disponibles a nivel de cantón, representan una aproximación al inventario de fuentes de amenazas y peligros naturales del territorio. Estos mapas identifican áreas de deslizamientos que podrán ser incluidas en el catálogo de deslizamientos que será usado en la modelación de la amenaza.

Los mapas se encuentran disponibles en https://www.cne.go.cr/reduccion_riesgo/mapas_amenzas/.

4.6.5 Mapa de susceptibilidad a deslizamientos a partir de imágenes LiDAR

El estudio de Ruiz Cubillo y Soto (2014) utiliza imágenes LiDAR para elaborar mapas de susceptibilidad a deslizamientos en algunos cantones de los Cerros de Escazú, Costa Rica, considerando factores como la geología, pendiente y sismicidad. Se generaron mapas geomorfológicos, geológicos y de deslizamientos, identificando áreas de alta susceptibilidad y proponiendo estrategias de monitoreo. Esta información detallada sobre la susceptibilidad de las laderas, considerando disparadores sísmicos y meteorológicos, podría ser muy útil para fortalecer un modelo de amenaza por deslizamientos en Costa Rica, facilitando la planificación y gestión del riesgo en zonas vulnerables.

4.6.6 Modelo CDRI-GIRI

En el marco del Global Infrastructure Resilience Index (GIRI) se desarrolló un modelo de amenaza por deslizamientos completamente probabilístico, que permite generar escenarios estocásticos de eventos de deslizamientos inducidos por terremotos o precipitaciones (considerando el cambio climático) de diferentes intensidades para cada país y territorio del mundo. En el caso de Costa Rica, este modelo ha sido implementado, y la Figura 21 muestra el mapa de susceptibilidad resultante.

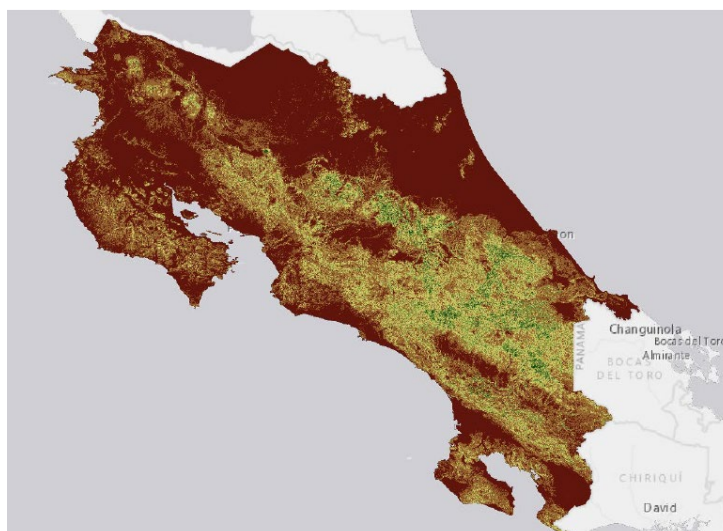


Figura 21. Mapa de susceptibilidad a los deslizamientos de Costa Rica del proyecto CDRI-GIRI liderado por INGENIAR

4.7 Amenaza por volcán

Costa Rica cuenta con más de diez estructuras volcánicas importantes, de las cuales cinco presentan una actividad significativa. La amenaza volcánica podría afectar algunos segmentos de la ruta RN2 y otros elementos viales clave en el país, lo que representa un riesgo para la infraestructura y la movilidad. A continuación, se presentan los estudios identificados que servirán de base para la modelación de los productos volcánicos en las áreas de interés, considerando parámetros como la dinámica eruptiva, la caída de ceniza y los flujos piroclásticos.

4.7.1 CAPRA

Como parte del proyecto CAPRA se calculó la amenaza volcánica para 9 volcanes activos en Costa Rica. En ese momento se hizo un modelo determinista (ERN-AL, 2009) ya que no se contaba, en la mayoría de los casos, con información suficiente para una adecuada modelación probabilista. Cada volcán fue caracterizado a partir de su historia eruptiva y características vulcanológicas generales, con el fin de modelar el escenario de amenaza más representativo. Se modelaron la caída de ceniza, los lahares y los flujos piroclásticos.

Estos modelos han sido actualizados por INGENIAR, y en la Figura 22 se presentan mapas de flujos piroclásticos en el volcán Poás y caída de ceniza en el volcán Irazú calculados para grandes períodos de retorno usando CAPRA-ROBOT.

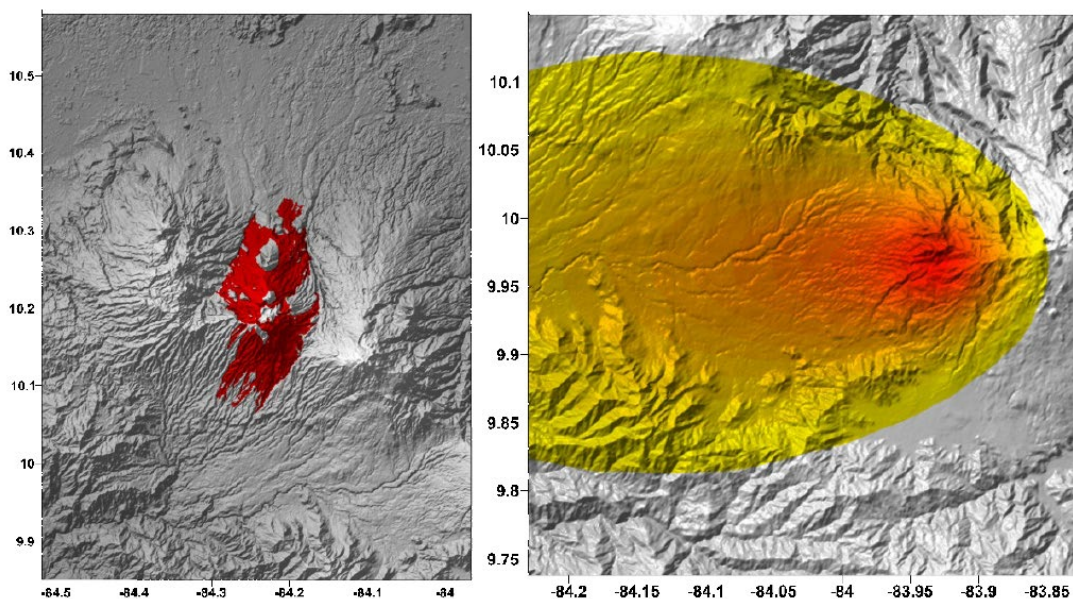


Figura 22. A la izquierda, mapa de flujos piroclásticos en el volcán Poás y a la derecha caída de ceniza en el volcán Irazú

4.7.2 Estudios de peligro volcánico nacionales

Se han identificado estudios sobre el peligro volcánico realizados para los volcanes Poás, Turrialba, Irazú, Arenal y Rincón de la Vieja. Estos proyectos, liderados por la Unidad de Investigación y Análisis del Riesgo

de la Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias (CNE), buscan actualizar e integrar los estudios existentes mediante la incorporación de nueva información disponible. A continuación, se describen algunos de los estudios consultados.

4.7.2.1 Actualización del peligro volcánico del Poás

La importancia turística del volcán Poás, al ser el tercer parque nacional más visitado, y su reciente actividad eruptiva en 2017 y 2019 motivaron a las autoridades a redireccionar la gestión del riesgo en el manejo turístico y a actualizar e integrar los estudios existentes sobre el peligro volcánico. En este estudio (Alvarado et al., 2020a) se incorporaron un mayor número de dataciones por radiocarbono (de hasta 50,000 años) para cumplir con estándares internacionales y se reevaluaron y actualizaron los peligros volcánicos con mayor resolución.

4.7.2.2 Peligro volcánico del Turrialba

El estudio (Alvarado et al., 2020b) señala que, al ser el volcán Turrialba uno de los cinco volcanes históricamente activos de Costa Rica y debido a su período de actividad registrado entre 2010 y 2020 (fecha del estudio), se consideró importante realizar una evaluación enfocada en la gestión del riesgo. Este estudio integra investigaciones previas, incorpora información actualizada como nuevas dataciones por radiocarbono y cuenta con la validación de las instituciones nacionales expertas y responsables en la materia.

4.7.2.3 Peligros volcánicos del Irazú

El volcán Irazú, el más alto de Costa Rica, fue responsable de la primera emergencia nacional por causa volcánica en 1963-1965, que dejó más de 20 muertos, 300 heridos y significativas pérdidas económicas. Este estudio (Alvarado et al., 2021) actualiza evaluaciones previas sobre el peligro volcánico, destacando la gestión del riesgo ante una posible reactivación y otorgando especial atención a los lahares. También incorpora información nueva y relevante para fortalecer el modelo de amenaza, con la validación de las instituciones nacionales competentes.

4.7.2.4 Actualización del análisis del peligro volcánico del Arenal

Este estudio (Alvarado et al., 2023) fue el resultado de un esfuerzo conjunto de varias instituciones del país, entre ellas el ICE, el CNE y la UNA. Su objetivo fue proporcionar un enfoque integral de gestión del riesgo para apoyar a los tomadores de decisiones y a las autoridades en la planificación del desarrollo de infraestructura y asentamientos, considerando el riesgo asociado al volcán Arenal, el cual mantuvo una intensa actividad entre 1962 y 2010.

4.7.2.5 Análisis del peligro volcánico del Rincón de la Vieja

El estudio de Alvarado et al. (2022) integra investigaciones previas e incorpora un enfoque de gestión del riesgo para apoyar la implementación de un plan de ordenamiento territorial. Este plan busca evaluar y mitigar el peligro volcánico, fomentando un desarrollo turístico responsable en esta región de alto potencial.

4.8 Amenaza por sequía

En Costa Rica, aproximadamente el 90% de los casos de sequía meteorológica están asociados al fenómeno de El Niño. Las zonas que presentan mayor riesgo se encuentran en el Pacífico Norte y la Zona Norte hacia el lado de Nicaragua, extendiéndose por la Vertiente Pacífica y hacia el sur de la Región Central. En la Figura 23 se presenta un mapa con las áreas más afectadas por este fenómeno. (Soto, 2013)

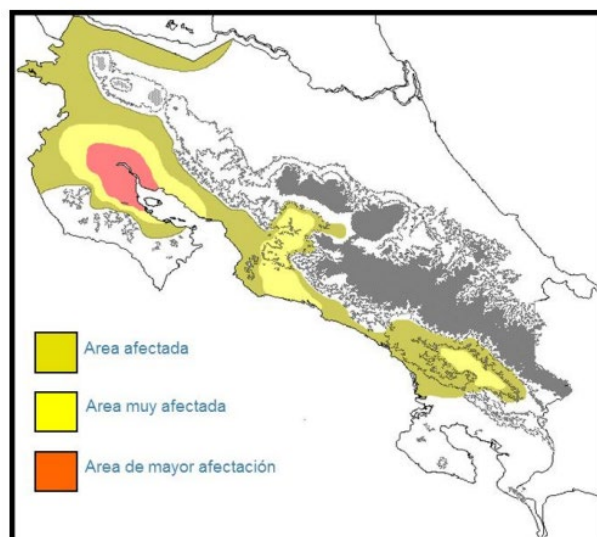


Figura 23. Zonas de afectación del fenómeno de El Niño (Soto, 2013).

A partir de los mapas de las zonas de afectación y la vulnerabilidad de los cantones ante eventos extremos secos (Figura 24), se presenta la distribución espacial del riesgo ante eventos extremos secos (Figura 25). Esta distribución identifica tres zonas de riesgo principales que se mencionan a continuación (Soto, 2013):

- Zona1: Cantones de La Cruz Pacífico Norte, Upala, Los Chiles y Guatuso de la Zona Norte, Parrita y Turrubares hacia el Pacífico Central y Buenos Aires y Pérez Zeledón en la Zona Sur. La frecuencia de aparición de sequías se ha vuelto más frecuente en la década de los 2000.
- Zona 2: Cantones de la Región Central del país: Mora, San José, Desamparados, Alajuelita, Cartago y el cantón central de Puntarenas. Las sequías que se presentan son de fuerte magnitud con una gran expansión del fenómeno y frecuentes.
- Zona 3: Comprende todos los cantones de la provincia de Guanacaste con excepción de La Cruz. Las sequías que se presentan en esta zona son las de mayor magnitud y frecuencia.

CANTONES DE MAYOR RIESGO	COMPONENTES E INDICADORES DE VULNERABILIDAD															
	INFRAESTRUCTURA				SERVICIOS					CONDICION HUMANA						
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	IDG	
Zona 1 de alto riesgo: Noreste, Sur y Pacífico Central.																
La Cruz																
Parrita																
Buenos Aires																
Upala																
Los Chiles																
Guatuzo																
Turrubares																
Pérez Zeledón																
Zona 2 de alto riesgo: Central																
Mora																
San José																
Desamparados																
Alajuelita																
Cartago																
Puntarenas																
Zona 3 de alto riesgo: Pacífico Norte																
Nicoya																
Cañas																
Liberia																
Carrillo																
Santa Cruz																
Hojancha																
Nandayure																
Bagaces																
Tilarán																
Abangares																
1	Viviendas en mal estado								8	Viviendas sin electricidad						
2	Viviendas sin acueducto								9	Consumo de agua del sector agropecuario						
3	Viviendas con tanque séptico								10	Población dependiente						
4	Infraestructura vial								11	Población discapacitada						
5	Area sin zonas protegidas								12	Indice de desarrollo humano						
6	Disponibilidad de agua por persona								13	Necesidades básicas insatisfechas						
7	Habitantes por EBAIS								14	Defunciones por IRAS						

Figura 24. Indicadores de vulnerabilidad en los cantones de mayor riesgo (Soto, 2013).



Figura 25. Distribución espacial del riesgo ante eventos extremos secos (Soto, 2013).

El informe “Patrones de sequía en Centroamérica”, permite observar el patrón de distribución espacial y temporal de la sequía en Centroamérica (Figura 26). Para Costa Rica se reporta una concentración de los eventos de sequía en la Zona Norte del país, los puntos de mayor severidad se encuentran en la franja cerca al Pacífico de Nicaragua.

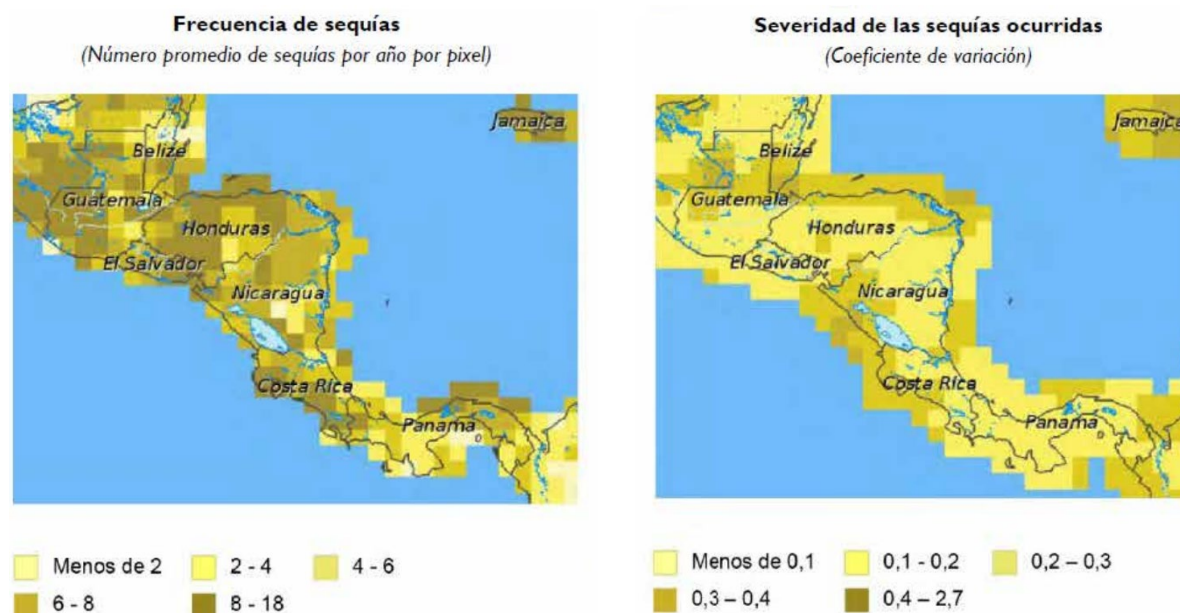


Figura 26. Frecuencia y severidad de sequías (Bonilla Vargas, 2014)

La NASA ha aportado evidencias de que el fenómeno de El Niño ha tenido un impacto significativo en la vegetación costarricense debido a la sequía regional masiva del año 2018, debido a que se registró un alto nivel de estrés vegetal, medido por la Estación Espacial Internacional, la cual mide la temperatura de las plantas a medida que se calientan al quedarse sin agua. En la Figura 27, se presenta la provincia de Guanacaste que tuvo las condiciones de sequía más intensas de ese año (JPL NASA, 2019).

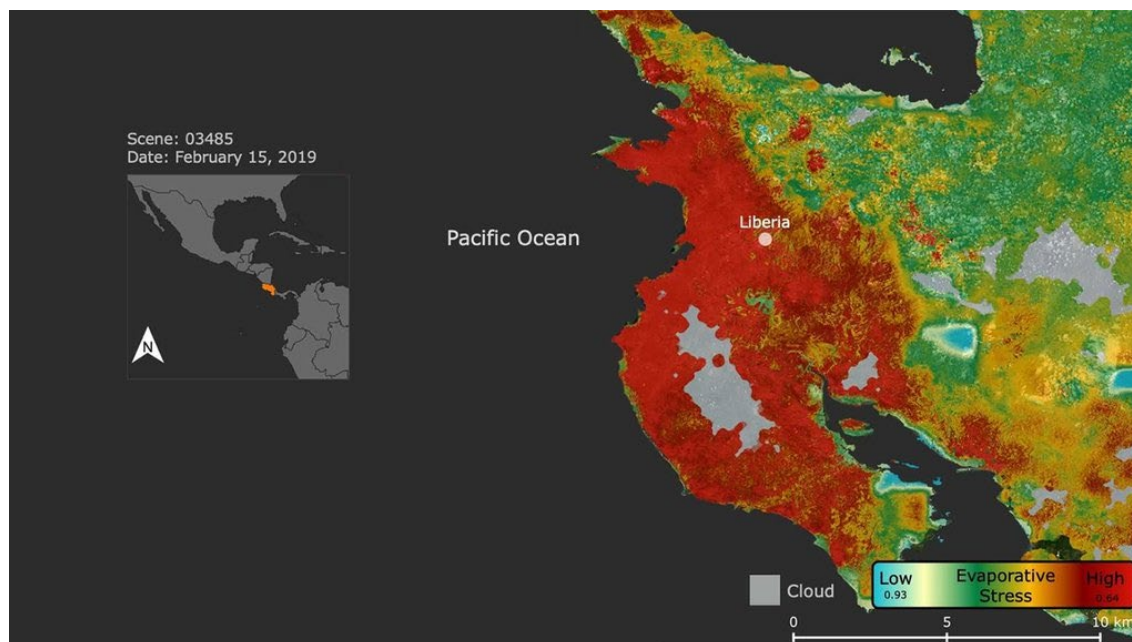


Figura 27. Estrés vegetal en la región de Guanacaste (JPL NASA, 2019).

Para monitorear este tipo de amenazas, Costa Rica cuenta con un “Observatorio de Sequía”, el cual consta de una red de 37 estaciones meteorológicas que monitorean variables climáticas cada 30 minutos (lluvia, temperatura, humedad relativa, radiación solar y viento), así como el monitoreo de la humedad y temperatura del suelo (OACG, 2025). En la Figura 28 se presenta el visor de estas estaciones.

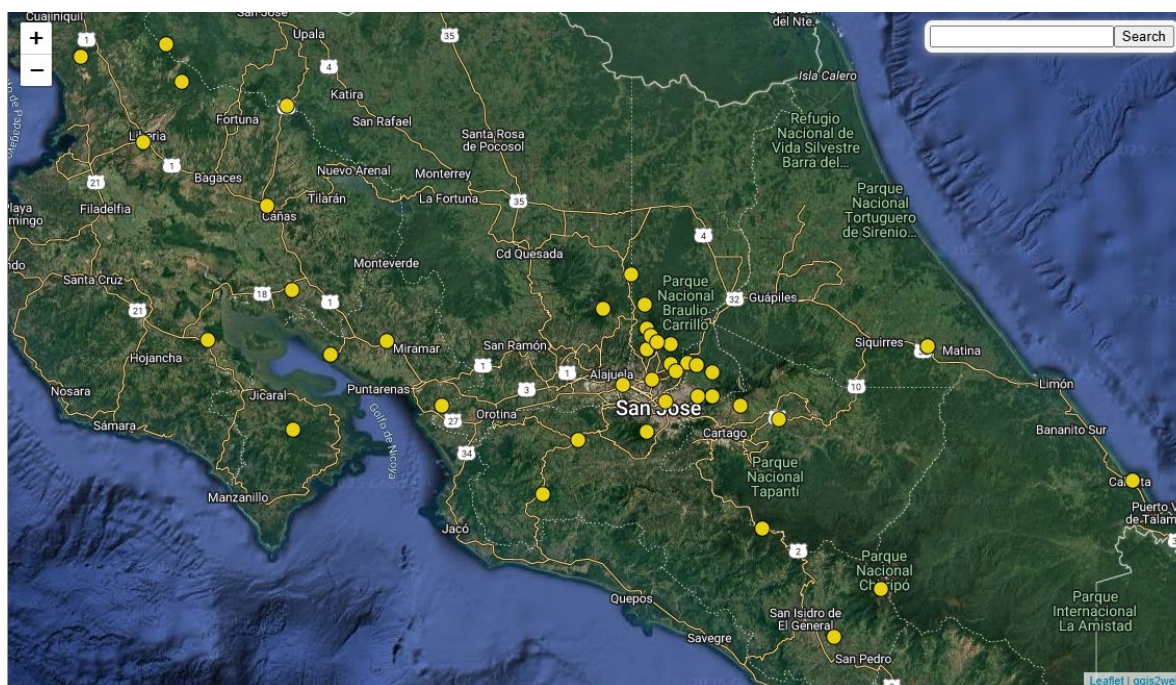


Figura 28. Visor de las estaciones del Observatorio de Sequía (OACG, 2025).

4.8.1 Indicadores de sequía

Quesada-Hernández et al. (2020), realizaron un estudio comparativo entre varios índices de sequía para los impactos socio productivos en el pacífico Norte de Costa Rica, utilizaron índices de sequía tales como el índice Normalizado de Sequía (SPI), Índice Modificado de Anomalía de Lluvia (mRAI), Índice de Severidad de Sequía de Palmer (PDSI), Índice Hidrológico de Palmer (PHDI), Índice Z de Sequía de Palmer (índice Z) y el índice de Reconocimiento de Sequías (RDI). Clasificando los valores que se obtienen en los índices a partir de la Tabla 7:

Tabla 7. Clasificación para evaluar los diferentes índices de sequía (Quezada-Hernández, 2020).

Categoría	SPI, RDI, mRAI	PDSI, PHDI e índice Z
Extremadamente húmedo	≥ 2	≥ 3
Severamente húmedo	1.5 a 1.99	2 a 3
Moderadamente húmedo	1 a 1.49	1 a 1.99
Levemente húmedo	0.5 a 0.99	0.5 a -0.99
Normal	0.49 a -0.49	0.49 a -0.49
Levemente seco	-0.5 a -0.99	-0.5 a -0.99
Moderadamente seco	-1 a -1.49	-1 a -1.99
Severamente seco	-1.5 a -1.99	-2 a -3
Extremadamente seco	≤ -2	≤ -3

Cada uno de estos índices permite analizar diferentes tipos de sequía: mRAI, RDI y PDSI se enfocan en sequías meteorológicas, los índices Z y SPI 6 para sequías agrícolas y los índices SPI 12 y PHDI para sequías hidrológicas. Entre todos ellos, el SPI es el índice más comúnmente empleado en diferentes estudios realizados para Costa Rica (Bonilla Vargas, 2014; GWPCAM, 2014; Rodríguez, 2018).

4.8.2 Mapa de suelos

4.8.2.1 SNIT

El Sistema Nacional de Información Territorial (SNIT), cuenta con datos cartográficos relacionados con el suelo para algunos cantones o provincias de Costa Rica. Se encuentran mapas de acidez intercambiable, uso de tierras, carbono del suelo, familia de suelos, fertilidad del suelo, fertilidad química, materia orgánica, pH, potencial de hidrógeno, salinidad de suelos, saturación de acidez, subgrupos de suelos, taxonomía de suelos, zonificación de café, zonificación de pastos. Sin embargo, la información encontrada en este portal no cuenta con la información para todo el país (SNIT, 2025).

4.8.2.2 Mapa de suelos FAO

Las organizaciones de la FAO y UNESCO elaboraron un Mapa Mundial de Suelos con escala 1:50000000, el cual permite tener una visión global de los recursos del suelo. En la Figura 30, se presenta el mapa de suelos de Centro América (FAO & UNESCO, 2025).

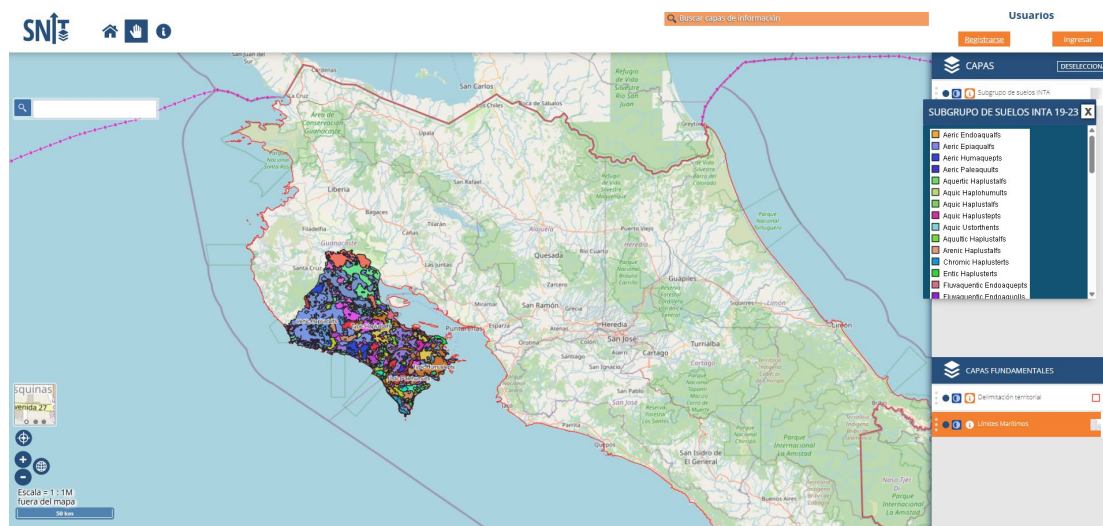


Figura 29. Visor de mapas SNIT

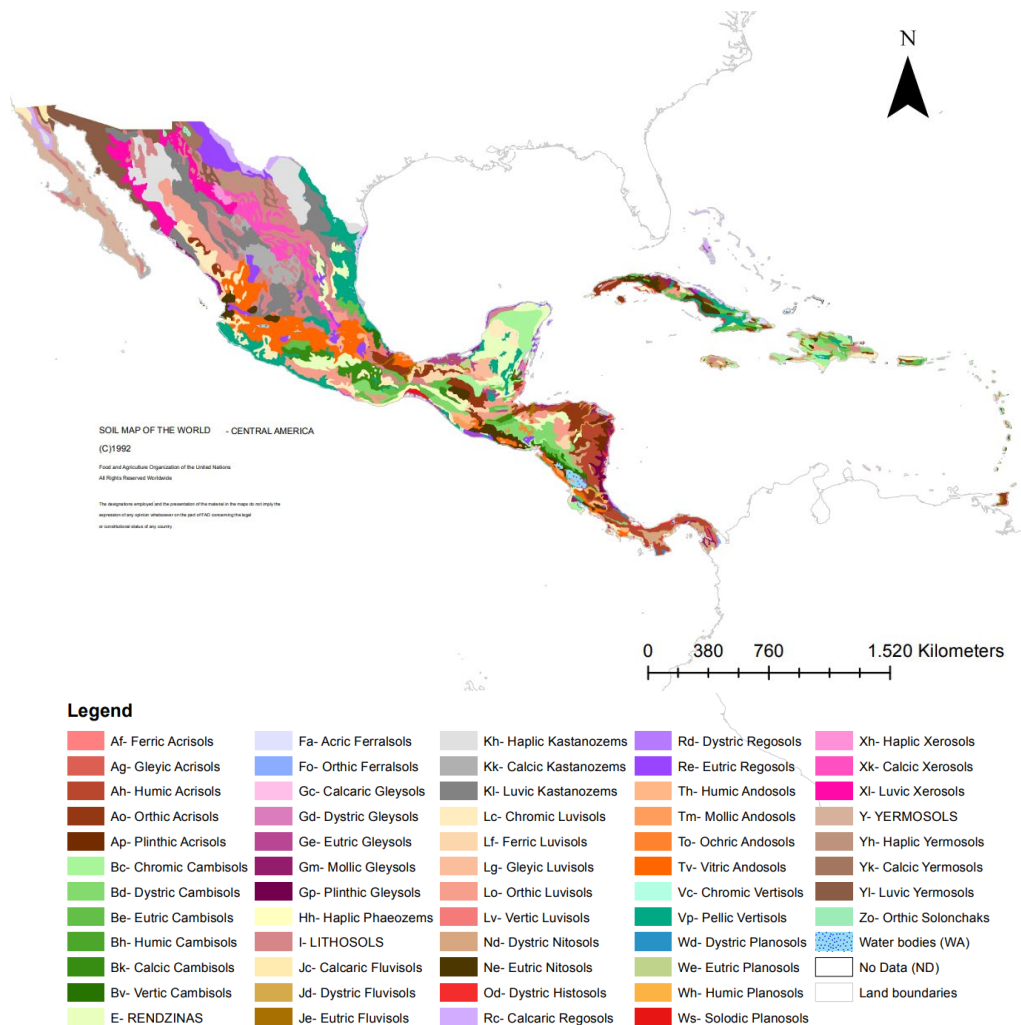


Figura 30. Mapa de suelos Centroamérica FAO

4.8.2.3 Mapa de textura de suelos FAO

La versión 2.0 de la Base de Datos Mundial Armonizada de Suelos (HWSD v2.0) es una herramienta global que proporciona información detallada sobre las propiedades morfológicas, químicas y físicas del suelo con una resolución de 1 km. Desarrollada en 2008 por el Instituto Internacional de Análisis de Sistemas Aplicados (IIASA) y la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), la HWSD ha sido actualizada en 2013 y 2023. Se puede acceder a esta a través del enlace <https://www.fao.org/soils-portal/data-hub/soil-maps-and-databases/harmonized-world-soil-database-v20/en/>

Esta base de datos integra datos de diversas bases nacionales, ofreciendo atributos detallados para siete capas de suelo y adoptando un sistema de referencia uniforme que combina los estándares FAO1990 con la World Reference Base for Soil Resources (WRB).

La HWSD v2.0 incluye un archivo de imagen rasterizada GIS vinculado a una base de datos de atributos del suelo, facilitando el acceso a información sobre la composición de suelos en cerca de 30,000 unidades de mapeo. Cada unidad posee sus respectivas características, incluyendo su textura, como se muestra en la Figura 31.

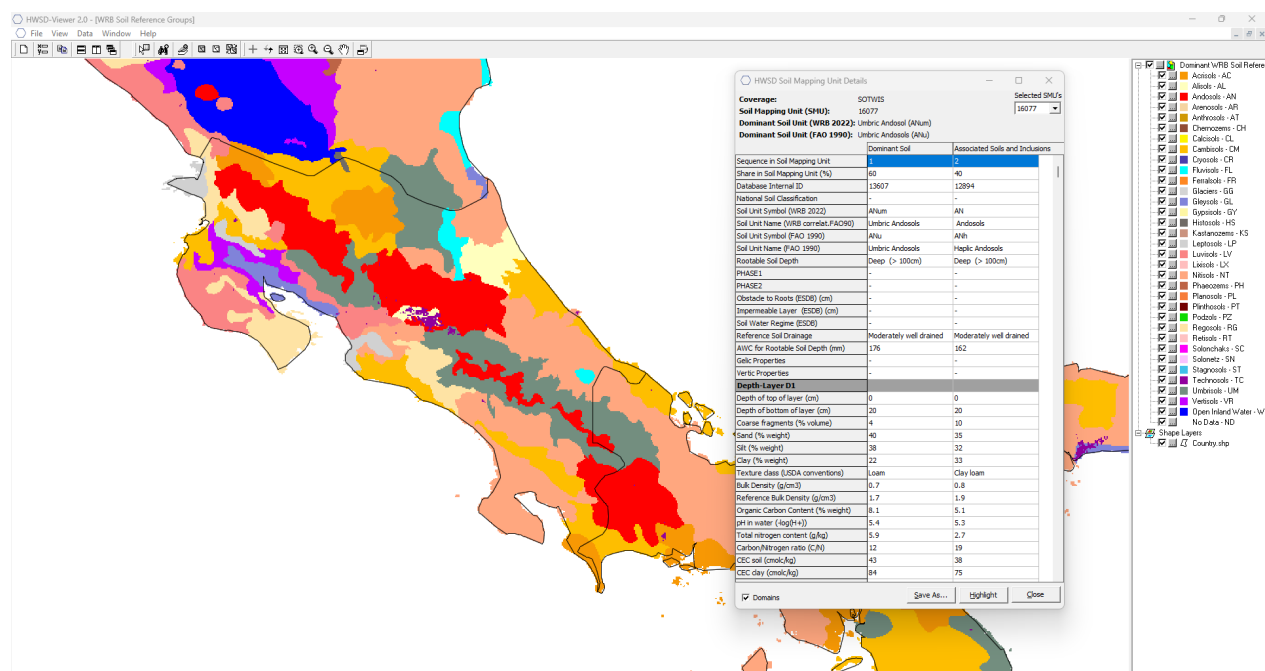


Figura 31. Base de Datos Mundial Armonizada de Suelos de la FAO.

4.8.3 Planes de contingencia

Costa Rica ha desarrollado el Plan General de la Emergencia por Sequía, el cual considera las acciones para atender las situaciones socioeconómicas de los productores afectados, promueve la recuperación de los sectores, la atención de la insuficiencia del agua para el consumo, aborda las implicaciones de la salud y el

ambiente, y busca prevenir el posible aumento en la incidencia de incendios forestales (Comisión Nacional de Emergencia, 2014).

Por otro lado, el país cuenta con un Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático, el cual establece los antecedentes, alcance, metas, marco y modelo de gestión, y financiamiento para la implementación de acciones dirigidas a enfrentar los efectos del cambio climático (Dirección de Cambio Climático & Ministerio de Ambiente y Energía, 2022).

4.8.4 Medidas NAMA

Costa Rica ha establecido una serie de acciones NAMA (Acciones Nacionalmente Apropriadas de Mitigación) a los sectores de ganadería y agricultura (especialmente para el sector de producción de café y caña de azúcar), en las que se busca la reducción de la emisión de GEI y la adaptación de los sistemas de producción para aumentar la resiliencia ante el cambio climático

4.9 Amenaza por ciclones tropicales (marea de tormenta, lluvia e inundación)

Para la evaluación de la amenaza por ciclones tropicales, se seguirá un enfoque metodológico basado en la simulación de trayectorias de huracanes. Para desarrollar el modelo de amenaza se requieren diferentes datos que contengan información de trayectorias de ciclones, topografía y batimetría. Las fuentes de información identificadas se describen a continuación.

4.9.1 Trayectorias históricas

En este caso se cuenta con la base de datos IBTrACS: (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).

Las trayectorias 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.

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

4.9.2 Trayectorias simuladas para clima futuro

El catálogo de ciclones tropicales que se incluirá en la evaluación de amenaza para un clima futuro estará compuesto por registros históricos obtenidos de IBTrACS y complementado con una muestra representativa del conjunto de datos STORM, desarrollado por Bloemendaal et al. (2020). Este conjunto proporcionará 10,000 años de trayectorias simuladas, generadas mediante un modelo estocástico que replicará las principales características que determinan la trayectoria de los ciclones tropicales, como la presión central, la velocidad y dirección de avance, el lugar de génesis, la temperatura superficial del mar y la presión media a nivel del mar, entre otras. Se realizarán simulaciones estocásticas adicionales para

generar nuevas trayectorias que cubran todos los posibles eventos en un rango amplio de frecuencias e intensidades.

4.9.3 Batimetría

La versión 2024 de la batimetría GEBCO (General Bathymetric Chart of the Oceans) es un modelo global continuo batimétrico, con una resolución espacial de 15 arco segundos, lo que equivale aproximadamente a 500 metros en el ecuador, lo que lo convierte en uno de los modelos batimétricos con mayor resolución espacial.

Incluir esta capa en la actualización del modelo de amenaza por tsunami permitiría llegar a un mayor nivel de resolución en comparación a los modelos previamente desarrollados.

En el enlace: <https://download.gebco.net/> se encuentra disponible la capa ráster para visualización y descarga.

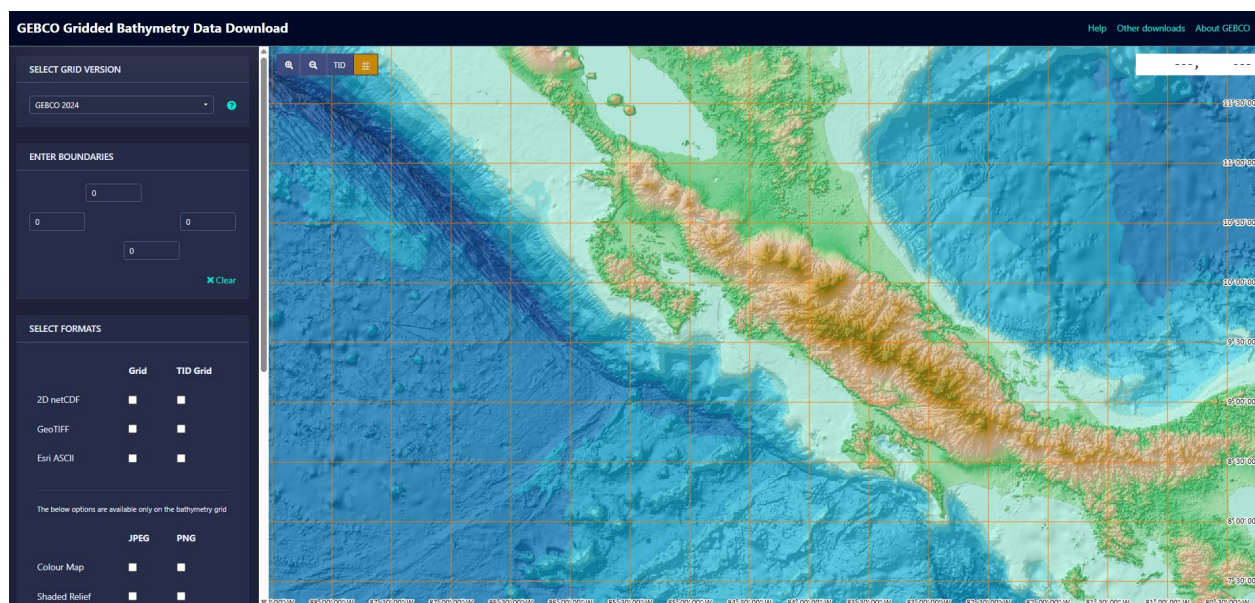


Figura 32. Visualización de la batimetría en el portal GEBCO

4.9.4 Topografía

Las diferentes bases de datos con información topográfica disponibles se mencionan en la sección 4.4.2 de este documento.

4.9.5 Precipitaciones

La información recolectada y expuesta en sección 0 de este documento, también será empleada en el modelo de inundación y lluvias por ciclones. Para más información ver dicha sección.

4.10 Amenaza por tsunami

Aunque no está contemplado en los Términos de Referencia, se entregará como valor agregado al proyecto una evaluación de riesgo por tsunami para el sector turístico en la costa pacífica del país. Las fuentes de información descritas a continuación han sido identificadas y servirán como base para actualizar el modelo de amenaza por tsunami en el marco de este proyecto.

4.10.1 CAPRA

En el marco de la iniciativa CAPRA, se llevó a cabo la evaluación del riesgo por tsunami a lo largo de la costa pacífica de Costa Rica (ERN-AL, 2009). La amenaza por tsunami se calculó en dos etapas:

1. Definición de las condiciones de generación, asociadas a las tasas de ocurrencia de terremotos de gran magnitud en la zona de subducción. Los sismos que generan un tsunami son aquellos que provocan un levantamiento significativo del lecho marino.
2. Análisis de la propagación y arribo del tsunami, fenómeno que está vinculado al desplazamiento de las ondas gravitacionales a través del océano y a la modificación de sus características de llegada en función de las condiciones batimétricas locales.

El modelo consideró un número suficiente de sismos, tanto históricos como simulados, obtenidos mediante el módulo CAPRA de amenaza sísmica, para representar de manera realista las condiciones de generación y propagación del tsunami. Para caracterizar cómo se amplificaría la amplitud de la ola en función de las condiciones específicas del impacto, se empleó un modelo digital combinado de batimetría y topografía con una resolución de 2 minutos, lo que corresponde a un tamaño de píxel de aproximadamente 3.6 kilómetros. La información fue obtenida de la base de datos ETOPO2v2 (2006), desarrollada por la NOAA. La Figura 33 muestra la altura de inundación en la costa pacífica para un período de retorno de 100 años.

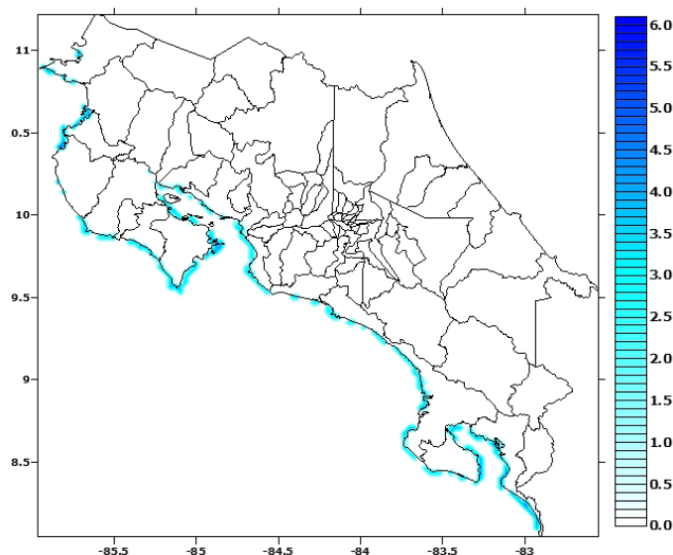


Figura 33. Mapa de distribución de la altura de inundación para un período de retorno de 100 años, en m. (Tomado de ERN 2009)

4.10.2 Modelo GAR-GIRI

El *Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction 2015* (GAR15), elaborado por la Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres (UNDRR), es un informe global que analiza el estado del riesgo de desastres a nivel mundial y evalúa los avances en la reducción de estos riesgos.

Como parte del Modelo Global de Riesgo desarrollado para el GAR15 (INGENIAR, 2014), el Instituto Geotécnico de Noruega (NGI) modeló la amenaza por tsunami basándose en un modelo global que considera la tasa de ocurrencia de terremotos en las principales fuentes sísmicas submarinas. Los detalles completos sobre el método de Evaluación Probabilística de Amenaza por Tsunami (PTHA) pueden encontrarse en Løvholt et al. (2014).

El NGI definió escenarios de amenaza para todas las regiones propensas a tsunamis en el mundo y construyó una colección de rejillas ráster con información georreferenciada, lo que permite una representación probabilística de los valores de intensidad de tsunami registrados. La amenaza se presenta en términos de un conjunto de escenarios, donde cada uno está caracterizado por una frecuencia anual de ocurrencia y las intensidades están definidas en función de dos parámetros: el valor esperado y la desviación estándar.

Este mismo modelo de amenaza fue utilizado en el desarrollo del *Global Infrastructure Resilience Index* (GIRI), en el cual participó esta firma consultora.

La Figura 34 presenta la altura de ola debido a la amenaza por tsunami para un período de retorno de 475 años.

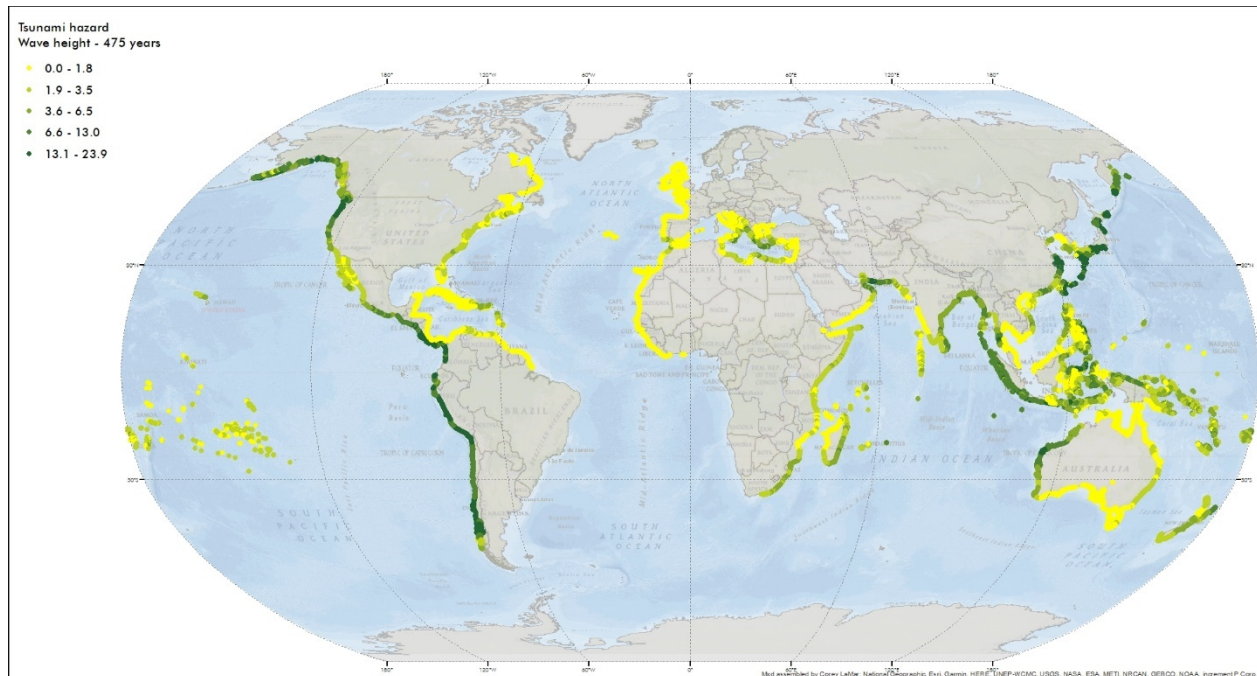


Figura 34. Mapa global de amenaza por tsunami que muestra la altura de inundación para un período de retorno de 475 años.

4.10.3 Batimetría

La versión 2024 de la batimetría GEBCO también será utilizada en este caso. Para más información, ver la sección 4.9.3 de este documento en donde se explica en detalle.

4.11 Amenaza por elevación del nivel del mar

Para analizar el nivel del mar, se tiene en cuenta el estudio "Estudios y proyecciones de aumento en el nivel del mar y erosión costera para las dos costas de Costa Rica" del 2024, el cual, se centra en analizar los impactos del incremento del nivel del mar y la erosión en las costas del país. Se desarrollaron escenarios para las regiones de Caldera en el Pacífico y el Caribe, con el objetivo de evaluar los riesgos y proponer estrategias de adaptación. Además, se elaboró una guía metodológica que ofrece un marco práctico para llevar a cabo estudios sobre el aumento del nivel del mar y la erosión costera en Costa Rica.

Adicional a esta información, como ya se presentó, se cuenta con los modelos del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP), que en su sexta fase (CMIP6) contribuye al Sexto Informe de Evaluación (AR6) del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) que se pueden descargar de la base Copernicus <https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/projections-cmip6?tab=download>. De los cuales se puede obtener la variable del nivel del mar para diferentes trayectorias RCP.

4.12 Elementos expuestos – edificaciones

La exposición de edificaciones se modela mediante capas de información georreferenciada, en donde cada elemento del portafolio tiene una representación geométrica en el espacio, y atributos que lo caracterizan. La información mínima necesaria para caracterizar las edificaciones expuestas es la siguiente:

- Ubicación geográfica
- Valor de reposición o compensación
- Código o clasificación de su vulnerabilidad

Cuando no se cuenta con estos atributos de forma específica, se hace necesario recopilar información complementaria que permita caracterizar cada elemento, con el fin de asociar un modelo de vulnerabilidad apropiado y estimar un valor de reposición adecuado. Por ejemplo, para edificaciones conviene conocer variables como:

- Número de pisos
- Sector de uso
- Sistema estructural
- Indicadores de personas en riesgo

A continuación, se describen las fuentes de información consultadas para caracterizar la exposición de las edificaciones en el cantón Heredia, de acuerdo con cada uno de los atributos mencionados.

4.12.1 Ubicación geográfica

Para determinar una representación geométrica de cada edificación en el espacio se cuenta con las siguientes fuentes de información.

4.12.1.1 Mapa catastral

En el sistema de información geográfica web – UBICA de la municipalidad de Heredia es posible consultar datos geográficos del cantón, entre los cuales encontramos el mapa catastral del cantón de Heredia, el cual contiene los linderos de las parcelas e información asociada como la ubicación, la identificación y el uso de estas. Es importante resaltar que el mapa catastral, aunque proporciona la ubicación y delimitación de las parcelas o lotes, no da cuenta del área construida de las edificaciones que contienen, como se observa en la Figura 35.

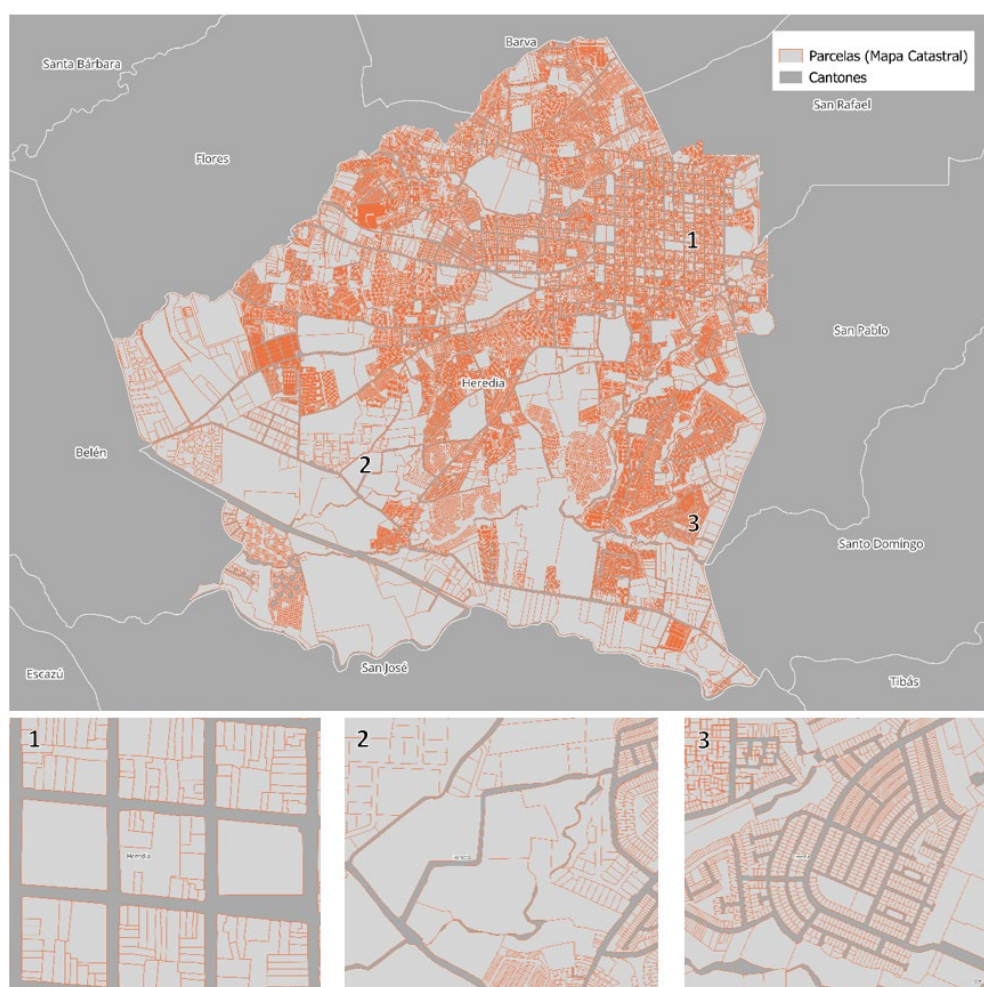


Figura 35. Mapa catastral del cantón Heredia

4.12.1.2 Cartografía - Edificaciones

Entre la cartografía del Instituto Geográfico Nacional consultada a través del Sistema Nacional de Información Territorial (SNIT) se encuentra la cobertura de edificaciones y construcciones a nivel país

obtenida a partir de ortoimágenes entre los años 2015 a 2018. Como se observa en la Figura 36, la cobertura representa bloques de edificaciones contiguas que pueden contener en un mismo bloque edificaciones con diferente propietario, número de pisos, sector de uso, sistema estructural, entre otros.

Es así como para obtener la ubicación y delimitación de las edificaciones, se hace necesario combinar la geometría de la cobertura de edificaciones, que nos da cuenta de las áreas construidas sin incluir el área del terreno, con la geometría del mapa catastral que nos proporciona variables para caracterizar las edificaciones de forma independiente.

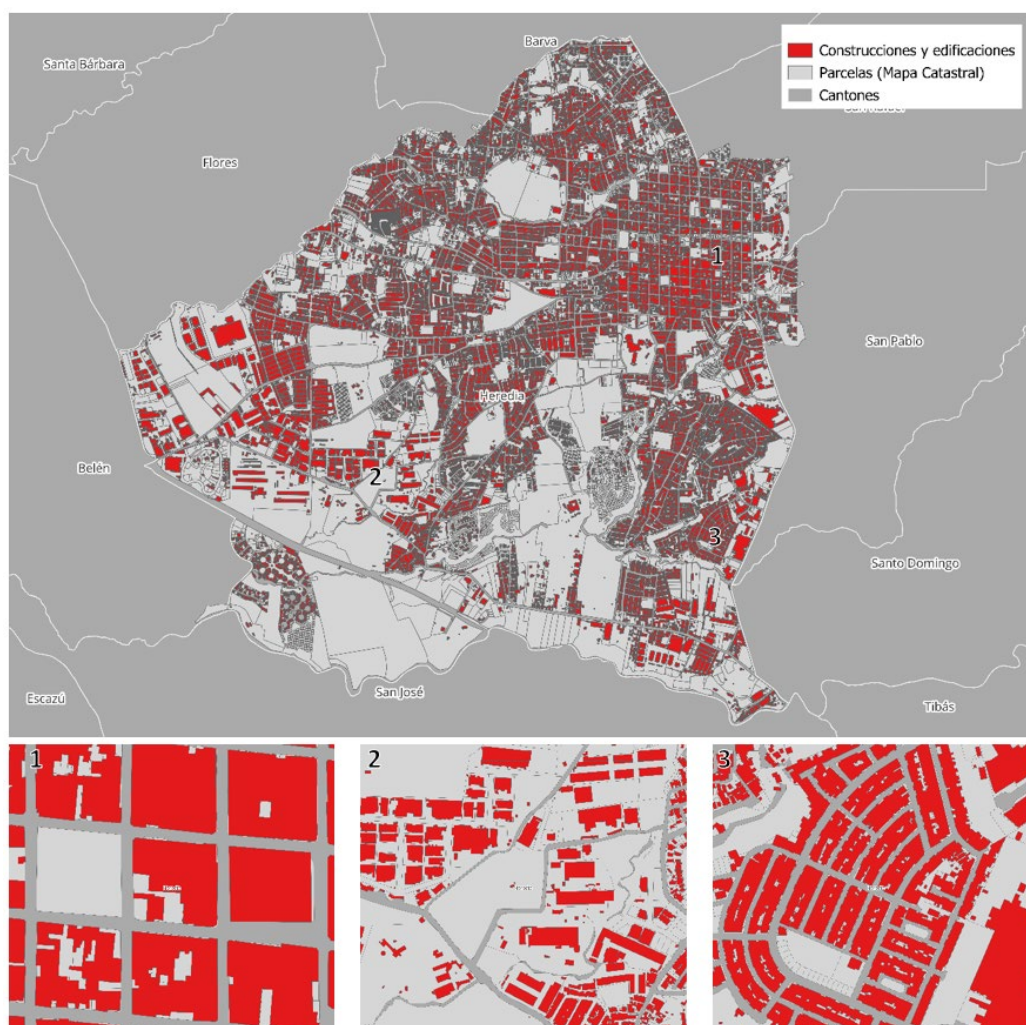


Figura 36. Cobertura de edificaciones

4.12.1.3 Marco Global de Evaluación del Riesgo (GRAF)

El Marco Global de Evaluación del Riesgo (GRAF) es una iniciativa de la Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo (UNDRR) cuya intención es fortalecer la capacidad de los países para acceder y aplicar datos relacionados con el riesgo para orientar la toma de decisiones.

En el marco de la aplicación del primer piloto GRAF en Costa Rica en coordinación con la Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y atención de Emergencias (CNE) se generaron modelos de exposición para

diferentes sectores entre los que se encuentra el sector viviendas como se muestra en la Figura 37. Esta base de datos de exposición de viviendas fue construida a partir de información suministrada por el Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC) y nos servirá como guía y fuente de información para caracterizar las edificaciones del cantón Heredia.

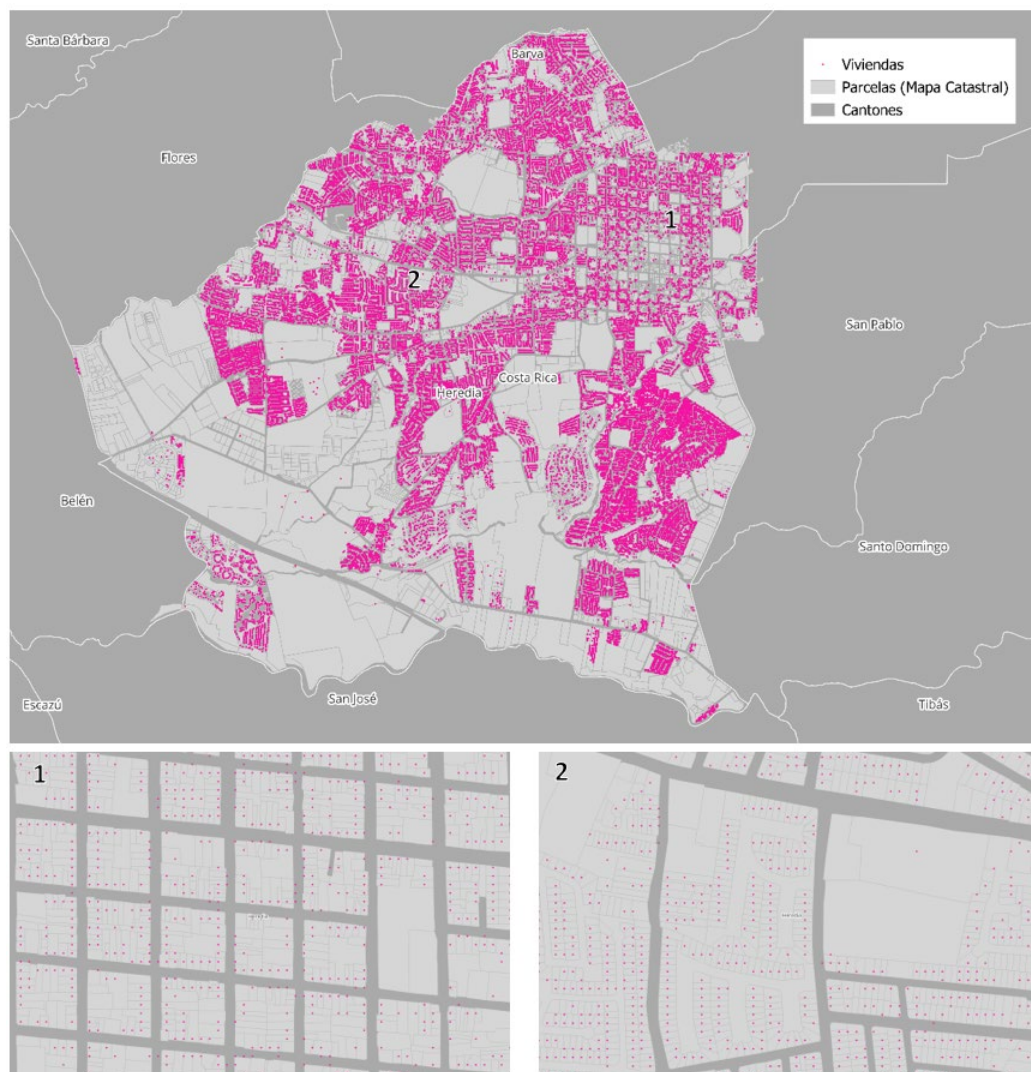


Figura 37. Base de exposición de viviendas del proyecto GRAF

4.12.2 Valor de reposición o compensación

4.12.2.1 Mapa de valores de zonas homogéneas

En el sistema de información geográfica web – UBICA se encuentra el mapa de valores de zonas homogéneas, que permite conocer el valor por metro cuadrado de un área determinada dentro del cantón de Heredia, este mapa fue publicado por el Ministerio de Hacienda en el año 2012. En la Figura 38 se muestra el mapa de valores de zonas homogéneas.

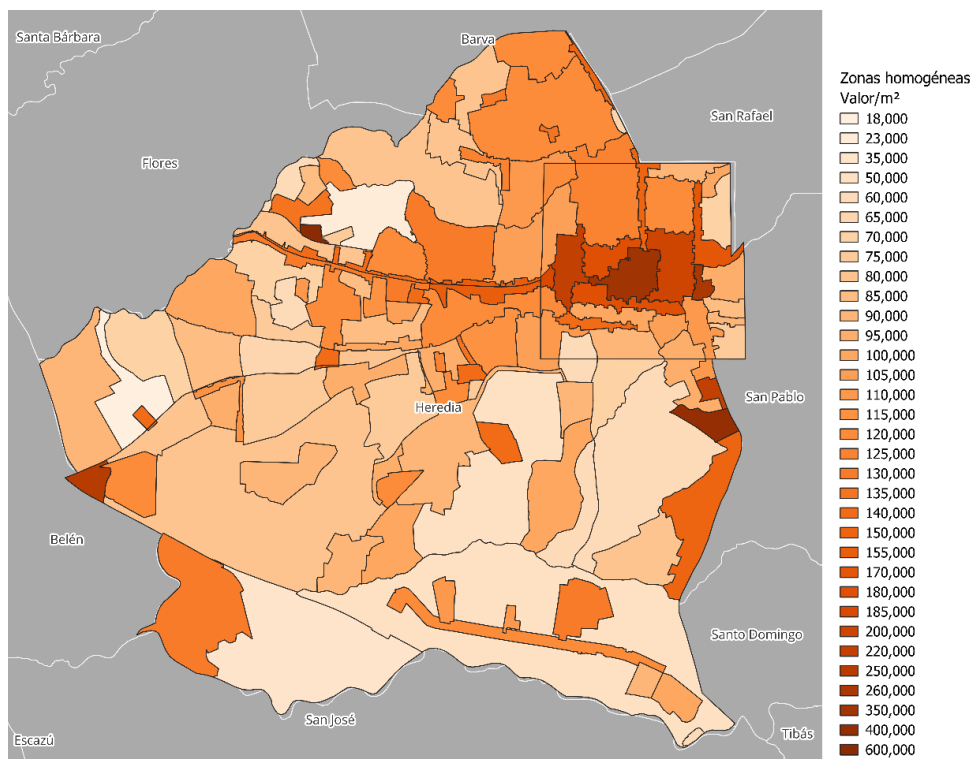


Figura 38. Mapa de zonas homogéneas de valor por m²

4.12.2.2 Manual de valores base unitarios por tipología constructiva

El Ministerio de Hacienda de Costa Rica desarrolla el Manual de Valores Base Unitarios por Tipología Constructiva como una herramienta de aplicación obligatoria para determinar el costo de reposición de las construcciones, con fines de procesos de fiscalización tributaria.

Los valores unitarios por tipología se reportan para edificios y vivienda, así como para sectores de uso, entre los que se encuentran uso habitacional, comercial, hospedaje, oficinas, entre otros. Esta información podrá ser empleada como una guía base para determinar la valoración de las edificaciones.

4.12.3 Número de pisos

4.12.3.1 Condominios verticales en 3D

En la plataforma web UBICA es posible consultar información sobre condominios verticales dentro del cantón, entre los atributos asociados se encuentra el nivel que nos permitirá estimar información sobre la altura de las edificaciones o el número de pisos. En la Figura 39 se muestra la consulta de una edificación en el visor de condominios verticales en 3D publicado en la plataforma.



Figura 39. Condominios verticales en 3D. Fuente: <https://ubica.heredia.go.cr/>

4.12.3.2 Copernicus GHSL - Capa de asentamientos humanos globales

Copernicus es un programa de observación de la tierra de la Unión Europea, que ofrece servicios de información espacial global de forma abierta y gratuita. Esta información se basa en la observación de la tierra por satélite y en datos in-situ, con el fin de describir la presencia humana en el planeta.

Entre la información reportada es posible consultar el conjunto de datos espaciales ráster GHS-BUILT-H (Pesaresi, M.; Politis, P. 2023) que representa la distribución espacial de las alturas de las edificaciones, derivada de la combinación y filtrado de modelos digitales de elevación globales (DEM) y de imágenes satelitales mediante técnicas de regresión lineal.

En la Figura 40 se muestra la distribución de altura de las edificaciones consultada para el cantón de Heredia, que se utilizará de forma complementaria a la información contenida en la capa Condominios Verticales mencionada anteriormente, para determinar la altura de cada una de las edificaciones.

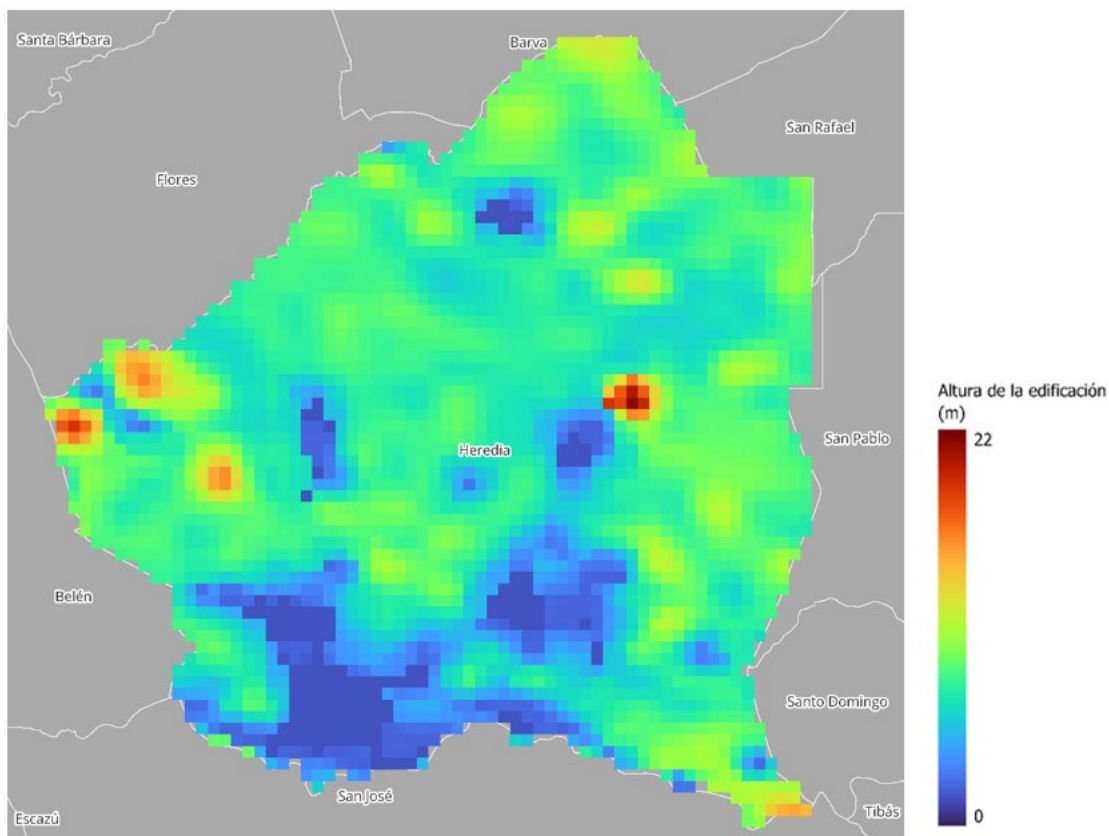


Figura 40. Altura de las edificaciones (GHS-BUILT-H).

4.12.4 Sector de uso

4.12.4.1 Mapa catastral

Entre los atributos del mapa catastral se encuentra la variable *Uso* que detalla para cada una de las parcelas el sector de uso al cual pertenece. En la Figura 41 se muestra la clasificación de los sectores de uso y su distribución en el cantón.

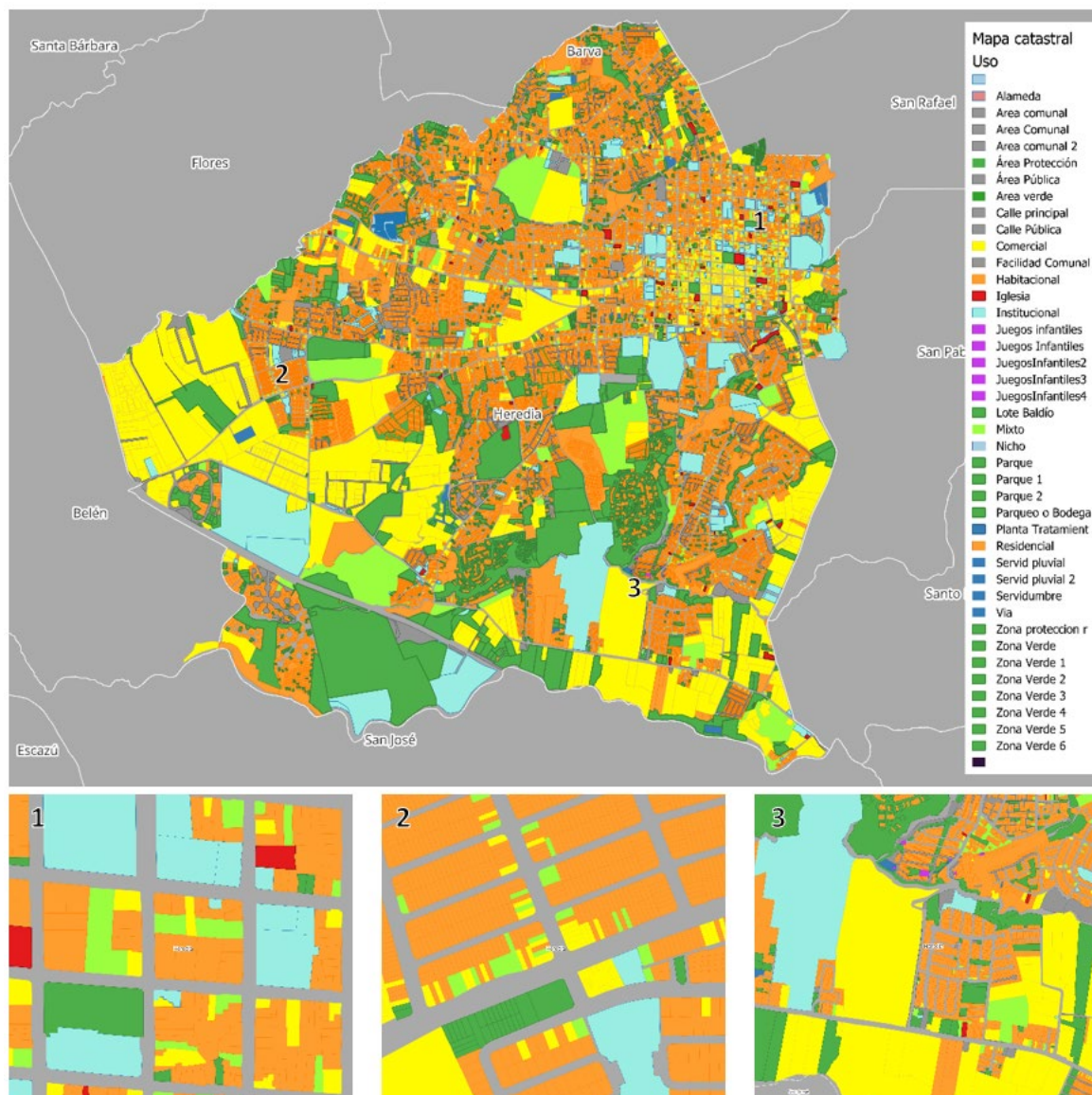


Figura 41. Sector de uso

4.12.4.2 Cartografía - Edificaciones

En la cobertura de edificaciones se encuentra la variable *Categoría* que también puede dar cuenta del sector de uso al cual pertenece la edificación, como se muestra en la Figura 42.

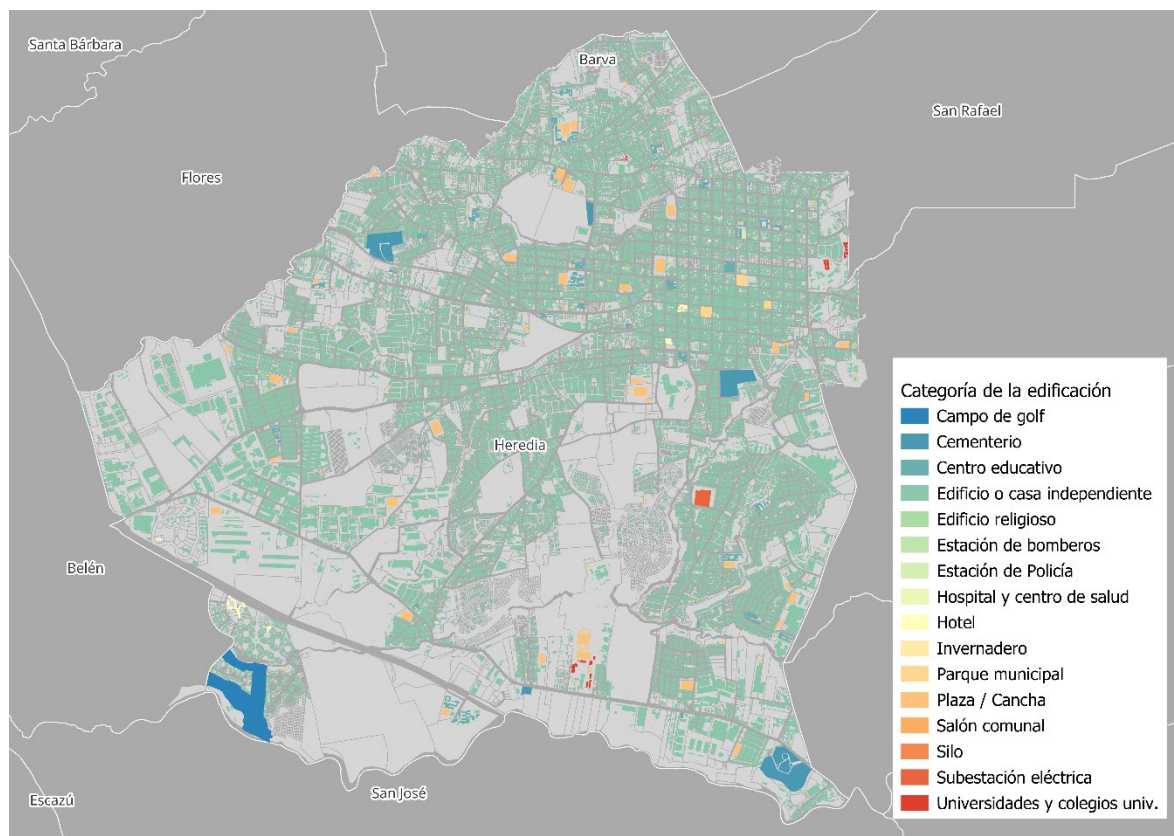


Figura 42. Categoría de uso

4.12.4.3 Sector salud

En el marco de la aplicación del primer piloto GRAF en Costa Rica se generaron modelos de exposición para diferentes sectores entre los que se encuentra el sector salud como se muestra en la Figura 43. Esta base de datos de exposición del sector salud fue construida a partir de información suministrada por Caja Costarricense de Seguro Social y nos servirá como guía y fuente de información para caracterizar las edificaciones del cantón Heredia.

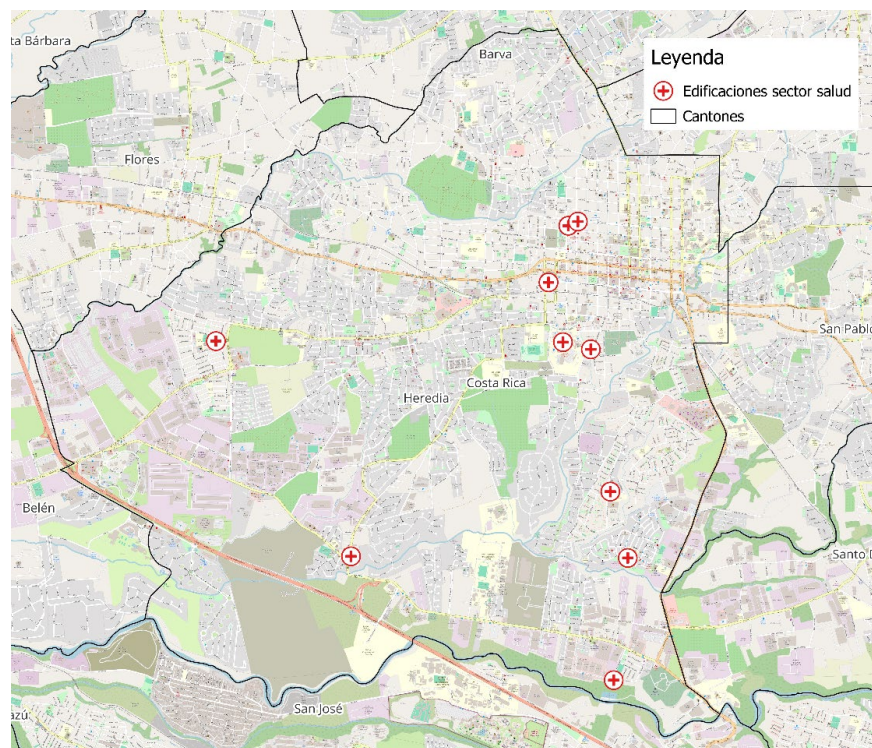


Figura 43. Edificaciones sector salud

4.12.4.4 Centros educativos

En la plataforma UBICA se encuentra información sobre la ubicación de los centros educativos en el cantón de Heredia como se muestra en la Figura 44. La fuente que publica la información es el Ministerio de Educación Pública de Costa Rica.

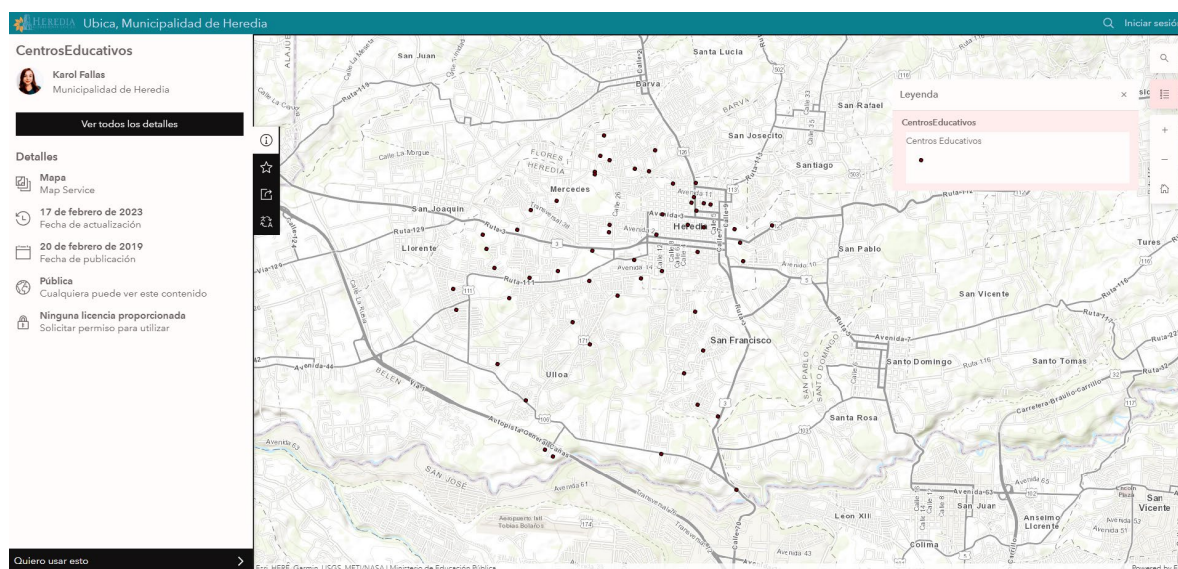


Figura 44. Centros educativos. Fuente: Información territorial (<https://ubica.heredia.go.cr/>)

4.12.4.5 Asentamientos informales

De la misma forma, en la plataforma UBICA se encuentra publicada información sobre la ubicación de asentamientos informales en el cantón Heredia, como se muestra en la Figura 45.

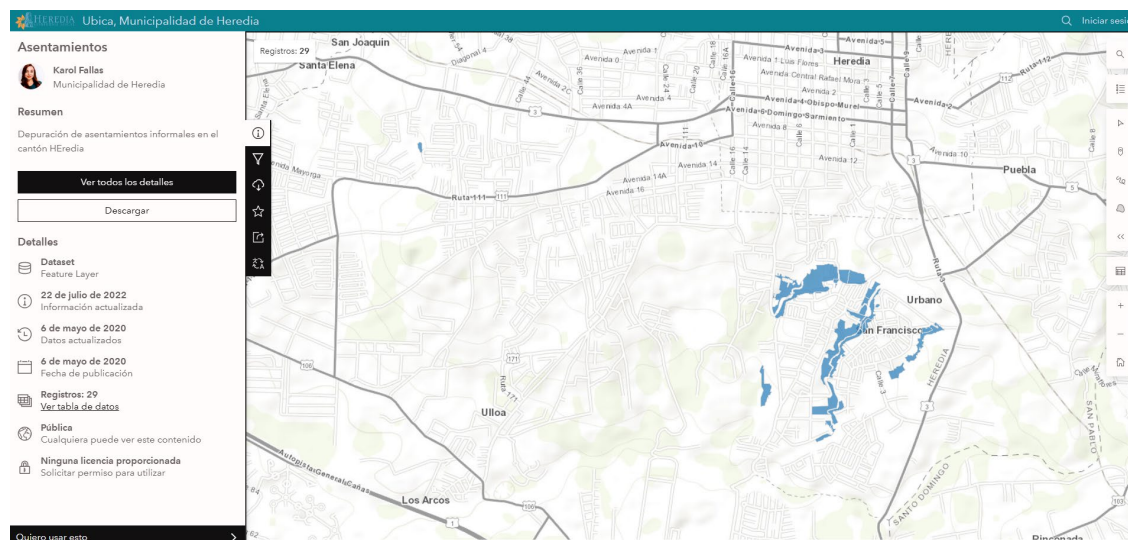


Figura 45. Asentamientos informales. Fuente: Información territorial (<https://ubica.heredia.go.cr/>)

4.12.4.6 Puntos de interés

En la plataforma UBICA se encuentra disponible la capa Puntos de Interés que contiene la localización de puntos comerciales, residenciales y comunales del cantón de Heredia. Entre la categorización se encuentran diferenciados puntos de interés de sitios turísticos históricos, de arquitectura histórica, de edificaciones del gobierno local, de servicios públicos, del sector institucional como edificaciones del ministerio de seguridad, de educación, del trabajo, del poder judicial, del patronato nacional, entre otros. En la Figura 46 se muestran los puntos de interés publicados por la municipalidad de Heredia.

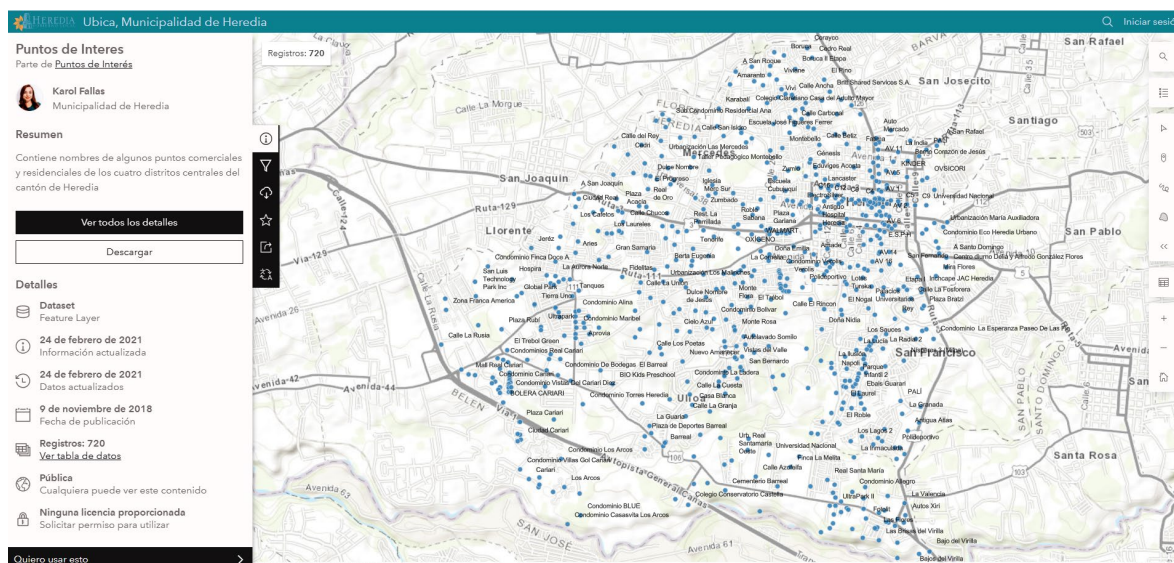


Figura 46. Puntos de interés. Fuente: Límites (<https://ubica.heredia.go.cr/>)

4.12.4.7 Áreas públicas

En la plataforma UBICA de la municipalidad de Heredia se encuentra disponible el mapa de áreas públicas del cantón de Heredia, que contiene las fincas que están a nombre de la Municipalidad, fincas de uso público, fincas registradas a nombre de instituciones del Estado y fincas que posiblemente están invadidas. En la Figura 47 se muestra una imagen del visor de este mapa de áreas públicas para el cantón de Heredia.

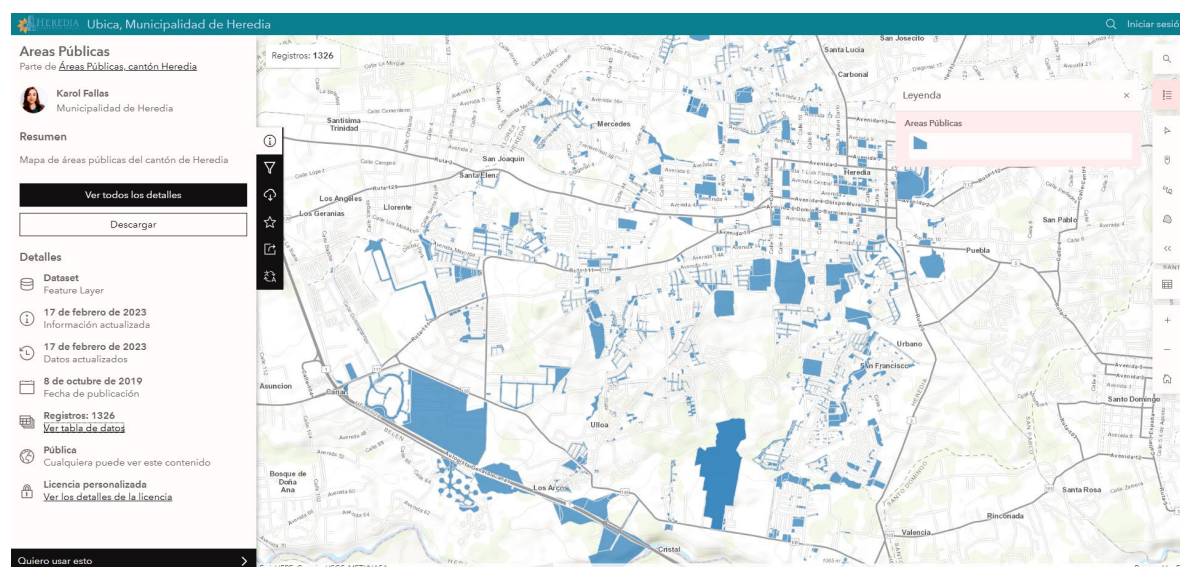


Figura 47. Áreas públicas. Fuente: Límites (<https://ubica.heredia.go.cr/>)

4.12.4.8 Albergues

En la plataforma UBICA se encuentra publicado un mapa con la localización de los sitios propuestos para albergues en caso de ocurrir una emergencia en el cantón de Heredia, esta información es proporcionada por el comité Municipal de Emergencia de Heredia. En la Figura 48 se muestra una imagen del visor con la ubicación de los albergues propuestos.

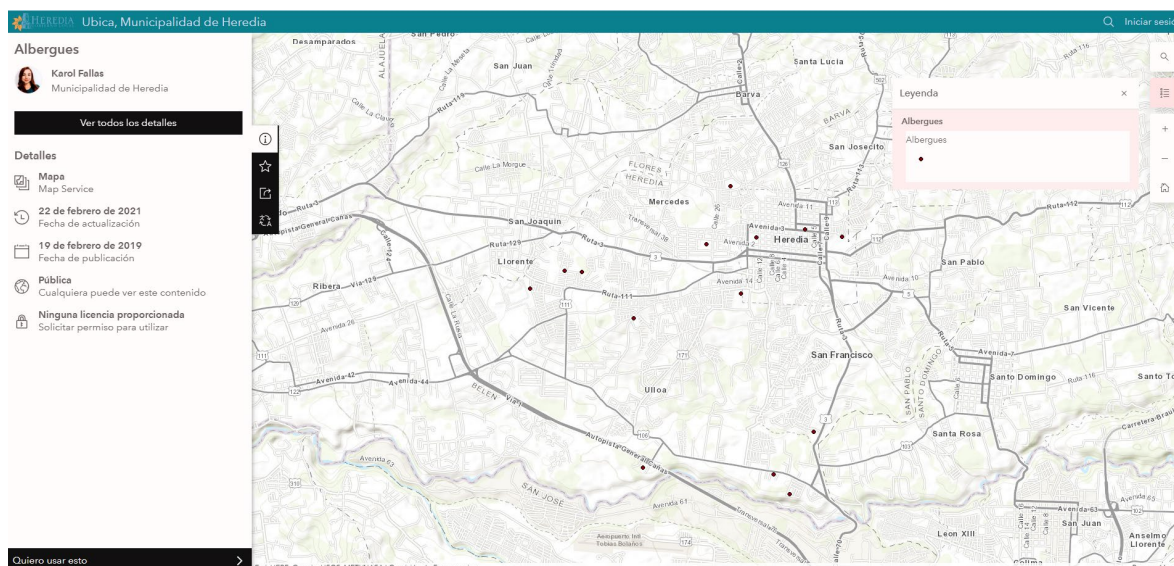


Figura 48. Albergues. Fuente: Comunidad (<https://ubica.heredia.go.cr/>)

4.12.5 Sistema estructural

Variables como sistema estructural no se encuentran usualmente disponibles ni en los catastros ni en los censos de vivienda u otra información adicional. Un recurso para aproximarse a esta información es la variable *Material predominante en las paredes exteriores* del Censo Nacional de Población y Vivienda, la cual da cuenta de los materiales de construcción empleados en el país, de cómo se distribuyen respecto al total de las viviendas y de su distribución geográfica. En la Figura 49 se presenta de forma general, la distribución del material predominante en paredes exteriores para las viviendas en el cantón Heredia según el Censo de Población y Vivienda del año 2011.

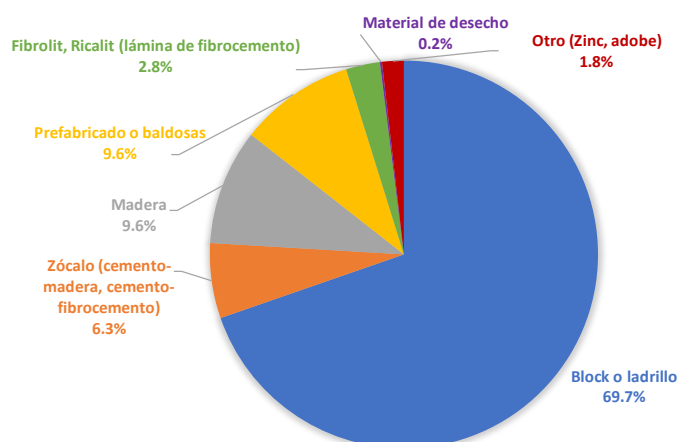


Figura 49. Material predominante en paredes exteriores para el cantón Heredia

A partir del material predominante en paredes exteriores e información recopilada en numerales anteriores como número de pisos, sector de uso, área construida, entre otros, se construyen algoritmos

que permiten asignar el sistema estructural a cada una de las edificaciones para determinar así la clasificación de su vulnerabilidad.

4.12.6 Indicadores de personas en riesgo

Para identificar la población en riesgo, en la plataforma UBICA, es posible consultar los datos de población y su distribución en el cantón Heredia, de acuerdo con los datos censales publicados por el Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC) del censo del año 2011. En la Figura 50 se muestra cómo se presenta la información de población en la plataforma UBICA.

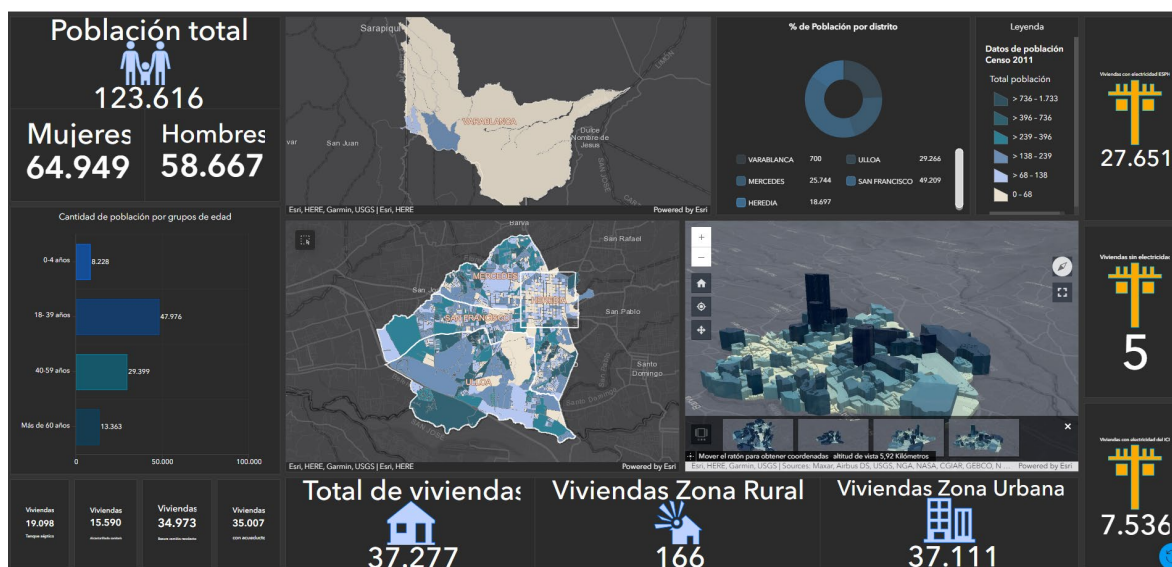


Figura 50. Datos de población. Fuente: <https://ubica.heredia.go.cr/>

4.13 Elementos expuestos del sector turismo - edificaciones

Para construir el modelo de exposición de edificaciones del sector turismo se cuenta con las siguientes fuentes de información:

4.13.1 Cartografía – Edificaciones

En el Sistema Nacional de Información Territorial (SNIT) se encuentra publicada la cobertura de edificaciones y construcciones a nivel país, que contiene como atributo descriptivo la categoría de la edificación, en esta categoría se especifican las edificaciones que corresponden a hoteles como se observa en la Figura 51.

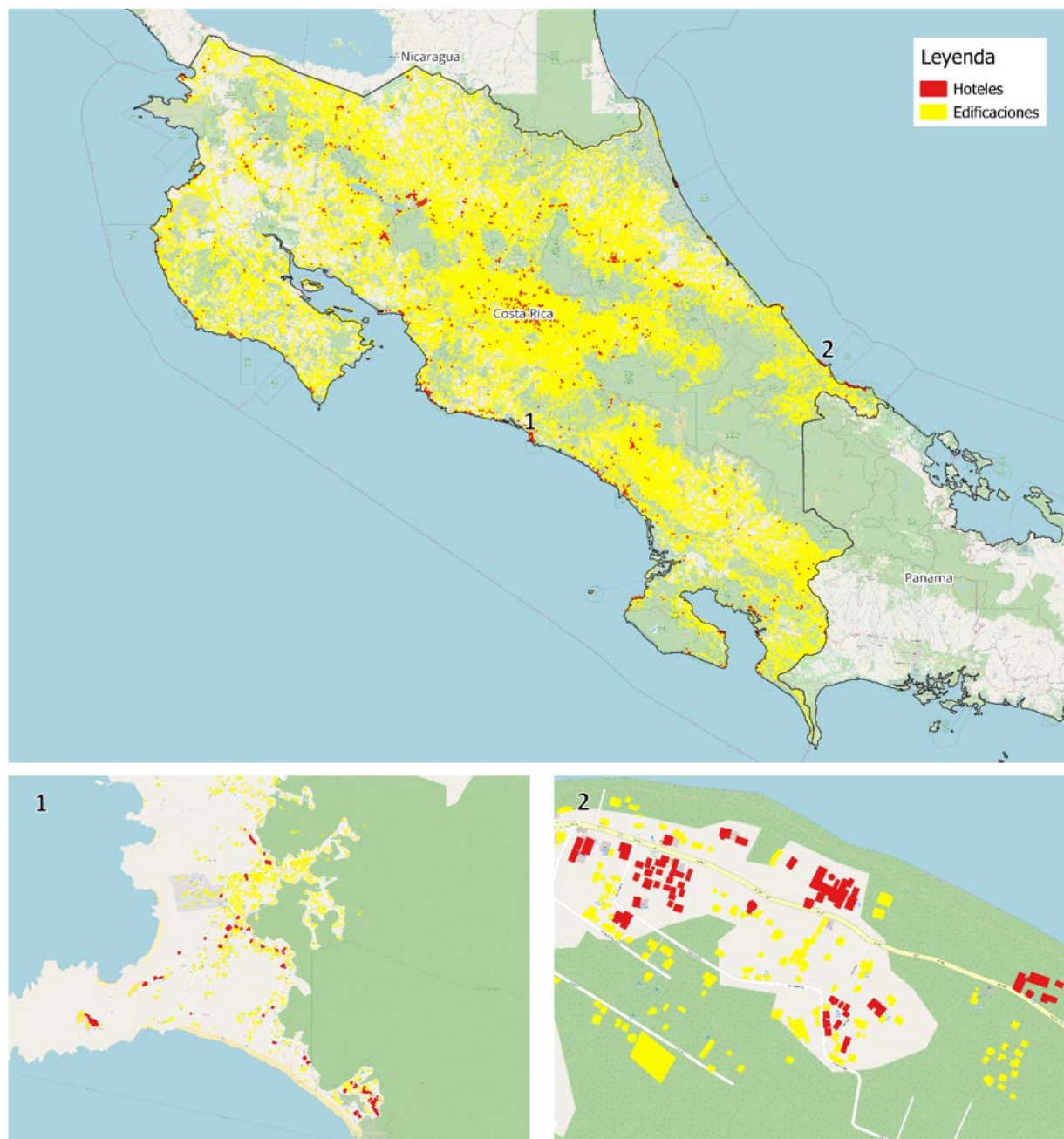


Figura 51. Hoteles categorizados en la cartografía de edificaciones

4.13.2 OpenStreetMap

Para complementar la información oficial reportada, se consultan fuentes de datos abiertos como OpenStreetMap (OSM), que contiene una base de datos geográfica colaborativa y abierta que incluye infraestructura y otros aspectos del entorno construido, puntos de interés, uso del suelo y clasificaciones de cobertura del suelo. La Figura 52 muestra la ubicación de datos abiertos en OpenStreetMap sobre instalaciones de alojamiento y hoteles en Costa Rica.

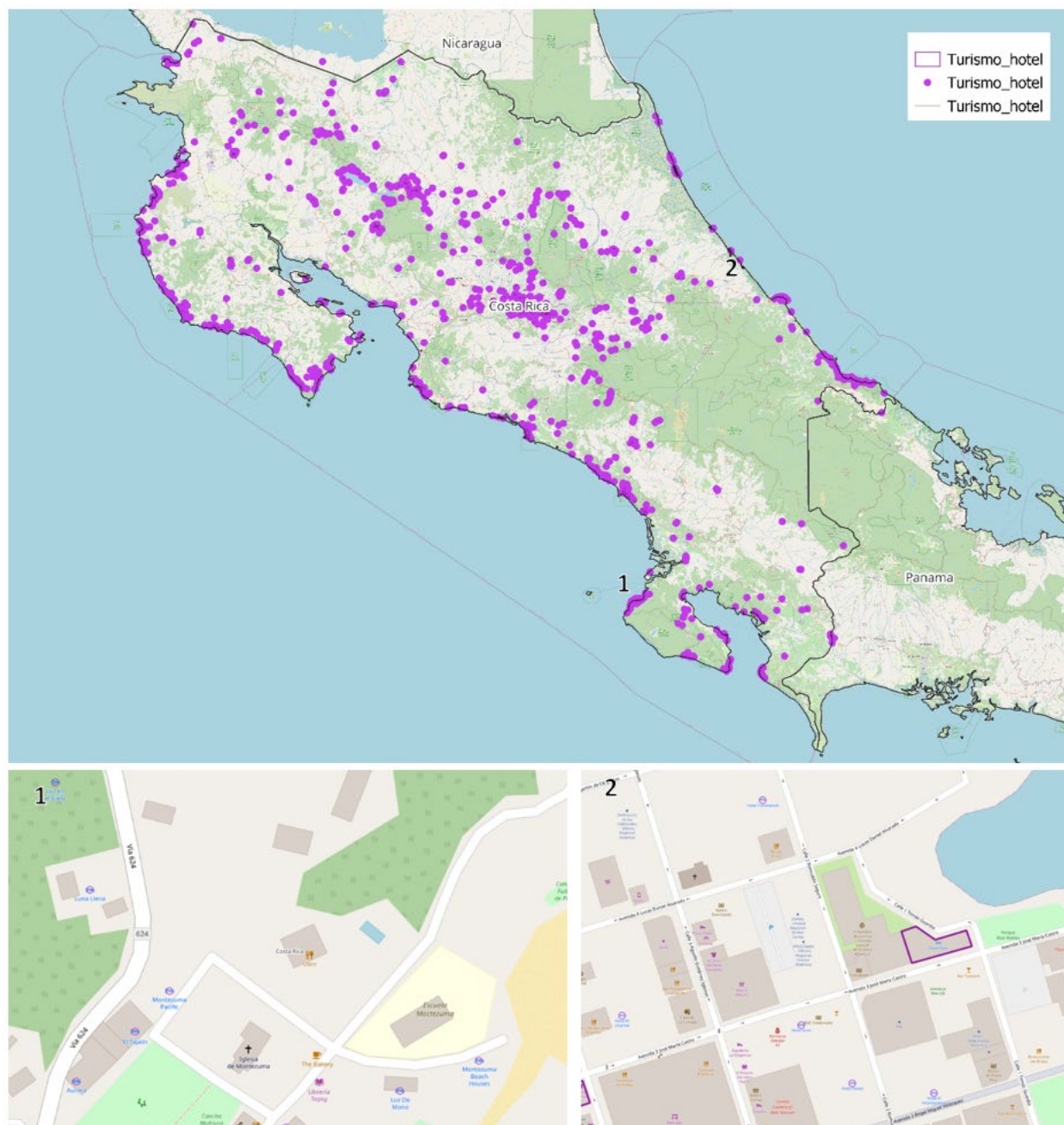


Figura 52. Datos abiertos de hoteles en OpenStreetMap

4.13.3 Manual de valores base unitarios por tipología constructiva

En el Manual de Valores Base Unitarios por Tipología Constructiva desarrollado por el Ministerio de Hacienda de Costa Rica, se consideran tipificaciones de valor por metro cuadrado para el sector de uso hotelero, información que se empleará como una guía base para determinar la valoración de las edificaciones pertenecientes al sector hoteles y hostales.

4.14 Elementos expuestos del sector infraestructura

Los portafolios de infraestructura se elaboran -al igual que en la exposición de edificaciones- a partir de información georreferenciada, que tiene una representación geométrica vectorial (punto, línea, polígono) y atributos que le permitan ser caracterizados. Cada portafolio elaborado debe contar -como mínimo- con geometría georreferenciada, valoración económica de reposición del elemento y una clasificación de vulnerabilidad.

En el presente proyecto, se consideran el sector vial (carretero), férreo, energía (eléctrico), comunicaciones y, acueducto y alcantarillado, para el cantón de Heredia. Cada sector se encuentra conformado por varios portafolios debido a los cambios en la representación geométrica de los elementos o en la diferencia de los atributos que tiene un conjunto de elementos expuestos.

Para la conformación de los múltiples portafolios de los sectores de infraestructura se revisaron cinco tipos de fuentes de información:

- Información oficial del cantón de Heredia, perteneciente al gobierno local de Heredia y publicada en su sistema de información geográfica denominado Ubica, así como información de la Empresa de Servicios Públicos de Heredia S.A.
- Información oficial de entidades del orden nacional de Costa Rica que han consolidado su información en el SNIT, tales como el Ministerio de Obras Públicas y de Transportes (MOPT), el Consejo Nacional de Vialidad (CONAVI), la Compañía Nacional de Fuerza y Luz (CNFL), el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) y el Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA).
- Información del modelo de exposición del Marco Global de Evaluación del Riesgo (GRAF -por sus siglas en inglés-) en Costa Rica, correspondiente a un producto final que tuvo como insumo a las fuentes de información enunciadas previamente.
- Información de proyectos comunitarios colaborativos tales como Open Street Map (OSM) y OpenCellID.
- Información del Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica (LanammeUCR)

La incorporación de una fuente de información dependerá de la adecuada representación de los elementos expuestos en el territorio y los atributos que tienen los elementos de cada fuente. Se prioriza la utilización de la información oficial del cantón, pero en caso de no estar disponible o requerirse de más información, se hará uso de las otras fuentes de información mencionadas. Así mismo, se descarta el uso de las fuentes diferentes a la oficial del cantón de Heredia que no aporten información adicional, sean redundantes con la información del cantón o distorsionen la calidad del modelo.

En los siguientes apartados se enuncian las fuentes de información a utilizar en la conformación de cada sector y una descripción básica del procedimiento a llevar a cabo para la conformación de los portafolios de exposición.

4.14.1 Sector vial

El sector vial carretero contempla la elaboración de portafolios que representen los tramos de vía carretera y los puentes en el cantón de Heredia.

En el caso de los puentes, la información oficial publicada en UBICA (la cual no está disponible para su descarga) incluye 40 elementos sin atributos relevantes para la caracterización de los puentes. Ante esta limitación, se opta por utilizar la información proporcionada por el LanammeUCR sobre los puentes de la red vial cantonal, la cual contiene datos sobre las dimensiones de la estructura, el tipo de material de las vigas y el tipo de superestructura. Estos atributos permiten caracterizar de manera precisa los puentes para su evaluación frente a múltiples amenazas. La Figura 53 muestra una vista del visor SIG de los puentes de la Red Vial Cantonal (RVC), con un enfoque particular en el cantón de Heredia.

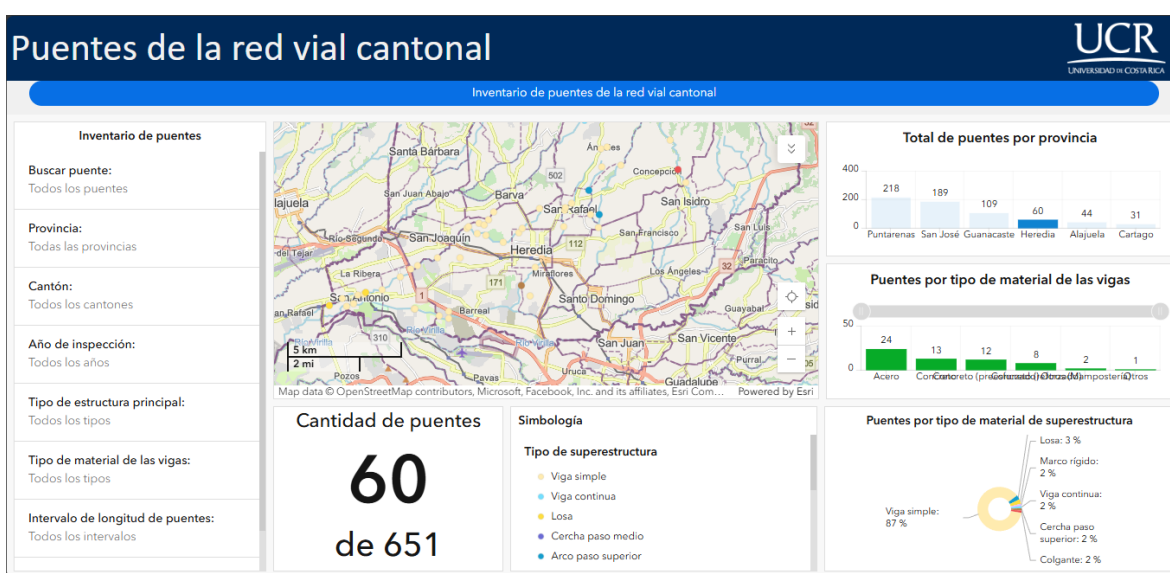


Figura 53. Geovisor de los puentes de la RVC del LanammeUCR

Para asegurar que se incluyan todos los puentes del cantón de Heredia, se realiza un contraste entre los puentes identificados por el LanammeUCR y la información libre de OpenStreetMap (OSM). Si se detecta un puente en la base de datos de OSM que no figure en la base del LanammeUCR, se incorpora al análisis y se le asignan atributos específicos. Para determinar las dimensiones, se utilizan imágenes satelitales, mientras que los atributos de superestructura y materiales se obtienen a partir de Google Street View.

4.14.2 Sector férreo

En este caso, el sector férreo corresponde a la línea ferroviaria San José – Heredia – Alajuela, que atraviesa los distritos de Heredia, San Francisco y Mercedes dentro del cantón de Heredia. En este tramo, la línea férrea tiene una longitud de 4.6 km y cuenta con dos estaciones de pasajeros.

La principal fuente de información utilizada en este portafolio es OpenStreetMap (OSM), debido a su coincidencia geométrica con los datos publicados por el cantón de Heredia en la plataforma UBICA y por el MOPT en su geovisor. Sin embargo, estas fuentes oficiales no están disponibles para descarga pública y

carecen de atributos útiles para la conformación del modelo de exposición. En contraste, la información de OSM proporciona datos sobre la longitud, el ancho de vía y la elevación del tramo con respecto al terreno (a nivel o en puente).

Para enriquecer la caracterización de la línea férrea, se extraerán imágenes aéreas mediante ortofotografía, lo que permitirá identificar atributos de la superestructura. A través del análisis de imágenes con inteligencia artificial, se evaluarán aspectos como la presencia de traviesas (sí o no) y el material de la superficie (concreto o balasto). Este enfoque es similar al planteado para el análisis de puentes en el sector vial.

4.14.3 Sector eléctrico

El sector eléctrico se divide en tres subsectores: generación, transmisión y distribución. Cada uno de estos subsectores contempla la conformación de portafolios con distintos tipos de elementos y atributos.

4.14.3.1 Generación eléctrica

Para el subsector de generación eléctrica, se conformará un portafolio que incluya las plantas de generación de energía. En el caso del cantón de Heredia, no existen plantas de generación dentro de sus límites político-administrativos. Sin embargo, dado el enfoque sistémico del sector, es fundamental considerar los riesgos que puedan afectar los elementos que proveen energía al cantón. Por ello, el portafolio incluirá plantas de generación eléctrica que suministren electricidad al cantón de manera directa.

Las fuentes de información disponibles para este análisis incluyen el modelo de exposición del GRAF, el cual cuenta con dos conjuntos de datos basados en información de la CNFL y la ESPH, así como los datos de *OpenStreetMap* (OSM). En ambos casos, la información disponible incluye geometría tipo punto, método de generación de energía (predominantemente hidroeléctrica) y capacidad instalada de cada planta. Con estos atributos, se llevará a cabo la valoración económica y la clasificación de vulnerabilidad de las plantas de generación.

4.14.3.2 Transmisión eléctrica

Para el subsector de transmisión eléctrica, el portafolio de exposición incluirá subestaciones eléctricas (geometría tipo punto) y líneas de transmisión eléctrica (geometría tipo línea). Al igual que en el caso de la generación, el análisis de las líneas de transmisión deberá realizarse a nivel provincial, más allá de los límites cantonales, con el objetivo de identificar las líneas y subestaciones que forman parte del sistema de abastecimiento eléctrico del cantón de Heredia.

Las fuentes de información sobre subestaciones eléctricas incluyen:

- La capa publicada en el geovisor del ICE con cobertura nacional, pero sin atributos adicionales más allá de la localización.
- La información del GRAF, basada en *datasets* del ICE y la ESPH, que proporciona datos sobre el voltaje de entrada y el material predominante de las subestaciones, principalmente acero.
- Los datos de OSM, que solo incluyen la ubicación de las subestaciones.

Para la conformación del portafolio, se utilizará como base la información del GRAF, complementándola con las otras dos fuentes para garantizar la mayor cantidad de atributos posible y evitar la duplicación de elementos. Como criterio de inclusión, solo se considerarán subestaciones ubicadas a menos de 2.5 km de una línea de transmisión, ya que no se considerará pertinente incluir elementos que no estén conectados de manera evidente a la red eléctrica.

En cuanto a las líneas de transmisión, la principal fuente de información será la capa vectorial publicada por el ICE en su geovisor, que contiene las líneas de alta tensión (138 kV y 230 kV) a nivel nacional. Solo se contemplarán aquellas líneas que conecten el cantón de Heredia con plantas de generación eléctrica, sin importar si se encuentran dentro o fuera de sus límites político-administrativos. Otras fuentes de información presentan datos redundantes o, en algunos casos, divergencias en la ubicación del trazado, por lo que no se consideran necesarias para esta parte del modelo de exposición.

A partir de la red de transmisión, se determinará la ubicación de las torres de transmisión eléctrica sobre las cuales se instala el cableado. Estas torres se definirán en función de los vértices de las polilíneas que representan la red de transmisión. Posteriormente, se verificará su ubicación utilizando la nube de puntos de OSM para torres de transmisión eléctrica, asegurando la mayor precisión posible y minimizando errores en la ubicación de estos elementos.

4.14.3.3 Distribución eléctrica

Para el subsector de distribución eléctrica contempla la conformación de un portafolio que incluye la red de distribución diferenciada según su tipo de tendido (aéreo o subterráneo), así como los postes y transformadores de la red. A diferencia de la red de transmisión, que tiene un alcance regional al transportar el fluido eléctrico, la red de distribución opera a nivel local. Por ello, se considera suficiente analizar la información dentro del cantón de Heredia.

La principal fuente de información sobre la red de distribución es la base de datos oficial de la EPSH, que proporciona geometría tipo línea y atributos clave para la caracterización del modelo, como el tipo de tendido (aéreo o subterráneo) y el voltaje de la línea. En la Figura 54 se presenta la red de distribución de la EPSH.

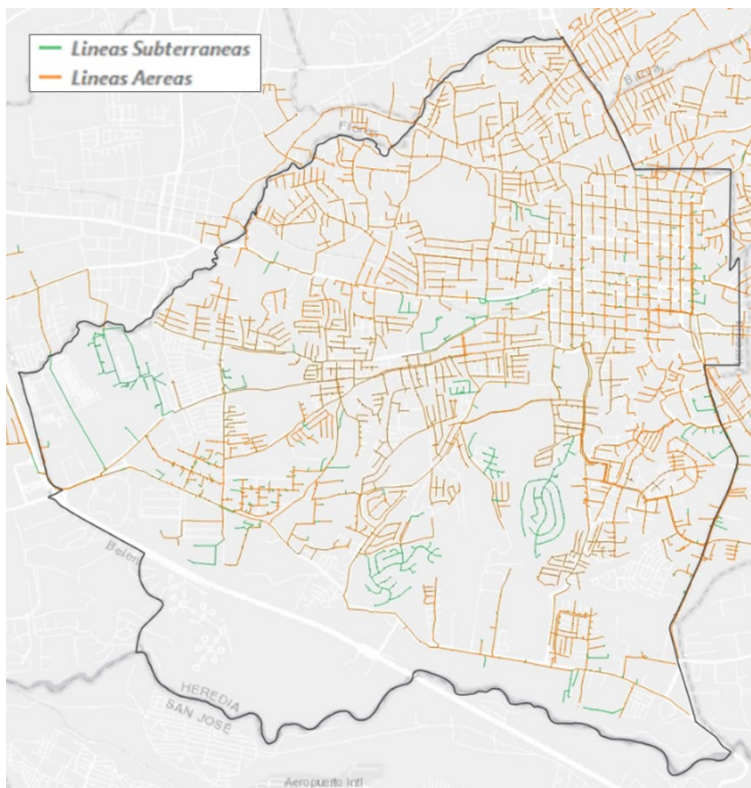


Figura 54. Red de distribución eléctrica en cantón de Heredia

Adicionalmente, se pueden incluir algunos elementos del modelo del GRAF, basado en información de la CNFL. Aunque su cobertura principal es externa al cantón de Heredia, en algunos casos incluye elementos dentro del cantón que no son administrados por la EPSH. La información del GRAF cuenta con los mismos atributos que la fuente principal, lo que permite complementar el modelo de exposición de manera adecuada.

Para los postes de la red aérea de distribución, la fuente principal de información es también la EPSH, que proporciona datos con geometría tipo punto y atributos relevantes como material, altura y año de construcción del poste.

En cuanto a los transformadores, la fuente principal de información es el GRAF, basado en datos de la EPSH (no disponibles públicamente). Los registros incluyen geometría tipo punto y atributos esenciales como la localización del transformador y su tipo de instalación (aéreo o de pedestal).

Tras evaluar todas las fuentes de información y definir los atributos mínimos requeridos para el modelo de exposición, se considera que los datos disponibles son adecuados para la valoración económica y la clasificación de vulnerabilidad de los elementos de la red de distribución eléctrica.

4.14.4 Sector de telecomunicaciones

La conformación del portafolio de exposición en el sector de telecomunicaciones se basa en la representación de la infraestructura que presta servicios fijos y móviles.

Para los servicios móviles, se plantea la conformación de un portafolio de antenas de telecomunicaciones dentro del cantón de Heredia. Para ello, se utiliza la base de datos del proyecto colaborativo OpenCellID, la más extensa a nivel mundial en cuanto a antenas de telecomunicación. Entre sus atributos se incluyen el tipo de red en la que opera cada antena (GSM, UMTS, LTE), su alcance (en metros) y el número de veces que ha sido identificada. La Figura 55 muestra la distribución de las antenas en el cantón de Heredia.

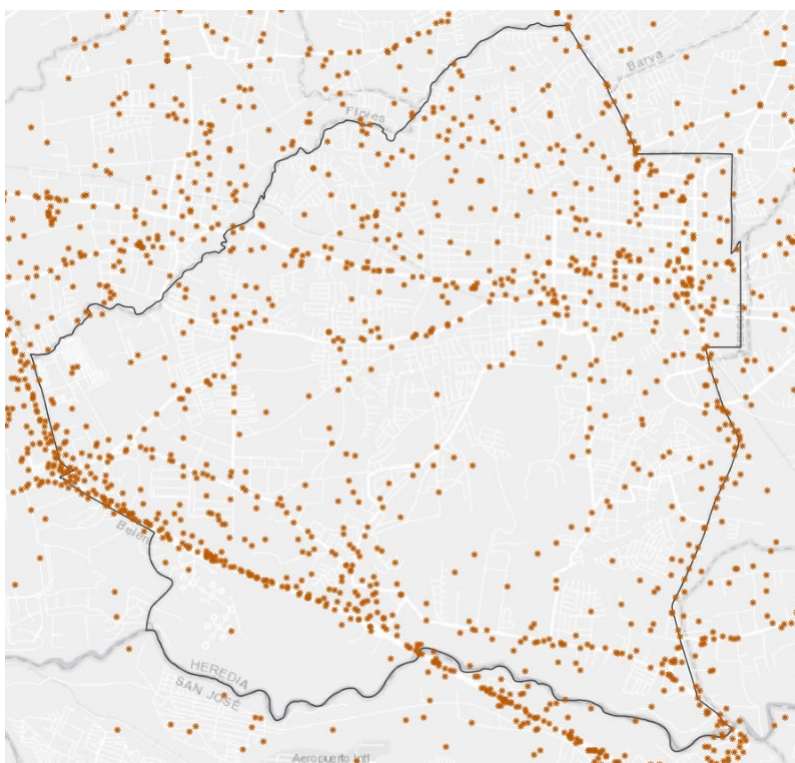


Figura 55. Antenas de telefonía móvil en el cantón de Heredia

A partir de estos atributos, se llevará a cabo una depuración de los registros con pocas identificaciones, ya que podrían corresponder a falsas detecciones. Así mismo, un aspecto clave para el modelo de exposición es determinar la posición relativa de cada antena respecto al suelo, es decir, si se encuentra a nivel del terreno o sobre una edificación. Para ello, se utilizarán las huellas de edificaciones en el cantón y datos de densidad poblacional, con el objetivo de asignar una probabilidad de que la antena esté a nivel del suelo. Esta información permitirá generar clasificaciones diferenciadas de vulnerabilidad.

Por otro lado, no existe información pública especializada sobre las redes de internet y telefonía fija en los hogares. Sin embargo, a partir de ciertos criterios y condiciones, es posible estructurar un portafolio de comunicaciones fijas. En el caso del cantón de Heredia, el porcentaje de viviendas con conexión a internet según el INEC (2022) oscila entre el 86.4% y el 90.6% en sus distritos (exceptuando el distrito de

Varablanca). Esto indica que un alto número de viviendas y edificaciones cuenta con acceso a servicios de telecomunicaciones fijas.

Considerando lo anterior, y que las redes eléctricas, de telecomunicaciones y viales suelen seguir patrones de distribución similares, se utilizará la geometría vectorial de la infraestructura vial como base para estimar la posible red de telecomunicaciones en el cantón. Para validar la existencia de cada elemento en la red, se aplicarán criterios de densidad poblacional, categoría socioeconómica y uso del suelo.

Adicionalmente, se identificará la ubicación de las centrales locales de los operadores en el cantón, lo que permitirá estimar la dirección del flujo de datos y determinar las zonas con mayor capacidad de tráfico de datos. Como resultado final, se espera generar un portafolio con la geometría de las vías, representando las áreas cubiertas por los servicios de telecomunicaciones fijas y asociando atributos relacionados con la capacidad de transmisión de datos en cada segmento de la red.

4.14.5 Sector de acueducto y alcantarillado

El sector de acueducto y alcantarillado se divide en tres portafolios: el de agua potable correspondiente al acueducto, el sistema de hidrantes y el de agua residual correspondiente al alcantarillado.

En este sector, es importante considerar no solo la infraestructura dentro del cantón de Heredia, sino también aquellos elementos ubicados fuera de su jurisdicción político-administrativa, debido al efecto sistémico en la provisión del recurso. En este caso, la captación y conducción del agua se realiza en la región montañosa al norte del área urbana del cantón. Por lo tanto, excluir estos elementos afectaría la precisión de la evaluación del riesgo para el sector.

4.14.5.1 Agua potable

El subsector de agua potable comprende múltiples elementos esenciales para la entrega del recurso a la población, entre los cuales se incluyen:

- Captaciones
- Aducciones
- Plantas de tratamiento de agua potable (PTAP)
- Tanques de almacenamiento
- Sistemas de bombeo
- Redes de conducción y distribución

La principal fuente de información para estos elementos es el modelo de exposición del GRAF, basado en datos de la EPSH. Este modelo incluye la mayoría de los atributos necesarios para la caracterización de la infraestructura. Sin embargo, en algunos casos, como en las captaciones, no se dispone de información sobre el caudal captado, lo que impide dimensionar la estructura con precisión. En tales situaciones, se asume que todos los elementos del dataset presentan características homogéneas.

El único elemento no considerado en el modelo de exposición del GRAF es la red de distribución, debido a que la EPSH dispone de una versión actualizada de esta infraestructura para el año 2024. Entre los atributos clave que caracterizan la red de distribución se encuentran el diámetro de la tubería y el material, los cuales son fundamentales para su correcta caracterización.

La Figura 56 presenta la red de distribución que se utilizará en la conformación del modelo de exposición.

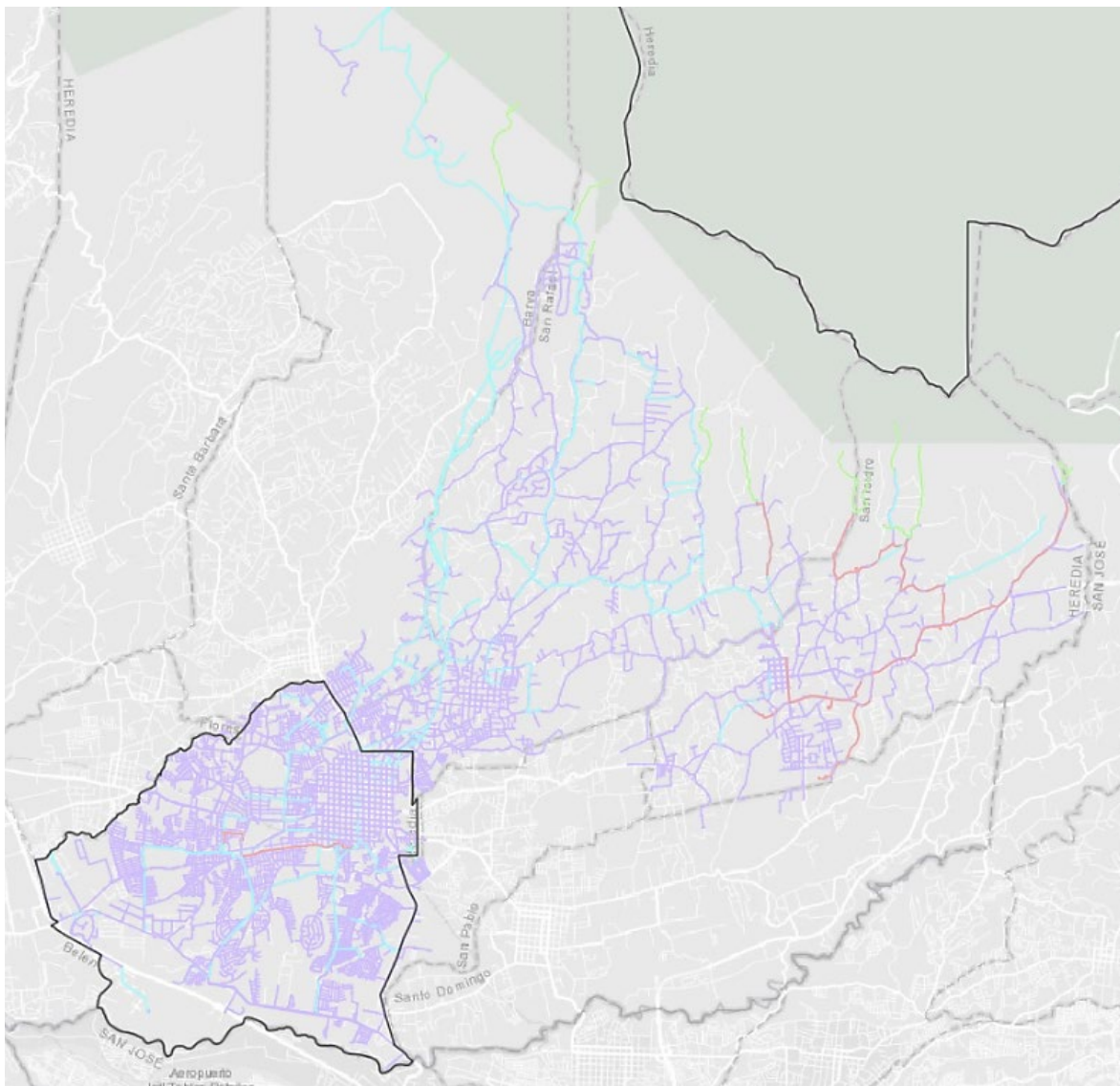


Figura 56. Red de agua potable en el cantón de Heredia

4.14.5.2 Sistema de hidrantes

El sistema de hidrantes es un componente esencial para la atención de emergencias, por lo que resulta fundamental incluirlo en la evaluación del riesgo. La fuente de información utilizada para su incorporación en el modelo de exposición es la EPSH. En este caso específico, no se identifican características distintivas entre los elementos, por lo que todos los hidrantes se consideran iguales.

4.14.5.3 Agua residual

El subsector de agua residual incluye diversos elementos esenciales para la recolección y tratamiento del recurso, entre los que se encuentran:

- Red sanitaria o alcantarillado
- Pozos sanitarios
- Plantas de tratamiento de agua residual

La fuente principal de información para estos elementos es la EPSH, cuya base de datos se encuentra actualizada a 2024. La Figura 57 muestra la distribución espacial de la red y los pozos sanitarios, destacando la cobertura desigual del alcantarillado en el cantón.

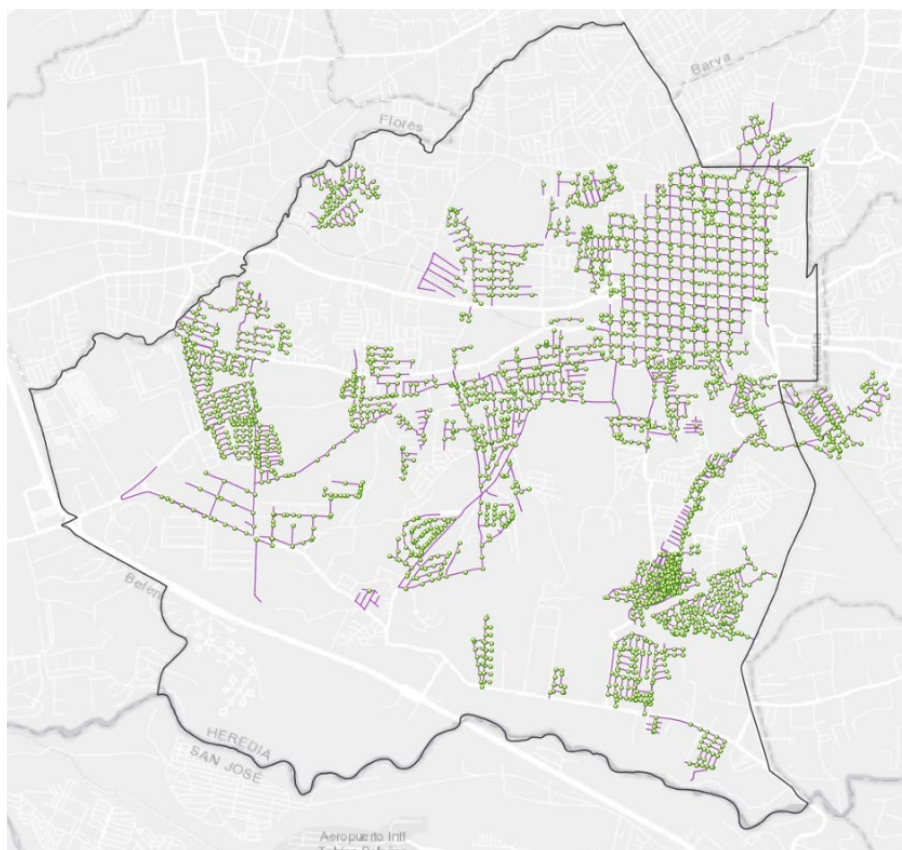


Figura 57. Red de agua residual en el cantón de Heredia

Para complementar el análisis, se utilizará la información espacializada del censo de 2011 del INEC con el fin de verificar la presencia de pozos sépticos en las zonas sin acceso a la red de alcantarillado. En caso de identificar áreas con acceso a la red sanitaria, pero sin representación cartográfica, se procederá a diseñar una extensión de la red siguiendo la metodología aplicada a los servicios fijos de telecomunicaciones, añadiendo atributos estadísticos coherentes con la infraestructura existente.

Respecto a la red sanitaria, se dispone de atributos clave como:

- Diámetro y material de la tubería

- Antigüedad de la infraestructura

En el caso de los pozos sanitarios, los datos incluyen:

- Dimensiones (diámetro y profundidad)
- Material de construcción
- Estado físico

Estos atributos permitirán una caracterización precisa de la vulnerabilidad de la infraestructura.

Por último, las plantas de tratamiento de agua residual cuentan con información sobre:

- Caudal tratado y caudal de diseño
- Población servida
- Tecnología utilizada en el proceso de tratamiento

Estos datos facilitarán un adecuado dimensionamiento y clasificación de las estructuras, así como una valoración económica más precisa. Además, la base de datos de plantas de tratamiento será comparada y, si es necesario, complementada con información de HydroSHEDS, considerando tanto las plantas dentro del cantón de Heredia como aquellas en zonas cercanas que puedan estar tratando aguas residuales del área urbana del cantón.

4.15 Elementos expuestos de la red vial (RN2)

El portafolio de la Ruta Nacional Primaria 2 (RN2) se elabora, al igual que en los apartados anteriores, a partir de información vectorial georreferenciada de tipo línea y de atributos que permiten su caracterización. La conformación del modelo de exposición se basa en la recopilación de la mayor cantidad de información posible para representar con precisión la vía en términos de su geometría, valoración económica y clasificación de vulnerabilidad en cada tramo.

Para ello, se revisaron diversas fuentes de información:

4.15.1 Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales – Universidad de Costa Rica (LanammeUCR)

El LanammeUCR cuenta con un Sistema de Información Geográfica (SIG) que integra información espacial de carreteras, puentes y zonas de inestabilidad geotécnica en la red vial nacional.

En el caso de las carreteras, el sistema dispone de atributos que permiten caracterizar la sección transversal de las rutas nacionales de Costa Rica. Estos atributos incluyen información proveniente de pruebas de pavimento, como la deflectometría de impacto (FWD) y el índice de regularidad internacional (IRI), así como datos sobre el material del pavimento, características geométricas (como el ancho de la vía o el número de carriles) y características del flujo vehicular, como el tránsito promedio diario (TPD). La Figura 58 muestra una vista del visor SIG correspondiente al atributo “material superficial” de la Red Vial Nacional (RVN).

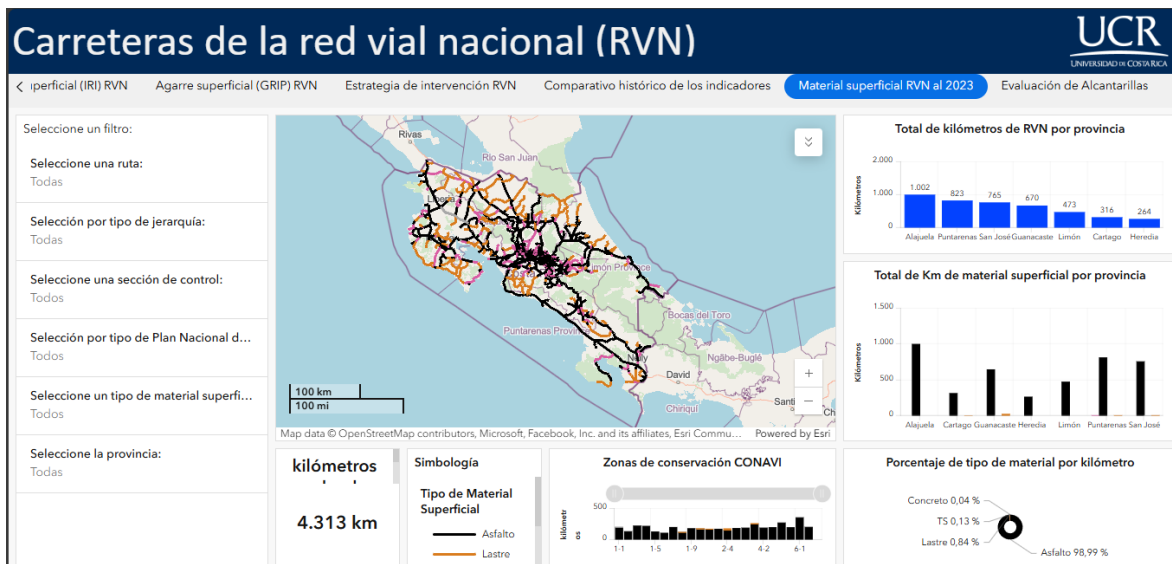


Figura 58. Geovisor de las carreteras de la RVN del LanammeUCR

En cuanto a los puentes, el LanammeUCR ha consolidado información con atributos que describen dimensiones, claros y superestructura, lo que permite representar adecuadamente los elementos en el modelo de exposición y clasificarlos para el modelo de vulnerabilidad. Como ejemplo, la Figura 59 muestra una vista del visor SIG con el atributo “tipo de superestructura” de los puentes de la Red Vial Nacional (RVN).

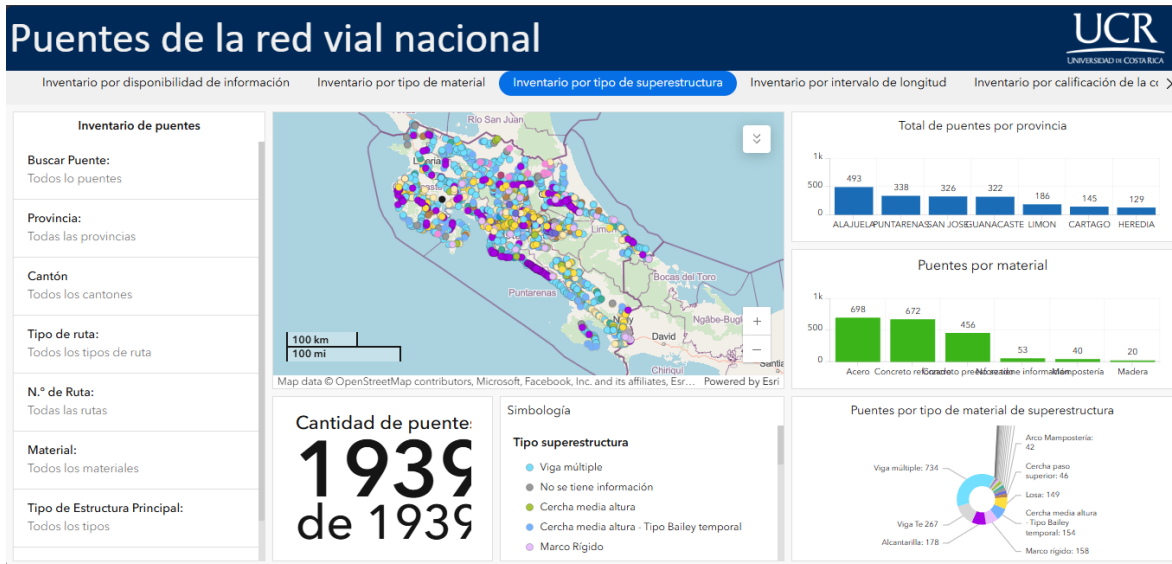


Figura 59. Geovisor de puentes de la RVN del LanammeUCR

4.15.2 Entidades del orden nacional (MOPT – CONAVI)

El Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT) proporciona información espacializada a través de su geovisor (ver Figura 60), cuya representación geométrica corresponde al eje de la calzada. Entre los atributos relevantes para el modelo de exposición se incluyen la jerarquía de la vía (en este caso, completamente primaria) y el derecho de vía.

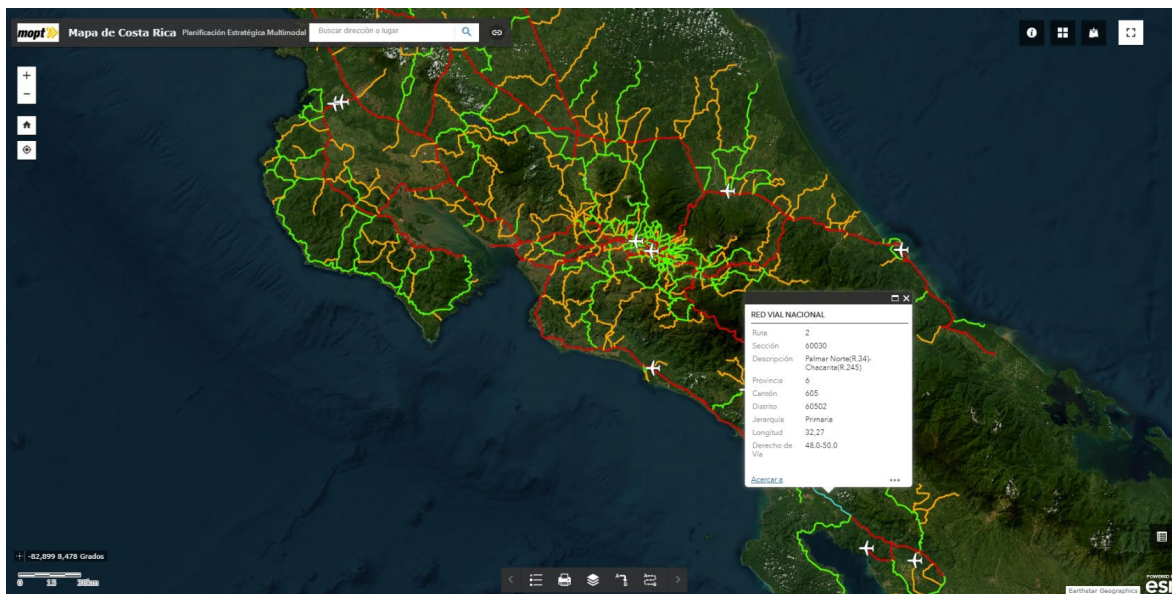


Figura 60. Geovisor de vías nacionales del MOPT

Además, el MOPT dispone de un sistema de certificaciones (ver Figura 61) que complementa la información del geovisor con datos adicionales sobre las secciones de las vías nacionales de Costa Rica. Entre estos atributos destacan la clasificación del tipo de terreno, la superficie, la descripción de la superficie, la estructura del pavimento y su composición. Estos elementos son fundamentales para caracterizar la infraestructura vial de la RN2.

Información de la sección

Ruta:	2
Nombre de la ruta:	RU TA 2
Jerarquía:	Primaria
Sección:	10001
Longitud (KM):	17.995
Descripción:	JUNTAS DE PACUAR(R.244)-CONVENTO (RÍO CONVENTO) (LTE PROVINCIAL)
Derecho de vía:	50.0
Tipo de terreno:	3
Tipo de superficie:	1
Superficie:	Carpeta Asfáltica de espesor igual o mayor a 4 cm.
Superficie de ruede:	4
Descripción de superficie:	Superficie generalmente lisa, pero con unas pequeñas corrugaciones u otras irregularidades aisladas, o con baches pequeños superficiales.
Estructura de pavimento:	5
Descripción de pavimento:	No existen evidencias de fallas en la estructura del pavimento, con la posible excepción de algunas en la superficie de ruede.

Ruta	Sección	Longitud (KM)	Jerarquía	Descripción	Ancho de vía (M)	Más detalles
2	10001	17.995	Primaria	JUNTAS DE PACUAR	50.0	≡
2	10002	6.89	Primaria	PALMARES(FINAL)	50.0	≡
2	10003	7.915	Primaria	SAN ISIDRO PER	29.8-50.0	≡
2	10010	10.29	Primaria	LA ESE(ESCUELA)	30 - 50	≡
2	10020	26.16	Primaria	NIVEL (LTE PROV	50.0	≡
3	10030	13.47	Primaria	PUENTE DE AGUACRUCE PROVINCIAL- CERRO ASUNCION(LTE PROV	50.0	≡

Figura 61. Sistema de certificaciones de vías del MOPT

Por su parte, el Consejo Nacional de Vialidad (CONAVI) también cuenta con un geovisor que proporciona información sobre la red vial, aunque en este caso no aporta datos adicionales respecto a los ya presentados por el MOPT en sus plataformas.

4.15.3 Open Street Map (OSM)

Otra fuente de información es el proyecto comunitario colaborativo *OpenStreetMap* (OSM), el cual puede aportar datos complementarios, como el número de carriles en distintos tramos y la ubicación de puentes. La identificación de los puentes es un paso clave en la conformación del modelo de exposición de la RN2, debido a su impacto en la valoración económica y en la evaluación de vulnerabilidad.

4.15.4 Imágenes satelitales - Google Street View

Para completar el modelo de exposición de la RN2, es esencial identificar estructuras complementarias que garanticen su operatividad, tales como muros de contención, terraplenes y cunetas de drenaje. En el caso de los puentes, se requiere determinar atributos como longitud, ancho aproximado, gálibo, tipología y material de la estructura, ya que estos factores influyen significativamente en la valoración y el análisis de riesgo.

Con este propósito, se emplean imágenes satelitales y Google Street View para extraer información visual en distintos tramos de la vía. Mediante un análisis automatizado de imágenes basado en inteligencia artificial, se pueden identificar y caracterizar estos elementos de manera precisa.

4.16 Elementos expuestos del sector agrícola (cultivos)

La evaluación del riesgo por sequía e inundación del sector agrícola se enfoca en los cultivos de café y caña de azúcar a nivel nacional. Para determinar su susceptibilidad a eventos de déficit o exceso hídrico, es fundamental contar con información detallada sobre su ubicación, área sembrada y cosechada, así como su rendimiento productivo (toneladas por unidad de área). También debe considerarse su estacionalidad y desarrollo fenológico.

La información utilizada proviene de diversas fuentes, las más destacadas y en las cuales se basará la determinación de la exposición de cultivos de café y caña de azúcar para el país se discuten a continuación.

4.16.1 Encuesta Nacional Agropecuaria - ENA (2023)

Según los resultados de la Encuesta Nacional Agropecuaria - ENA (2023), presentada por el Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC), se cuenta con información detallada y actualizada sobre la producción agropecuaria y forestal en Costa Rica.

Desde su implementación en 2017, la ENA se realiza anualmente mediante una encuesta por muestreo que recopila datos a nivel nacional. Su objetivo es generar información sobre el área sembrada y cosechada, la producción obtenida, los destinos de la producción y las prácticas agronómicas aplicadas en los cultivos más relevantes para la economía del país.

La Tabla 8 ilustra la extensión de área sembrada, cosechada y la producción de cultivos permanentes, entre ellos el café y la caña de azúcar. En el caso de la caña de azúcar, se considera únicamente la destinada a la producción de azúcar, excluyendo la caña utilizada para forraje y la producción de dulce.

Tabla 8. Extensión sembrada y cosechada en hectáreas y producción en toneladas métricas, según cultivo permanente, 2023. (INEC, 2024)

Cultivo	Extensión		Producción
	Sembrada	Cosechada	
Aguacate	3 995,8	2 869,4	13 471,7
Banano	47 766,1	46 320,5	2 439 825,2
Café	74 000,2	59 175,0	416 215,4
Caña de azúcar	56 619,6	49 533,7	3 191 449,4
Chayote	444,0	366,9	39 785,5
Mango	5 637,1	3 129,5	24 583,7
Naranja	12 847,0	7 256,6	174 626,0
Palma aceitera	69 398,6	66 695,7	1 109 441,9
Palmito	3 200,3	2 820,5	2 883,5
Plátano	8 774,4	5 926,8	72 877,5

4.16.2 VI Censo Nacional Agropecuario (2014)

El VI Censo Nacional Agropecuario constituye una fuente clave para este estudio, ya que ofrece un diagnóstico detallado del sector agropecuario y su evolución. Se trata de una investigación estadística a gran escala con cobertura nacional, que recopiló información de todas las fincas agropecuarias del país, reflejando sus principales características y actividades durante el año agrícola 2014.

Dado que no se realizaba un censo agropecuario desde 1984, esta actualización resulta fundamental para el análisis y la toma de decisiones en el sector. Además, sus resultados sirven de base para actualizar los marcos muestrales utilizados en la recopilación anual de las Encuestas Nacionales Agropecuarias (ENAs), asegurando información más precisa y representativa para estudios futuros.

Este documento presenta información principalmente a nivel nacional y provincial, con algunos datos disponibles a escala cantonal. En particular, la Figura 63 y Figura 64 ilustran la distribución de la superficie sembrada de café y caña de azúcar por cantón. Además de la extensión cultivada, el censo permite conocer qué parte de estos cultivos ha alcanzado la edad de producción (ver Figura 62). Este dato es clave en cultivos permanentes como el café y la caña de azúcar, donde la productividad depende tanto de la superficie cultivada como de la madurez de las plantas. Esta información resulta fundamental para estimar la producción agrícola y planificar estrategias de adaptación para el sector.

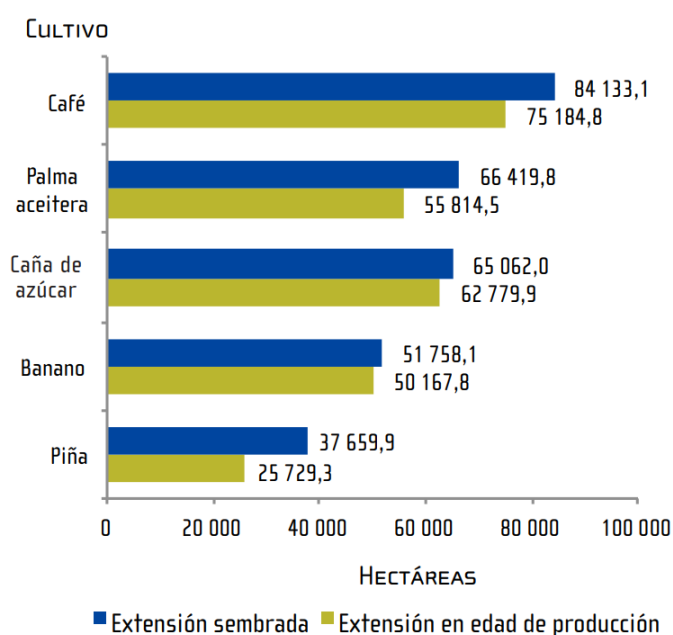


Figura 62. Extensión sembrada y en edad de producción en hectáreas por los principales cultivos permanente (INEC, 2015).

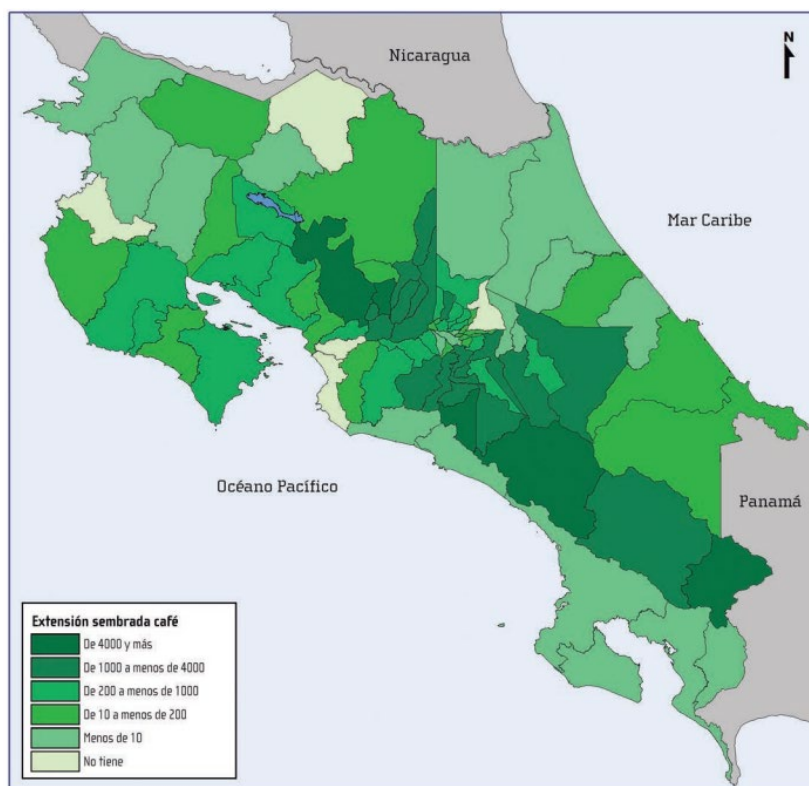


Figura 63. Distribución de la extensión sembrada en hectáreas de café por cantón (INEC, 2015).

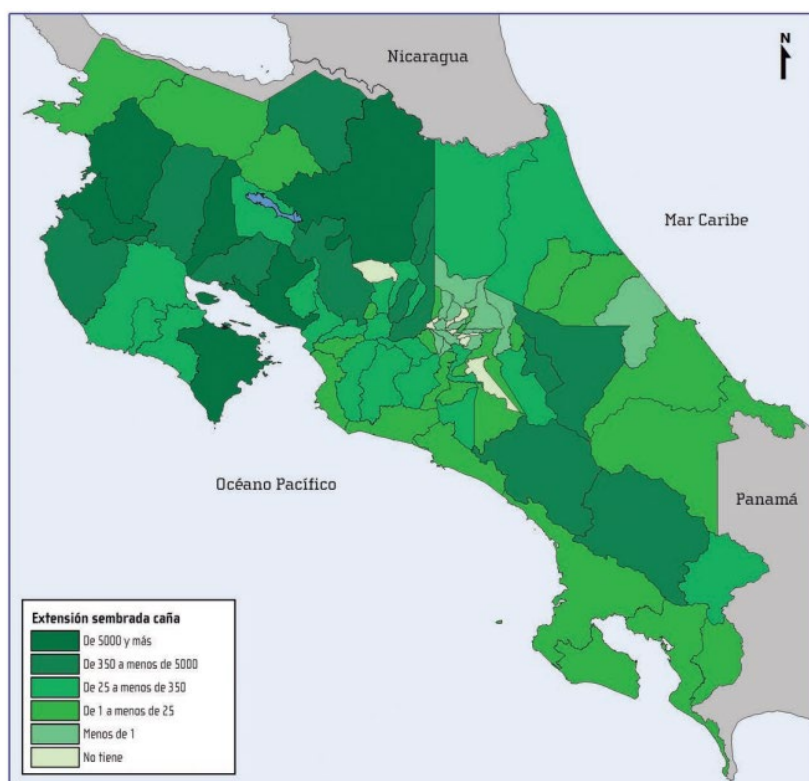


Figura 64. Distribución de la extensión sembrada en hectáreas de caña de azúcar por cantón (INEC, 2015).

A nivel provincial, el censo proporciona datos sobre el uso de insumos agrícolas, especificando el tipo de fertilizantes, métodos de control de malezas y aplicación de plaguicidas como insecticidas y fungicidas. También se analizan aspectos clave del cultivo, como el destino de la producción, el origen de la semilla utilizada y la implementación de sistemas de riego.

Dado que este estudio se enfoca en micro, pequeños y medianos productores, se analiza el número de fincas y su distribución por tamaño a nivel nacional y provincial, como se muestra en la Figura 65. Además, esta información está desglosada por provincia tanto para el café como para la caña de azúcar.

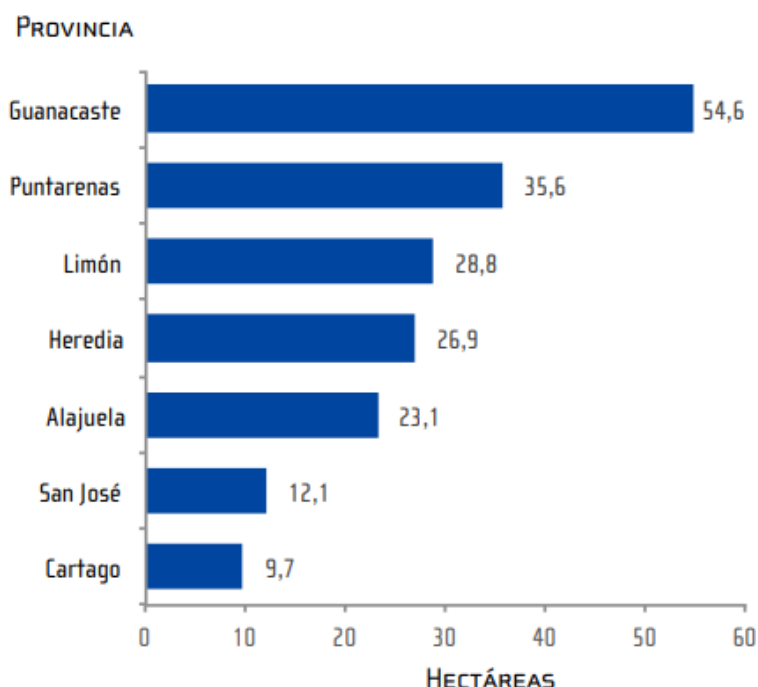


Figura 65. Tamaño promedio en hectáreas de las fincas por provincia (INEC, 2015).

La Figura 66 muestra la localización y distribución de las fincas del sector agropecuario en Costa Rica. Aunque sería ideal contar con esta información georreferenciada en formato digital, hasta el momento no se ha encontrado disponible en línea ni en bases de datos de acceso libre. En general, este tipo de datos suele estar protegido por la ley de protección de datos y, en muchos casos, su acceso podría requerir autorización de la entidad responsable, en este caso, el INEC. No obstante, la Figura 66 ofrece una visión más detallada de la distribución geográfica de las fincas en comparación con la escala provincial y cantonal.

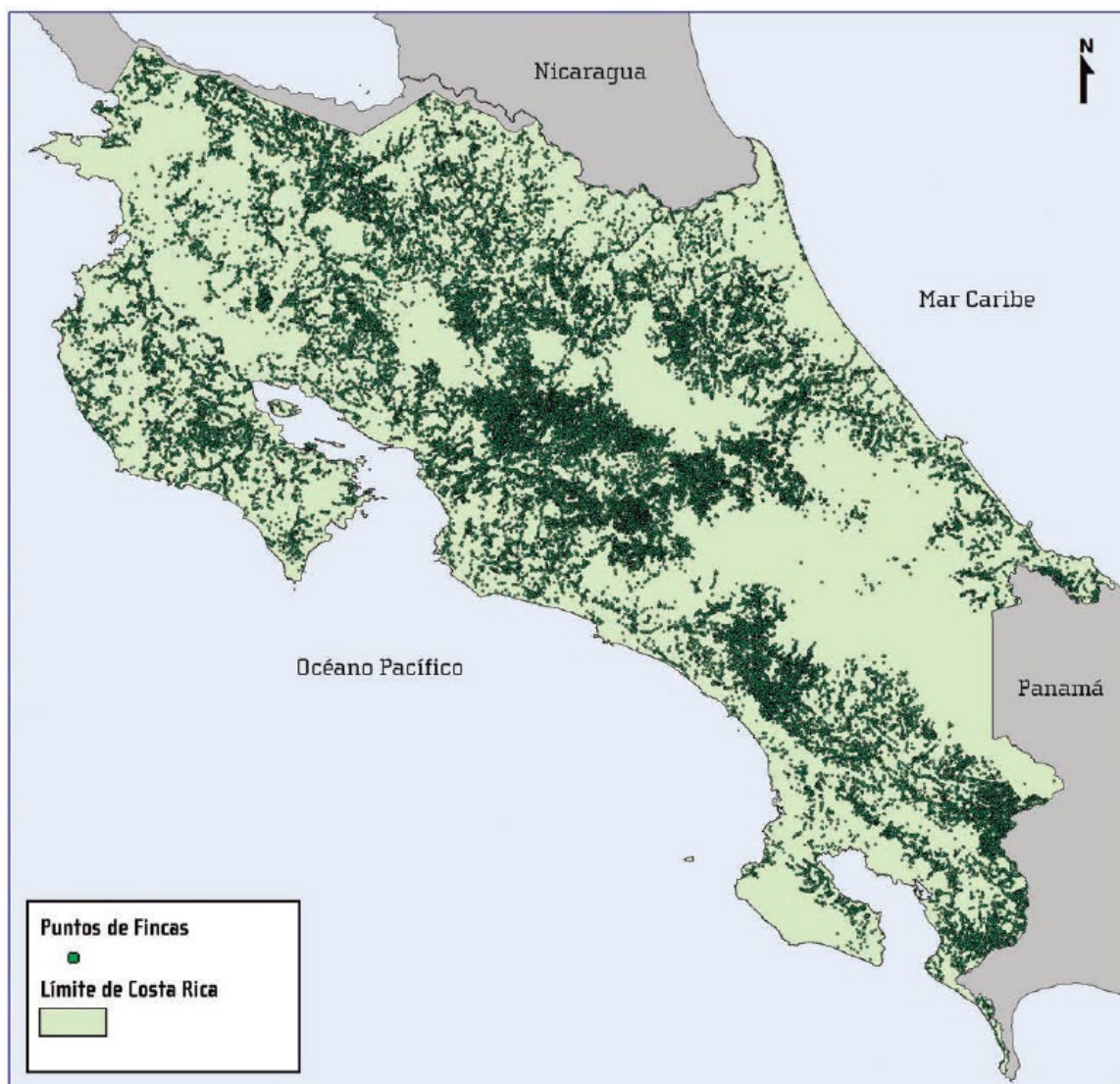


Figura 66. Distribución de las fincas según los puntos georreferenciados del Censo (INEC, 2015).

4.16.3 Mapa de Cobertura y usos de la tierra de Costa Rica - REDD+

Los mapas de cobertura y uso de la tierra son una herramienta eficaz para obtener información espacial sobre distintos tipos de cobertura suelo, como bosques, cuerpos de agua, áreas agrícolas, zonas urbanas y otros usos del territorio. Estos mapas permiten un análisis detallado del paisaje, facilitando la evaluación y gestión del entorno.

El Diagnóstico de Mapeo sobre Cobertura y Uso de la Tierra y Ecosistemas para Costa Rica (SIMOCUTE, 2019) indica que no existe un mandato legal claro sobre el rol del Estado en este ámbito. Aunque la demanda de información es alta, la falta de una metodología estandarizada dificulta la comparación de los mapas a lo largo del tiempo y ha generado actualizaciones irregulares. Se han realizado esfuerzos para unificar criterios, como el diseño y validación de la Leyenda CLC-CR (Corine Land Cover versión Costa Rica) por el INAT en 2015. Sin embargo, hasta la fecha, no se ha encontrado un mapa que adopte esta leyenda.

A pesar de estos desafíos, el Sistema Nacional de Información Territorial (SNIT) dispone de una serie de mapas de cobertura y uso de la tierra de Costa Rica, actualizados cada dos años desde 2013 (2013, 2015, 2017, 2019, 2021). Gracias a la aplicación de una metodología consistente, estos mapas han logrado mantener coherencia y continuidad a lo largo del tiempo.

La elaboración de estos mapas está liderada por el Instituto Meteorológico Nacional (IMN), entidad adscrita al Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE) y encargada de los informes de emisiones de gases (INGEI). El IMN coordina este proceso con el apoyo de la Secretaría REDD+, conformada por el Fondo Nacional de Financiamiento Forestal (FONAFIFO) y el Sistema Nacional de Áreas de Conservación (SINAC). Además de brindar información territorial, estos mapas son una herramienta clave para medir datos de actividad y calcular las emisiones y absorciones de gases de efecto invernadero en el sector AFOLU (SNIT, 2024; MINAE, 2015; CDI, 2015).

La Figura 67 y Figura 68 muestran la evolución de la distribución de la cobertura y usos de la tierra de Costa Rica entre 2013 y 2021. Esta información es fundamental para el análisis espacial de la cobertura agrícola y pecuaria, permitiendo identificar tendencias en el uso del suelo y evaluar cambios en los cultivos permanentes, así como en las áreas de pastoreo destinadas a la ganadería.

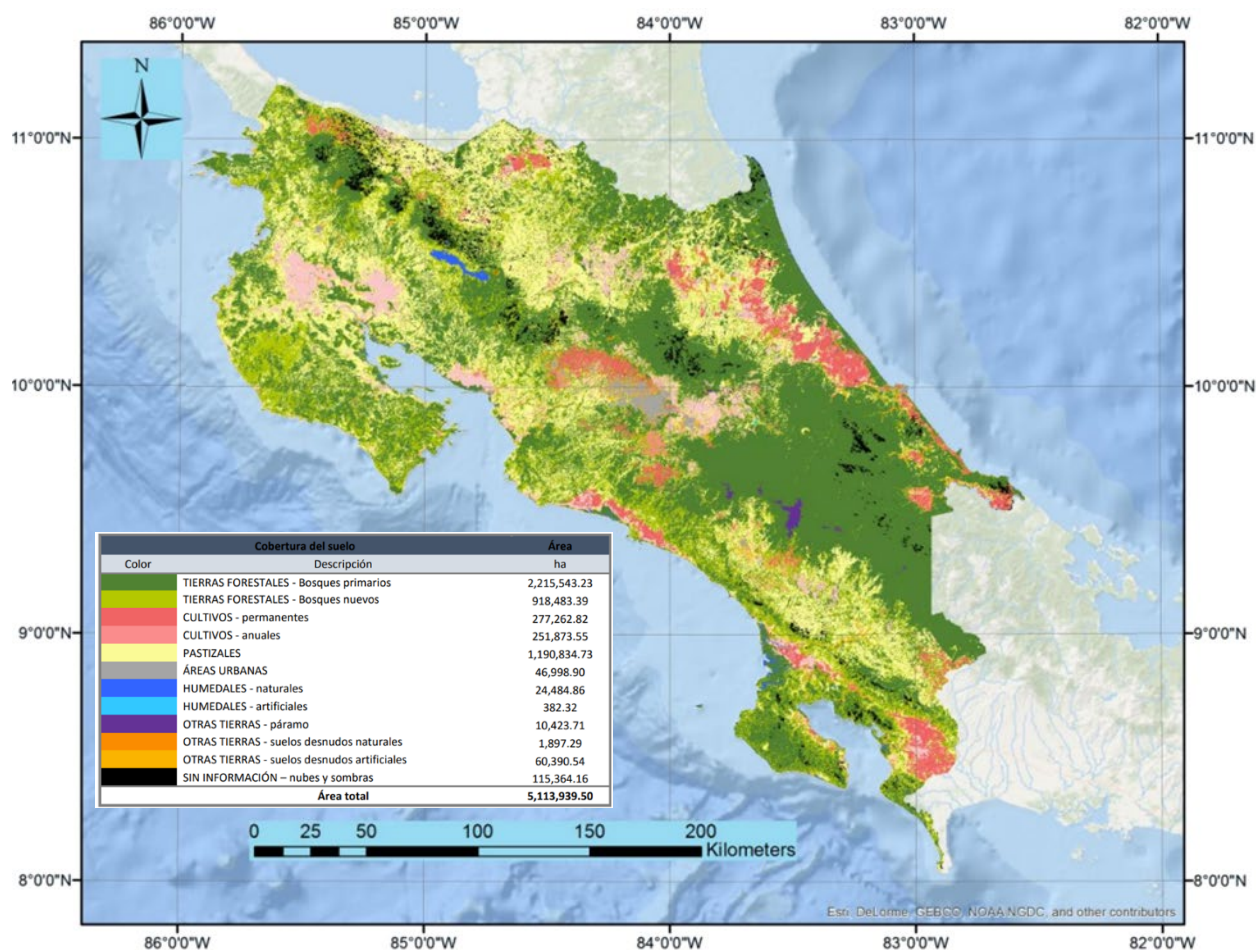


Figura 67. Mapa de Cobertura y usos de la tierra de Costa Rica 2013 (MINAE, 2015; CDI, 2015; SNIT, 2024)

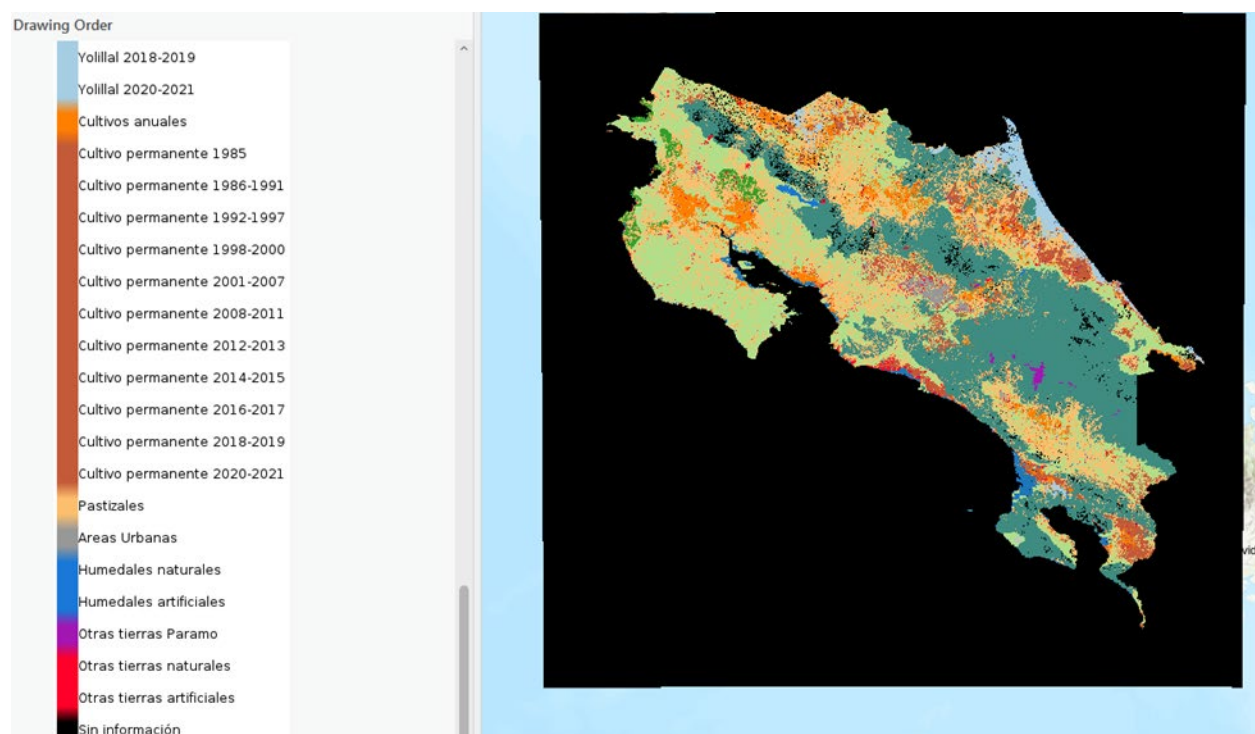


Figura 68. Mapa de Cobertura y usos de la tierra de Costa Rica 2021 (SNIT, 2024).

4.16.4 Estudio de prácticas efectivas para adaptación de cultivos prioritarios para seguros en Costa Rica

Este estudio, realizado por el Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE, 2018a, 2018b), identifica prácticas agrícolas para mitigar el impacto de eventos climáticos y no climáticos en cultivos prioritarios, como el café (CATIE, 2018b) y la caña de azúcar (CATIE, 2018a). Analiza el sistema productivo, los eventos que afectan cada fase del cultivo y las estrategias de mitigación utilizadas por expertos, incluyendo su costo y valoración bajo programas ambientales. Dicho estudio ha sentado las bases de información técnica confiable para su aplicación en productos financieros y seguros agropecuarios, uno de los objetivos del estudio que está llevando a cabo esta consultora. Asimismo, los hallazgos del proyecto de CATIE fortalecen otro de los objetivos esenciales del presente estudio: impulsar la gestión del riesgo a través de prácticas sostenibles que mejoren la resiliencia y adaptabilidad del sector agrícola, dentro del marco de las Acciones Nacionalmente Apropriadas de Mitigación (NAMA) del MAG.

Si bien toda la información del proyecto de CATIE es clave, se resalta de gran utilidad la información de las especificaciones de las fases del ciclo fenológico por región productiva, incluyendo las variedades utilizadas, la fecha de siembra, la duración del ciclo total y de cada una de las etapas.

A manera de ejemplo, en la Figura 69 se ilustra el ajuste realizado en los meses e intervalos de duración de cada fase en la región productiva Brunca. En esta figura se observa cómo el ciclo de la caña de azúcar se distribuye a lo largo del año, considerando las condiciones climáticas de la región. Se identifican cuatro fases principales, iniciando con la fase de germinación o retoñamiento (fase 1) y finalizando con la fase de

maduración de la planta (fase 4), cuya duración está influenciada por la variedad del cultivo y las condiciones edafoclimáticas locales. Además, se destaca la influencia de la época lluviosa (de abril a noviembre) en las primeras tres fases del cultivo, mientras que la época seca (de diciembre a marzo) favorece la maduración. Esta distribución evidencia la importancia de adaptar el manejo agronómico a las condiciones climáticas locales para optimizar el rendimiento del cultivo. Estas fases fueron adaptadas con base en la consulta con expertos revisión de literatura (CATIE, 2018).

0		90 DDS		180 DDS		270 DDS		360 DDS				
Criterio	Germinación/retoñamiento			Crecimiento vegetativo		Desarrollo vegetativo			Maduración			
												
Época	Época lluviosa (Invierno)					Época seca (Verano)						
Meses	A	M	J	J	A	S	O	N	D	E	F	M
DDS: días después de la siembra												

Figura 69. Fases del ciclo fenológico del cultivo de caña de azúcar en la región productiva Brunca

De manera similar, el cultivo del café presenta un ciclo fenológico bien definido, aunque con una duración más extensa debido a las particularidades de su desarrollo. A manera de ejemplo, en la Figura 70 se ilustra el ajuste realizado en los meses e intervalos de duración de cada fase en la región productiva de Turrialba. En esta figura se observa cómo el ciclo fenológico del café se desarrolla a lo largo de un período aproximado de dos años, influenciado por las condiciones climáticas de la región. El ciclo del café se divide en seis fases principales, iniciando con la selección y preparación de la semilla (fase 0) y culminando con el reposo y defoliación natural de la planta (fase 6), siendo su duración variable según la variedad y las condiciones edafoclimáticas locales.

0-----6 meses-----0												-----2 años-----0																
0 Fase			1 Fase						2 Fase			3 Fase			4 Fase			5 Fase			6 Fase							
																												
Selección y preparación de semilla			Crecimiento Vegetativo						Reposo de Yema y caída de hojas / revestimiento de botones florales			Floración principal más 2 y 4 floraciones			Llenados de fruto/granos			Maduración / Cosecha			Reposo / Defoliación natural							
Germinación y Almácigo			Crecimiento en altura y formación de bandolas primarias						Inducción y desarrollo de yemas generativas y seriales			Formación de botones florales y floración			Frutos/granos muy pequeños			Frutas/granos maduras			Auto poda de los arbustos							
Época			Época seca (Verano)			Época lluviosa (Invierno)			Época seca (Verano)						Época lluviosa (Invierno)						Época seca (Verano)							
Meses			F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	N	D	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	E	F

Fuente: elaboración a partir de consultas a expertos

Figura 70. Fases del ciclo fenológico del cultivo de café, en la región productiva de Los Santos

Por último, CATIE (2018) realizó un análisis de aptitud para identificar las áreas óptimas, medias y deficitarias para el cultivo de caña de azúcar y café en Costa Rica. Los mapas de aptitud se presentan en la Figura 71 y la Figura 72.

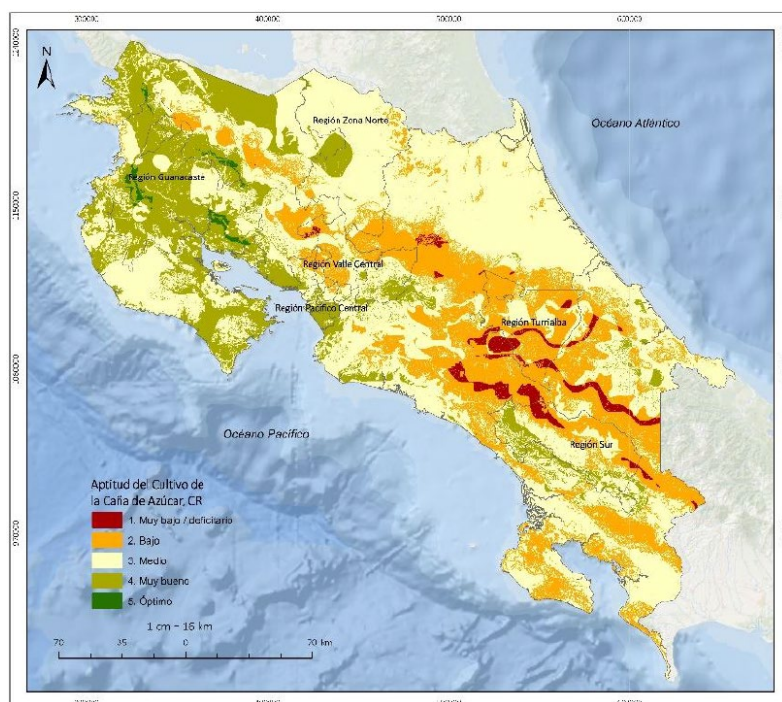


Figura 71. Mapa de aptitud del cultivo de caña de azúcar en Costa Rica

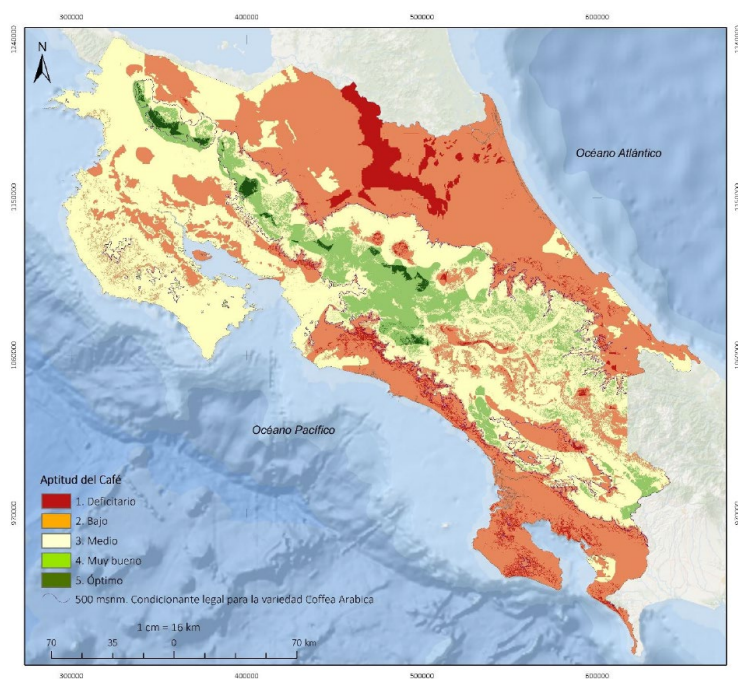


Figura 72. Mapa de aptitud del cultivo de café en Costa Rica

4.17 Elementos expuestos del sector pecuario

La evaluación del riesgo por sequía e inundación en el sector pecuario considera como elementos expuestos el stock ganadero, incluyendo los distintos tipos de pasturas y las manadas de animales que dependen de ellas.

La metodología del modelo estima las pérdidas en sistemas productivos de carne, basándose en la reducción del peso vivo de los animales tras estos eventos. Sin embargo, no contempla cambios demográficos en la manada, como nacimientos, muertes naturales o el desplazamiento de los animales entre regiones del país.

La información utilizada proviene de diversas fuentes, siendo las más relevantes aquellas en las que se basará la determinación de la exposición del sector pecuario en el país, las cuales se detallan a continuación.

4.17.1 Encuesta Nacional Agropecuaria - ENA (2023)

Según el INEC, la Encuesta Nacional Agropecuaria (ENA) 2023 presenta información detallada sobre la ganadería vacuna y porcina, así como las prácticas pecuarias asociadas a escala nacional. Este estudio incluye datos sobre el hato de ganado vacuno, desglosado por sexo, edad y propósito, además de registrar los nacimientos y pérdidas de animales según su causa, como se muestra en la Tabla 9. Para la ganadería porcina, se reporta la cantidad de animales según su propósito y fase productiva, junto con indicadores de eficiencia como los partos por hembra, los días de destete y el intervalo entre destete y preñez.

Tabla 9. Total de ganado vacuno por sexo, según propósito (INEC, 2024).

Propósito	Total	Sexo	
		Machos	Hembras
Total	1 510 563	420 620	1 089 943
Carne	901 299	325 247	576 052
Leche	284 904	16 505	268 399
Doble propósito	322 599	77 107	245 492
Trabajo ^{1/}	1 761	1 761	-

La estimación del hato de ganado porcino indica que el 88,5 % se destina a la producción de carne, mientras que el 11,5 % restante corresponde a porcinos destinados a la reproducción. La Figura 73 presenta la distribución porcentual del ganado porcino de carne según la fase productiva, y la Figura 74 muestra la distribución porcentual del ganado porcino reproductor según el sexo.

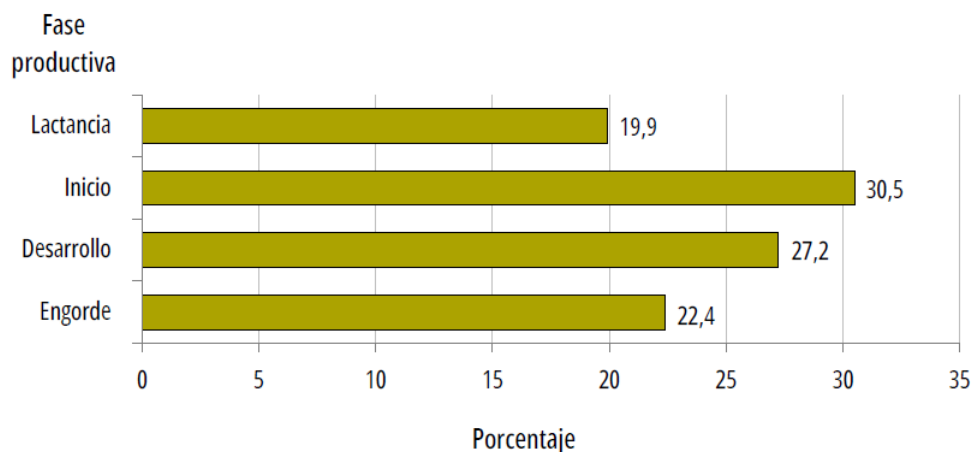


Figura 73. Distribución porcentual del ganado porcino de carne, según fase productiva (INEC, 2024).

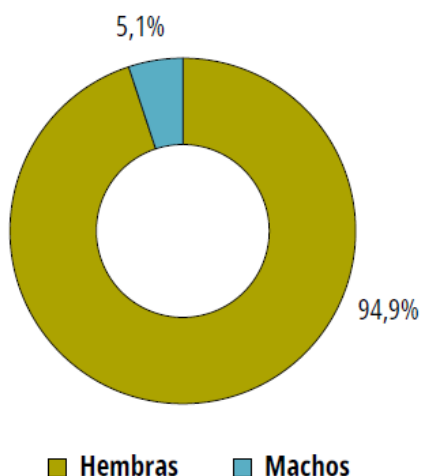


Figura 74. Distribución porcentual del ganado porcino de reproducción, según sexo (INEC, 2024).

Asimismo, la ENA proporciona información valiosa sobre las pérdidas de ganado vacuno en Costa Rica, permitiendo identificar las principales causas que afectan al sector. La siguiente Tabla 10 detalla el total de reses pérdidas durante el año 2023, clasificadas por edad y motivo de pérdida. Además de registrar pérdidas por enfermedades, robo y ataques de animales, estas encuestas resaltan el impacto de factores climáticos como inundaciones y sequías, ofreciendo una visión más completa de los desafíos que enfrenta la ganadería.

Por otro lado, en el caso del ganado porcino, la información se presenta según su propósito (producción de carne o reproducción), pero no se detalla por causa de pérdida, lo que limita el análisis de los factores específicos que afectan a este sector.

Tabla 10. Total de pérdidas de ganado vacuno por edad, según principal causa de pérdida, 2023

Causas de pérdida	Total	Edad		
		Menores de 1 año	De 1 a menos de 2 años	De 2 años y más
Total	63 640	20 519	11 913	31 208
Robo, hurto, destace	11 148	582	963	9 603
Pocas lluvias (sequía)	816	-	31	785
Plagas y enfermedades	27 648	13 962	5 671	8 015
Inundaciones	38	3	-	35
Accidentes (quebraduras, golpes)	9 482	2 039	1 564	5 879
Ataques de animales (felinos, serpientes)	10 959	2 531	3 095	5 333
Otra	3 549	1 402	589	1 558

4.17.2 VI Censo Nacional Agropecuario (2014)

Además de la información presentada en la sección 4.16.2, el Censo Nacional Agropecuario de 2014 proporciona datos sobre las actividades pecuarias en Costa Rica. La investigación censal abarca distintos tipos de ganado, incluyendo bovino, caprino, ovino, porcino y aves de corral, entre otros. Los resultados del censo, que reflejan el número de fincas y la cantidad de animales, se presentan en la Figura 75.

Actividad	Total de fincas	Total de animales
Ganado vacuno	37 171	1 278 817
Ganado caprino	2 348	12 852
Ganado ovino	1 792	35 800
Ganado porcino	14 355	435 243
Ganado asnal	482	1 349
Ganado bufalino	247	4 380
Ganado caballar	19 695	66 942
Ganado mular	880	2 730
Aves de corral ^{2/}	36 752	18 589 455

1/ Una misma finca puede presentar una o más actividades pecuarias, por lo que quedaría contabilizada en varias categorías.

2/ Incluye pollos, pollas, gallos y gallinas, y no incluye otras aves de corral como carracos, chompipes, codornices, gansos, patos u otros.

Figura 75. Tipo de actividad pecuaria por total de fincas y cantidad de animales

El documento proporciona información principalmente a nivel nacional y provincial, con algunos datos disponibles a escala cantonal. Por ejemplo, desde la Figura 76 muestra el número de cabezas de ganado vacuno.

Además, para el ganado bovino, se incluyen datos sobre el total de fincas que los crían, desglosados según la cantidad de animales y el tamaño del hato.

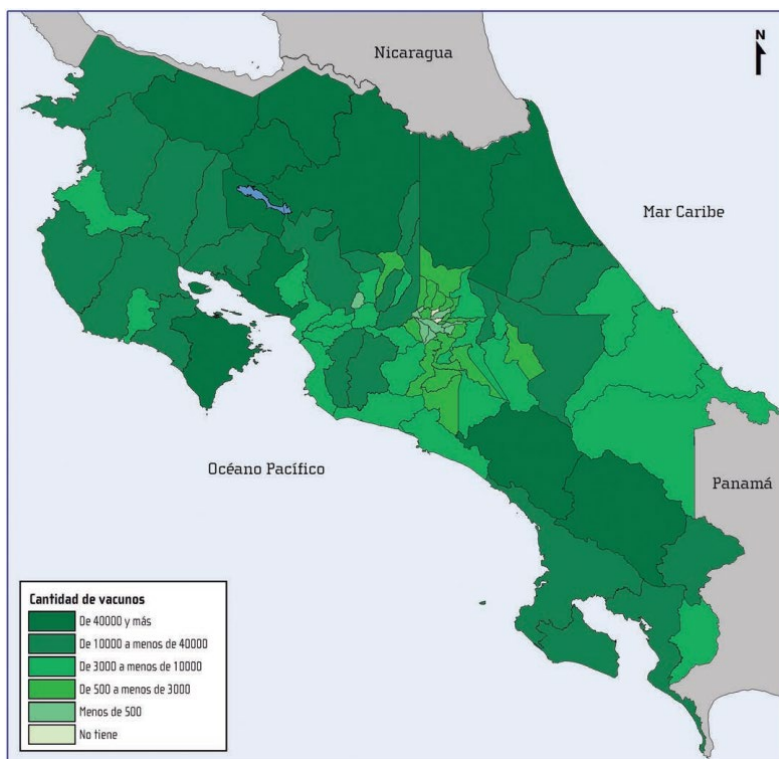


Figura 76. Distribución de cantidad de animales de ganado vacuno por cantón

4.18 Vulnerabilidad física de edificaciones

La vulnerabilidad de los elementos expuestos se define mediante funciones matemáticas que relacionan la intensidad con el impacto físico directo. Estas funciones se denominan funciones de vulnerabilidad y deben ser estimadas y asignadas para cada uno de los tipos de activos identificados en la base de datos de exposición. A continuación, se indican las fuentes y estudios que pueden ser consultados, en el marco de los cuales se estudiaron y desarrollaron funciones de vulnerabilidad para los distintos sistemas estructurales presentes en la región y para las amenazas estudiadas. Es importante resaltar que se cuenta con estas funciones ya que son desarrolladas por el mismo consultor o son de libre acceso.

4.18.1 CAPRA ROBOT

CAPRA ROBOT cuenta con una biblioteca de funciones de vulnerabilidad generadas específicamente para las clases de construcción típicas en la región de América Latina y el Caribe. Esta biblioteca incluye funciones de vulnerabilidad ante sismos, vientos fuertes, marejadas ciclónicas e inundaciones. Se pueden consultar más detalles en ERN-AL(2009).

En la Figura 77 se presenta un ejemplo de estas librerías de funciones de vulnerabilidad desarrolladas para diferentes sistemas estructurales, en este caso para la amenaza de sismo.

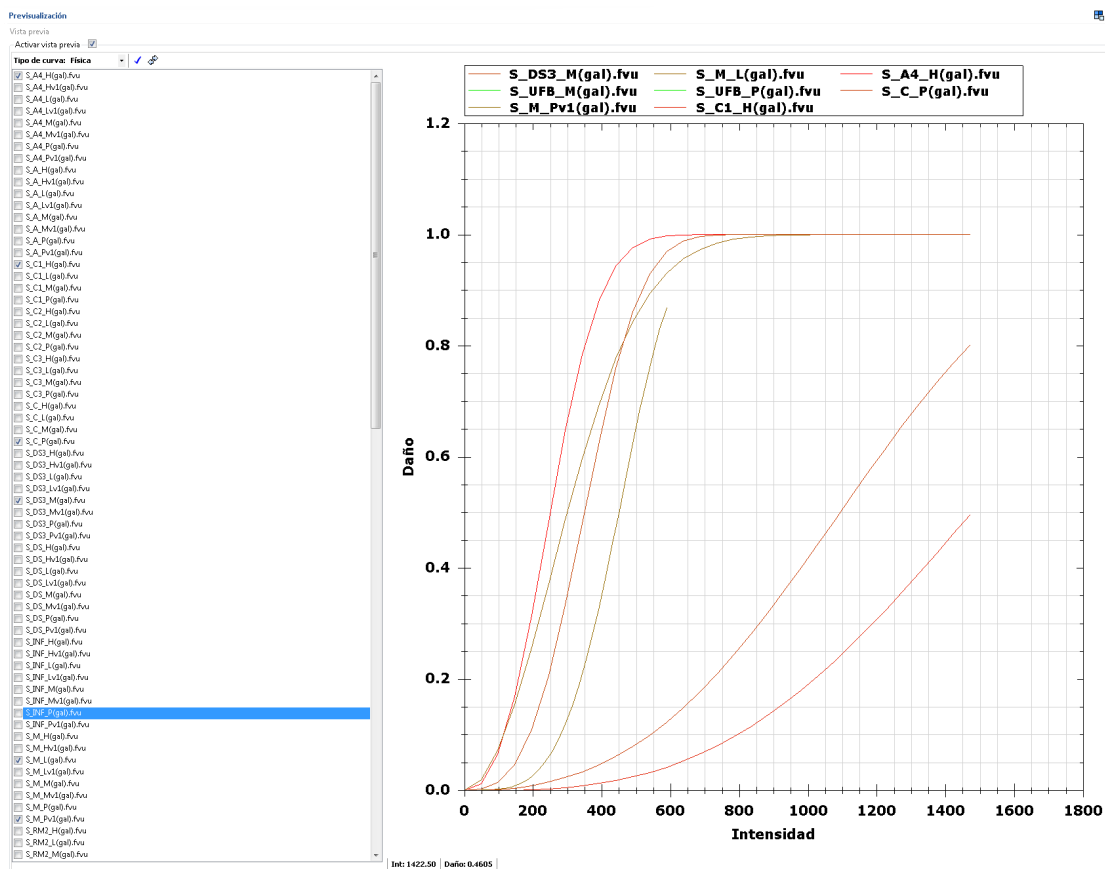


Figura 77. Librería de funciones de vulnerabilidad para edificaciones – Proyecto CAPRA

4.18.2 GAR15

En el marco del proyecto GAR15 se realizó una regionalización de la vulnerabilidad para captar las diferentes características de la construcción en las distintas regiones del mundo, tomando como base los estudios e información regional disponible, como resultado se tienen librerías de funciones para las diferentes amenazas como la presentada en la Figura 78. Se pueden consultar más detalles en INGENIAR (2014).

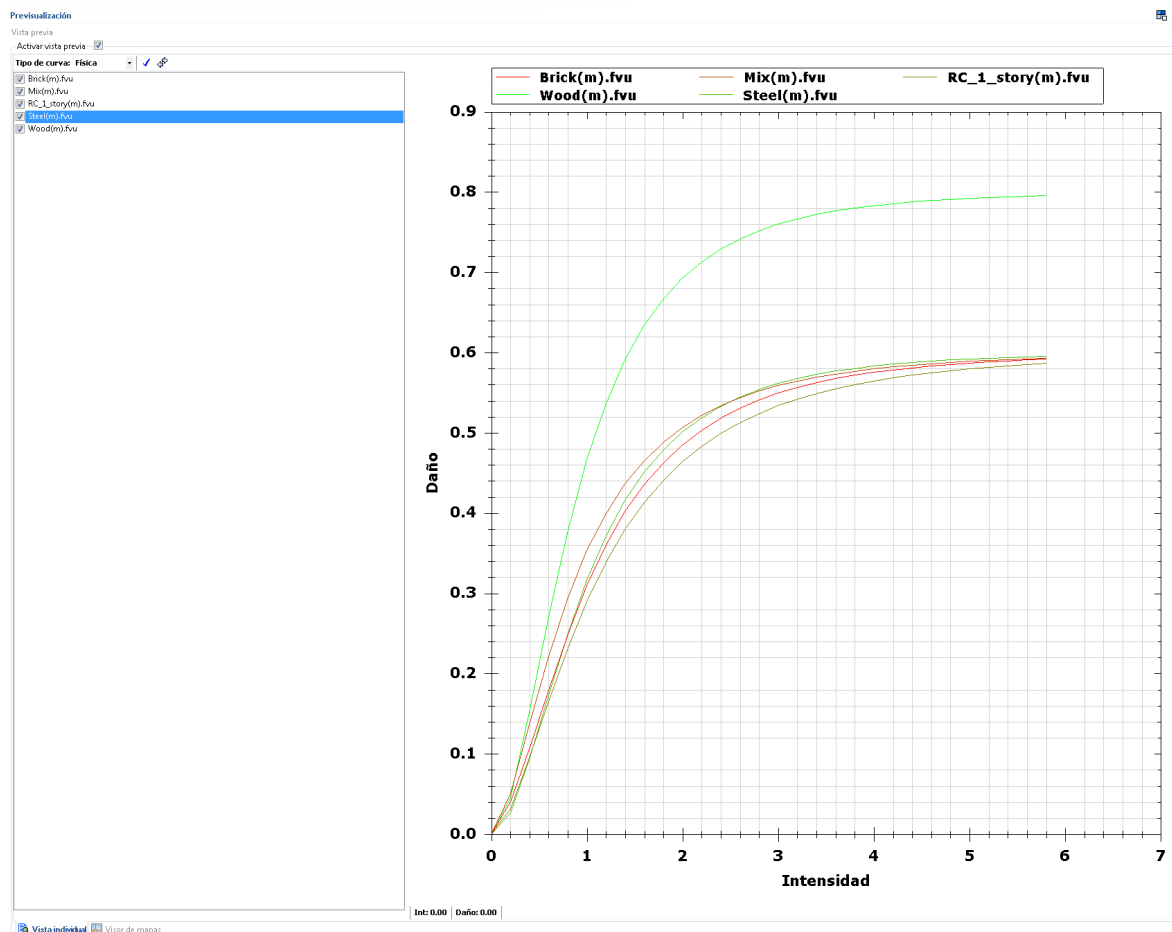


Figura 78. Librería de funciones de vulnerabilidad para edificaciones – Proyecto GAR15

4.18.3 Vulnerabilidad para la amenaza de tsunami

La principal fuente de datos para la modelación de vulnerabilidad ante la amenaza de tsunami es el trabajo de Suppasri et al. (2013). Este trabajo define funciones de fragilidad basadas en datos recopilados del tsunami del Gran Terremoto del Este de Japón de 2011. Las funciones de fragilidad fueron convertidas en funciones de vulnerabilidad siguiendo el mismo procedimiento que para las funciones de terremotos de HAZUS descritas en CIMNE et al. (2012).

4.19 Vulnerabilidad física de infraestructura

Para el caso de elementos de infraestructura se emplean funciones de vulnerabilidad para describir el daño. Estas funciones se definen a partir de arquetipos, que es un enfoque que permite considerar una serie de complejidades en los elementos, que no es posible capturar de otra manera para la escala de trabajo.

Los arquetipos de vulnerabilidad son representaciones simplificadas de los elementos de infraestructura, compuestos por una serie de elementos que se considera dan cuenta de las características y complejidad

del elemento, y que en conjunto permiten al elemento prestar el servicio para el cual fue concebido. A cada elemento del arquetipo se le asigna una función de daño, de acuerdo con su clasificación según las características básicas que lo definen dentro del contexto de esta metodología. Estas características son:

- Tipo: el elemento se clasifica según su naturaleza, entre construcción u obra civil (diferente a edificación), edificación, equipo mecánico, equipo eléctrico, equipo electromecánico o mobiliario.
- Protegido: establece si el elemento se encuentra protegido, ante un peligro específico, por parte de otro elemento del arquetipo.
- Enterrado: determina si el elemento se encuentra bajo el nivel del terreno en el arquetipo.
- Hermético: define si se trata o no de un elemento hermético al agua.
- Nivel de referencia: corresponde a la posición vertical en el arquetipo en la cual se encuentra el elemento (el nivel corresponde al número del piso en edificaciones).
- Altura: establece la altura a la cual se encuentra el elemento en el arquetipo, con respecto a su nivel de referencia.
- Cimentación: define el tipo de cimentación del elemento, entre flexible, superficial y profundo. Aplica para edificaciones y obras civiles únicamente.
- Sistema estructural / material: establece el tipo de sistema estructural o material del elemento.
- Participación: corresponde a la participación en costo del elemento dentro de todo el arquetipo.

A partir de estas categorías, se asignan las funciones de daño de cada elemento, las cuales se totalizan para el arquetipo de acuerdo con la *participación* de cada elemento en el total.

4.20 Vulnerabilidad física de la red vial

La vulnerabilidad física de una vía se puede definir por medio de la metodología de arquetipos a partir de la segmentación y clasificación de vías por vulnerabilidad de acuerdo con sus atributos. Se puede generar una combinación de clasificaciones de vulnerabilidad de acuerdo con los atributos a considerar en la segmentación; por ejemplo, en un portafolio con dos clasificaciones de vías (nacional - local) y tres categorías de terreno (plano, ondulado, escarpado) se pueden generar seis tipologías que tienen diferente participación en cada uno de sus elementos. Para la estimación de las curvas de vulnerabilidad se parte de una tipología de tramo general, en la cual se define valores de participación para cada elemento de la vía. La Figura 79 ilustra la tipología base y los elementos que la componen. La Tabla 11 presenta la participación de cada componente dentro de cada uno de los arquetipos que corresponden a tramos viales.

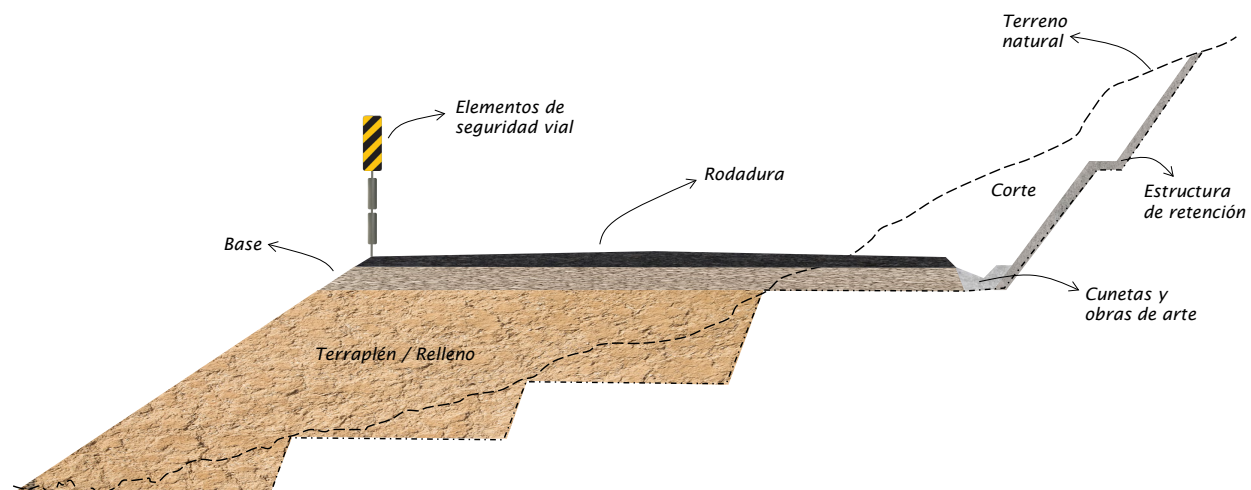


Figura 79. Vista transversal de la tipología base de tramo vial

Tabla 11. Participación de elementos de la tipología base en los arquetipos de tramos viales

Elemento	V1	V2	V3	V4	V5	V6
Rodadura	66%	46%	29%	75%	54%	32%
Base	17%	18%	11%	9%	11%	6%
Terraplén	9%	17%	30%	8%	14%	33%
Obras de arte	6%	7%	9%	6%	7%	9%
Retención	0%	9%	17%	0%	11%	15%
Seguridad vial	2%	3%	4%	2%	3%	5%

La Figura 80. Curvas de vulnerabilidad para seis tipologías base de tramo vial muestra funciones de vulnerabilidad estimadas ante inundaciones para seis arquetipos de tramos.

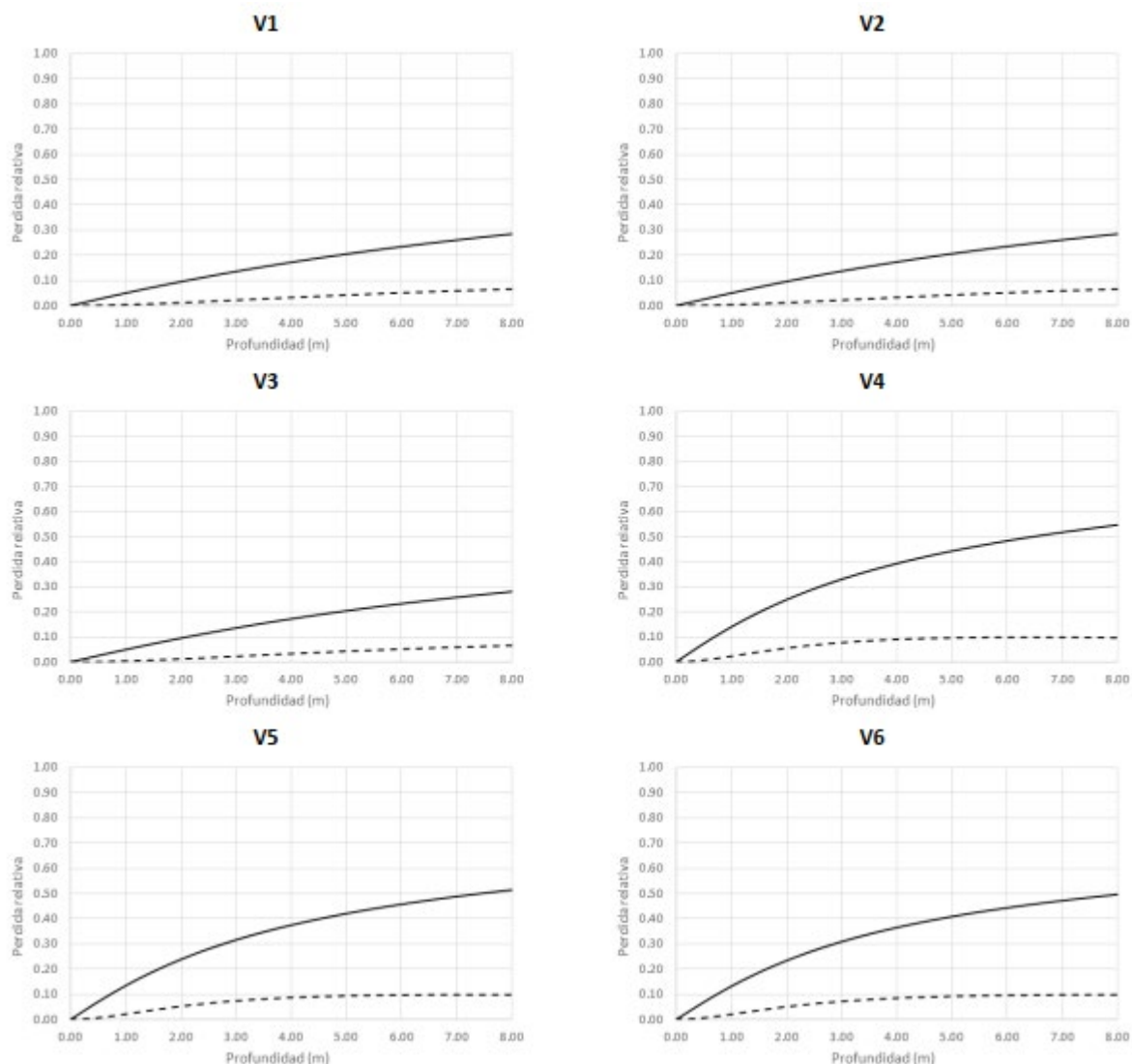


Figura 80. Curvas de vulnerabilidad para seis tipologías base de tramo vial

4.21 Vulnerabilidad física de los cultivos

En Costa Rica, existen estudios y metodologías que evalúan la vulnerabilidad de cultivos como el café y la caña de azúcar frente a fenómenos hidrometeorológicos extremos, como sequías e inundaciones.

El Manual de Evaluación y Capacitación en Vulnerabilidad y Adaptación en Café del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE, 2018d). Este documento proporciona una metodología práctica para evaluar el nivel de vulnerabilidad de las unidades productivas cafetaleras frente al cambio climático, incluyendo aspectos relacionados con sequías e inundaciones.

En el documento “Prácticas efectivas para la reducción de impactos por eventos climáticos” para el cultivo de café y caña de azúcar (CATIE, 2018a; 2018b), el Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG) proporciona información importante sobre las características del cultivo, fases fenológicas, prácticas para

la preparación del suelo, control de malezas, métodos de siembra y fertilización. Además de ubicación espacial e información sobre sensibilidad del cultivo.

Según el informe “Las condiciones de sequía y estrategias de gestión en Costa Rica” (Soto, 2013), las zonas con mayor riesgo de eventos de sequía extremos se encuentran en el Pacífico Norte y la Zona Norte hacia el lago de Nicaragua. Estas áreas experimentan escurrimientos tanto superficiales como subterráneos por debajo del promedio, afectando la humedad del suelo y, por ende, la producción agrícola.

Adicionalmente, a partir de revisión de literatura se generan características propias para cada cultivo, necesarias para la modelación del desarrollo del cultivo usando la metodología del programa Aquacrop de la FAO. Estos parámetros permiten describir las variables de cada cultivo y comprenden parámetros como la duración del ciclo de cultivo, coeficiente de cultivo (Kc), eficiencia en el uso del agua y sensibilidad al estrés hídrico, que influyen en el rendimiento y la respuesta del cultivo al agua disponible. A continuación, se presenta una lista de las diferentes variables y su descripción.

Tabla 12. Variables en los modelos de cultivo

Variable	Descripción	Unidad
CropType	Tipo de cultivo: '1' - Vegetales de hoja, '2' - Raíz/tubérculo, '3' - Fruto/grano	[-]
CalendarType	Determinación del ciclo de crecimiento: '1' - Días calendario, '2' - Grados diarios acumulados de crecimiento (GDD)	[-]
SwitchGDD	Convertir días calendario a GDD ('0': No; '1': Si)	[-]
PlantingDate	Fecha de siembra	(dd/mm)
HarvestDate	Último día de cosecha	(dd/mm)
Emergence	Tiempo desde la siembra hasta la germinación	días o GDD
MaxRooting	Tiempo desde la siembra hasta alcanzar la mayor profundidad de la raíz	días o GDD
Senescence	Tiempo desde la siembra hasta la senescencia	días o GDD
Maturity	Tiempo desde la siembra hasta la madurez	días o GDD
Hlstart	Tiempo desde la siembra hasta la formación del rendimiento	días o GDD
Flowering	Duración de la floración (-999 para cultivos que no sean frutos/granos)	días o GDD
YldForm	Duración de la formación del rendimiento	días o GDD
GDDmethod	Método utilizado para el cálculo del GDD: '1': $T_{avg} = (T_x + T_n) / 2$; '2': $T_{avg} = (T * x + T * n) / 2$; '3': $T_{avg} = (T * x + T_n) / 2$	[-]
Tbase	Temperatura base por debajo de la cual el cultivo deja de desarrollarse	[°C]
Tupp	Umbral superior de temperatura sobre la cual el cultivo deja de desarrollarse	[°C]
PolHeatStress	Polinización afectada por estrés por calor (0: No; 1: Si)	[-]
Tmax_up	Temperatura máxima del aire sobre la cual la polinización comienza a fallar	[°C]
Tmax_lo	Temperatura máxima del aire en la cual la polinización falla completamente	[°C]
PolColdStress	Polinización afectada por estrés por frío (0: No; 1: Si)	[-]
Tmin_up	Temperatura máxima del aire debajo de la cual la polinización comienza a fallar	[°C]
Tmin_lo	Temperatura del aire debajo de la cual la polinización falla completamente	[°C]
BioTempStress	Producción de biomasa afectada por estrés por temperatura (0: No; 1: Si)	[-]
GDD_up	GDD mínimos requeridos para la producción total de biomasa	[°C/día]
GDD_lo	GDD en la cual no se produce la producción de biomasa	[°C/día]
fshape_b	Factor de forma describiendo la reducción en la producción de biomasa por insuficientes GDD	[-]

Variable	Descripción	Unidad
PctZmin	Porcentaje inicial de la profundidad mínima efectiva de la raíz	[%]
Zmin	Profundidad mínima efectiva de la raíz	[m]
Zmax	Profundidad máxima de la raíz	[m]
fshape_r	Factor de forma describiendo la expansión de la raíz	[-]
fshape_ex	Factor de forma describiendo los efectos de estrés hídrico en la expansión de la raíz	[-]
SxTopQ	Máxima extracción de agua en la zona superior de la raíz	[m ³ /m ³ /día]
SxBotQ	Máxima extracción de agua en la zona inferior de la raíz	[m ³ /m ³ /día]
a_Tr	Parámetro que describe el efecto del decrecimiento del dosel en la capacidad de transpiración/fotosíntesis de la planta	[-]
SeedSize	Superficie de suelo cubierta por una planta al 90% de germinación	[cm ²]
PlantPop	Número de plantas por hectárea	[Plantas/ha]
CCmin	Fracción del dosel mínima para asegurar la formación de la cosecha	[fracción del dosel]
CCx	Cobertura máxima del dosel	[fracción de cobertura del suelo]
CDC	Coeficiente de decrecimiento de la cobertura	[fracción por día/GDD]
CGC	Coeficiente de crecimiento de la cobertura	[fracción por día/GDD]
Kcb	Coeficiente del cultivo cuando el crecimiento del dosel está completo, pero antes de la senescencia	[-]
fage	Coeficiente de disminución del cultivo debido a la edad	[%/día]
WP	Productividad hídrica normalizada para ET ₀ y CO ₂	[g/m ²]
WP _y	Ajuste a productividad hídrica normalizada por ET ₀ y CO ₂ durante formación de cosecha	[% de WP]
fsink	Evaluación de la capacidad de absorción y respuesta al CO ₂ de cada cultivo. Cereales (Maíz, Arroz, Trigo, Girasol, Sorgo): entre 0 y 0.2 Legumbres (Soja, Frijol): entre 0.2 y 0.4 No determinados (tomate, quinoa): entre 0.4 y 0.6 Raíces y tubérculos (Papa, Remolacha): entre 0.6 y 0.8	[-]
bsted	Ajuste de la productividad hídrica por CO ₂ , dado por Steduto et al. 2007	[-]
bface	Ajuste de WP según ensayos en laboratorio (FACE experiments)	[-]
HI ₀	Índice de cosecha de referencia	[-]
HI _{ini}	Índice de cosecha inicial	[-]
dHI_pre	Incremento posible del índice de cosecha debido al estrés hídrico antes de la floración	[%]
a_HI	Coeficiente que describe el impacto positivo en HI por cierre de los estomas durante la formación de la cosecha	[-]
b_HI	Coeficiente que describe el impacto negativo en HI por cierre de los estomas durante la formación de la cosecha	[-]
dHI ₀	Incremento máximo permitido del índice de cosecha sobre la referencia	[-]
Determinant	Producción del cultivo asociada a floración ('0': Indeterminado, '1': Determinado)	[-]
exc	Exceso de frutas potenciales	[%]
MaxFlowPct	Porcentaje del periodo de florecencia total en el que el pico de flores ocurre	[%]
p_up1	Umbral superior de agotamiento del agua del suelo para los efectos del estrés hídrico en la expansión del dosel afectado	[0 - 1]
p_up2	Umbral superior de agotamiento del agua en el suelo para efectos de estrés hídrico en el control estomático del dosel	[0 - 1]
p_up3	Umbral superior de agotamiento del agua para los efectos del estrés hídrico en la senescencia del dosel	[0 - 1]
p_up4	Umbral superior de agotamiento del agua en el suelo para los efectos del estrés hídrico en la polinización del dosel	[0 - 1]
p_lo1	Umbral inferior de agotamiento del agua del suelo para los efectos del estrés hídrico en la expansión del dosel afectado	[0 - 1]
p_lo2	Umbral inferior de agotamiento del agua en el suelo para efectos de estrés hídrico en el control estomático del dosel	[0 - 1]

Variable	Descripción	Unidad
p_lo3	Umbral inferior de agotamiento del agua para los efectos del estrés hídrico en la senescencia del dosel	[0 - 1]
p_lo4	Umbral inferior de agotamiento del agua en el suelo para los efectos del estrés hídrico en la polinización del dosel	[0-1]
fshape_w1	Factor de forma describiendo los efectos del estrés hídrico en la expansión del dosel	[-]
fshape_w2	Factor de forma describiendo los efectos del estrés hídrico en el control estomático	[-]
fshape_w3	Factor de forma describiendo los efectos del estrés hídrico en la senescencia del dosel	[-]
fshape_w4	Factor de forma describiendo los efectos del estrés hídrico en la polinización	[-]
ETadj	Ajuste al umbral de estrés hídrico dependiendo de la ETO diaria (0: 'No', 1: 'Si')	[-]
Aer	Volumen debajo de la saturación en la cual comienza el estrés debido al déficit por aireación	[%]
LagAer	Número de días para considerar estrés por falta de aireación	días
beta	Reducción del umbral inferior de disponibilidad de agua en suelo cuando la senescencia inicia por estrés hídrico	[%]
GermThr	Proporción del agua disponible total necesaria en la zona radicular para que el cultivo germine	[0 - 1]

4.22 Vulnerabilidad del sector pecuario

El modelo de vulnerabilidad de este estudio sigue la metodología utilizada en investigaciones internacionales para el cálculo del rendimiento de productos agropecuarios. En este contexto, la vulnerabilidad se define como la pérdida de la capacidad de la pastura para alimentar la carga animal en un determinado sitio, debido a las reducciones en la producción de pastos naturales ocasionadas por eventos de sequía o inundación.

Dado que se emplea un modelo bioeconómico de respuesta de pasturas y crecimiento animal, no se recurrirá al uso de curvas o funciones de vulnerabilidad. Para aplicar este modelo, es fundamental conocer las características de los pastos utilizados en la ganadería de Costa Rica. Según INTA (2022), algunos de los forrajes más comunes incluyen la caña forrajera (*Saccharum* sp.), el pasto Camerún (*Pennisetum* sp.), el pasto Cuba OM 22 (*Pennisetum purpureum* x *Pennisetum glaucum*), y el maíz forrajero, entre otros. Desde la Figura 81 hasta la Figura 83 se presentan ejemplos de estos forrajes, mientras que la Tabla 13 muestra sus principales propiedades.

Adicionalmente, se hace uso de los parámetros característicos de la Tabla 13, pero en este caso sobre el pasto, asignando de acuerdo con la literatura la información para simular de una forma adecuada su desarrollo y así proporcionar el contenido de materia seca que puede generar cada unidad cultivada para alimentar el ganado.



Figura 81. Pasto cuba OM 22, La Garita, Alajuela. INTA (2022).



Figura 82. Caña forrajera utilizada para alimentación animal. EELM del INTA, Quepos. INTA (2022).



Figura 83. Pasto taiwán, Finca Comunidad de Encuentro, Los Reyes, Coto Brus. INTA (2022).

Tabla 13. Fuentes de energía para trópico húmedo y seco. Región Brunca (INTA, 2022).

Fuente	T/ha/año	PC	MS %	DR
Camerún	110-150	13-15	18-20	60
Taiwán	110-130	12-14	20	60
Maralfalfa	120-130	15-16	12-16	55
Caña	120-150	3-8	40-80	10-12 (meses)
Sorgo	160-200	10-12	28	90
Maíz	80-100	8-10	25	90
Cuba OM 22*	200-300	12-14	15-18	55

Fuente: Datos propios generados

*Preferiblemente para Trópico Seco

4.22.1 Mapa de ubicación de pastos

Es importante conocer la ubicación de los pastos en Costa Rica, especialmente considerando su vulnerabilidad (ver sección 4.22). El Censo Agropecuario proporciona información de pastos distribuida por provincia y por cantón (INEC, 2015), en la Figura 84, se presenta la distribución de la extensión de pastos por cantón. En la sección 4.16.3 de mapas de cobertura, se encuentra información más detallada sobre los pastos.

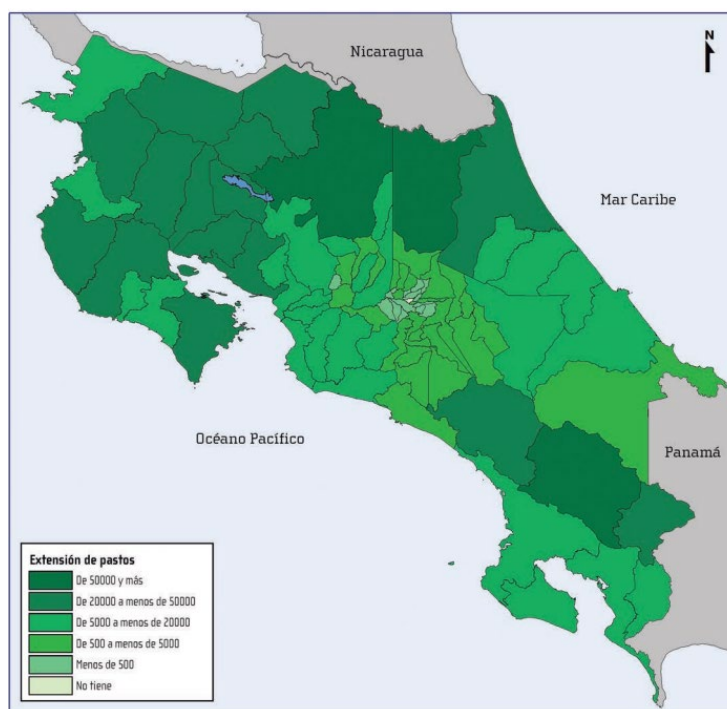


Figura 84. Distribución de la extensión de pastos por cantón (INEC, 2015).

4.23 Resumen de fuentes de información y datos asociados

Las fuentes de información y los datos asociados presentados en detalle previamente en esta sección se consolidan en las tablas a continuación.

4.23.1 Clima

Tabla 14. Fuentes de información sobre clima para Costa Rica

Fuente	Nombre	Descripción	Enlace de descarga
Instituto Meteorológico Nacional (IMN)	Estaciones Meteorológicas Automáticas	Temperatura, humedad relativa, presión atmosférica, velocidad y dirección del viento, precipitación.	https://www.imn.ac.cr/web/imn/estaciones-automaticas
	Mapa Interactivo	Información promedio mensual de precipitación, temperatura y viento.	https://www.imn.ac.cr/web/imn/mapa#c29tZUhhc2hUaGF0RG9lc250RXhpc3Q
CHIRPS ³	Conjuntos de datos basados en satélite	Registros diarios de precipitación. Series temporales de alta resolución adecuadas para análisis de tendencias climáticas y monitoreo estacional de sequías. Formato ráster (.tiff), resolución espacial: 0.05° x 0.05°.	Descarga gratuita: https://www.chc.ucsb.edu/data/chirps
ERAS – Servicio de Cambio Climático de Copernicus	Datos meteorológicos globales	Datos históricos y casi en tiempo real con alta resolución espacial y temporal. Incluye precipitación, temperatura (media, mínima, máxima), radiación solar, humedad específica, presión del aire en superficie y velocidad del viento. *Variables ajustadas por cambios de elevación. Formato ráster (rejilla y NetCDF).	Descarga gratuita: https://cds.climate.copernicus.eu

³ Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data

4.23.2 Cambio Climático

Tabla 15. Fuentes de información sobre cambio climático para Costa Rica

Fuente	Nombre	Descripción	Enlace de descarga
Instituto Meteorológico Nacional (IMN)	Escenarios de Cambio Climático	Trayectorias de concentración de gases de efecto invernadero (RCP): RCP2.6 y RCP8.5. Tres períodos climáticos: 2010–2039, 2040–2069, 2070–2099.	http://cglobal.imn.ac.cr/
Servicio de Cambio Climático de Copernicus (Modelos CMIP)	Proyecto de Comparación de Modelos Acoplados (CMIP)	Datos globales de proyección climática (diarios y mensuales). Incluye precipitación, temperatura, velocidad y dirección del viento, evapotranspiración, humedad y nivel del mar.	https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/projects-cmip6?tab=download

4.23.3 Amenaza

4.23.3.1 Amenaza de inundación

La información disponible de la siguiente tabla es útil para la modelación de la amenaza de inundación a nivel nacional y para el análisis específico del río Pirro.

Tabla 16. Fuentes de información del sector de agua y cuencas para Costa Rica

Fuente	Nombre	Descripción	Enlace de descarga
Sistema Nacional de Información Territorial (SNIT)	Visor de Capas de Agua y Saneamiento – Sistema Nacional de Información para la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (SINIGIRH)	Información sobre el sector hídrico y cuencas hidrográficas	https://www.arcgis.com/apps/dashboards/71b40ee586b6439ba343ad1af1ebee1c
	Capa vectorial de cauces de ríos	Líneas de drenaje principales y secundarias a nivel nacional	

4.23.3.2 Amenaza sísmica

Dentro del marco de este proyecto no es necesario llevar a cabo una modelación de amenaza sísmica adicional. Por lo tanto, se usará información disponible de esfuerzos previos.

Tabla 17. Estudios de amenaza sísmica para Costa Rica

Nombre	Fuente	Descripción
RESIS II	NORSAR et al. (2008)	Evaluación de amenaza sísmica para los países de América Central
CAPRA	ERN-AL (2009)	Evaluación de riesgo sísmico para San José, Costa Rica (amenaza basada en RESIS II)
ASLAC	Salgado-Gálvez et al. (2018)	Modelo avanzado de amenaza sísmica para América Latina y el Caribe
Modelo de Amenaza Sísmica de Costa Rica	Hidalgo Leiva et al. (2022)	Evaluación probabilista más reciente de amenaza sísmica para Costa Rica

4.23.3.3 Amenaza de deslizamiento

Para complementar y mejorar el modelo de deslizamientos actualmente disponible para Costa Rica, desarrollado por INGENIAR. Este modelo se basa en investigaciones y conocimientos locales, incorporando elementos del método de Mora y Vahrson (1994) para la evaluación de la susceptibilidad a deslizamientos, originalmente desarrollado por Sergio Mora de la Universidad de Costa Rica. Sobre esta base, la propuesta busca aumentar el nivel de detalle del modelo mediante la integración de capas nuevas y actualizadas de factores predisponentes, fortaleciendo así la evaluación y cuantificación de la susceptibilidad a deslizamientos, con el fin de mejorar la gestión del riesgo y la toma de decisiones en políticas públicas.

Tabla 18. *Datasets* e información útil para la actualización del modelo de deslizamientos

Nombre	Fuente	Descripción	Enlace de descarga/visor
Catálogo de deslizamientos	SNIT	Inventario histórico que incluye actividades de movimiento en masa, distribución espacial, procesos y características	Enlace de descarga: https://www.snitcr.go.cr/ico_servicios_ogc_info?k=bm9kbzo6NDU=&nombre=CNE
Visor de amenaza por deslizamientos		Visor cartográfico interactivo	Visor de mapas: https://www.snitcr.go.cr/Visor/visor
Amenaza por deslizamientos en Costa Rica	Proyecto de la Escuela Centroamericana de Geología, UCR (1996–2003)	Mapas de amenaza por deslizamientos que cubren partes significativas de Costa Rica	No accesible públicamente
Proyecto RECLAIMM/CEPREDE NAC-Noruega	CEPREDENAC/Noruega	Mapas de susceptibilidad considerando geología, pendiente, uso del suelo y patrones de precipitación	Acceso limitado
Mapas de amenaza	CNE	Áreas propensas a deslizamientos incluidas en la modelación de amenaza	https://www.cne.go.cr/red_uccion_riesgo/mapas_amezas/
Mapa de susceptibilidad basado en LiDAR	Ruiz Cubillo y Soto (2014)	Mapas detallados geomorfológicos, geológicos y de	

		deslizamientos para las colinas de Escazú	
Modelo CDRI-GIRI	Liderado por INGENIAR	Escenarios estocásticos de deslizamientos inducidos por terremotos o precipitaciones (incluye cambio climático)	

4.23.3.4 Amenaza Volcánica

Tabla 19. Información sobre amenaza volcánica para Costa Rica

Nombre	Fuente	Descripción
Amenaza volcánica para 9 volcanes activos en Costa Rica	CAPRA – ERN-AL, actualizado por Ingeniar/CAPRA ROBOT	Modelación determinista de caída de ceniza, lahares y flujos piroclásticos
Estudios nacionales de amenaza volcánica	Alvarado et al. (2020a, 2021, 2022, 2023), ICE, CNE, UNA	Análisis actualizados de amenaza para los volcanes Poás, Irazú, Arenal y Rincón de la Vieja

4.23.3.5 Amenaza por sequía

Tabla 20. Información sobre sequía para Costa Rica

Nombre	Fuente	Descripción	Enlace de descarga
Patrones de sequía en Centroamérica	Soto (2013)	Distribución espacial y temporal de la sequía	
Monitoreo de sequía	OACG	Variables climáticas monitoreadas cada 30 minutos	
Indicadores de sequía	Quesada-Hernández et al. (2020)	Índices para sequía meteorológica, agrícola e hidrológica	
Mapas de suelos	SNIT, FAO/UNESCO, IIASA/FAO	Clasificación detallada de suelos, propiedades morfológicas, químicas y físicas	https://www.fao.org/soils-portal/data-hub/soil-maps-and-databases/harmonized-world-soil-database-v20/en/

4.23.3.6 Amenaza de ciclones tropicales

Para evaluar la amenaza por ciclones tropicales, se aplicará un enfoque metodológico basado en la simulación de trayectorias de huracanes. El desarrollo del modelo de amenaza requiere diversos conjuntos de datos que contienen información sobre las trayectorias de los ciclones, la topografía y la batimetría. A continuación, se describen las fuentes de datos identificadas.

Tabla 21. Fuentes de información sobre ciclones tropicales

Nombre	Fuente	Descripción	Enlace de descarga
Trayectorias históricas - Base de datos IBTrACS	NOAA	Trayectorias históricas de ciclones y sus características	https://www.ncei.noaa.gov/products/international-best-track-archive
Trayectorias futuras simuladas	Bloemendaal et al. (2020)	Conjunto de datos STOR que proporciona 10,000 años simulados de trayectorias de ciclones	
Batimetría	GEBCO	Modelo batimétrico global continuo	https://download.gebco.net/

4.23.3.7 Amenaza de tsunami

Para evaluar el peligro asociado a ciclones tropicales, se aplicará un enfoque metodológico basado en la simulación de trayectorias de huracanes. El desarrollo del modelo de peligro requiere diversos conjuntos de datos que contienen información sobre las trayectorias de los ciclones, la topografía y la batimetría. A continuación, se describen las fuentes de datos identificadas.

Tabla 22. Modelos de tsunami

Nombre	Fuente	Descripción
Evaluación del riesgo de tsunami – Costa Pacífica de Costa Rica	CAPRA (2009)	Terremotos históricos y simulados
Modelo GAR-GIRI	INGENIAR - NGI	Modelo probabilista global de peligro por tsunami

4.23.3.8 Amenaza de aumento del nivel del mar

Tabla 23. Modelos de tsunami

Nombre	Fuente	Descripción	Enlace de descarga
Proyecciones de erosión costera	IMN	Escenarios para las costas del Pacífico y Caribe	
Guía metodológica		Proporciona un marco práctico para realizar estudios sobre el aumento del nivel del mar y la erosión costera en Costa Rica	
Servicio de Cambio Climático de Copernicus (Modelos CMIP)	Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP)	Datos de proyecciones climáticas globales (diarios y mensuales). Incluye precipitación, temperatura, velocidad y dirección del viento, evapotranspiración, humedad y nivel del mar.	https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/projects-cmip6?tab=download

4.23.4 Topografía

Dentro del modelo de inundación local, es fundamental contar con información topográfica de la cuenca que alimenta el río o canal en estudio, tanto para el componente hidrológico como para el modelo hidrodinámico. Aunque existen diversas bases de datos con información topográfica disponible, la

selección final dependerá del nivel de detalle requerido para el análisis, considerando el equilibrio costo-beneficio entre la resolución del modelo y el tiempo de cómputo, en relación con la capacidad computacional disponible.

Tabla 24. Fuentes para descargar modelos de elevación digital

Fuente	Nombre	Resolución	Enlace de descarga
GTOPO 30	Datos de elevación regional de baja resolución	30 segundos de arco (1 km)	https://earthexplorer.usgs.gov/
SRTM	Misión de Topografía por Radar Shuttle	3 segundos de arco (90 m)	https://search.earthdata.nasa.gov/
ASTER	Emisión Térmica y Reflexión Avanzada desde Satélite	1 segundo de arco (30 m)	https://search.earthdata.nasa.gov/
ALOS-PALSAR	Satélite de Observación Terrestre Avanzado-1	12.5 m	https://search.asf.alaska.edu/#/

4.23.5 Proyecto Estratégico: Demostración de Métodos de Evaluación de Riesgos para Infraestructura Crítica en Heredia

4.23.5.1 Información Adicional sobre Amenazas

Insumos adicionales para las amenazas consideradas en el proyecto estratégico en el cantón de Heredia

Tabla 25. Información adicional de amenaza para el cantón de Heredia

Nombre	Fuente	Descripción
Peligro de Inundación del Río Virilla⁴	SNIT	Canal principal del Río Virilla
Microzonificación Sísmica – Gran Área Metropolitana	Basado en Schmidt et al. (2005) y Arroyo-Solórzano (2023)	Microzonificación para la modelación del riesgo sísmico en la Área Metropolitana de San José

4.23.5.2 Exposición de Edificaciones

La exposición de edificaciones se modela utilizando capas de datos georreferenciadas. Cada activo en el portafolio cuenta con una representación espacial y atributos descriptivos. La información mínima requerida incluye la ubicación geográfica, el valor de reposición y una clasificación de vulnerabilidad. Otros atributos valiosos incluyen el número de pisos, el tipo de uso del edificio, el sistema estructural y los indicadores de riesgo para la población.

Tabla 26. Información de exposición para el cantón de Heredia

Variable	Nombre	Fuente	Descripción
Ubicación	Mapa catastral	UBICA (Municipalidad de Heredia)	Límites de parcelas, ubicación, ID y uso del suelo (no incluye el área construida)
Huellas de edificaciones		SNIT	Cobertura a nivel nacional de bloques edificados, número de pisos, uso del suelo, sistema estructural, etc.

⁴ Dado que el río Pirro es tributario del río Virilla, la información disponible para el río Virilla es útil para la evaluación del riesgo por inundación en el cantón de Heredia.

Modelos de exposición	Modelos de Exposición	Global Risk Assessment Framework (GRAF)	Iniciativa de la UNDRR que proporciona modelos de exposición específicos por sector, incluyendo vivienda
Valor de reposición	Mapa de valores por zona homogénea	UBICA	Valores unitarios por metro cuadrado para zonas definidas
Valores base de construcción	Valores base de construcción	Ministerio de Hacienda de Costa Rica	Valores unitarios para diferentes tipologías constructivas con fines fiscales
Número de pisos	Condominios verticales 3D	UBICA	Altura o número de niveles
Altura de asentamientos	Altura de Asentamientos Humanos	Copernicus GHSL	Distribución espacial de alturas de edificaciones
Uso del edificio	Mapa de uso del suelo	UBICA / Municipalidad de Heredia	Mapa catastral con datos de uso
Uso del edificio	Puntos de interés	UBICA / Municipalidad de Heredia	Ubicación de edificaciones públicas, institucionales y patrimoniales.
Uso del edificio	Áreas públicas	UBICA / Municipalidad de Heredia	Ubicación de edificaciones públicas.
Uso del edificio	Albergues	UBICA / Municipalidad de Heredia	Ubicación de albergues.
Sector salud	Sector Salud	GRAF	Incluye infraestructura del sector salud (datos de la Caja Costarricense de Seguro Social)
Sistema estructural	Censo Nacional de Población y Vivienda	INEC	Material predominante de las paredes (usado como proxy para tipo estructural)
Indicadores de población en riesgo			Datos poblacionales y su distribución espacial

4.23.5.3 Exposición de sectores de infraestructura

Cada cartera de infraestructura debe incluir geometría georreferenciada, estimaciones de costo de reposición y una clasificación de vulnerabilidad. El proyecto de Heredia considera la infraestructura vial, ferroviaria, energética, de telecomunicaciones, y de agua y saneamiento.

Sector vial

Tabla 27. Información disponible para el sector vial del cantón de Heredia

Subsector	Fuente	Descripción
Carreteras y Autopistas	UBICA / Municipalidad de Heredia	Segmentos viales: geometría y clasificación
	OpenStreetMap	Geometría vectorial para vías públicas y privadas; tipo de superficie y número de carriles
	CONAVI	Visor de la red vial nacional (usado para validación y verificación de atributos)
Puentes	LanammeUCR	Identificación de puentes cantonales: ubicación, dimensiones, material y sistema estructural

Ferrocarriles	OpenStreetMap	Identificación de segmentos de puentes dentro de la red vial
	OpenStreetMap	Longitud, ancho y elevación de los segmentos ferroviarios
	Ortofotografía	Imágenes aéreas para identificar características de la superestructura

Sector energía

El sector energético se divide en tres subsectores: generación, transmisión y distribución. Cada uno incluye elementos diversos con requisitos específicos de geometría y atributos.

- **Generación eléctrica:** Incluye plantas de generación dentro y fuera del cantón de Heredia. Se consideran también las plantas fuera del área debido a las interdependencias sistémicas.
- **Transmisión eléctrica:** Comprende subestaciones (geometría de punto) y líneas de transmisión (geometría de línea). El análisis se extiende a nivel provincial para identificar todos los componentes relevantes para el suministro de Heredia.
- **Distribución eléctrica:** El portafolio incluye redes de distribución aéreas y subterráneas, postes de servicios y transformadores—limitado a la infraestructura dentro de Heredia.

Tabla 28. Información disponible para el sector energético del cantón de Heredia y alrededores

Nombre	Fuente	Descripción
Generación eléctrica	GRAF	Dos datasets basados en información de CNFL y ESPH. Incluyen geometría de punto, método de generación y capacidad instalada
	OpenStreetMap	Atributos similares a los de GRAF, incluyendo geometría de punto y especificaciones de la planta
Transmisión	GRAF	Datos de subestaciones y líneas de transmisión
Distribución	ICE	Cobertura del geoportal nacional; incluye subestaciones y líneas de transmisión de alta tensión (138kV y 230kV)
	OpenStreetMap	Ubicación de subestaciones
	ESPH	Dataset oficial: geometría de líneas, tipo de instalación (aérea o subterránea), nivel de voltaje
		Postes eléctricos: Geometría de punto; incluye material, altura y año de instalación
	GRAF	Incluye los mismos atributos que ESPH
		Transformadores: Geometría de punto; incluye ubicación y tipo de instalación (aéreo o pedestal)

Sector de telecomunicaciones

La cartera de exposición en telecomunicaciones se basa en la representación de la infraestructura que soporta tanto los servicios fijos como móviles. Los conjuntos de datos disponibles se centran principalmente en la infraestructura de antenas y en estimaciones inferidas del trazado de la red.

Tabla 29. Información disponible para el sector de telecomunicaciones

Fuente	Descripción de los Datos
OpenCellID	Incluye tipo de red (GSM, UMTS, LTE), radio de cobertura (metros) y frecuencia de identificación. Los métodos de depuración de datos estiman la posición relativa de las antenas usando huellas de edificios y densidad poblacional. Se utiliza para desarrollar clasificaciones diferenciadas de vulnerabilidad.
INEC 2022	No se dispone de datos espaciales públicos sobre redes de internet y telefonía fija en los hogares. La geometría vectorial de la red vial se utiliza como aproximación para estimar el posible trazado de la red de telecomunicaciones dentro del cantón.

Sector de acueducto y alcantarillado

Este sector se divide en dos subsectores: agua potable y sistemas de aguas residuales.

- **Agua potable:** Incluye captaciones de agua, acueductos, plantas de tratamiento de agua potable (PTAP), tanques de almacenamiento, sistemas de bombeo, y redes de distribución y conducción.
- **Aguas residuales:** Incluye la red de saneamiento (alcantarillado sanitario), pozos sanitarios y plantas de tratamiento de aguas residuales.

Es esencial incluir infraestructura tanto dentro como fuera de los límites administrativos de Heredia, ya que los componentes externos pueden desempeñar un papel crítico en la prestación del servicio.

Tabla 30. Información disponible para el sector de acueducto y alcantarillado

Subsector	Fuente	Descripción de los datos
Agua potable	GRAF (basado en datos de EPSH)	Incluye la mayoría de los atributos necesarios para caracterizar la infraestructura. Se asume homogeneidad de los elementos. Faltan datos sobre captaciones y caudales captados.
	EPSH	Versión actualizada (2024) de la red de distribución: diámetro y material de las tuberías.
Sistema de hidrantes	EPSH	Ubicación de hidrantes
Aguas residuales	EPSH	Distribución espacial de la red de alcantarillado sanitario y pozos sanitarios.
	INEC 2011 (datos censales espacializados)	Red de alcantarillado: diámetro, material y antigüedad de las tuberías.
		Pozos sanitarios: diámetro, profundidad, material de construcción, estado físico.
		Plantas de tratamiento de aguas residuales: capacidad de tratamiento, capacidad de diseño, población servida y tecnología utilizada.
	HydroSHEDS	Base de datos de plantas de tratamiento de aguas residuales.

4.23.5.4 Vulnerabilidad Física de Edificaciones

La vulnerabilidad física de los edificios expuestos se caracteriza mediante funciones matemáticas que relacionan la intensidad de la amenaza con el daño físico directo. Estas funciones de vulnerabilidad deben

ser estimadas y asignadas para cada tipo de activo identificado en la base de datos de exposición. El proyecto se basa en fuentes bien establecidas y accesibles de funciones de vulnerabilidad, muchas de las cuales fueron desarrolladas por el mismo equipo consultor o están disponibles públicamente.

Tabla 31. Información disponible de vulnerabilidad física de edificaciones

Nombre	Fuente	Descripción
CAPRA-ROBOT	ERN-AL (2009)	Biblioteca de funciones de vulnerabilidad para clases de construcción típicas en América Latina y el Caribe. Incluye amenazas: sismos, vientos fuertes, marejadas y inundaciones.
GAR15	INGENIAR (2014)	Bibliotecas de funciones que cubren múltiples amenazas.
Funciones de Vulnerabilidad por Tsunami	CIMNE et al. (2012)	Funciones específicas para la estimación de daños relacionados con tsunamis.

Nota: Estas fuentes de información sobre vulnerabilidad también aplican al proyecto operacional 3 de turismo

4.23.5.5 Vulnerabilidad Física de Infraestructura

Para los elementos de infraestructura, la vulnerabilidad se describe mediante funciones que estiman los niveles de daño basados en la intensidad de la amenaza. Estas funciones se desarrollan utilizando un enfoque basado en arquetipos, lo que permite incorporar la complejidad estructural que no puede capturarse a escalas más amplias. Los arquetipos se construyen a partir de los datos de exposición y siguen la metodología descrita en el marco metodológico del proyecto.

Este enfoque es esencial para modelar adecuadamente la vulnerabilidad de diversos sistemas de infraestructura —como transporte, electricidad, agua y telecomunicaciones— dada su configuración e interacciones únicas. Cada tipo de infraestructura está asociado con uno o más arquetipos que reflejan características estructurales y funcionales típicas relevantes para la simulación del impacto de la amenaza.

4.23.6 Proyecto Operacional 1: Evaluación del Riesgo de Desastres y Cambio Climático para la Infraestructura Vial – Ruta Nacional 2 Carretera Panamericana (RN2)

4.23.6.1 Exposición

El modelo de exposición para la Ruta Nacional Primaria 2 (RN2) se desarrolla utilizando datos vectoriales georreferenciados que representan características lineales y atributos relevantes. El objetivo es construir un portafolio integral que represente con precisión la geometría de la carretera, su valor económico y la clasificación de vulnerabilidad a lo largo de sus tramos.

Tabla 32. Información disponible para el modelo de exposición de la Ruta Nacional 2 Carretera Panamericana (RN2)

Fuente	Datos / Información
LanammeUCR	Geoportal con información de la red vial nacional: atributos de dimensiones, pavimento y tráfico
	Geoportal con información de puentes nacionales: ubicación, dimensiones, material y clase de superestructura

MOPT	Geovisor con representación geométrica del eje vial; incluye jerarquía vial y datos de derecho de vía
	Sistema de Certificación Vial: incluye clasificación del terreno, descripción de la superficie del pavimento y composición de la estructura del pavimento
CONAVI	Geoportal para la red vial nacional; soporte para validación (sin atributos adicionales más allá de MOPT)
OpenStreetMap	Número de carriles en varios segmentos, ubicaciones de puentes
Google Street View	Imágenes satelitales para identificar atributos como muros de contención, terraplenes, zanjas de drenaje
	Características de puentes: longitud aproximada, ancho, altura libre, tipología y material de construcción

4.23.6.2 Vulnerabilidad

La vulnerabilidad física de la red vial RN2 se evalúa utilizando la metodología basada en arquetipos descrita previamente. Este enfoque incorpora la variabilidad de las características estructurales y funcionales observadas en los diferentes segmentos de la carretera y los elementos de infraestructura asociados.

4.23.7 Proyecto Operacional 2: Riesgo de Inundación y Sequía para Pequeños y Medianos Productores Agrícolas

4.23.7.1 Exposición

Este componente evalúa el riesgo de sequía e inundación para el sector agrícola, con un enfoque en los cultivos de café y caña de azúcar a escala nacional. La evaluación considera la distribución geográfica, el área bajo cultivo y cosecha, el rendimiento (toneladas por unidad de área) y la fenología del cultivo.

La exposición del sector ganadero incluye las áreas de pastoreo y los hatos ganaderos que dependen de ellas. La modelación del riesgo en los sistemas de producción de carne se basa en las pérdidas esperadas de peso vivo tras eventos de peligro, aunque aún no considera cambios demográficos (por ejemplo, nacimientos, muertes naturales o movimientos de animales).

Tabla 33. Información disponible para el modelo de exposición de agricultura y ganado

Sector	Nombre	Fuente	Descripción
Agricultura	Encuesta Nacional Agropecuaria – ENA (2023)	INEC	Datos detallados y actualizados sobre producción agrícola: área sembrada/cosechada, producción, uso y prácticas agronómicas
	VI Censo Nacional Agropecuario (2014)		Información sobre todas las fincas en Costa Rica, incluyendo distribución espacial de café y caña a nivel cantonal. Incluye insumos y técnicas agrícolas. No hay datos georreferenciados disponibles (protegidos por leyes de privacidad de datos).
	Mapa de Cobertura y Uso de Suelo de Costa Rica – REDD+	SIMOCUTE, 2019	Datos espaciales sobre categorías de cobertura del suelo como bosques, agricultura, zonas urbanas y cuerpos de agua
	Mapa de Cobertura y Uso de Suelo	SNIT	Datos territoriales usados para estimar emisiones y remociones de GEI de AFOLU

	Prácticas Efectivas para la Adaptación de Cultivos	CATIE (2018a, b)	Insumos para productos financieros y seguros agrícolas: fenología del cultivo, variedad, fecha de siembra, duración de etapas de crecimiento
	Estudio de Idoneidad	CATIE	Mapas de idoneidad óptima, moderada y baja para cultivo de café y caña en Costa Rica
Ganadería	Encuesta Nacional Agropecuaria – ENA (2023)	INEC	Datos desagregados sobre ganado bovino y porcino: composición del hato, indicadores de productividad, registros de pérdidas
	VI Censo Nacional Agropecuario (2014)		Datos sobre actividades ganaderas, incluyendo especies bovina, caprina, ovina, porcina y avícola

4.23.7.2 Vulnerabilidad

- **Vulnerabilidad del cultivo:** La vulnerabilidad de los cultivos de café y caña se evalúa utilizando métodos prácticos de evaluación adaptados a los efectos del cambio climático, incluyendo la sensibilidad a la sequía e inundaciones.
- **Vulnerabilidad ganadera:** Utiliza un enfoque de modelado bioeconómico para simular la respuesta del pasto y el crecimiento animal.

Tabla 34. Información disponible para el modelo vulnerabilidad de agricultura y ganado

Sector	Nombre	Fuente	Descripción
Agricultura	Manual de Vulnerabilidad y Adaptación para el Café	CATIE (2018d)	Guía práctica para evaluar la vulnerabilidad del cultivo de café al cambio climático
	Prácticas Efectivas para Reducir Impactos Climáticos	CATIE (2018a, b), MAG	Incluye características del cultivo, preparación del suelo, plantación, fertilización y datos de vulnerabilidad
	Modelo AquaCrop	FAO	Genera parámetros específicos del cultivo para modelar desarrollo y productividad bajo condiciones de estrés
Ganadería	Características del Pasto en Costa Rica	INTA (2022)	Modelo bioeconómico del desempeño del pasto y crecimiento del ganado
	Mapa de Ubicación de Pastos	INEC (2015)	Distribución de áreas de pasto por cantón

4.23.8 Proyecto Operacional 3: Evaluación de la Exposición y el Riesgo para Pequeños y Medianos Hoteles y Hostales en el Programa Fu-turismo.

4.23.8.1 Exposición

Tabla 35. Datasets e información disponible para el sector turismo de costa Rica

Nombre	Fuente	Descripción
Cartografía de Edificios	SNIT	Cobertura nacional de edificios y estructuras, filtrada para incluir solo hoteles.
Infraestructura y Uso del Suelo	OpenStreetMap (OSM)	Incluye infraestructura hotelera, entorno construido circundante, puntos de interés, clasificaciones de uso del suelo y tipos de cobertura del suelo.

Manual de Valores Unitarios Base para Tipologías Hoteleras	Ministerio de Hacienda de Costa Rica	Proporciona valoración por metro cuadrado para edificios de uso hotelero.
--	--	--

4.23.8.2 Vulnerabilidad Física de Edificaciones

Las funciones de vulnerabilidad y la metodología utilizadas para el Proyecto Estratégico de Heredia (Sección 4.5.4) también se aplicarán al sector turismo, permitiendo la consistencia entre las evaluaciones y aprovechando recursos compartidos para las tipologías de edificios e infraestructura.

4.24 Otras Iniciativas

4.24.1 CCRIF SPC

El CCRIF SPC (*Caribbean Catastrophe Risk Insurance Facility*) es un mecanismo innovador de seguro paramétrico que ofrece cobertura a los países del Caribe — y más recientemente a algunas naciones de Centroamérica — contra desastres naturales como huracanes, terremotos y eventos de lluvia extrema. Fue establecido en 2007 tras los devastadores impactos de las temporadas de huracanes 2004–2005, con el apoyo del Banco Mundial, donantes internacionales y gobiernos caribeños.

CCRIF ha compartido con el grupo consultor los perfiles de riesgo catastrófico para Costa Rica ante terremoto, huracán y exceso de lluvia, por medio de documentos PDF en los cuales se describen los modelos y se resumen los resultados. Es importante aclarar que los mencionados perfiles de riesgo no corresponden a los *datasets* usados para fines de modelación, ni tampoco se han compartido los modelos en sí.

Conviene mencionar que el modelo sísmico de CCRIF, el modelo SPHERA, está basado en el modelo ASLAC de amenaza sísmica, desarrollado por ERN de México e INGENIAR, y que es el modelo propuesto para ser usado en la modelación del riesgo sísmico y por deslizamientos, como se detalla en el Entregable 2 de esta consultoría.

4.24.2 Global Risk Assessment Framework (GRAF)

El *Global Risk Assessment Framework* (GRAF) es una iniciativa de la Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres (UNDRR) que tiene como objetivo fortalecer la capacidad de los países para acceder y aplicar datos relacionados con el riesgo, con el fin de informar la toma de decisiones.

Como parte de la implementación del primer piloto de GRAF en Costa Rica, realizado en coordinación con la Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias (CNE), se desarrollaron modelos de exposición para varios sectores, incluido el sector de vivienda. La base de datos de exposición de viviendas se construyó con información proporcionada por el Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC) y servirá como referencia y fuente clave de información para caracterizar los edificios en el cantón de Heredia.

Para el componente de riesgo sísmico, el proyecto utilizará el modelo ASLAC, un modelo de riesgo más reciente y detallado que ha sido validado y aprobado internacionalmente, asegurando un mayor nivel de precisión y relevancia para el análisis actual.

4.24.3 Acciones de Mitigación Nacionalmente Apropriadas (NAMA)

Costa Rica ha desarrollado una serie de Acciones de Mitigación Nacionalmente Apropriadas (NAMA, por sus siglas en inglés) dirigidas a los sectores agrícola y pecuario, particularmente para la producción de café y caña de azúcar. Estas iniciativas tienen como objetivo reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y promover la adaptación de los sistemas de producción para aumentar su resiliencia frente al cambio climático.

Las NAMA en Costa Rica forman parte de una estrategia climática más amplia del país, diseñada para impulsar el cambio tecnológico y fomentar modelos de producción de bajas emisiones. Por ejemplo, la NAMA Café busca desarrollar una cadena de suministro de café con bajas emisiones, al tiempo que mejora el acceso a mercados para los caficultores costarricenses. De manera similar, la NAMA Caña de Azúcar promueve una transformación de la industria azucarera para reducir las emisiones de GEI y ampliar las oportunidades de mercado, mientras que la NAMA Ganadería se enfoca en reducir las emisiones de CO₂ y promover la captura de carbono en el sector pecuario.

La implementación de estas NAMA podría proporcionar información valiosa para el proyecto, especialmente en lo que respecta a la identificación de prácticas alternativas que podrían incorporarse en el índice de riesgo. Comprender los procesos, enfoques de modelación e información utilizados en el desarrollo de las NAMA Café, Caña de Azúcar y Ganadería es esencial para integrar medidas de mitigación y adaptación climática en las herramientas de evaluación del riesgo.

El conocimiento generado a través de estas iniciativas es clave para avanzar en el objetivo de informar y fortalecer el diseño de un índice de riesgo integral, alineado con las políticas climáticas nacionales y las estrategias sectoriales.

4.25 Brechas de Datos Identificadas

La revisión de información y bases de datos reveló una amplia variedad de bases de datos, mapas, documentos y estudios relevantes y suficientes para una implementación exitosa del proyecto. Sin embargo, una mayor resolución espacial de los datos climáticos, registros históricos de eventos y modelos de vulnerabilidad adaptados localmente podrían mejorar las evaluaciones. Un desafío importante sigue siendo la ausencia de una plataforma nacional integrada y de acceso abierto para la información.

Es importante destacar que, desde el inicio del proyecto, se han hecho esfuerzos para solicitar y recopilar los datos nacionales disponibles. Varios conjuntos de datos han sido compartidos por instituciones locales y ya se encuentran integrados en el análisis presentado en la Sección 4. Se podrá incorporar nueva información solicitada desde el comienzo, en caso de ser entregada oportunamente, para incluirla en las próximas tareas.

El proyecto tiene dos líneas principales de trabajo: la entrega de métricas de evaluación de riesgo multiamenaza y el fortalecimiento de capacidades. Debido al tiempo limitado, no es factible generar ni co-

desarrollar datos adicionales. En caso de no recibirse nueva información, el proyecto se basará en la información actualmente referenciada, la cual se considera suficientemente sólida y adecuada para los objetivos y el alcance de esta iniciativa.

Es importante mencionar que el curso de capacitación incluido en este proyecto está diseñado para empoderar a las instituciones nacionales y al personal técnico, dotándolos de herramientas y metodologías que les permitan fortalecer y ampliar los datos existentes, desarrollar bases de datos de exposición y llevar a cabo evaluaciones de riesgo alineadas con sus prioridades específicas y necesidades de toma de decisiones en el futuro.

5 METODOLOGÍA DE MODELACIÓN DEL RIESGO CATASTRÓFICO

La evaluación modelación probabilista del riesgo catastrófico tiene por objetivo estimar la distribución de probabilidad de la pérdida que puede presentarse en un conjunto de elementos expuestos, tras la ocurrencia de un evento de amenaza (Cardona, 1986 a;b;c; 1989; 1990). La modelación probabilista permite entonces realizar pronósticos sobre los niveles futuros de pérdida, considerando la amenaza propia del territorio y la incertidumbre en su estimación, así como la vulnerabilidad inherente de los elementos expuestos y su respectiva incertidumbre.

5.1 Enfoque conceptual para la modelación del riesgo

La modelación probabilista del riesgo consiste en determinar las posibles consecuencias que un conjunto de elementos expuestos puede sufrir, por cuenta de la ocurrencia de eventos de amenaza. Una buena modelación del riesgo es fundamental en la construcción de un proceso de desarrollo sostenible y resiliente, considerando los *trade-offs* de los posibles perjuicios y beneficios. En otras palabras, dicho proceso solo puede ser debidamente orientado si se cuenta con una modelación del riesgo que sea suficientemente robusta, en términos de la verosimilitud de afectaciones y que facilite las decisiones que se puedan tomar con un apropiado soporte técnico sin arbitrariedad. Una apropiada modelación del riesgo debe cumplir con la siguiente lista (no exhaustiva) de características:

- **Multiamenaza.** Esta característica es fundamental dado que se requiere incorporar modelos que den cuenta de la dinámica propia de las diferentes amenazas naturales y de forma acoplada entre ellas, de tal manera que la visión del riesgo sea completa, al considerar todas las posibles pérdidas frente a los diferentes tipos de amenaza, y no solamente asociada a uno de ellos. Adicionalmente, es necesario expresar el riesgo de la misma manera, de tal forma que los impactos de las diferentes amenazas sobre los elementos expuestos sean conmensurables y aditivos.
- **Probabilista.** La ocurrencia de fenómenos naturales peligrosos, por la cantidad de variables y dinámicas que se conjugan en su desarrollo, conllevan una alta incertidumbre inherente, que requieren contar con un marco conceptual y matemático que permita incorporar esta condición adecuadamente, de modo que, más que estimaciones puntuales, se involucren distribuciones de probabilidad. Es así, como el enfoque de evaluación del riesgo aplicado en esta consultoría está basado en los preceptos fundamentales de la *Teoría de Ruina* (Embrechts et al., 2012) y permite caracterizar los daños y pérdidas potenciales causados por los fenómenos de la naturaleza sobre los elementos expuestos a través de distribuciones de probabilidad. De esta manera, los resultados se expresan como métricas probabilistas, dando una orientación integrada, completa y transparente al tomador de decisiones sobre el riesgo que enfrenta.
- **Estocástico.** No es equivalente al punto anterior. Significa que el modelo debe basarse tanto en la física de los fenómenos naturales como en la aleatoriedad de su ocurrencia. Esto implica que se necesitan, por lo general, miles de simulaciones de eventos de amenaza para construir un conjunto razonablemente exhaustivo de los posibles daños o pérdidas que pueden sufrir los elementos expuestos y, por lo tanto, las consecuencias que se derivan (Bernal et al. 2019).

- *No estacionario.* Los modelos probabilistas de riesgo de desastre suelen ser estacionarios, es decir, no admiten una variación sensible de la frecuencia de ocurrencia de los eventos de amenaza en el tiempo. Esta característica es apropiada para fenómenos no relacionados con el clima, como por ejemplo los terremotos. Por el contrario, en la modelación de peligros que se ven influenciadas por el cambio climático, es necesario un enfoque que permita incorporar tendencias de fondo que alteren las tasas de ocurrencia de los eventos, lo cual implica un modelo de riesgo no estacionario. Esto a su vez implica métricas de riesgo que se expresan como función del tiempo (Bernal et al. 2019).
- *Fundamentado en incertidumbre profunda.* Adicionalmente al punto anterior, la incorporación del cambio climático en el modelo de riesgo implica introducir una variable para la cual no podemos asignar de forma significativa una distribución de probabilidad, lo cual significa que nos enfrentamos a una incertidumbre profunda. Desde el punto de vista matemático, el modelo debe estar en capacidad de permitir el tratamiento de ciertas variables por medio de estructuras de incertidumbre no probabilistas⁵, que permitan simular el verdadero estado de incertidumbre y, consecuentemente, la expresión de las métricas de riesgo en forma de probabilidades imprecisas (Bernal et al. 2019).
- *Orientado a la toma de decisiones.* La definición de un modelo de evaluación y análisis, en este caso para definir el riesgo y las medidas de adaptación frente al mismo, no sólo se fundamenta en los aspectos físicos y matemáticos, sino que también debe considerar que los resultados obtenidos puedan orientar la toma de decisiones. Para lograr este propósito se debe tener claridad de las partes interesadas en el problema de riesgo y adaptación, sus necesidades, y proporcionar información para este fin. El modelo de riesgo debe tener en cuenta entonces la magnitud de los impactos previstos y su probabilidad de ocurrencia, pero lo más importante es que permita evaluar la eficacia de las estrategias de gestión del riesgo que puedan ser factibles de acuerdo con el contexto local y el grado de aversión al riesgo.

El procedimiento de modelación probabilista del riesgo de desastres, considerando el cambio climático, se puede resumir, de forma general, como se ilustra en la Figura 85.

⁵ Como, por ejemplo, la teoría de los conjuntos difusos, la teoría de decisión de Dempster-Shafer o la teoría de los conjuntos aleatorios, entre otras

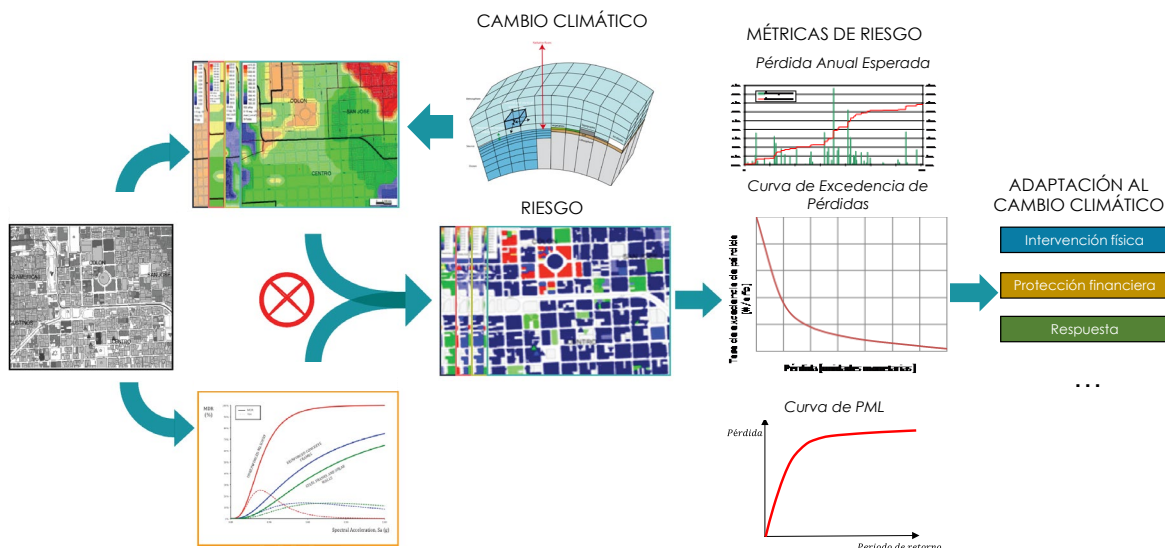


Figura 85. Componentes de la modelación del riesgo y su interrelación.

Como se ilustra en la Figura 85, una vez evaluado el riesgo por medio de métricas actuariales como la *pérdida anual esperada*, la *curva de excedencia de pérdidas* y la *pérdida máxima probable*, es posible establecer una relación objetiva con las medidas de gestión del riesgo y su efectividad, de modo que puede usarse el modelo para diseñar estrategias de intervención, compuestas por múltiples medidas, cuya capacidad para reducir el riesgo puede ser cuantificada.

Siguiendo el enfoque presentado, en este estudio el riesgo se evalúa en base a 3 factores fundamentales:

- 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).
- Los *elementos expuestos*, que corresponden a los bienes inmuebles, infraestructura o producción agropecuaria expuestos a las amenazas y que son susceptibles de sufrir daño o alteración ante la influencia de estas.
- La *vulnerabilidad* de los elementos expuestos, la cual se entiende como la propensión o predisposición a ser afectado negativamente. La valoración de la vulnerabilidad implica un modelo específico para cada tipo de elemento expuesto y cada tipo de amenaza, es decir, no existe una manera unificada de representarla. Sin embargo, la modelación sí deriva en la misma métrica de cuantificación de afectación (pérdida económica), lo cual hace a los diferentes modelos aditivos y conmensurables en términos del riesgo.

El primer enfoque totalmente probabilista dado al problema del riesgo, desde el punto de vista actuarial, fue propuesto por Filip Lundberg en 1903 (Lundberg, 1903). En 1930, Harald Cramér formalizó la teoría de Lundberg en lo que hoy se conoce como *Teoría de Ruina* (Cramér, 1930). Lundberg definió un modelo de *ingresos-resultados* en el que una compañía de seguros inicia sus operaciones con una cierta cantidad de capital, que aumenta con el tiempo en la medida en que se recolectan las primas. Adicionalmente, las

pérdidas (que la compañía debe cubrir) ocurren aleatoriamente en el tiempo. Si, debido al pago de las reclamaciones, el capital cae por debajo de cero, entonces la compañía quiebra. Lundberg estaba interesado en determinar la probabilidad de quiebra de una compañía de seguros.

La *Teoría de Ruina* considera que la ocurrencia de siniestros no es determinista. Lundberg demostró que la ocurrencia de pérdidas en el tiempo puede modelarse como un proceso de Poisson. Posteriormente, se demostró que cualquier proceso de renovación es válido dentro de la Teoría de Ruina (Andersen, 1957). Un proceso de renovación es un tipo de proceso estocástico, de tiempo continuo y estado discreto, ampliamente utilizado en múltiples aplicaciones en ciencias e ingeniería, que establece la ocurrencia de eventos de forma totalmente aleatoria. Los eventos, en este contexto, se refieren a la ocurrencia de pérdidas, independientemente de su origen. Esta es la razón por la que la teoría de ruina o de insolvencia es adecuada para modelar cualquier impacto asociado a un fenómeno, natural o no, y es apropiada para orientar la gestión del riesgo en otros ámbitos o contextos sociales, económicos, ambientales y en general del desarrollo, más allá del propio mercado de los seguros.

Un proceso de renovación se define en términos de un parámetro único, su intensidad o tasa. En la evaluación del riesgo, este parámetro es la *tasa de excedencia de pérdidas*, que es a su vez el inverso del tiempo promedio entre la ocurrencia de eventos que superan un monto de pérdida p . Por lo tanto, al calcular el riesgo de un portafolio de elementos expuestos (es decir, la probabilidad de que se supere una cierta pérdida p en una ventana de tiempo), su tasa de excedencia $\nu(p)$ debe calcularse en función de la probabilidad de ocurrencia de cualquiera de los posibles eventos de peligro que causarían que p sea excedida. Esto configura un proceso de renovación que permite estimar la probabilidad de excedencia de la pérdida p en cualquier periodo de tiempo.

5.2 Cuantificación del riesgo

La modelación del riesgo tiene como propósito, desde el punto de vista matemático, caracterizar un proceso aleatorio de ocurrencia de pérdidas en el tiempo (i.e., proceso de pérdidas). Un proceso de pérdidas tiene unas características importantes que condicionan el enfoque de modelación del riesgo adoptado en este estudio, y que se utiliza en el campo de la modelación catastrófica actuarial, de la seguridad y confiabilidad en ingeniería, de la industria aeronáutica y aeroespacial, entre otros.

Considérese un proceso histórico de pérdidas como el presentado en la Figura 86. Al establecer una pérdida económica p , se puede identificar en la gráfica todos los eventos cuyas pérdidas exceden p . Los tiempos entre eventos $(T_1, T_2, \dots, T_n)$ se encuentran indicados en la Figura 86 y se usan para estimar el parámetro λ del proceso de renovación con el cual se modela la ocurrencia de eventos que superan p (i.e. $\lambda = \nu(p)$).

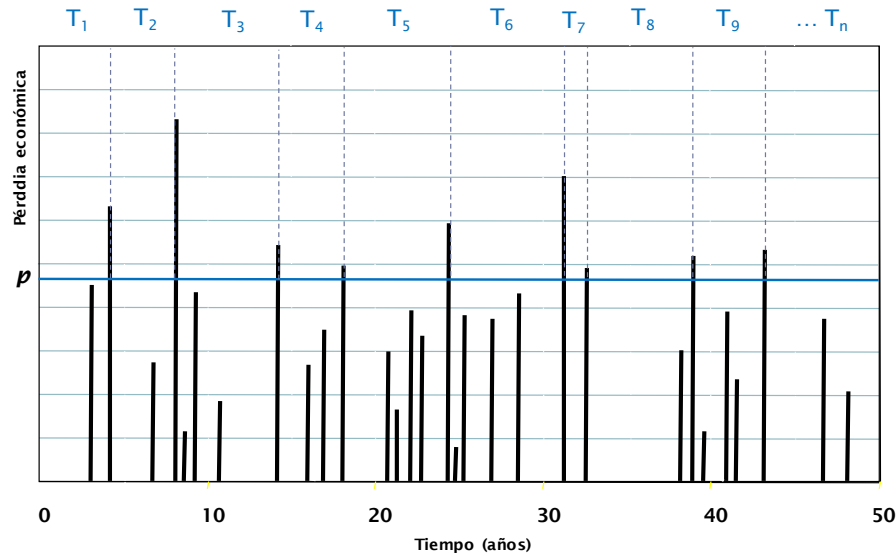


Figura 86. Proceso hipotético de pérdidas

Para la pérdida p indicada, la tasa de excedencia poblacional (λ) puede estimarse mediante la tasa de excedencia muestral (Λ) de la siguiente manera (Bernal et al., 2021):

$$\lambda \approx \Lambda = \frac{n-1}{\sum_{i=1}^n T_i} \quad \text{Ecuación 1}$$

en donde n es el número de eventos que superan la pérdida p y T_i son los tiempos observados. Este estimador cumple con los cuatro criterios estadísticos de calidad de la estimación de parámetros de distribuciones de probabilidad: es no sesgado, de varianza mínima, consistente y suficiente. Ahora bien, si asumimos un proceso de Poisson (i.e. el tiempo de eventos se distribuye exponencial), es posible demostrar que el estimador Λ sigue una distribución de probabilidad *Gamma inversa* con parámetros n y $(n-1)\lambda$, a partir de lo cual se puede determinar su coeficiente de variación (CV) como (Bernal et al., 2021):

$$CV = \frac{1}{\sqrt{n-2}} \quad \text{Ecuación 2}$$

El coeficiente de variación indica la relación entre la desviación estándar y la media de una variable aleatoria. Como se indica en la Ecuación 2, CV disminuye a medida que el número de datos (n) aumenta (ver Figura 87).

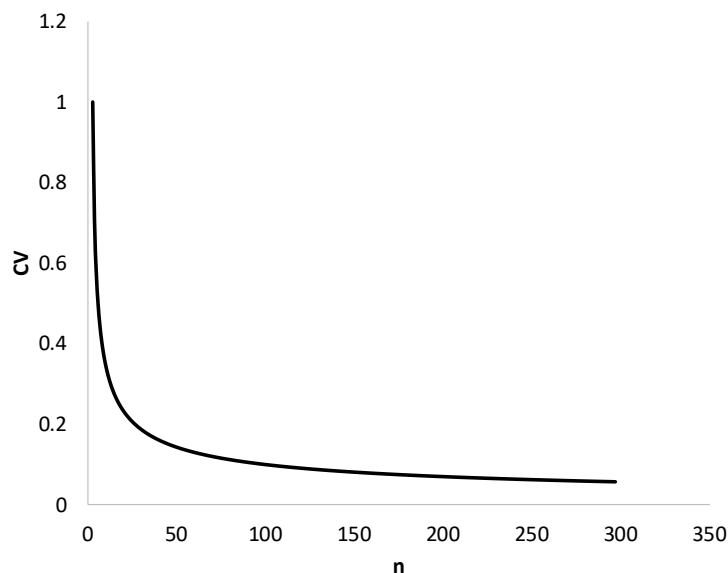


Figura 87. Variación del coeficiente de variación de la tasa de excedencia con el tamaño de la muestra.

El comportamiento presentado revela que, para eventos con pérdidas grandes (eventos catastróficos), la estimación de la tasa de excedencia a partir del registro histórico es altamente incierta (i.e., pocos eventos que exceden esa pérdida), independientemente de la calidad de la información o incluso del número de años para los cuales se cuente con registro. Esta es la razón por la cual se requiere de simulaciones de pérdidas, es decir, modelar la amenaza, exposición, vulnerabilidad y sus relaciones matemáticas con el fin de estimar la tasa de excedencia de pérdidas de forma apropiada, pues la información histórica es en general insuficiente.

El riesgo se determina mediante la convolución entre la amenaza y la vulnerabilidad, en la ubicación ocupada por los elementos expuestos y para la totalidad de estos. En el cálculo probabilista de las pérdidas, la amenaza y la vulnerabilidad están representadas también de manera probabilista. La amenaza tiene una representación probabilista tanto temporal como espacial. La ocurrencia en el tiempo de los escenarios de amenaza se modela como un proceso de renovación, lo que conlleva a ajustar un modelo de probabilidad al tiempo que transcurre entre dos eventos consecutivos.

Las incertidumbres asociadas a la amenaza y a la vulnerabilidad son entonces definidas en su propia naturaleza; temporal y espacial para la amenaza y dependiente de la intensidad para la vulnerabilidad. De esta manera, el principal resultado del modelo es una distribución de probabilidad específica de la pérdida para cada evento de amenaza. La función de densidad de probabilidad de la pérdida en el elemento expuesto j , condicional a la ocurrencia del evento de amenaza i (i.e., $f(p_j|E_i)$), se calcula como:

$$f(p_j|E_i) = \int_0^{\infty} f(p_j|s)f(s|E_i)ds \quad \text{Ecuación 3}$$

en donde el primer término de la integral tiene que ver con la vulnerabilidad ($f(p_j|s)$, la densidad de probabilidad de la pérdida dada una intensidad s) y el segundo término tiene que ver con la amenaza ($f(s|E_i)$, la densidad de probabilidad de la intensidad, dada la ocurrencia de un evento de amenaza).

La pérdida total del evento i corresponde a la suma de todas las pérdidas individuales (p_j) de los elementos expuestos. Dado que los sumandos son variables aleatorias, debe usarse la aritmética correcta para determinar la pérdida del evento i . La suma se hace sobre los momentos de probabilidad de las variables p_j , como se indica a continuación:

$$E(p|E_i) = \sum_{j=1}^{NE} E(p_j) \quad \text{Ecuación 4}$$

$$\sigma^2(p|E_i) = \sum_{j=1}^{NE} \sigma^2(p_j) + 2 \sum_{\substack{k=1 \\ k < j}}^{NE-1} \sum_{j=2}^{NE} cov(p_k, p_j) \quad \text{Ecuación 5}$$

en donde $E(p|E_i)$ es el valor esperado de la pérdida del evento i , $\sigma^2(p|E_i)$ es su varianza, NE es el número total de elementos expuestos, $E(p_j)$ es el valor esperado de la pérdida en el elemento j , $\sigma^2(p_j)$ es su varianza, y $cov(p_k, p_j)$ es la covarianza de la pérdida de dos elementos expuestos diferentes. A partir de los momentos de probabilidad de la pérdida totalizada para el evento, se ajusta un modelo de probabilidad Beta, el cual tiene la siguiente función de densidad de probabilidad (f_p):

$$f_p = \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha) \cdot \Gamma(\beta)} \cdot p^{\alpha-1} \cdot (1-p)^{\beta-1} \quad \text{Ecuación 6}$$

en donde α y β son los parámetros de la distribución Beta, y $\Gamma(\cdot)$ es la función *Gamma*. De esta manera queda completamente determinada, en términos de probabilidad, la pérdida asociada a la ocurrencia del evento de amenaza i .

El riesgo es comúnmente descrito mediante la llamada *curva de excedencia de pérdidas* la cual especifica las frecuencias de ocurrencia de eventos en que se exceda un valor específico de pérdida. Esta frecuencia anual de excedencia, que no es más que la *tasa de excedencia* $v(p)$, se calcula de la siguiente manera:

$$v(p) = \sum_{i=1}^N Pr(P > p|E_i) \cdot F_A(E_i) \quad \text{Ecuación 7}$$

en donde $v(p)$ es la tasa de excedencia de la pérdida p , N es el número total de eventos de amenaza, $F_A(E_i)$ es la frecuencia anual de ocurrencia del evento i , y $Pr(P > p|E_i)$ es la probabilidad de que p sea excedida dado que ocurrió el evento i . La suma cubre todos los eventos de amenaza en los cuales se pueden generar pérdidas. El inverso de $v(p)$ es el periodo de retorno de la pérdida p (Tr), el cual no es más que el valor esperado del tiempo entre eventos que superan la pérdida p .

$$Tr = \frac{1}{v(p)} \quad \text{Ecuación 8}$$

La curva de excedencia de pérdidas contiene toda la información necesaria para caracterizar, en términos de probabilidad, el proceso de ocurrencia de las pérdidas asociadas a eventos de amenaza. La Figura 88 muestra una curva de excedencia de pérdidas de ejemplo.

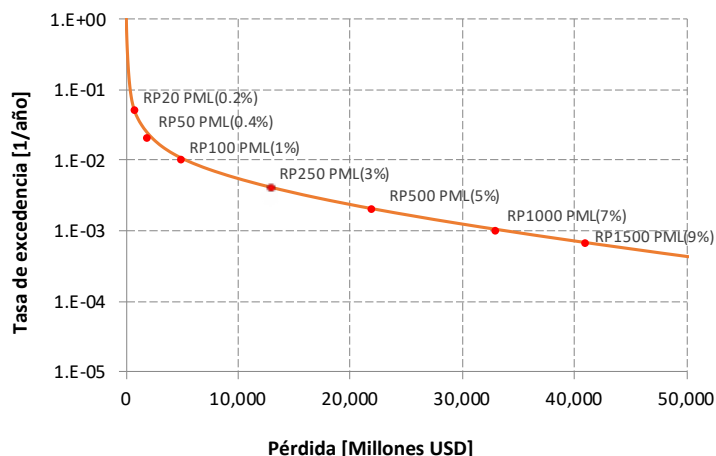


Figura 88. Ejemplo de curva de excedencia de pérdidas. El eje vertical muestra la tasa de excedencia. El eje horizontal muestra la pérdida asociada. (RP = Return Period; PML = Probable Maximum Loss).

El cálculo realizado con la Ecuación 7 corresponde a la estimación de la tasa de excedencia de las cuantías de pérdida que ocurren en todos los elementos expuestos para todos los eventos incluidos en el modelo de amenaza, y para todas las amenazas. Como se muestra en la Figura 89, la evaluación probabilista del riesgo se puede resumir en los siguientes pasos: 1) para cada evento de amenaza se determina la pérdida en todos y cada uno de los elementos expuestos (Ecuación 3); 2) se calcula la pérdida causada por cada evento como la suma de las pérdidas individuales causadas en cada elemento expuesto (Ecuación 4, Ecuación 5 y Ecuación 6); 3) una vez se cuantifican las pérdidas de todos eventos, se calculan las tasas de excedencia (Ecuación 7).

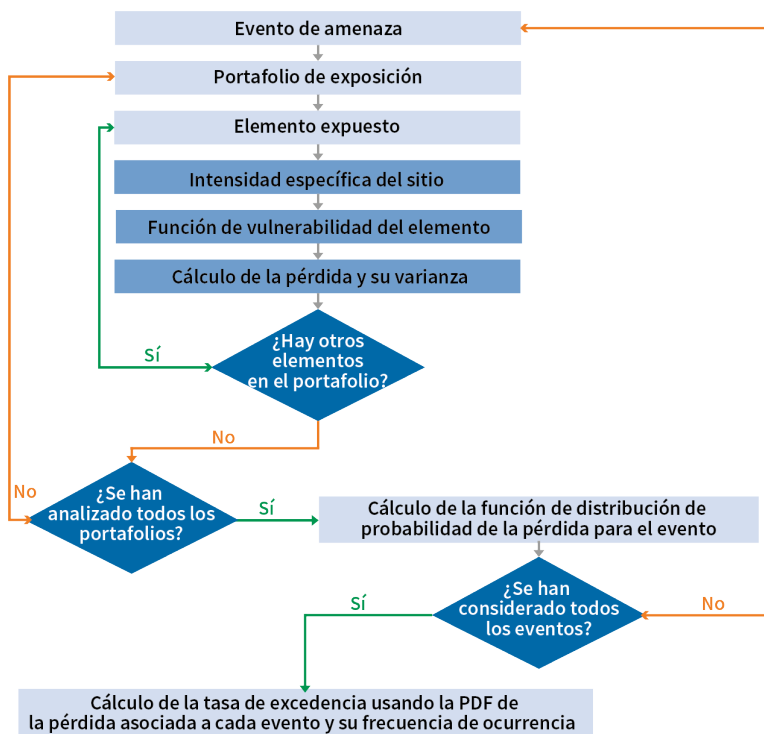


Figura 89. Diagrama de flujo de la evaluación probabilista del riesgo

5.3 Métricas de riesgo

A partir de la curva de excedencia de pérdidas es posible obtener diversas métricas del riesgo, las cuales son útiles para diferentes fines dentro de los procesos de toma de decisiones y la gestión del riesgo. Estas métricas proporcionan una representación integral del riesgo, por lo general condensada en uno o pocos indicadores, en lugar de proporcionar todo el conjunto de las pérdidas por eventos o la curva de excedencia de pérdidas completa.

5.3.1 Pérdida anual esperada (PAE)

La PAE corresponde al valor esperado de la pérdida anual. Indica el valor anual promedio que, de sumarse en el largo plazo, equivaldría a todas las pérdidas futuras. La PAE sería la prima pura anual justa para cubrir anualmente todas las pérdidas que pueden presentarse. Se puede calcular como el área bajo la curva de excedencia de pérdidas:

$$PAE = \int_0^{\infty} v(p) dp \quad \text{Ecuación 9}$$

También, desde el conjunto de pérdidas por evento, puede determinarse la PAE como:

$$PAE = \sum_{i=1}^N E(P|E_i) F_A(E_i) \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde: $E(P|E_i)$ es un valor esperado de la pérdida del evento i , $F_A(E_i)$ y es la frecuencia anual de ocurrencia del evento i . El valor esperado de la pérdida, dada la ocurrencia de un evento particular, depende de la vulnerabilidad de los elementos expuestos.

La pérdida anual esperada es un indicador importante dado que integra en un único valor el efecto, en términos de pérdidas, de la ocurrencia de los eventos de amenaza sobre los elementos expuestos vulnerables. Es el indicador más robusto del riesgo, no solo por su capacidad de resumir el proceso de ocurrencia de pérdidas en un solo número, sino por ser relativamente insensible a la incertidumbre, debido a que corresponde a la esperanza matemática de las pérdidas en forma anualizada.

5.3.2 Pérdida máxima probable (PML)

Si bien el principal resultado de la evaluación del riesgo es la curva de excedencia de pérdidas, la curva de PML⁶ es usualmente preferida debido a que, en general, es más fácil de comprender la noción de un periodo de retorno que, como se mencionó previamente, es el valor esperado del tiempo entre eventos que superan una pérdida, y que matemáticamente corresponde al inverso de la tasa de excedencia. La curva de excedencia de pérdidas y la curva de PML son equivalentes en la información contenida.

De la curva de PML se pueden determinar los valores de pérdida para periodos de retorno arbitrarios. La selección del periodo de retorno para una PML como referente depende exclusivamente de la aversión al

⁶ Probable Maximum Loss

riesgo del tomador de decisiones. La Figura 90 muestra un ejemplo de una curva de PML, en donde, a partir de un período de retorno seleccionado en el eje horizontal, que en este ejemplo es de 400 años, se puede determinar el valor de la pérdida en el eje vertical, lo que indica que esta pérdida se superará en promedio cada 400 años.

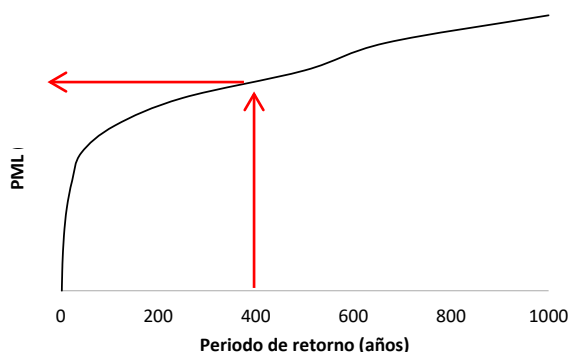


Figura 90. Ejemplo de curva de PML

5.3.3 Probabilidad de ocurrencia en un tiempo de exposición

Equivale a la denominada probabilidad de quiebra (P_Q) que no es más que la probabilidad de exceder un nivel de pérdida dado en un tiempo de exposición establecido. Se deriva directamente del proceso de renovación y permite asociar el tiempo de exposición, que podría ser el tiempo en el que se espera hacer uso del activo en riesgo, en el cálculo de la probabilidad de exceder pérdidas de cualquier monto. Es común presentar un juego de curvas de P_Q , definidas para diferentes tiempos de exposición (ver Figura 91). Al seleccionar un monto de pérdida en el eje horizontal, se determina del gráfico la probabilidad que dicho monto se supere por lo menos una vez en la curva correspondiente a cada tiempo de exposición.

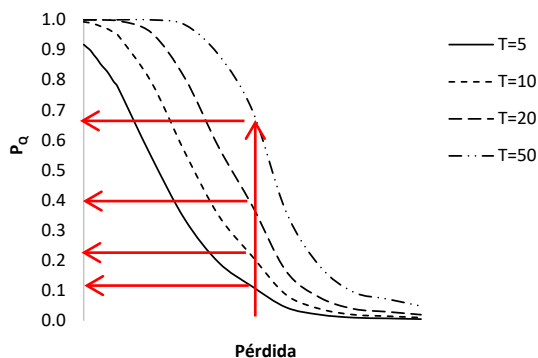


Figura 91. Ejemplo de curvas de P_Q

5.3.4 Probabilidad de excedencia de pérdidas en el próximo evento

Esta curva indica cuál es la probabilidad de exceder un cierto valor de pérdida tras la ocurrencia del próximo evento, o de un evento cualquiera tomado al azar. Esta curva no está asociada al tiempo entre

eventos peligrosos. Por el contrario, determina la probabilidad de que las pérdidas asociadas a un evento superen un cierto valor, independientemente de cuando ocurra. Este resultado es útil para las actividades de preparación para emergencias, así como para cuantificar el costo de los instrumentos financieros y las estrategias de mitigación. La Figura 92 presenta un ejemplo de probabilidad de excedencia del valor de la pérdida en el próximo evento.



Figura 92. Ejemplo de curva de probabilidad de excedencia de pérdida en el próximo evento

5.4 Incorporación de tendencias de fondo

La estacionariedad del proceso de Poisson implica que su tasa media (i.e., la tasa de excedencia) es constante en el tiempo. Esta aproximación es ampliamente aceptada debido a la dificultad de incorporar modelos de peligro, exposición y vulnerabilidad dependientes del tiempo, y la gran incertidumbre que surge al incorporarlos. No obstante, en los casos en los que, hasta donde se tenga conocimiento, la condición de estacionariedad es poco realista y la dinámica futura de los componentes del riesgo se conoce o puede aproximarse razonablemente (como en el caso del cambio climático), es posible extender el modelo mediante procesos no estacionarios.

Consideremos una curva de excedencia de pérdidas resultante de una evaluación probabilista del riesgo. Este resultado expresa las tasas de excedencia de pérdidas dada la incidencia del peligro, la exposición y la vulnerabilidad; tasa que se considera constante en el tiempo. No obstante, si existe una forma razonable de modelar los cambios futuros en los componentes del modelo, es posible calcular nuevas curvas de excedencia de pérdidas para momentos futuros en el tiempo. Por lo tanto, las tasas de excedencia de pérdidas ahora exhiben una dependencia del tiempo, transformando la curva de excedencia de pérdidas en una *superficie de excedencia de pérdidas* (ver Figura 93). La superficie de excedencia de pérdidas contiene todas las funciones $v(p, t)$ requeridas para definir la ocurrencia en el tiempo de pérdidas mayores que p como un proceso de Poisson no homogéneo.

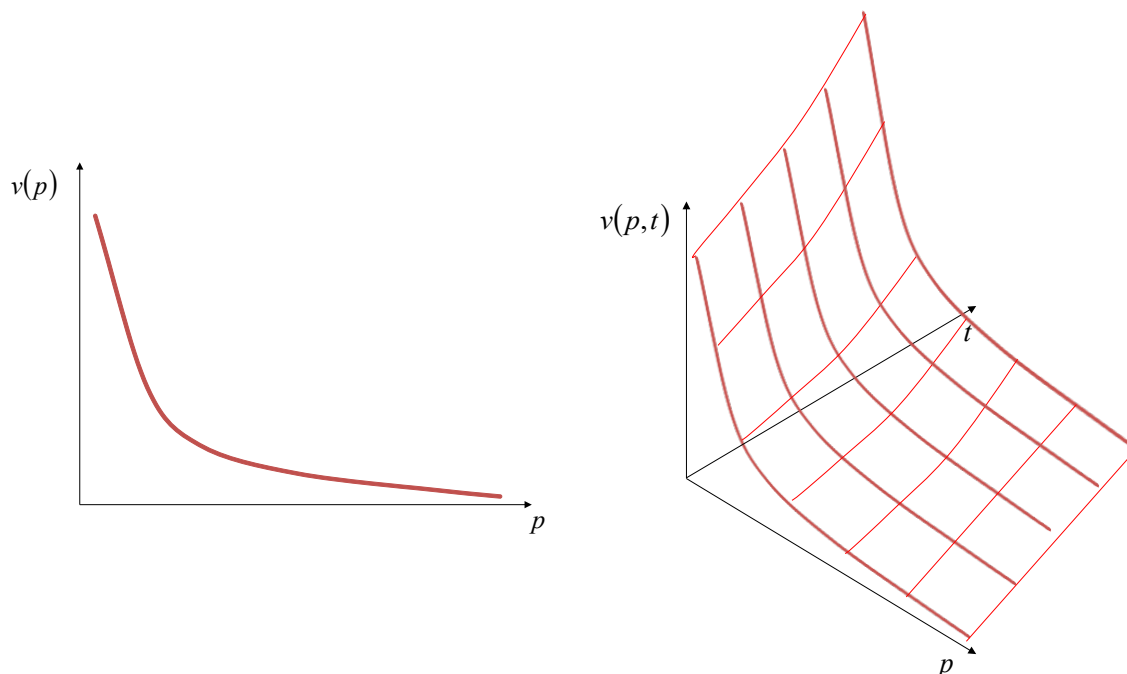


Figura 93. Dependencia del tiempo agregada a las tasas de excedencia de pérdidas. Izquierda: curva de excedencia de pérdidas; Derecha: superficie de excedencia de pérdidas

Un proceso de Poisson no homogéneo satisface las mismas propiedades básicas de uno homogéneo, es decir, incrementos independientes y distribuidos Poisson. La principal diferencia es que la tasa del proceso es una función del tiempo, $\lambda(t)$ ⁷. Una evaluación del riesgo expresada mediante este enfoque cumple las siguientes propiedades:

- El proceso de ocurrencia de pérdidas sigue siendo estocástico.
- La tasa media del proceso cambia en el tiempo.
- Todas las métricas de riesgo (PAE, PML, etc.) son funciones del tiempo.

Las métricas puntuales, como la PAE, se convierten entonces en funciones del tiempo. Esto implica perder algunas de las características deseables de estas métricas integrales condensadas. Para obtener métricas de valor puntual, se requiere un promedio de tiempo simple, con una elección arbitraria de sus límites.

5.5 Incorporación de variables con incertidumbre profunda

Las características futuras del entorno construido, la dinámica de los sistemas sociotécnicos o las condiciones exactas del clima futuro, por mencionar algunos, son insumos deseables para la modelación del riesgo, útiles para diseñar las acciones y políticas para anticipar la materialización del riesgo. Sin embargo, saber con precisión arbitraria cómo cambiarán los fenómenos naturales no estacionarios, los elementos expuestos y su vulnerabilidad en un futuro lejano, o incluso cercano, es prácticamente imposible. Además, asignar cualquier tipo de modelo de probabilidad a un comportamiento tan dinámico y complejo es extremadamente difícil sin arbitrariedad.

⁷ Para una descripción general del proceso de Poisson no homogéneo, se remite al lector a Kirgman (1992).

La mayoría de las variables involucradas en la evaluación probabilista del riesgo encajan bien en los modelos de probabilidad. Como se presentó anteriormente, es incluso posible incorporar tendencias de fondo en el cálculo, manteniendo el problema dentro del alcance de la teoría de la probabilidad. ¿Pero qué sucede cuando se incorpora una nueva variable para la cual no es posible hacer suposiciones puntuales razonables, no existen datos observados (o no los suficientes), no es posible predecir su comportamiento a partir de modelos físicos y no hay un consenso acotado sobre su evolución? En este caso, estamos ante un problema de incertidumbre profunda. El cambio climático es un claro ejemplo de una variable con incertidumbre profunda.

Tratar con una incertidumbre profunda en la evaluación de riesgos requiere una expansión del enfoque metodológico, trasladando la modelación del riesgo catastrófico, de ser una metodología indexada a la teoría de la probabilidad, a indexarla a la *teoría de conjuntos aleatorios*. La teoría de conjuntos aleatorios (Kendall, 1974; Matheron, 1975) es considerada hoy en día como la teoría matemática más general para el tratamiento de la incertidumbre. Esto significa que dentro de esta es posible operar con diversos tipos de estructuras de incertidumbre (por ejemplo, cuerpos de evidencia de Dempster-Shaffer, estructuras info-gap, cajas de probabilidad, intervalos crudos, conjuntos difusos, e incluso funciones de distribución de probabilidad, entre otros).

Sea $(\mathcal{L}, \ell)$ el conjunto aleatorio que contiene todas las imágenes de los cálculos de pérdidas. Entonces $\mathcal{L}$ es la colección de elementos focales de pérdida (intervalos, L_j) y $\ell(L_i)$ para $L_j \in \mathcal{L}$ es la asignación de masa, es decir, la probabilidad de ocurrencia del evento que generó el elemento focal de pérdida. Sea F el evento en el que la pérdida, P , excede la cantidad p (es decir, $F = \{P: P \geq p\}$), entonces, las tasas de excedencia de pérdida *inferior* y *superior* se obtienen como:

$$v(p)_L = \sum_{j=1}^n I[L_j \subseteq F] \cdot \ell(L_j) \quad \text{Ecuación 11}$$

$$v(p)_U = \sum_{j=1}^n I[L_j \cap F \neq \emptyset] \cdot \ell(L_j) \quad \text{Ecuación 12}$$

donde n es el número total de elementos focales en $\mathcal{L}$, e $I[\cdot]$ es la función indicador. Por lo tanto, la inclusión de variables con incertidumbre profunda, como el cambio climático, implica que el resultado se exprese mediante una curva de excedencia de pérdidas *imprecisa*, compuesta por una curva superior y una inferior. Así mismo, todas las métricas de riesgo se determinan como intervalos, es decir, son de naturaleza imprecisa.

5.6 Toma de decisiones de gestión del riesgo y adaptación al cambio climático

La gestión del riesgo de desastres incluye diferente tipo de acciones, que adicionalmente a lo que convencionalmente se cree sobre atención de emergencias y desastres, incluyen la preparación para la atención de este tipo de escenarios, pero sobre todo van desde profundizar el conocimiento, a partir del monitoreo de fenómenos, estudios y modelaciones de peligro, vulnerabilidad y riesgo, hasta la reducción del riesgo desde una perspectiva no estructural, es decir, a través de normas, guías, procesos de educación y capacitación, el ordenamiento del uso del suelo, etc., y desde una perspectiva estructural, es decir,

mediante la construcción de obras para el control de erosión, para adecuar las orillas y cauces de los ríos, las intervenciones en estructuras y edificaciones. Las acciones de conocimiento y reducción del riesgo están directamente relacionadas con las acciones de adaptación al cambio climático. Dentro de la amplia gama de posibilidades para reducir el riesgo, el tipo de eventos, el sistema de gestión del riesgo, ambiental y/o de cambio climático, así como las políticas nacionales o locales, o incluso las opiniones de expertos o funcionarios públicos pueden influir sobre las medidas que se puedan y deban adoptar. Por ejemplo, en problemas de riesgo dominados por eventos de alta intensidad, no es extraño que se opte por llevar a cabo procesos de reubicación. Sin embargo, esta no es la única posibilidad disponible, ni necesariamente la óptima. La mejor combinación de alternativas de reducción de riesgos es, en general, extremadamente difícil de obtener sin arbitrariedad.

Tanto el riesgo catastrófico como las medidas de gestión del riesgo son estados hipotéticos cuya cuantificación exacta es imposible. Esto implica que la modelación del riesgo requiere de una cuantificación rigurosa de la incertidumbre (como la presentada), de lo contrario, no se está hablando de riesgo de desastres. Del mismo modo, la incorporación de medidas de gestión del riesgo que intervienen las condiciones que conducen a la existencia de riesgo, debe seguir un enfoque que permita conocer todas las posibles variaciones de la forma en que puede darse la intervención. No solo se trata de un problema fuertemente no lineal, sino profundamente incierto. A esto se le conoce como *incertidumbre profunda*.

Hacer frente a la incertidumbre profunda requiere de enfoques novedosos que faciliten el proceso de toma de decisiones, llevándolo más allá de la visión clásica determinista (incompleta e insuficiente) en la que el problema y su solución pueden ser perfectamente determinados, a una visión centrada en la incertidumbre, basada en los planteamientos de la ciencia post-normal, en donde se reconoce el vasto dominio de posibilidades como puede desarrollarse el problema, y se busca una solución que sea la mejor en la mayoría de escenarios futuros inciertos.

Recientemente varios autores han propuesto enfoques para abordar problemas con incertidumbre profunda y orientar la toma de decisiones (ver, por ejemplo, la recopilación dada en Marchu et al., 2019). Resalta el enfoque conocido como *Toma de Decisiones Robusta* (Robust Decision Making, RDM) (Lempert, 2019), el cual sigue una metodología denominada XLRM, en donde X se refiere a la incertidumbre, L a las posibles acciones a formular, R al modelo del sistema y M son las métricas de éxito de las posibles acciones. De acuerdo con Lempert (2019), los pasos para lograr una toma de decisiones robusta son: 1) enmarcar el análisis por medio de la definición de un modelo (R) que describa suficientemente bien el problema; 2) simulación, considerando la incertidumbre (X) del efecto de las posibles acciones (L) en el sistema; 3) exploración de resultados y cuantificación de métricas de éxito (M); 4) comparación y análisis del éxito de las acciones en lograr el objetivo planteado y; 5) iteración y reevaluación. En resumen, se reconoce que no es posible lograr una toma de decisiones robusta sin considerar las múltiples ramificaciones que definen el dominio de las posibilidades futuras.

5.6.1 Ingeniería de Control del Riesgo (Risk Control Engineering)

Siguiendo los metaconceptos de la teoría de control, Bernal et al. (2021) plantean los lineamientos de la *Ingeniería de Control de Riesgo* (Risk Control Engineering, RCE), como metodología para la cuantificación de las posibles maneras como puede controlarse el riesgo de desastres y medidas de adaptación al cambio

climático, a partir de diferentes tipos de intervención. La RCE es un marco metodológico diseñado específicamente para ayudar a los gobiernos, las instituciones y las partes interesadas del sector privado a orientar la toma de decisiones bajo incertidumbre profunda en el contexto de la gestión del riesgo. El proceso de la RCE se resume en la Figura 94. La RCE sigue lineamientos y procedimientos similares a los planteados por Lempert (2019) en la RDM, conduciendo a una toma de decisiones basada en el mejor resultado posible (optimización) ante una vasta cantidad de futuros inciertos.

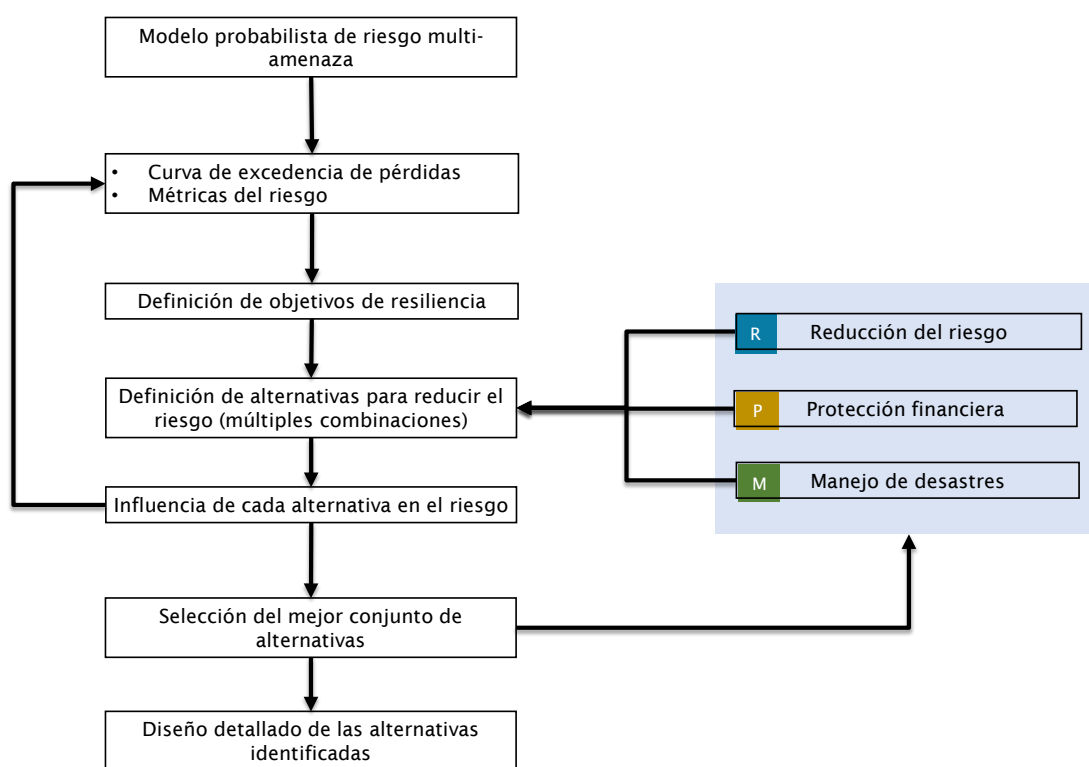


Figura 94. Proceso de Ingeniería de Control del Riesgo (RCE)

La RCE se basa en medir el efecto de las medidas de reducción del riesgo de desastres y/o adaptación al cambio climático, y así encontrar estrategias óptimas a un costo favorable. La métrica por excelencia del riesgo es la curva de excedencia de pérdidas (CEP). La capacidad de una medida de para reducir el riesgo se mide, en rigor, en términos de su capacidad de reducir la CEP dentro de un intervalo correspondiente con la capacidad propia de la medida.

La CEP, entre muchas otras propiedades interesantes, se puede estratificar, permitiendo la definición de un conjunto de medidas o acciones de intervención encaminadas a reducir el riesgo y/o adaptación al cambio climático (ver Figura 95). El concepto de estratificación del riesgo está asociado con la efectividad de las medidas de reducción del riesgo en diferentes niveles. Esto significa que cada medida de gestión del riesgo cubre o es efectiva en una capa, “estrato” o región de la CEP, y no en todo el dominio de la pérdida.

Cada medida de gestión del riesgo afectará la CEP de forma diferente, por lo cual se requiere una colección o conjunto de medidas para llevar el riesgo a niveles aceptables. Dicho conjunto de medidas constituye

una *estrategia de gestión del riesgo de desastres*. El paisaje del riesgo se modifica cuando se aplica una estrategia determinada. La mejor manera de definir si una estrategia es lo suficientemente buena para reducir el riesgo, es repetir la evaluación del riesgo incluyendo el efecto de todas las medidas que la componen. Si se define una gran cantidad de posibles variaciones en la estrategia de gestión, en términos de las medidas que la componen y su efectividad para reducir la CEP, es posible identificar cuál de las estrategias estudiadas es óptima o eficiente para reducir el riesgo.

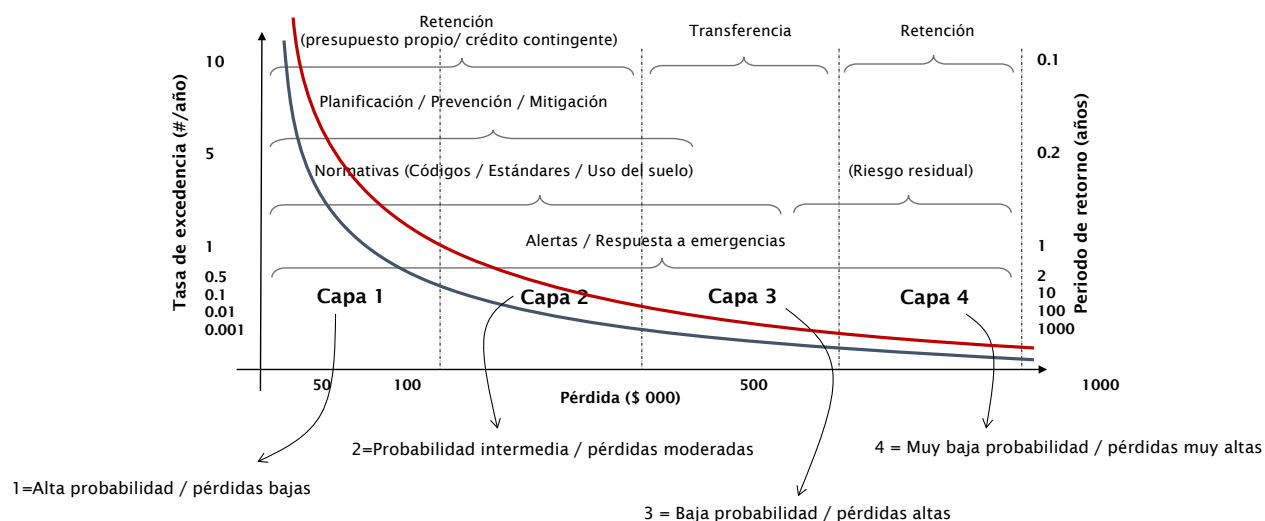


Figura 95. Ilustración de la estratificación de una CEP en un estado sin intervenir (curva roja) y el efecto en reducción del riesgo aplicando las acciones indicadas por estrato (curva azul).

La metodología RCE considera tres tipos de acciones o medidas de gestión del riesgo y /o adaptación al cambio climático que pueden ser incorporadas en la modelación con el fin de medir su efectividad. Primero, acciones de *reducción del riesgo*, las cuales buscan disminuir la exposición y la vulnerabilidad. Estas son acciones de mitigación, protección, prevención y planificación que concretamente corrigen la exposición o la vulnerabilidad creadas, o evitan la configuración de nueva exposición y vulnerabilidad, y en consecuencia reducen directamente la curva de excedencia de pérdidas.

Se consideran también medidas de *protección financiera*, o transferencia del riesgo, las cuales buscan brindar los mecanismos de compensación necesarios para garantizar la disponibilidad de recursos con los cuales puedan cubrirse los costos de los desastres y enfrentar la recuperación. En estos mecanismos es usual transferir parte del riesgo a un tercero, que tiene la responsabilidad, a cambio de una compensación económica, de cubrir parte de las pérdidas con sus propios recursos. Si bien estas medidas no inciden directamente en la pérdida directa, si reducen la pérdida neta del responsable del riesgo.

Finalmente, las acciones de *manejo de desastres* permiten limitar los impactos totales una vez ha ocurrido el desastre. Los sistemas de alerta temprana, planes de emergencias y contingencia, así como los procesos de atención inmediata, reconstrucción, recuperación y restitución de servicios esenciales, deben ser definidos con base en el modelo de riesgo y tienen una incidencia importante en la reinstalación o no de las condiciones de exposición y vulnerabilidad preexistentes, de cara a eventos futuros (Cardona, 1996; 1997).

Como se mencionó anteriormente, una estrategia de gestión del riesgo y de adaptación al cambio climático consiste en la combinación de múltiples medidas. Puede definirse en términos de: i) las medidas que la componen; ii) la capacidad de reducción del riesgo de cada medida; y iii) el costo de implementación de cada medida. La incorporación de las medidas en el modelo de riesgo se realiza modificando los aspectos que se espera sean modificados por la medida, por ejemplo:

- La reducción de la vulnerabilidad de las construcciones e infraestructura expuestas, disminuyendo el potencial de pérdida una vez ocurren los eventos peligrosos.
- Un proceso de reubicación cambia directamente la exposición, reduciendo el valor expuesto al evento. Los elementos son trasladados a otra ubicación, con exposición y vulnerabilidad diferentes a los originales.
- Un mecanismo de protección financiera reduce la pérdida para el responsable del riesgo, limitando las pérdidas netas como máximo a las porciones en retención.

La reducción del riesgo a un nivel aceptable puede lograrse por medio de una enorme cantidad de combinaciones de medidas de gestión del riesgo y adaptación al cambio climático. La mejor combinación de medidas es usualmente muy difícil de establecer sin arbitrariedad. Por esta razón, en la RCE se establecen de forma estocástica múltiples posibles estrategias de gestión con el fin de probar la efectividad de todas dentro del modelo de riesgo. Dado que la búsqueda aleatoria de la combinación óptima puede ser demasiado extensa, se emplea computación evolutiva con el fin de aproximarse a la estrategia o combinación de medidas que permitan reducir el riesgo a menor costo. A continuación, se resume el algoritmo genético de optimización implementado dentro de la RCE:

1. Se crean al azar un gran número de combinaciones de medidas de gestión del riesgo para poblar una primera generación de estrategias. Cada estrategia se considera un individuo. El genotipo de un individuo es el conjunto de medidas que lo componen (ver Figura 96). Cada individuo tiene una capacidad diferente de reducir el riesgo. Aquel que reduzca el riesgo a un menor costo se considera el *campeón* de la primera generación.
2. El proceso evolutivo comienza de manera que se crean aleatoriamente nuevas combinaciones de alternativas como resultado del cruce y mutación de los individuos de la generación anterior. El proceso se repite por un cierto número de generaciones. El *campeón* de la última generación tiene la combinación óptima de medidas de gestión del riesgo a aplicar. Esta combinación es un fuerte candidato para convertirse en la estrategia de gestión a llevar a cabo.

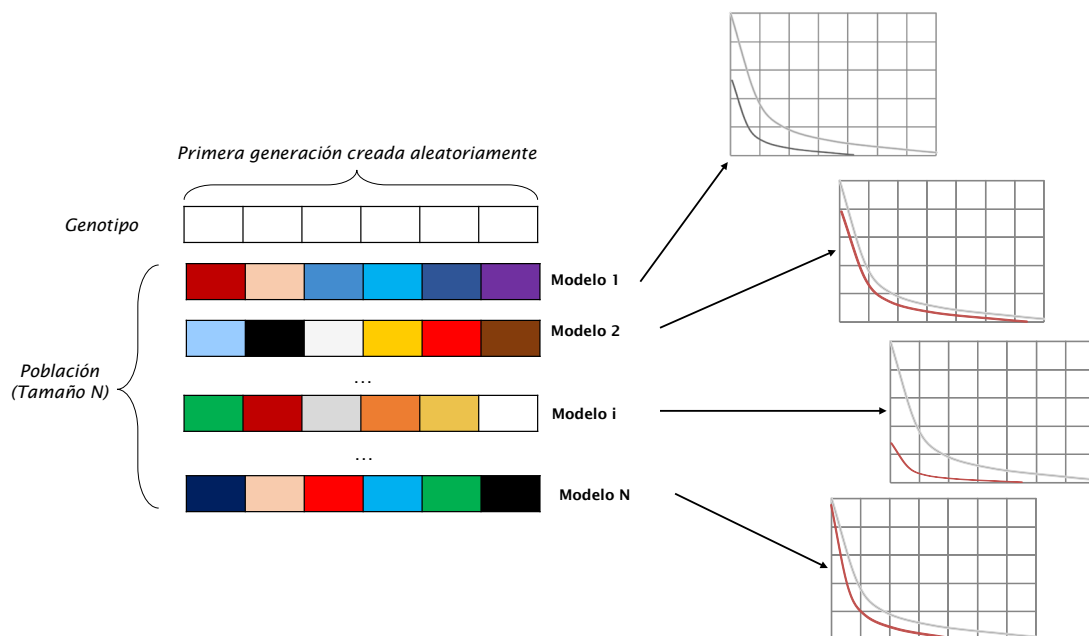


Figura 96. Ilustración de la creación de una primera generación de estrategias de gestión del riesgo. Los colores en los cuadros son para ilustrar las diferentes características dentro de cada medida.

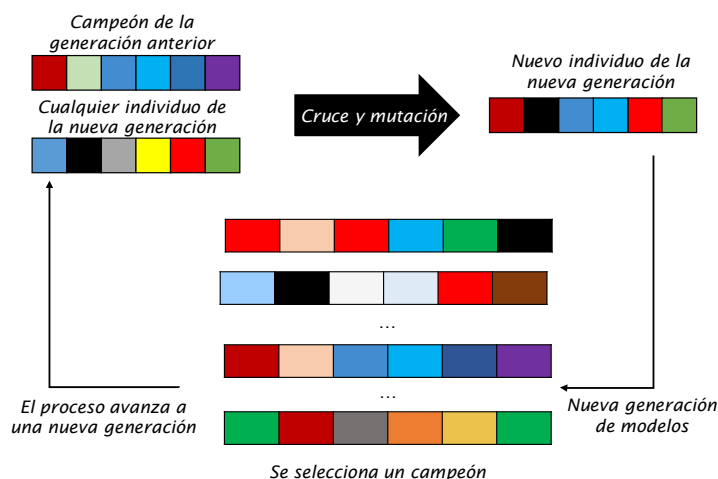


Figura 97. Ilustración del proceso evolutivo para la optimización de combinación de medidas de reducción del riesgo

Dado que se trata de un enfoque basado en optimización de búsqueda aleatoria, las estrategias de gestión obtenidas del proceso pueden variar si se ejecuta varias veces. Es posible entonces definir un grupo de posibles estrategias que cumplen con los criterios de optimización u otros criterios restrictivos (como por ejemplo un determinado presupuesto máximo de inversión), con el fin de presentar un conjunto de posibles estrategias al tomador de decisiones. Es decir que, en un proceso de toma de decisiones robustas, la optimización es simplemente una herramienta de ayuda a la preselección de estrategias dentro del vasto dominio de posibilidades.

6 MODELACIÓN PROBABILISTA DE AMENAZAS HIDROMETEOROLÓGICAS

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. Dada la influencia que el cambio climático tiene principalmente sobre amenazas de origen hidrometeorológico, influencia que no es igual de crítica para amenazas de origen geológico, se presentan en este informe estos dos grupos de amenazas de forma separada, con el fin de hacer la asociación al componente climático de forma más directa para los fenómenos hidrometeorológicos. No obstante, conviene indicar que algunas amenazas de origen geológico pueden ser influenciadas por condiciones climáticas, y de forma más precisa, por condiciones meteorológicas, como por ejemplo los deslizamientos detonados por exceso de lluvia, o el transporte de ceniza volcánica por el viento.

6.1 Modelación del forzamiento meteorológico

En esta consultoría se adopta una metodología fundamentada en la modelación del forzamiento meteorológico del cual se derivan las amenazas hidrometeorológicas. A partir de los registros históricos de precipitación, temperatura y otras variables meteorológicas⁸ que estén disponibles en el país, se construyen series de tiempo de larga duración (miles de 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., en base a 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 (de exceso o déficit de lluvias y temperatura extremas, por ejemplo) que podrían ocurrir con una baja frecuencia (i.e., no necesariamente vistas en la historia). Estas condiciones extremas derivan en eventos de amenaza como sequías, inundaciones fluviales o inundaciones costeras. La incorporación de los potenciales impactos del cambio climático se hace al perturbar las series estocásticas para incluir los cambios en temperatura y precipitación dados por las proyecciones, para luego recalcular cada amenaza.

6.1.1 Generación estocástica de series climáticas

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

⁸ Variables como evapotranspiración potencial, humedad relativa, velocidad y dirección del viento, entre otras.

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 98). 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.

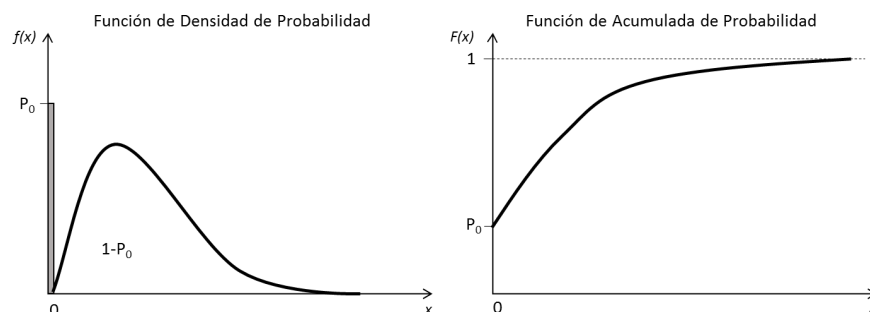


Figura 98. Ilustración de funciones acopladas de densidad de probabilidad y probabilidad acumulada para la precipitación

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.

La Figura 99 muestra las series sintéticas de un año de duración, para precipitación y temperatura, simuladas mediante el procedimiento descrito anteriormente, para una ubicación arbitraria. Vale la pena mencionar que estos valores no corresponden a un pronóstico, sino que son valores aleatorios que han sido correlacionados para que se ajusten y representen el clima del área de estudio y brinden más información (comparado con la poca información histórica) sobre posibles eventos hidrometeorológicos derivados, que no se hayan presentado aún.

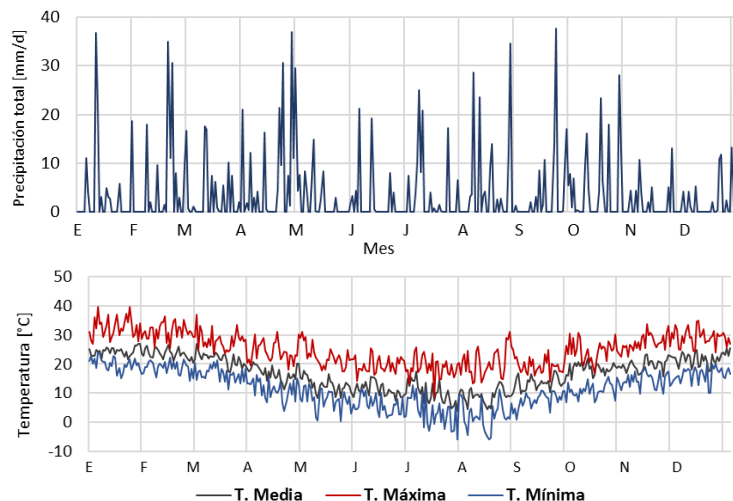


Figura 99. Series sintéticas de un año de simulación para una ubicación arbitraria.

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 100 presenta un diagrama de flujo del proceso de generación estocástica de series meteorológicas, específicamente para precipitación y temperatura.

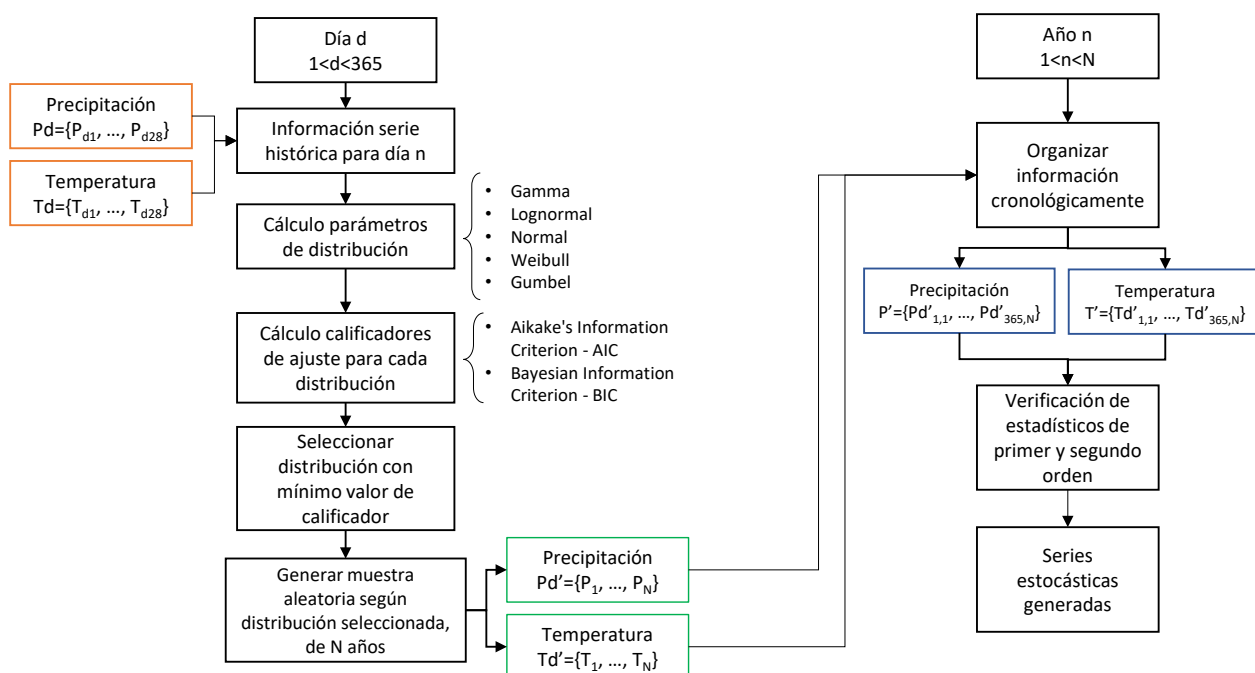


Figura 100. Diagrama de flujo del proceso de generación de series sintéticas.

6.1.2 Incorporación del Cambio Climático en la generación de series climáticas

La incorporación del cambio climático en las series simuladas constituye un procedimiento de reducción de escala (*downscaling*) estadístico, basado en el generado estocástico de series meteorológicas descrito anteriormente, en el 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.

Para incorporar el cambio climático en la generación de las series climáticas se analizan todas las proyecciones dadas en los modelos circulación global disponibles en el CMIP6⁹, para múltiples escenarios de emisiones: SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP4-6.0, SSP5-8.5; como se presenta en la Figura 101.

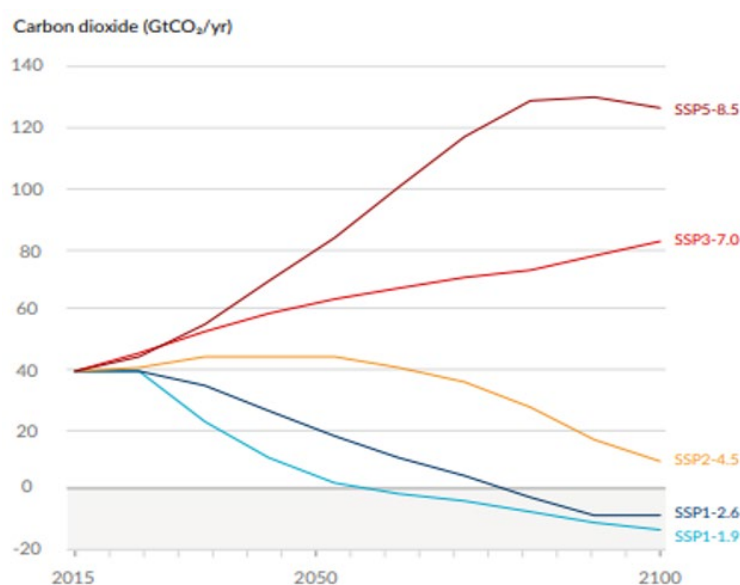


Figura 101. Escenarios de cambio climático según el IPCC – AR6 (2021)

⁹ Se usan los siguientes modelos de circulación GCM (incluyendo múltiples versiones): Australian Community Climate and Earth System Simulator (ACCESS 1); Beijing Climate Center Climate System Model versión 1.1 (BCC-CSM 1.1); Beijing Normal University Earth System Model (BNU-ESM); Canadian Earth System Model (CanESM2); Community Climate System Model (CCSM4); Community Earth System Model Version 1 (CESM1); Centro Euro-Mediterráneo sui Cambiamenti Climatici (CMCC); Centre National de Recherches Météorologiques - Coupled Model 5 (CNRM-CM5); Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO-Mk3-6-0); Flexible Global Ocean-Atmosphere-Land System, Gridpoint version 2 (FGOALS-g2); First Institute of Oceanography-Earth System Model (FIO-ESM); Geophysical Fluid Dynamics Laboratory - Earth System Model 2G (GFDL-ESM2G); Goddard Institute for Space Studies-E2 (GISS-E2); Hadley Centre Coupled Model Version 3 (HadCM3); Hadley Centre Global Environmental Model, version 2 (HadGEM2-ES); Institute for Numerical Mathematics Climate Model 4 (INMCM4); Institut Pierre Simon Laplace Model (IPSL-CM5A); Model for Interdisciplinary Research on Climate 4 (MIROC4h); Model for Interdisciplinary Research on Climate Earth System Model (MIROC-ESM); Max Planck Institut für Meteorologie Earth System Model (MPI-ESM); Meteorological Research Institute Global Climate Model 3 (MRI-CGCM3); Norwegian Earth System Model (NorESM1).

Las SSP¹⁰ son escenarios narrativos descriptivos del cambio climático que tienen en cuenta el progreso socioeconómico y la capacidad de mitigación y adaptación del mundo. A través de la descripción narrativa de los diferentes escenarios, se puede asignar cada camino de los SSP y relacionarlo directamente con los escenarios de emisiones teniendo en cuenta sus valores de emisiones, de esta manera por ejemplo un escenario con alto nivel de uso de combustibles fósiles y poca mitigación como el SSP5 está asociado o representado por un forzamiento radiativo adicional promedio al 2100 estimado en 8.5W/m^2 , mientras que un escenario con mejor mitigación como el SSP2 está asociado con un forzamiento radiativo adicional de 4.5W/m^2 (Escoto et al., 2017). Por el contrario, un escenario SSP1 con narrativa de sostenibilidad (bajo crecimiento de la población, alto crecimiento económico, altos niveles de educación, gobernabilidad, una sociedad globalizada, cooperación internacional, desarrollo tecnológico y conciencia ambiental) estaría asociado con un forzamiento radiativo adicional de 2.6W/m^2 .

La Figura 102 muestra las proyecciones de cambio en precipitación y temperatura media en una ubicación arbitraria. Estas proyecciones son los resultados de la combinación de 53 modelos de circulación global del CMIP6, evaluados para los escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero previamente descritos.

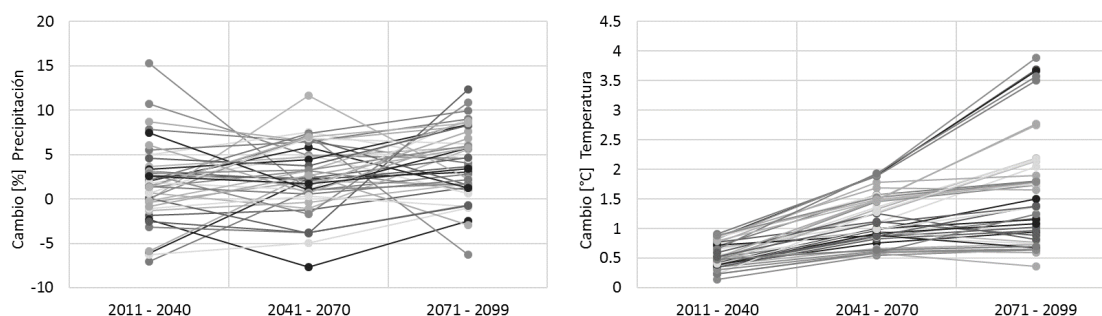


Figura 102. Proyecciones de cambio de precipitación (izquierda) y temperatura (derecha) según múltiples GCM y SSP para una ubicación arbitraria

A partir de las gráficas de dispersión de los modelos de circulación global se puede concluir que:

- Los modelos de circulación global tienen una alta dispersión, lo que indica que las proyecciones para un mismo punto tienen un rango amplio de valores esperados.
- No hay un único modelo que se ajuste de forma precisa a los registros históricos para un punto o un área de análisis.
- No se recomienda utilizar valores máximos ni mínimos de los modelos de circulación global, porque pueden subestimar o sobreestimar el clima histórico y aumentar la incertidumbre con las proyecciones de variabilidad climática en el futuro.

El alcance del estudio contempla evaluar el efecto del cambio climático en variaciones en precipitación y temperatura de acuerdo con los siguientes criterios:

¹⁰ Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (*Shared Socioeconomic Pathways*). SSP1: Sostenibilidad. SSP2: Mitad del camino. SSP3: Rivalidad regional. SSP4: Desigualdad. SSP5: Desarrollo impulsado por combustibles fósiles.

- Los modelos de circulación global siempre brindan proyecciones de estas dos variables, y en pocos casos brindan información sobre otros parámetros climáticos (humedad, radiación, velocidad del viento) al ser parámetros complejos que responden a interacciones físicas y químicas de los modelos acoplados de atmósfera-océano-superficie terrestre-hielo oceánico.
- La metodología de peligro climático contempla en su alcance la generación estocástica de series de precipitación y temperatura (proceso estadístico de simulación del clima a partir de registros históricos). La modelación de otras variables climáticas (humedad, radiación, velocidad del viento) implica el uso de modelos complejos de circulación atmosférica e interacción de sistemas terrestres, que no está dentro del alcance de este estudio.

De las series meteorológicas simuladas, para el clima actual o un clima perturbado por cambio climático, se extrae el forzamiento del cual se deriva la ocurrencia de eventos de peligro, los cuales son simulados con modelos basados en la física, como se describe en las siguientes secciones.

6.2 Amenaza de sequía

En términos generales, para el caso de la sequía, a partir de las series históricas y sintéticas de precipitación y temperatura se calculan múltiples *indicadores de sequía*¹¹ para todas las estaciones y a diferentes escalas de tiempo en pasos mensuales. Una vez se obtiene la serie temporal del indicador seleccionado en cada estación, se identifican los eventos de sequía. Los eventos de sequía ocurren cuando el indicador toma un valor negativo, o por debajo de un umbral crítico.

6.2.1 Evapotranspiración de referencia

El cálculo de algunos indicadores de sequía requiere del cálculo previo de la evapotranspiración de referencia, para evaluar las condiciones atmosféricas que definen si se presenta un exceso de agua en la atmósfera (baja evapotranspiración) o un déficit (alta evapotranspiración y poca lluvia). La evapotranspiración de referencia se estima siguiendo el método de Penman-Monteith, descrito en profundidad en el documento *Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop requirements* (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 1998), y que el método más empleado a nivel mundial.

La evapotranspiración de referencia es el potencial de evaporación de la atmósfera; se calcula en una superficie vegetal uniforme sin restricciones hídricas. La superficie de referencia es un cultivo hipotético, con una altura asumida de 0,12 m, una resistencia superficial fija de 70 s/m y un albedo de 0,23 (Allen et al., 1998); es independiente del tipo de cultivo, de su desarrollo o de su manejo. Al no tener restricciones en el contenido de agua, las características del suelo tampoco influyen en su resultado. Estas condiciones permiten comparar los resultados en diferentes localizaciones o estaciones para evaluar las condiciones evaporativas de la atmósfera ya que únicamente varía según las condiciones climáticas presentes.

Es importante señalar que la evapotranspiración de referencia (ET_0) es diferente a la evapotranspiración de un cultivo específico bajo condiciones estándar (ET_c) y a la evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar ($ET_{c_{aj}}$). La evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (ET_c)

¹¹ Los indicadores de sequía son métricas estadísticas estandarizadas que dan cuenta de condiciones de déficit o exceso de agua.

considera características particulares según el tipo de cultivo que se esté evaluando (resistencia del cultivo, albedo, anatomía de las hojas, características de los estomas, propiedades aerodinámicas, entre otros). Por otro lado, la evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar ($ET_{c_{aj}}$) considera cultivos que crecen bajo condiciones ambientales y de manejo diferentes a condiciones óptimas de suelo y agua, presencia de enfermedades o fertilización que implican cambios en el rendimiento de la cosecha.

El método de Penman-Monteith (ver Ecuación 1) para el cálculo de la evapotranspiración de referencia permite cuantificar los procesos de evaporación (vaporización de agua desde una superficie: suelo, vegetación húmeda) y transpiración (vaporización del agua contenida en los tejidos vegetales), que ocurren simultáneamente. Los parámetros necesarios para el cálculo son el brillo solar, la temperatura, la humedad, la velocidad del viento, el flujo de vapor y la resistencia aerodinámica.

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad \text{Ecuación 1}$$

en donde R_n es la radiación neta, G es el flujo de calor del suelo, γ es la constante psicrométrica, T es la temperatura promedio diaria, u_2 es la velocidad del viento (a 2m de la superficie), $(e_s - e_a)$ representa el déficit de presión de vapor y Δ es la pendiente de la curva de presión de vapor. La aplicación de la metodología de Penman-Monteith implica la recopilación de información meteorológica que puede no estar disponible en todos los casos. Los parámetros meteorológicos faltantes se establecen a partir de criterio de expertos, información meteorológica general de la región y las reglas de cálculo recomendadas por la FAO (Raes, 2009). El método de Penman-Monteith para el cálculo de la evapotranspiración de referencia se presenta con detalle en el Anexo 1.

6.2.2 Indicadores

Los indicadores de sequía meteorológica son ampliamente utilizados para identificar los eventos, al detectar condiciones de precipitación por debajo de la precipitación media y condiciones simultáneas de temperatura por encima de las temperaturas promedio. 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 103. Cada evento de sequía está compuesto por la siguiente información:

- *Severidad*: corresponde al área bajo la curva del evento, es decir, el valor acumulado del indicador durante el evento.
- *Duración*: es el tiempo que dura el evento.
- *Intensidad*: se calcula como la severidad dividida por la duración. Es una medida unitaria de la magnitud del evento.

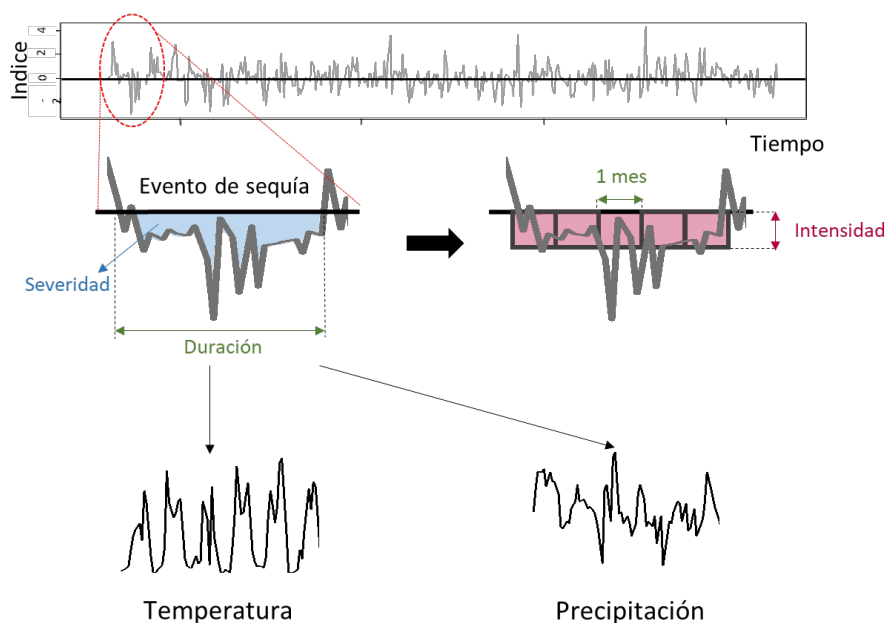


Figura 103. Esquema de indicadores de sequía y conceptos de severidad, duración e intensidad del evento.

Dependiendo del tipo de sequía a evaluar, se pueden incluir diferentes parámetros en el cálculo de los índices. Las sequías meteorológicas están condicionadas a la deficiencia de precipitación en términos de cantidad, intensidad y tiempo de precipitación, y al aumento de la evaporación y transpiración a causa de altas temperaturas, vientos fuertes, baja humedad relativa, intenso sol y menor nubosidad. Las sequías agrícolas están condicionadas por la deficiencia de agua en el suelo en términos de estrés hídrico para las plantas, y la reducción en la biomasa y el rendimiento. Las sequías hidrológicas están determinadas por la reducción en caudales de ríos y quebradas, almacenamiento reducido de los embalses y reducción de los humedales. Esta clasificación de sequías, como sequía meteorológica, agrícola, hidrológica y socioeconómica fue definida por primera vez por Wilhite y Glantz (1985).

Según Jayanthi (2014), los indicadores de sequía agrícola deben integrar las variables pluviométricas y de temperatura, junto con la evapotranspiración para el monitoreo efectivo de los cultivos de secano, pastos y pastizales. Banimahd y Khalili (2013) compararon los índices de sequía agrícola más utilizados, como el Palmer Drought Severity Index - PDSI (Palmer, 1965), el Standardized Precipitation Index -SPI (McKee, Doesken, & Kleist, 1993), el Effective Drought Index -EDI (Byun & Wilhite, 1999), el Reconnaissance Drought Index - RDI (Tsakiris, Pangalou, & Vangelis, 2007) y el Standardized Precipitation Evapotranspiration Index -SPEI (Vicente-Serrano, Beguería, & López-Moreno, 2010). Sus resultados mostraron que la SPEI y la RDI detectaron de manera más apropiada las severidades de sequía máximas, enfatizando el importante papel de la evapotranspiración. Estos resultados son consistentes con el trabajo de Tsakiris et al. (2007), en donde se demuestra que la sola precipitación no correlaciona satisfactoriamente con la producción de rendimiento en cultivos, sino que se requiere la incorporación de la evapotranspiración de referencia (que depende directamente de la temperatura), para describir apropiadamente la ocurrencia de las sequías.

Este estudio no incluye el uso de indicadores que tienen en cuenta parámetros propios del suelo o del cultivo para definir un evento de sequía, como el Indicador de Palmer. Esto se debe a que en el modelo de amenaza por sequía se evalúan las condiciones de tiempo (precipitación y temperatura) únicamente, para clasificar los eventos de sequía independientes de sus posibles efectos en la agricultura. De esta forma se puede evaluar la amenaza independiente de la vulnerabilidad de los elementos expuestos. Es en el modelo de vulnerabilidad (respuesta al agua de cultivos – ver sección 9.4) en el cual se incluyen los parámetros propios del suelo y cultivos existentes en cada unidad de tierra cultivada dentro del área de estudio.

Los indicadores estandarizados de sequía, como el RDI y el SPEI, pueden compararse entre sí en dimensiones espaciales y temporales. La severidad de la sequía caracterizada aplicando estos indicadores, se puede clasificar de acuerdo con lo presentado en la Tabla 36.

Tabla 36. 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

Nótese que, en todos los casos, los indicadores reflejan condiciones de sequía cuando sus valores son negativos, siendo las sequías más severas las asociadas a valores más negativos. Es conveniente evaluar los escenarios de sequía con más de un indicador, ya que ninguno de ellos puede aplicarse universalmente debido a la complejidad de esta amenaza y a las condiciones particulares de las diversas zonas climáticas (Tsakiris et al., 2007). Los indicadores se calculan para cada serie (histórica o simulada) en cada uno de los puntos de la malla de análisis. La Figura 104 muestra un ejemplo del cálculo del indicador de sequía para tres años de la serie histórica e indica la línea del umbral para definir sequías desde los eventos leves (umbral=-1). En este ejemplo, se presenta una sequía de 4 meses entre finales de 1981 y principios de 1982¹².

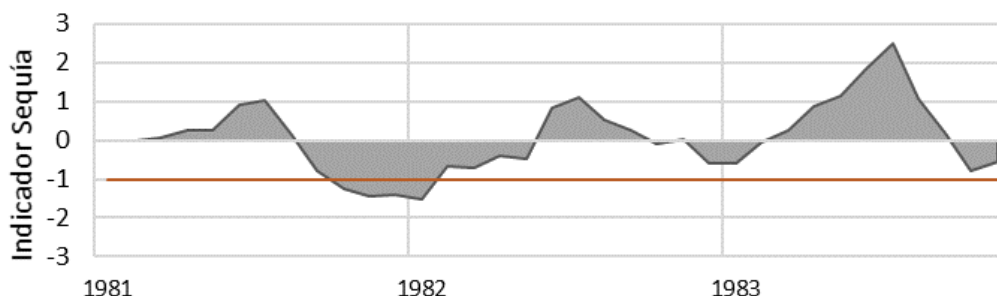


Figura 104. Series de indicador de sequía para 3 meses con umbral=-1.

6.2.3 Definición de eventos regionales de sequía

El siguiente paso es identificar los eventos de sequía que ocurren simultáneamente en varias estaciones de la región de estudio. Para cada mes, se identifican las estaciones con un valor de indicador por debajo

¹² Este es un ejemplo ilustrativo y no corresponde a un evento real de sequía en Costa Rica.

del umbral definido para la evaluación (por ejemplo, -1, para detectar sequías moderadas y severas). Si el número total de estaciones con valores por debajo del umbral es mayor que un cierto porcentaje (por ejemplo, 50%), entonces se identifica una sequía regional. Con cálculos consecutivos para todos los años de simulación, se pueden detectar múltiples sequías regionales, con su valor asociado de duración, severidad e intensidad en cada estación. Cada una de las sequías regionales es un escenario de sequía individual, con una frecuencia anual de ocurrencia igual a $1/N$, en donde N es el número total de años de simulación. La Figura 105 muestra esquemáticamente cómo se identifican las sequías regionales, de acuerdo con los criterios de selección definidos por un valor umbral de indicador y un número mínimo de estaciones que satisfacen dicha condición. Este procedimiento puede aplicarse para toda la región de estudio, o para subregiones definidas por otros criterios, como zonas climáticas, zonas productivas, entidades territoriales, etcétera.

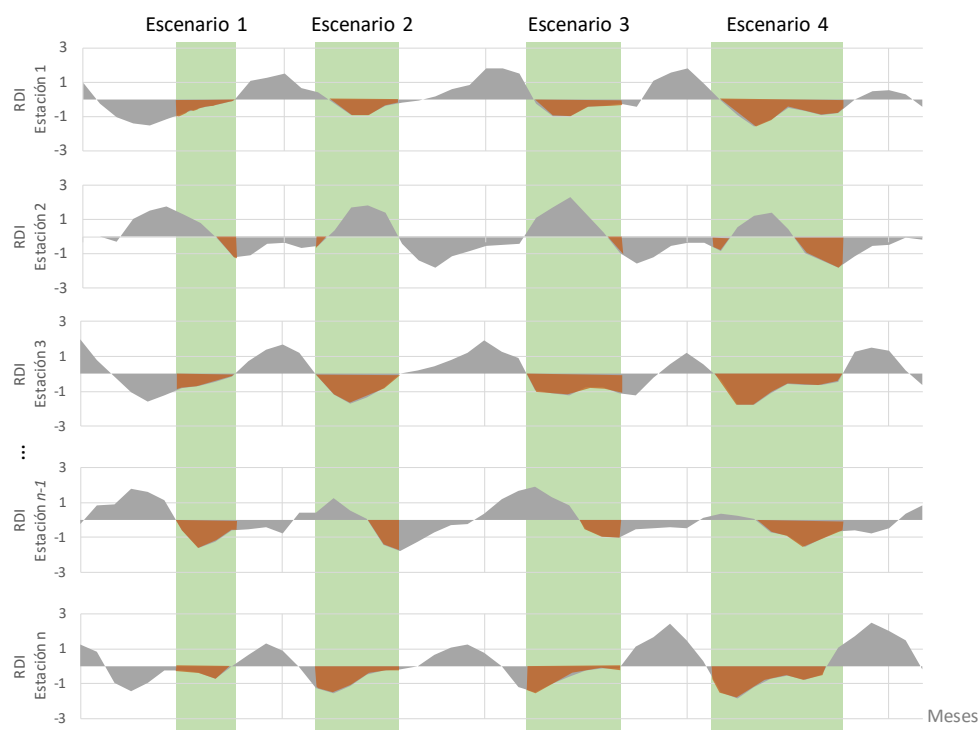


Figura 105. Identificación de sequías regionales sobre las series de tiempo de todas las estaciones del área de estudio.

6.3 Amenaza de inundación pluvial y fluvial

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 modelo para inundaciones costeras se presenta en la sección 6.4. 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.

6.3.1 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. La Figura 106 muestra, a modo de ilustración, eventos de precipitación estocásticos generados sobre una cuenca arbitraria¹³. 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 corresponden a una metodología de “tormentas de diseño” propuesta por Huff en 1967 con el fin de describir la distribución temporal de la precipitación de una zona en términos probabilistas (Rao & Kao, 2006). Huff (1967) identificó que la mayor cantidad de precipitación ocurre en una porción pequeña del total de la duración de cada evento, confirmando el concepto de las curvas IDF (Intensidad – Duración – Frecuencia) en las que se establece que las mayores intensidades de precipitación se registran en lapsos cortos. Así, los eventos de precipitación para un área determinada se clasifican en cuatro cuartiles, definidos como el 25% del segmento temporal en el que ocurre la mayor cantidad de precipitación (ver Figura 107).

¹³ Se trata de un ejemplo ilustrativo y no corresponde a una cuenca de Costa Rica.

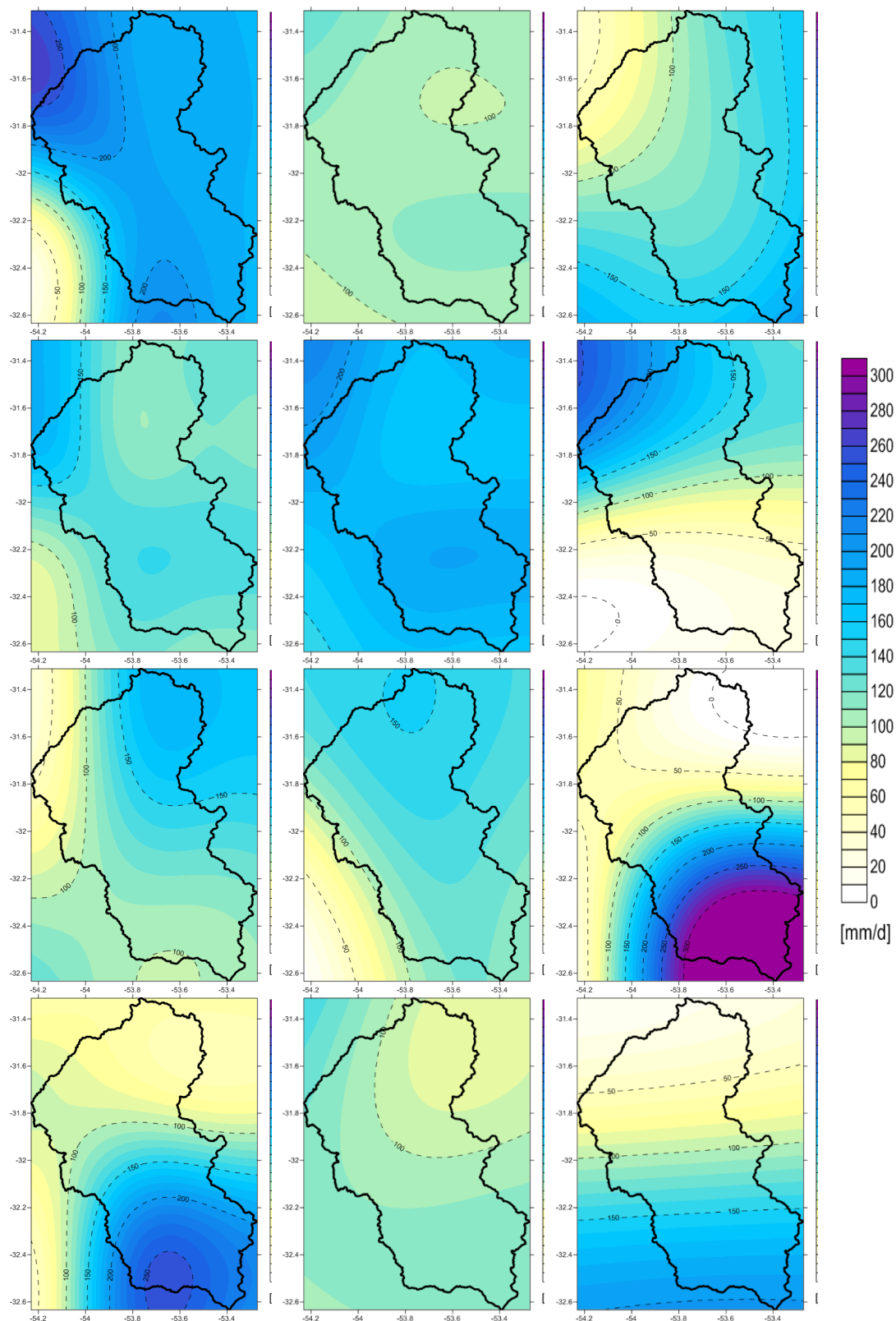


Figura 106. Ilustración de eventos estocásticos de precipitación generados en una cuenca arbitraria.

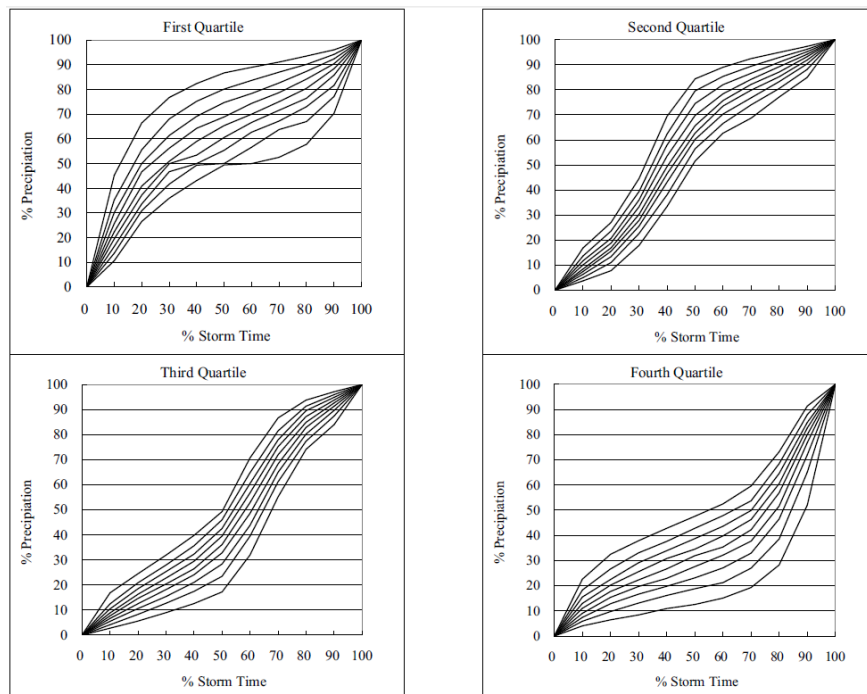


Figura 107. Ejemplo de curvas Huff. Tomado de Rao & Kao, 2006.

Las curvas Huff se obtienen de información intradiaria, en caso de estar disponible, y se construyen en base a la cuantificación estadística de los cuartiles mencionados. Una vez conocidas las curvas, 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 108. Esto hace de las curvas Huff una poderosa herramienta al permitir sintetizar hietogramas desde la información diaria previamente simulada. De esta manera, los aguaceros identificados previamente (ver Figura 108) pueden ser distribuidos en valores horarios haciendo uso de las curvas Huff, como se ilustra en la Figura 109.

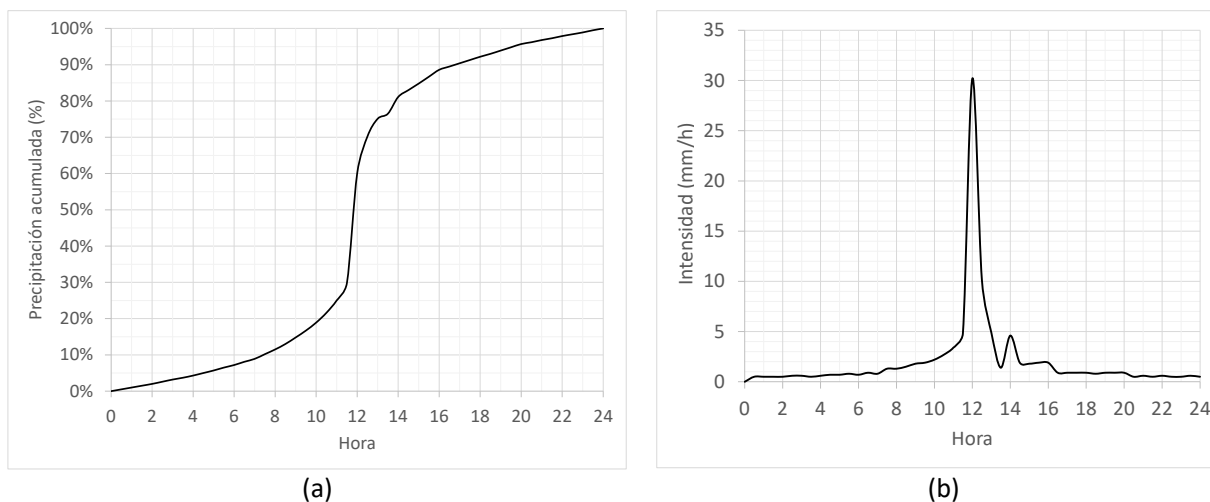


Figura 108. (a) Curva Huff. (b) Derivada temporal de la curva Huff presentada.

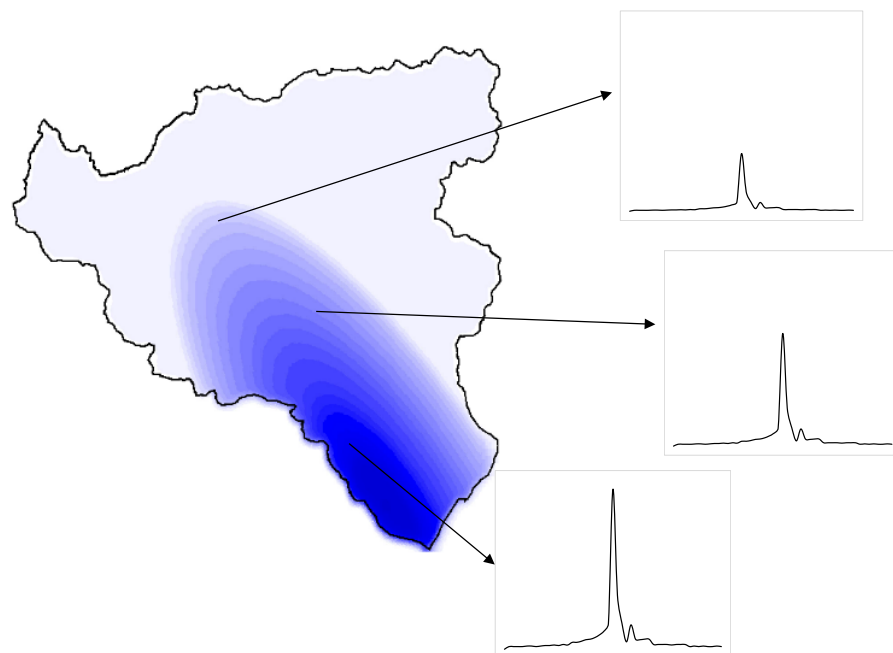


Figura 109. Ilustración de la distribución temporal de la lluvia diaria para un aguacero simulado.

6.3.2 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:

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

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 37 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 2, es para valores de:

$$P_m > \frac{508}{CN} + 5.08$$

Ecuación 3

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 37. Valores de CN para diferentes coberturas (usos de la tierra) y tipos de suelo¹⁴. (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
Descanso (sin cultivo)	77	86	91	94
Superficie impermeable. Calles. Pavimentada	98	98	98	98
Potrero	30	58	71	78

6.3.3 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 6.3.2 (el modelo de infiltración).

El potencial topográfico de acumulación de agua es evaluado a través de la identificación de mayor y menor susceptibilidad tipográfica en un Modelo de Elevación Digital (DEM), como se ilustra en la Figura 110.

¹⁴ Los tipos de suelo mencionados corresponden a los Grupos Hidrológicos del Suelo definidos por el Soil Conservation Service de los Estados Unidos.

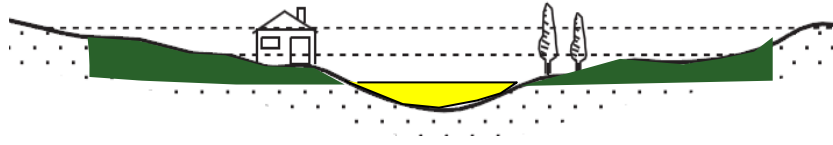


Figura 110. Ilustración de zonas de potencial de acumulación alto (amarillo), medio (verde) o nulo (sin color).

El potencial de acumulación topográfico (PAT) es clasificado en tres categorías, como:

- Alto. Corresponde a depresiones topográficas.
- Medio. Corresponde a 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:

$$Z_{K,L} \geq Z_{X,Y} + Z_{Lim} \quad \text{Ecuación 4}$$

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

$$m_T = \frac{Z_{X,Y} - Z_{K,L}}{D} \quad \text{Ecuación 5}$$

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 111 ilustra la identificación del potencial de acumulación sobre perfil de terreno.

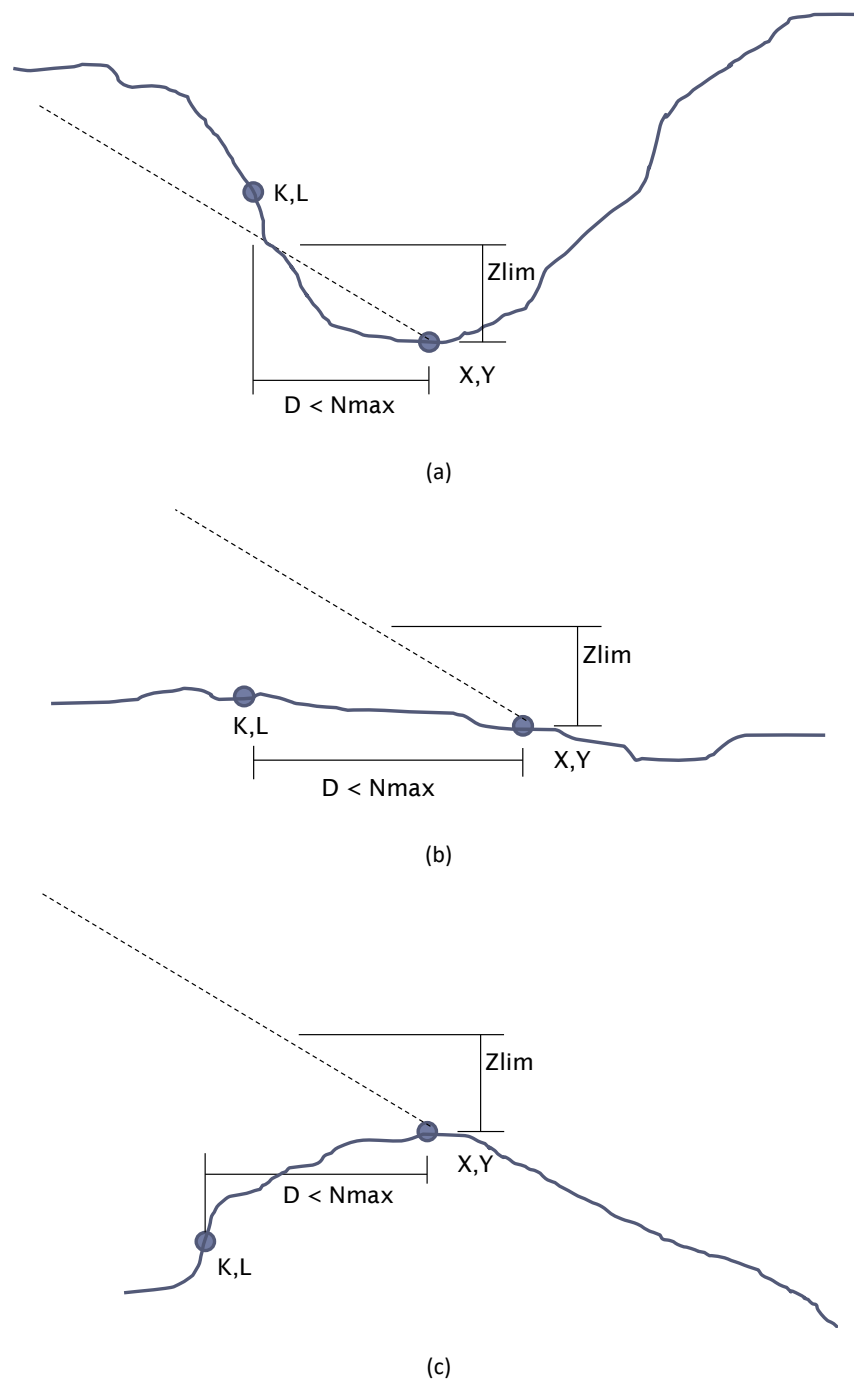


Figura 111. Ilustración de la identificación del PAT. a) Terreno con alta acumulación. b) Terreno con acumulación intermedia. c) Terreno con baja acumulación.

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 38.

Tabla 38. 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

6.3.4 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:

$$t_{celda} = t_c \frac{d_{celda}}{d_{m\acute{a}x}} \quad \text{Ecuación 6}$$

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 $d_{m\acute{a}x}$ 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:

$$\frac{dS}{dt} = I_t - O_t \quad \text{Ecuación 7}$$

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:

$$S = R \cdot O_t \quad \text{Ecuación 8}$$

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:

$$O_t = C_A I_t + C_B O_{t-1}$$

Ecuación 9

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

$$C_A = \frac{\Delta t}{R + 0.5\Delta t}$$

Ecuación 10

$$C_B = 1 - C_A$$

Ecuación 11

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

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

Ecuación 12

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).

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

Ecuación 13

El modelo Clark modificado se presenta esquemáticamente en la Figura 112.

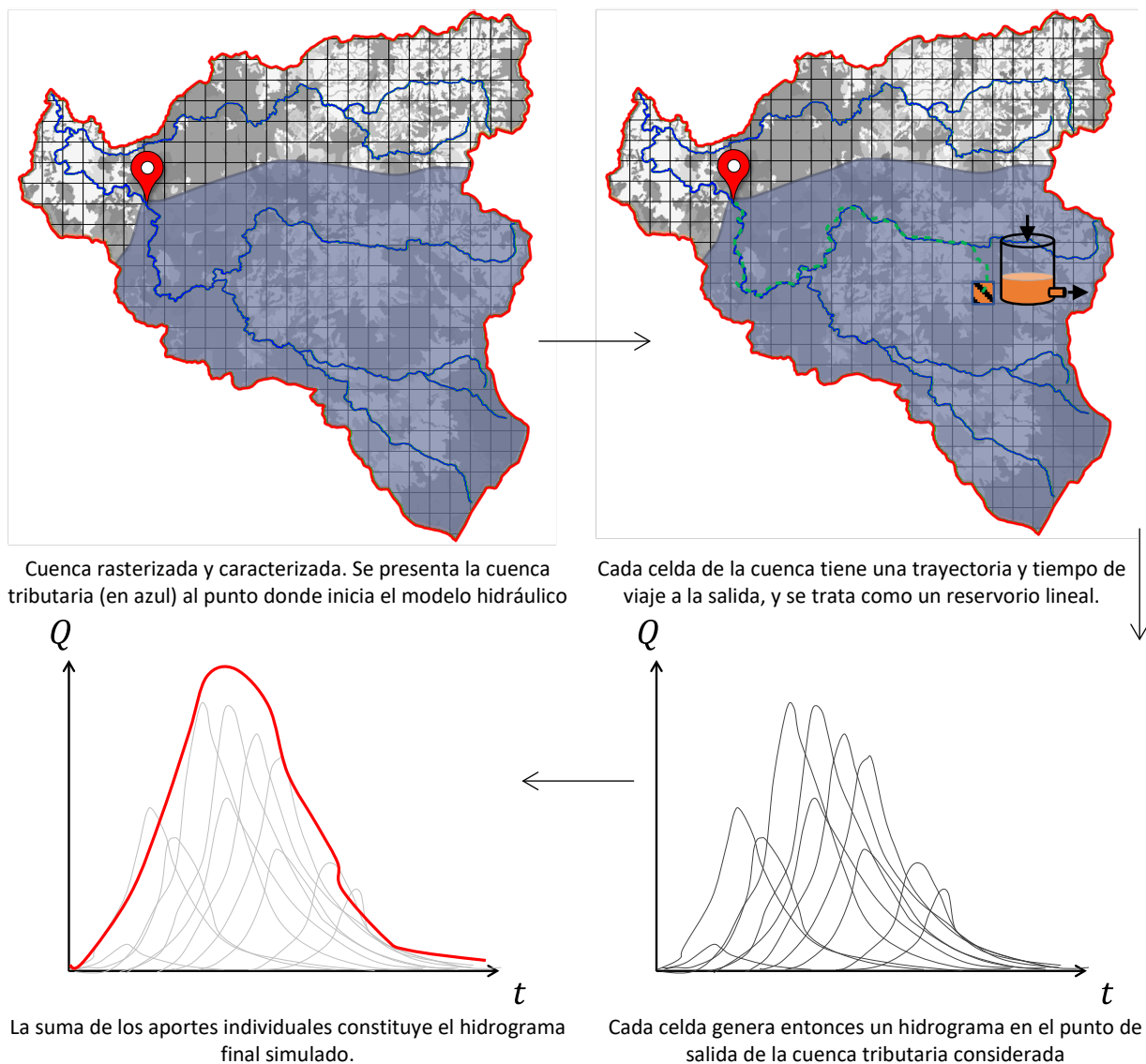


Figura 112. Ilustración del modelo lluvia-escorrentía de Clark modificado.

6.3.5 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.

6.3.5.1 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

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

Ecuación 14

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:

$$h_e = L\bar{S}_f + C \left| \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \right| \quad \text{Ecuación 15}$$

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:

$$L = \frac{L_{lob}\bar{Q}_{lob} + L_{ch}\bar{Q}_{ch} + L_{rob}\bar{Q}_{rob}}{\bar{Q}_{lob} + \bar{Q}_{ch} + \bar{Q}_{rob}} \quad \text{Ecuación 16}$$

$$S_f = \left(\frac{Q_1 + Q_2}{K_1 + K_2} \right)^2 \quad \text{Ecuación 17}$$

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:

$$Q = K\sqrt{S_f} \quad \text{Ecuación 18}$$

$$K = \frac{1.486}{n} AR^{2/3} \quad \text{Ecuación 19}$$

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.

6.3.5.2 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:

$$\frac{1}{g} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{n^2 |u| u}{h^{4/3}} = - \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{\partial z}{\partial x} \quad \text{Ecuación 20}$$

$$\frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{n^2 |v| v}{h^{4/3}} = - \frac{\partial h}{\partial y} - \frac{\partial z}{\partial y} \quad \text{Ecuación 21}$$

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:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} u h + \frac{\partial}{\partial y} v h = 0 \quad \text{Ecuación 22}$$

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.



Figura 113. Ejemplo de configuración geométrica del modelo hidráulico 1D/2D acoplado para el río Yaguarón, Uruguay.

6.4 Amenaza de inundación costera

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 costarricenses¹⁵, generan sobre elevaciones por marea de tormenta que se manifiestan como potenciales inundaciones costeras. En este trabajo las

¹⁵ Con excepción del huracán Otto en 2016.

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 la sección 7.2.

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 114 muestra la trayectoria, con sus diferentes avisos, del huracán Otto (noviembre de 2016).



Figura 114. Trayectoria y avisos del huracán Otto

6.4.1 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 23:

$$\mathbf{x}_s(t_{k+1}) = \mathbf{x}_s(t_k) + \Delta \mathbf{X}_{k,k+1} + e \quad \text{Ecuación 23}$$

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.

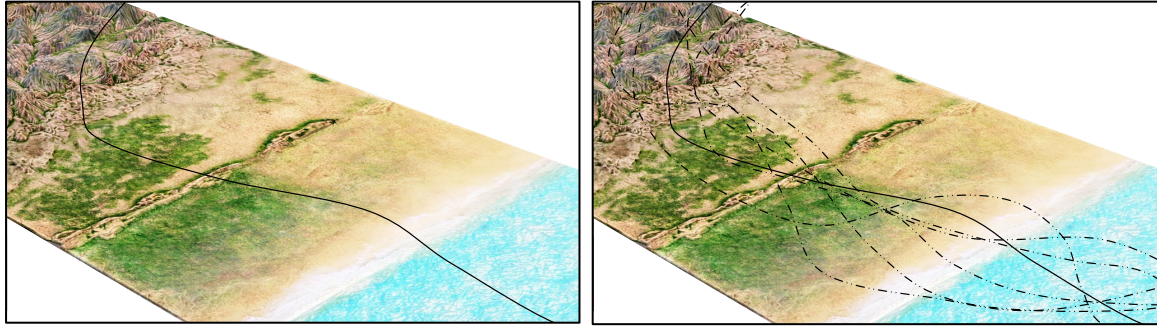


Figura 115. Ilustración de la perturbación de trayectorias sobre un territorio hipotético. De la trayectoria original (izq.) se obtiene una familia de trayectorias perturbadas (der.)

6.4.2 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):

$$v_G = \sqrt{\left(\frac{RMW}{r}\right)^B \cdot \frac{B \cdot \Delta P \cdot \exp\left(-\left(\frac{RMW}{r}\right)^B\right)}{\rho} + \frac{r^2 f^2}{4} - \frac{f \cdot r}{2}} \quad \text{Ecuación 24}$$

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),

$$RMW = 3.015 - 6.291 \cdot 10^{-5} \Delta P + 0.0337 \varphi \quad \text{Ecuación 25}$$

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

$$B = 1.732 - 2.237 \sqrt{A} \quad \text{Ecuación 26}$$

$$A = \frac{RMW \cdot f}{\sqrt{2R_d T_s \cdot \ln \left(1 + \frac{\Delta P}{P_0 \cdot e} \right)}} \quad \text{Ecuación 27}$$

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 116. 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.

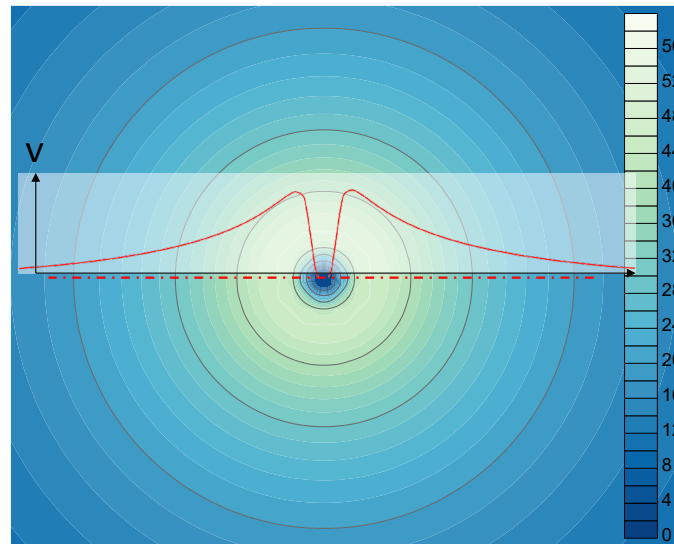


Figura 116. Campo de velocidad gradiente de una tormenta estacionaria con presión central de 950 hPa. El perfil de velocidad presentado es calculado con el modelo de Holland (1980).

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 plantearía. 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:

$$u(z) = \frac{u_*}{k} \left[\ln \left(\frac{z}{z_0} \right) - 0.4 \left(\frac{z}{H^*} \right)^2 \right] \quad \text{Ecuación 28}$$

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:

$$H^* = 343.7 + \frac{0.26}{I} \quad \text{Ecuación 29}$$

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

$$I = \sqrt{\left(f + \frac{2V_G}{r}\right) \left(f + \frac{V_G}{r} + \frac{\partial V_G}{\partial r}\right)} \quad \text{Ecuación 30}$$

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

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}} \quad \text{Ecuación 31}$$

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

$$\tau = \rho \cdot C_d \cdot u^2 \quad \text{Ecuación 32}$$

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 117 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.

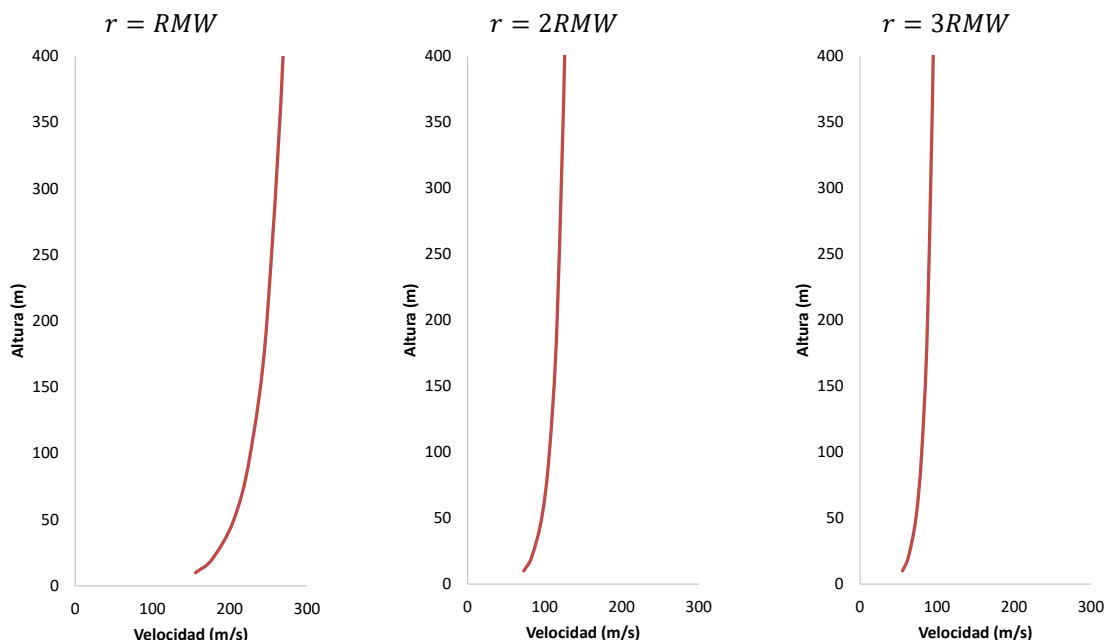


Figura 117. Perfiles de velocidad logarítmicos calculado a diferentes distancias del centro de la tormenta para un huracán con presión central de 930 hPa transitando sobre mar abierto.

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 118.

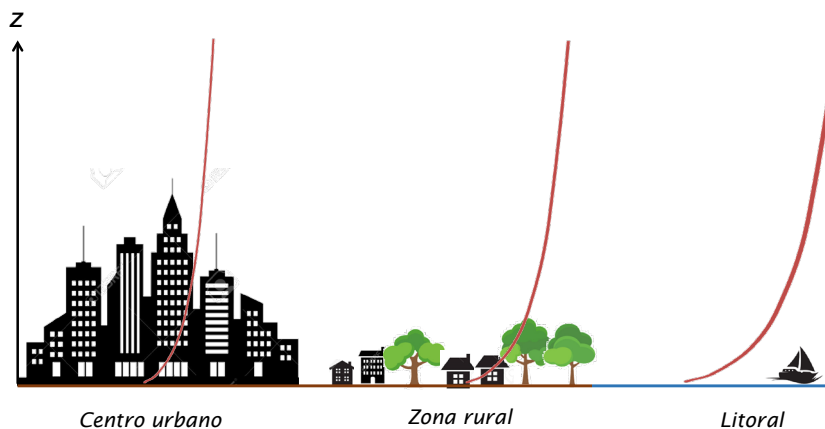


Figura 118. Ilustración del cambio inducido en el perfil logarítmico del modelo de capa límite por cuenta de la rugosidad superficial.

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.

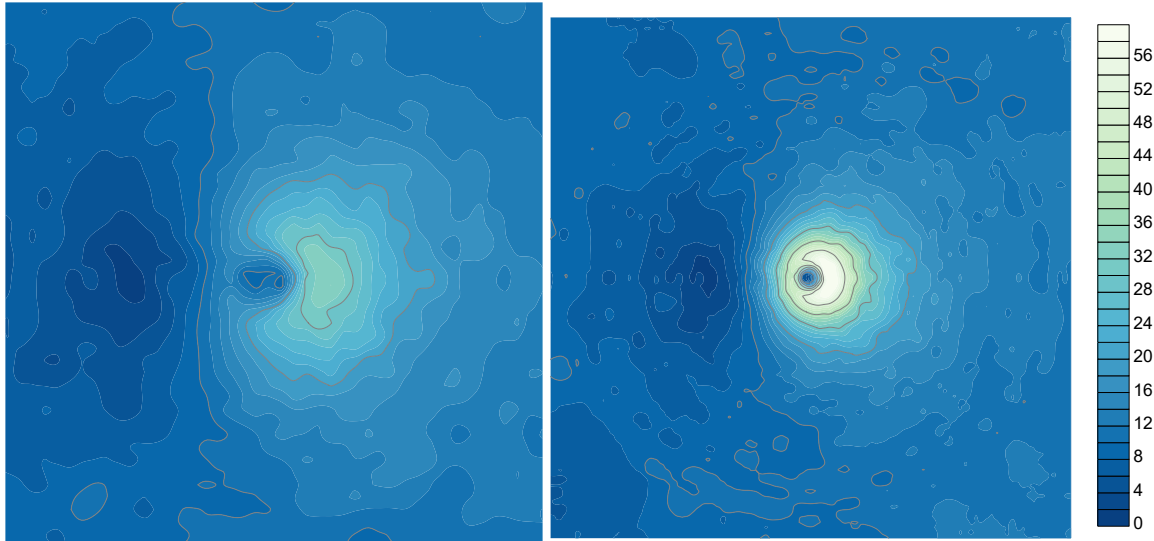


Figura 119. Ejemplos de campos de viento superficial, para huracanes con velocidad de avance de 10 m/s hacia el norte y presión central de 950 hPa (izq.) y 920 hPa (der.).

6.4.3 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).

$$\eta = \eta_c + \eta_p \quad \text{Ecuación 33}$$

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.

$$\eta_c = \int_0^L -\frac{f U_x}{g} \sqrt{\frac{\rho_a c_a U}{\rho \cdot c_b |U_x|}} + \frac{\rho_a c_a U_y U}{\rho g D(y)} dy \quad \text{Ecuación 34}$$

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 sobreelevación de 1 cm por cada hPa de diferencial de presión (ver Ecuación 35). 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 36).

$$\eta_P = \frac{\Delta P}{\rho \cdot g} \quad \text{Ecuación 35}$$

$$P(r) = P_0 + (P_n - P_0) \exp\left(-\frac{RMW}{r}\right) \quad \text{Ecuación 36}$$

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):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\eta + \frac{v^2}{2g} \right) = \frac{\tau_a - \tau_b}{\rho g d} \quad \text{Ecuación 37}$$

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 120 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.

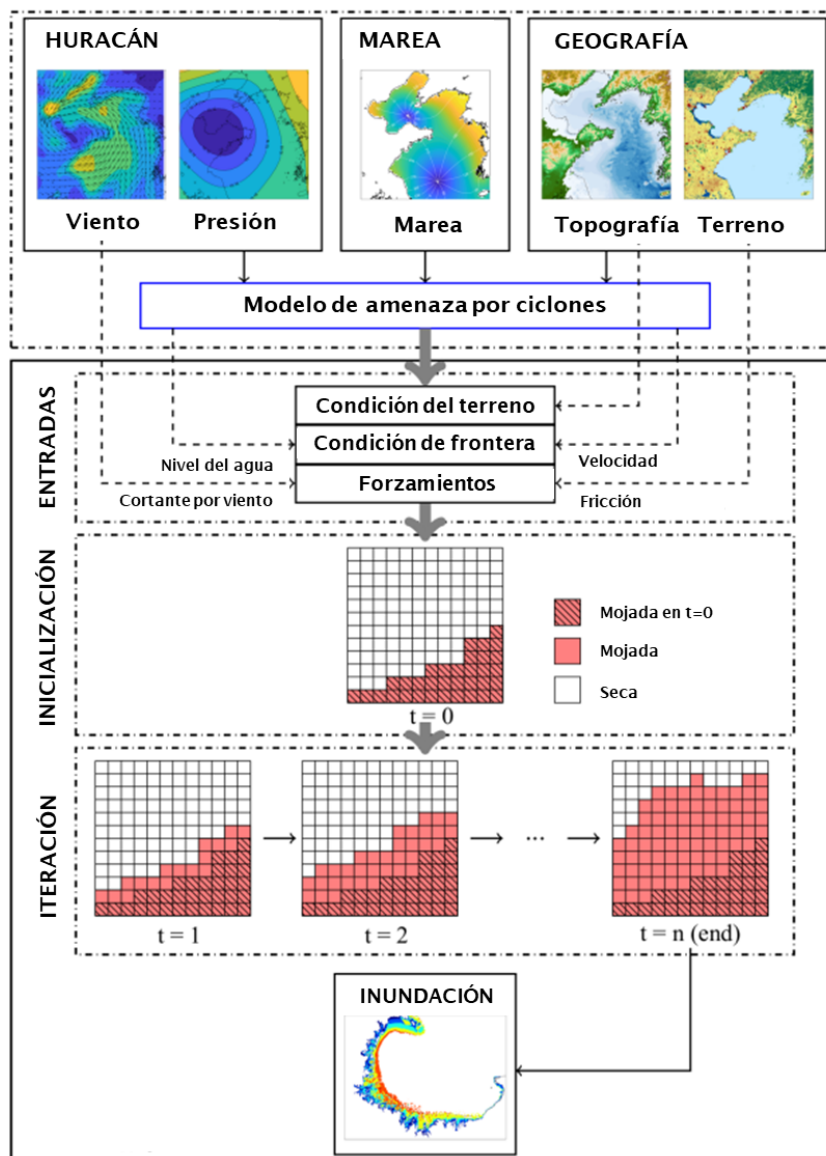


Figura 120. Marco conceptual del modelo de inundación por marea. Modificado de Gao et al. 2024.

7 MODELACIÓN PROBABILISTA DE AMENAZAS GEOLÓGICAS

7.1 Terremoto

Debido a las incertidumbres existentes en aspectos tales como la localización, la magnitud y las aceleraciones esperadas del terreno relacionadas con la ocurrencia de futuros terremotos, se requiere utilizar metodologías probabilistas para evaluar la amenaza sísmica mediante simulaciones numéricas de futuros eventos. A pesar de que existe un marco conceptual común para dichas evaluaciones, pueden seleccionarse diferentes opciones relacionadas con los modelos geométricos y de sismicidad, dependiendo no solo de la razón de ser del análisis, sino también de la información disponible para realizarlo. En general, se pueden identificar cuatro etapas en la evaluación probabilista de la amenaza sísmica: 1) selección del modelo geométrico y zonificación tectónica, 2) selección del modelo de sismicidad y estimación de sus parámetros, 3) selección de las relaciones de atenuación de movimiento fuerte y asignación a las fuentes sismogénicas y 4) cálculo de la amenaza sísmica.

7.1.1 Modelación geométrica

Sobre la base de los estudios existentes del entorno tectónico del área de estudio, se definen porciones del territorio dentro de las cuales se asume posible la ocurrencia de rupturas en la corteza terrestre. Es usual que estas porciones se definen por medio de geometrías simples, como polígonos orientados en el espacio, en los cuales se asume ocurren los terremotos. Cada polígono conforma entonces una fuente sismogénica. Cada una de estas fuentes se subdivide de manera recursiva en geometrías triangulares, como se muestra en la Figura 121, conservando cada sub-fuente la misma sismicidad por unidad de área de la fuente original.

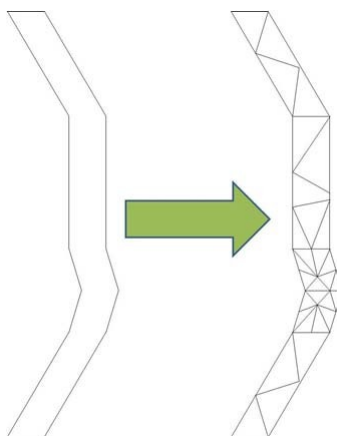


Figura 121. Subdivisión de las fuentes sismogénicas en sub-fuentes

Todas las fuentes relevantes del territorio deben ser incluidas en la modelación, con el fin de capturar todos los posibles orígenes de los terremotos a simular en el modelo. Como ilustración, se presenta el modelo geométrico de fuentes para América Latina y el Caribe, tomado del proyecto ASLAC (INGENIAR & ERN - Salgado et. al., 2018).

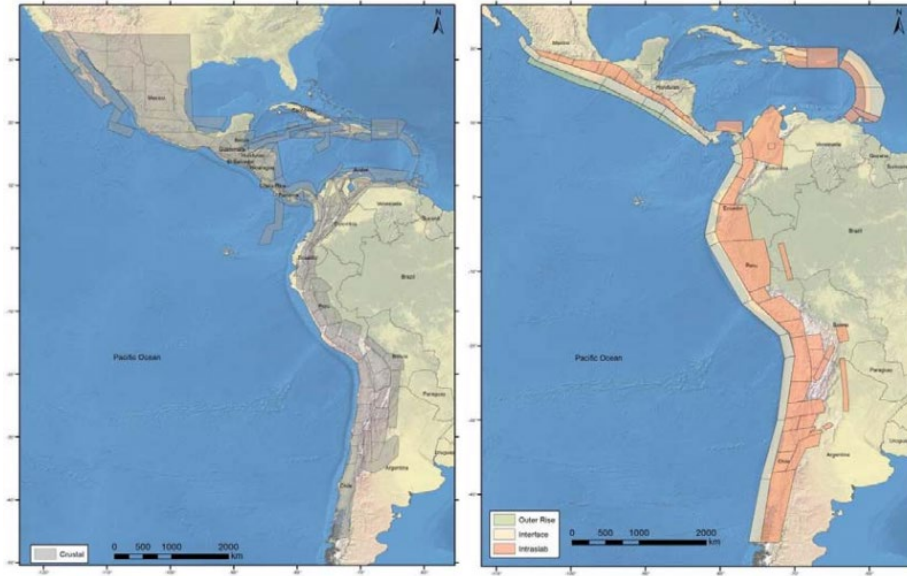


Figura 122. Modelo geométrico de fuentes del proyecto ASLAC

7.1.2 Modelación de la sismicidad

La modelación de la sismicidad consiste en aproximar la ocurrencia en el tiempo de los terremotos en cada fuente. Existen en la literatura un amplio número de modelos de sismicidad, cuya selección se fundamente, principalmente, en establecer si la condición de estacionariedad se cumple o no en la ocurrencia de los terremotos. Es común en ingeniería sísmica asumir que los sismos ocurren en el tiempo como lo describe un proceso estocástico de Poisson. Esta suposición resulta ser válida en la absoluta mayoría de los casos, con algunas contadas excepciones vistas en territorios muy particulares. Por lo tanto, bajo el supuesto de un modelo de ocurrencia poissoniano, es posible entonces adoptar el modelo de sismicidad de *Gutenberg-Richter modificado* (Cornell y Van Marke), el cual es posiblemente el modelo de sismicidad más ampliamente usado a nivel internacional.

$$\lambda(M) = \lambda_0 \frac{e^{-\beta M} - e^{-\beta M_u}}{e^{-\beta M_0} - e^{-\beta M_u}} \quad \text{Ecuación 38}$$

En donde $\lambda(M)$ es la tasa anual de recurrencia de eventos con magnitud igual o superior a la magnitud umbral M_0 (tomada usualmente como 4.0), λ_0 es la tasa anual de ocurrencia de sismos con magnitud igual o superior a M_0 , β corresponde al parámetro de la distribución exponencial truncada de ocurrencia de las magnitudes en la fuente, y M_u es la magnitud última asociada a cada fuente sismogénica.

Los parámetros λ_0 y β pueden calcularse, para cada fuente del modelo, mediante métodos estadísticos basados en el catálogo de eventos sísmicos disponible, posterior a un procesamiento de completitud y eliminación de réplicas. Haciendo uso del método de máxima verosimilitud, λ_0 y β se calculan como

$$\lambda_0 = \frac{N}{t} \quad \text{Ecuación 39}$$

$$\beta = \frac{N}{\sum_{i=1}^N M_i - M_0}$$

Ecuación 40

donde N corresponde al número de eventos asociados a la fuente sismogénica y t es la ventana de observación del catálogo sísmico.

7.1.3 Atenuación del movimiento fuerte

Una vez definida la posible ubicación de los terremotos desde el modelo geométrico, y la tasa de actividad de las fuentes desde el modelo de sismicidad, es necesario involucrar un modelo de atenuación del movimiento fuerte, el cual da cuenta del tránsito de las ondas sísmicas por la corteza terrestre, y el gasto de energía que dicho tránsito implica, desde la ruptura en la corteza hasta la ubicación de los elementos expuestos en la superficie.

Un modelo de atenuación describe la variación en una medida de intensidad (como la aceleración máxima o la aceleración espectral, por ejemplo), con la distancia y la magnitud de los terremotos. La Figura 123 ilustra una función obtenida de un modelo de atenuación. Para una magnitud y distancia determinadas, los modelos de atenuación devuelven la distribución de probabilidad de la aceleración, como se ilustra en la Figura 123.

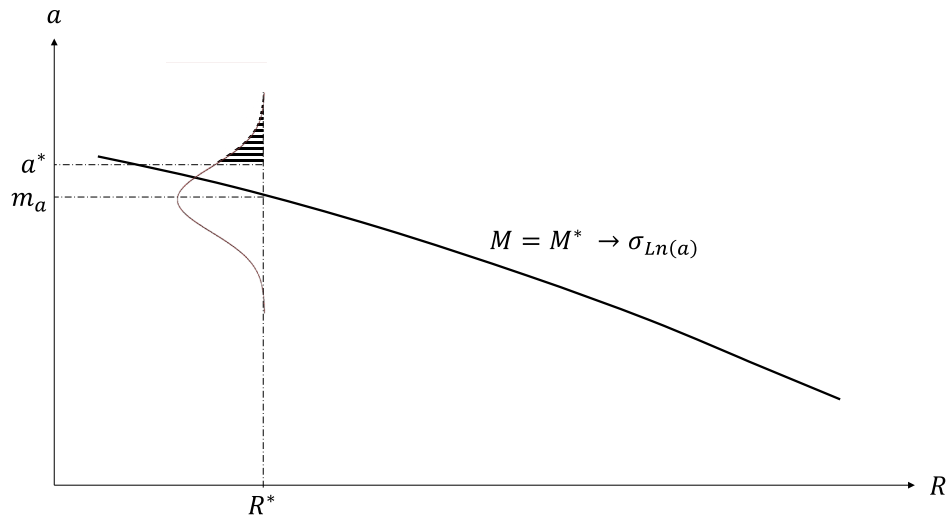


Figura 123. Ilustración de un modelo de atenuación del movimiento fuerte

Así pues, la probabilidad de que se exceda cierto nivel de intensidad, conocidas la magnitud y la distancia de un evento, $P(a > a^* | M^*, R^*)$, puede calcularse como:

$$P(a > a^* | M^*, R^*) = 1 - \Phi \left[\frac{\ln(a^*) - \ln(m_a)}{\sigma_{\ln(a)}} \right]$$

Ecuación 41

Donde M^* es la magnitud del evento, R^* es la distancia de la fuente al sitio de cálculo, $\Phi(\cdot)$ es la distribución normal estándar, m_a es la mediana de la aceleración y $\sigma_{Ln(a)}$ es la desviación estándar del logaritmo natural de la aceleración.

Existe una muy amplia oferta de modelos de atenuación en la literatura especializada. Por lo cual se recurrirá a la consulta de los modelos de amenaza sísmica recientemente desarrollados para Costa Rica con el fin de establecer cuales modelos de atenuación se han usado previamente y emplearlos en la evaluación de la amenaza.

7.1.4 Cálculo de la amenaza sísmica

Para la evaluación de la amenaza se utiliza un procedimiento de integración espacial que considera las diferentes localizaciones de los terremotos simulados, cuyo hipocentro se define en el centroide de las subfuentes generadas. La tasa anual de excedencia de una intensidad arbitraria $v(a^*)$, se determina como,

$$v(a^*) = \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^{n_j} \int_{M_0}^{M_u} -P(a > a^* | M, R) \cdot \frac{d\lambda(M)_{SF_{j,i}}}{dM} \quad \text{Ecuación 42}$$

En donde N corresponde al número de fuentes en el modelo, n_j es el número de elementos en que ha sido dividida la fuente sismogénica j. La ecuación anterior es una de las múltiples formas que adopta el teorema de la probabilidad total. Aplicando estos conceptos, es posible determinar las tasas de excedencia de cualquier medida de intensidad, y obtener representaciones clásicas de la amenaza sísmica, como mapas o espectros de amenaza uniforme, por ejemplo.

7.2 Tsunami

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.

7.2.1 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.

7.2.1.1 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:

- 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.
- 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 de 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.

7.2.1.2 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 43

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 124 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, Mw=7.0 y profundidad de 5Km.

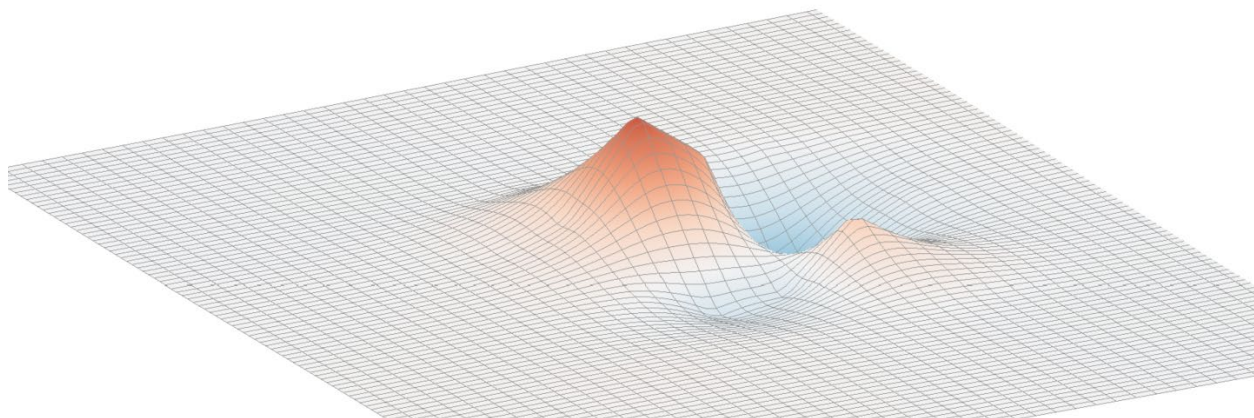


Figura 124. Deformación vertical del lecho marino para un sismo de desplazamiento vertical con lineamiento al este, de $M_w=7.0$ y profundidad de 5Km.

7.2.2 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.

$$\eta(x, y, t) = \frac{1}{(2\pi)^2} \iint_{\mathbb{R}^2} \frac{e^{i(kx+ly)}}{\cosh(mH)} \int_0^t (1 - \omega \sin \omega\tau) \bar{\zeta}(k, l, t - \tau) d\tau dk dl \quad \text{Ecuación 44}$$

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 125 muestra ilustra el resultado del modelo de Dutykh & Dias (2007) aplicado al sismo de la Figura 125.

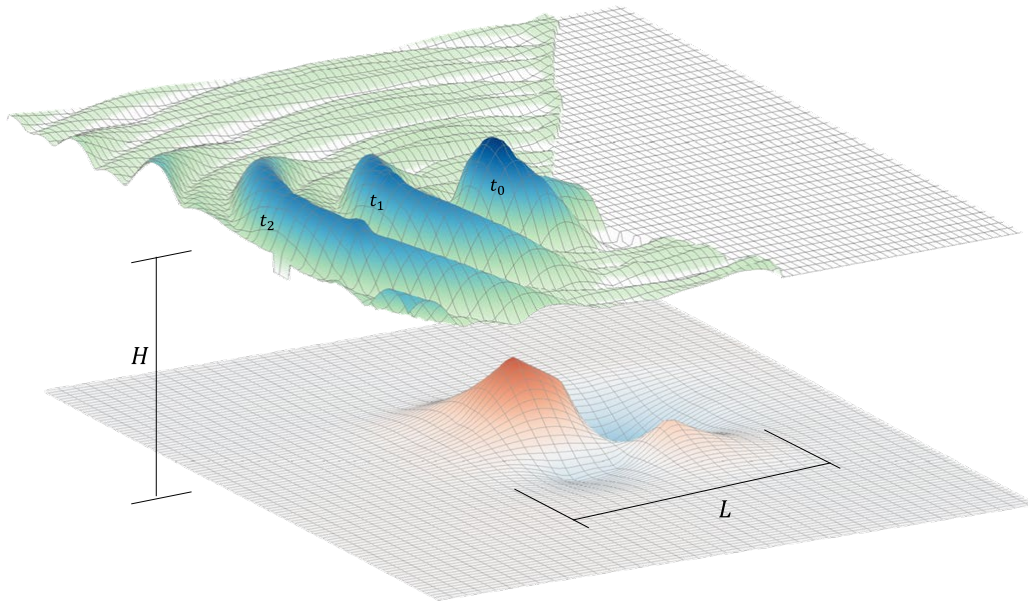


Figura 125. Simulación del progreso de la onda de sobreelevación η , en 3 tiempos diferentes (t_0 , t_1 , t_2), para el sismo de la Figura 124, calculada con el modelo de Dutykh & Dias (2007).

7.2.3 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),

$$\frac{R}{a_0} = 2\pi^{3/4} \left(\frac{a_0}{h_0} \right)^{-1/4} \xi^{-1/2} \quad \text{Ecuación 45}$$

$$\frac{U}{\sqrt{g \cdot a_0}} = \frac{\sqrt{\pi}}{\xi} \left(\frac{R}{a_0} \right) \quad \text{Ecuación 46}$$

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,

$$\xi \equiv \frac{s}{\sqrt{\frac{h_0}{L}}} \quad \text{Ecuación 47}$$

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:

$$\frac{R}{a_0} \leq \frac{R_{max}}{a_0} = \frac{1}{\pi} \xi^2 \quad \text{Ecuación 48}$$

en donde R_{max} corresponde a la máxima amplitud que pueden alcanzar las olas para las características implícitas en ξ . La Figura 126 muestra la variación de las funciones de amplitud (Ecuación 45) y velocidad (Ecuación 46) con el número de Iribarren y la manera como interviene el criterio de rompimiento.

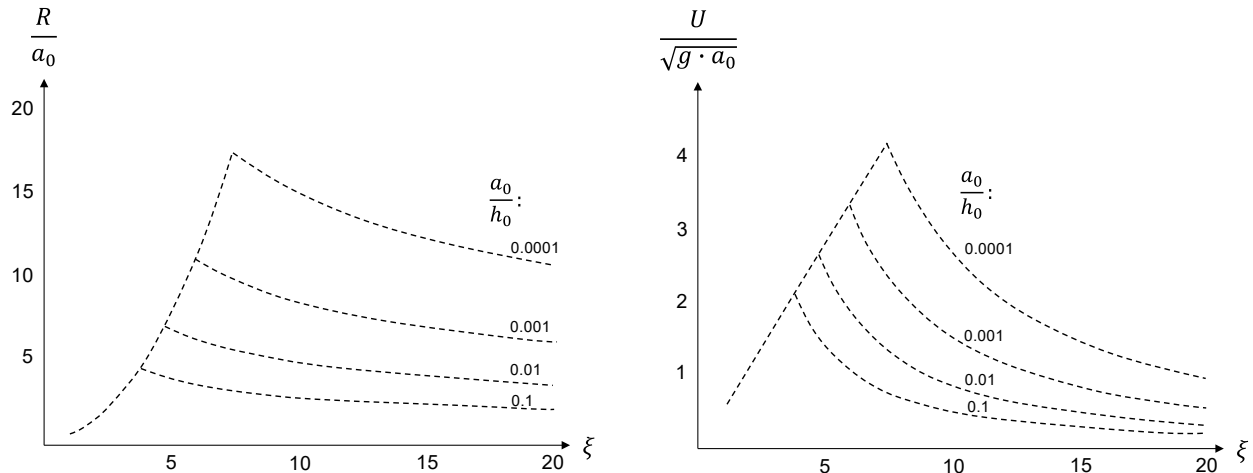


Figura 126. Variación de la amplitud de ola R y la velocidad de ingreso U con el número de Iribarren, incluyendo como límite de aplicación el criterio de rompimiento. Tomado de Madsen y Fuhrman (2007)

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 la sección 6.4.3, eliminando el término asociado al cortante superficial del viento que no aplica en este contexto.

7.3 Erupciones volcánicas

7.3.1 Localización de puntos de emisión

En la modelación de la amenaza volcánica, es fundamental la definición del sitio exacto por donde el material será expulsado a la atmosfera, en términos de una posición geográfica y una probabilidad de abertura. En la mayoría de los volcanes, esta definición es relativamente simple de lograr, dado que los volcanes tienden siempre a expulsar el material por el cráter principal. Si el volcán bajo estudio tiene solamente un cráter y una chimenea conocida, y no hay indicios de intrusión de magma en ninguna otra parte del edificio volcánico, entonces el punto de emisión será dicho cráter con una probabilidad de abertura igual a 1.

En aquellos casos en donde se conocen puntos de emisión adicionales al cráter, cada uno de ellos podría expulsar material en una erupción. Es más, el material podría ser expulsado desde todos los puntos en una misma erupción. Cuantificar la probabilidad de abertura de cada uno de estos sitios puede ser una tarea compleja, especialmente si no se cuenta con mucha información. Lo importante es reconocer que en un

episodio eruptivo puede emitirse material por uno o por todos los puntos de emisión identificados, o incluso combinaciones de ellos, lo que implica que sus probabilidades de abertura conjuntas son mayores a cero.

Lo anterior es válido, siempre y cuando dichos puntos de emisión estén claramente identificados sobre el edificio volcánico. Sin embargo, cuando el edificio volcánico no presenta evidencia clara de la ubicación del posible punto de emisión, es posible hacer inferencias que lleven a una medida de la probabilidad de abertura espacial sobre el edificio volcánico. Para cuantificar esta probabilidad espacial, el territorio se rasteriza, y se asignan posibles ubicaciones de puntos de emisión según la evidencia geológica existente. Esto significa que algunas ubicaciones tendrán una mayor probabilidad de convertirse en el punto de emisión que otras. Sobre cada ubicación seleccionada, se define una función kernel que describe la densidad de probabilidad de abertura alrededor de cada posible punto de emisión. El procedimiento asigna los mayores valores de susceptibilidad a los puntos base de definición de la malla (puntos de emisión identificados), y genera una malla de susceptibilidad por medio de superficies de distribución de probabilidad Normal, construidas a partir de la revolución de funciones de densidad de probabilidad alrededor del eje vertical, y centradas en cada punto base. El resultado es una malla de susceptibilidad a la abertura de los puntos de emisión, como se ilustra en la Figura 127.

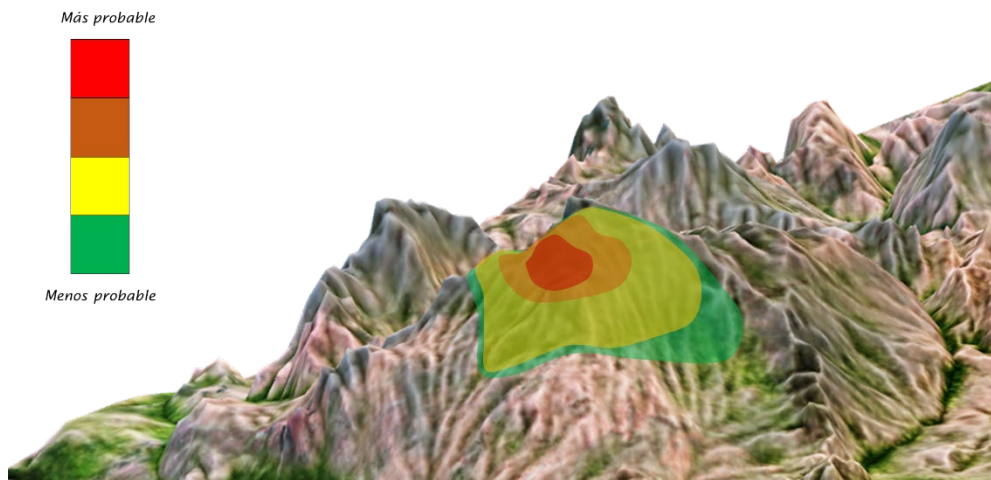


Figura 127. Ilustración de la medida de susceptibilidad de abertura sobre un edificio volcánico

7.3.2 Modelación de la caída de piroclastos transportados por el viento

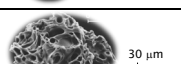
Los depósitos de caída piroclástica se producen por la dispersión del material en flotación en la columna eruptiva por cuenta de las corrientes atmosféricas, y su sedimentación vertical por gravedad. Los piroclastos se clasifican según su tamaño. Es común en vulcanología, usar la medida de tamaño ϕ , la cual está asociada al diámetro equivalente de los fragmentos (ver Ecuación 49), y que permite una mayor uniformidad en sus valores, facilitando el estudio de los piroclastos según su tamaño.

$$d = 2^{-\phi}$$

Ecuación 49

Los piroclastos se clasifican en bloques o bombas, lapilli, ceniza gruesa y ceniza fina, como se muestra en la Tabla 41. Los bloques y bombas son fragmentos de más de 64 mm de diámetro, o ϕ menor a -6. Se diferencian entre sí en que los bloques tienen bordes irregulares, lo que indica que fueron expulsados siendo ya fragmentos sólidos, mientras que las bombas tienen bordes redondeados, indicando que eran líquidos al momento de ser expulsados. Lapilli corresponde a fragmentos de menos de 64 mm y más de 2 mm, o equivalentemente, ϕ entre -6 y -1. La ceniza gruesa corresponde a partículas de menos de 2mm de diámetro, o ϕ mayor a -1, y hasta 0.063 mm de diámetro o ϕ menor a 4. Finalmente, la ceniza fina corresponde a fragmentos de menos de 0.063 mm de diámetro o ϕ mayor a 4. En general, las bombas y bloques no serán transportados por el viento, sino que se depositarán relativamente cerca del punto de emisión, siguiendo trayectorias definidas por la balística (ver Sección 7.3.3). Por lo tanto, la simulación del transporte de piroclastos por el viento se limitará a lapilli, ceniza gruesa y ceniza fina.

Tabla 39. Referencia de tamaños de piroclastos (Reproducido de Mullineaux, 2013)

Tipo	ϕ	$d = 2^{-\phi}$	Referencia de tamaño
Bloques y bombas	< -6	> 64 mm	
Lapilli	> -6	< 64 mm	
Ceniza gruesa	> -1	< 2 mm	
Ceniza fina	> 4	< 0.063 mm	

De la observación del tamaño de los fragmentos depositados sobre el terreno después de un evento eruptivo, se concluye que los fragmentos de mayor tamaño se depositan cerca del punto de emisión, mientras que los fragmentos más finos pueden ser transportados por mayores distancias. La posición final de un fragmento depende entonces de su tamaño, su posición inicial en la columna eruptiva y las características del campo de viento que lo transporta. El transporte eólico del material, teniendo en cuenta estas características, puede ser aproximado como un problema de *advección-difusión-sedimentación*, el cual es el enfoque más ampliamente usado a nivel mundial para simular la caída de piroclastos. Este modelo considera que la posición final de cualquier fragmento depende de la advección horizontal del viento, la difusividad atmosférica y la sedimentación por gravedad, por medio de la siguiente ecuación diferencial vectorial:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\nabla u C + \nabla(k \nabla C) - \nabla u_s C + S_0 \quad \text{Ecuación 50}$$

en donde C es la concentración de masa, u es la velocidad del viento, k es el tensor de difusividad por turbulencia, u_s es la velocidad de sedimentación y S_0 es un termino de fuente. Esta ecuación describe el cambio en la concentración en masa de partículas de cierto tamaño ϕ , en una posición x,y,z en la atmosfera ($\partial C / \partial t$), como función de la traslación causada por el campo de viento ($\nabla u C$), la difusión debida a la turbulencia ($\nabla(k \nabla C)$), la velocidad de sedimentación ($\nabla u_s C$), y el término de fuente (S_0) que establece las condiciones iniciales de concentración de material en la columna eruptiva. Como se indica, la Ecuación

50 aplica para un único tamaño ϕ , lo que implica que debe repetirse la solución para todos los tamaños de fragmentos considerados. Así mismo, conviene mencionar que el modelo de advección-difusión-sedimentación puede considerarse válido únicamente dentro de la tropósfera, es decir, no es apropiado para simular el transporte de piroclastos por corrientes atmosféricas a nivel de la estratósfera.

La aplicación el modelo de advección-difusión-sedimentación, requiere de la definición previa de la distribución de la concentración inicial de fragmentos en la columna eruptiva. Esta distribución cambia según el tamaño ϕ de los fragmentos en consideración. En este trabajo se emplea la formulación dada por Armienti et al. (1988):

$$M_{\phi}(z) = M_{\phi} \frac{A_{\phi}^2 \left(1 - \frac{z}{H}\right) e^{A_{\phi} \left(\frac{z}{H} - 1\right)}}{H \left(1 - \frac{1}{A_{\phi}}\right) e^{-A_{\phi}}} \quad \text{Ecuación 51}$$

en donde H es la altura de la columna eruptiva, M_{ϕ} es la masa total de los fragmentos de tamaño ϕ , y A_{ϕ} es un parámetro adimensional que establece la localización del punto de máxima concentración de fragmentos en la columna eruptiva, y se define como:

$$A_{\phi} = \frac{A}{v_{\phi 0}} \quad \text{Ecuación 52}$$

en donde A es un factor de forma de la columna eruptiva y $v_{\phi 0}$ es la velocidad límite de sedimentación de fragmentos de tamaño ϕ a nivel del mar. El factor de forma A define que tan concentrada o no es la distribución de los tamaños de partículas en la columna eruptiva. Su valor se establece de forma arbitraria, encontrándose en la literatura valores entre 1 y 10. Por su parte, la velocidad $v_{\phi 0}$ se cuantifica en base a la ley de Stokes, mediante diferentes relaciones en función del número de Reynolds (ver Bonadonna et al., 1998). La aplicación de la Ecuación 51 genera formas de distribución en altura de la masa de partículas para cada tamaño ϕ , como las presentadas en la Figura 128. Nótese que, según esta formulación, las partículas más gruesas se concentran a menores alturas, mientras que las más finas se concentran en mayores alturas.

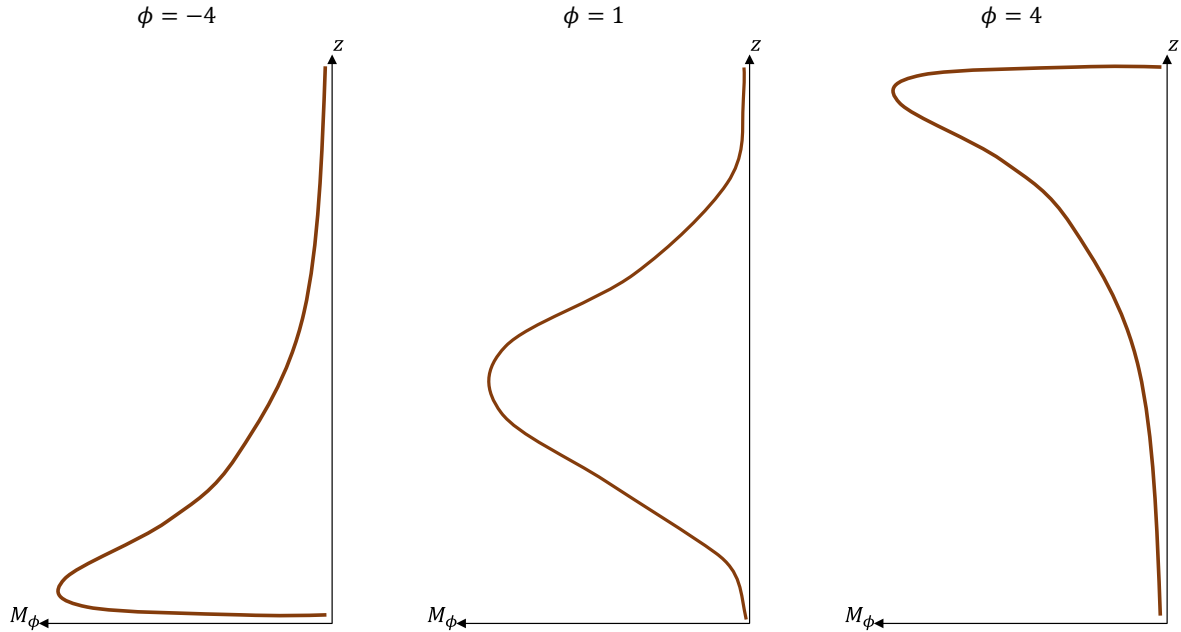


Figura 128. Ilustración de la variación de la masa de fragmentos de tamaño ϕ con la altura en la columna eruptiva, para tres valores de ϕ .

La distribución total de tamaños de fragmentos definirá las masas M_ϕ totales que serán transportadas por el viento. Es decir, la distribución de tamaños no es necesariamente uniforme. En este trabajo se adopta la suposición realizada por Wood & Bursik (1991), que consiste en definir la distribución de tamaños como proporcional a una distribución normal truncada entre límites ϕ_{min} y ϕ_{max} , con parámetros dados por un tamaño medio (ϕ_m) y una desviación estándar (σ_ϕ).

La subdivisión del dominio en capas horizontales permite separar el cálculo por tamaños y por posiciones en la columna eruptiva. Un disco de material con tamaño ϕ_i , que inicialmente se encuentra en la posición vertical z_j en la columna eruptiva, con un radio inicial r_0 y que tiene una cantidad de masa $M_{\phi_i z_j}$, se deformará progresivamente a medida que es empujado horizontalmente por el viento y verticalmente por la acción de la gravedad. La masa contenida originalmente en el disco de radio r_0 , al ser depositada, será distribuida en una forma no necesariamente circular de área mayor a la original, resultante de la elongación del disco en la dirección que sopla el viento, capa por capa. En términos generales, esta transformación puede expresarse como:

$$m_{\phi_i z_j} = M_{\phi_i z_j} f_{\phi_i z_j}(x, y) \quad \text{Ecuación 53}$$

en donde $m_{\phi_i z_j}$ es la función bidimensional (x, y) de distribución de la masa original del disco ($M_{\phi_i z_j}$), y $f_{\phi_i z_j}(x, y)$ es una función de transformación. Esta última es usualmente seleccionada arbitrariamente, buscando que satisfaga la Ecuación 50. La función definida por Carslaw & Jaeger (1959) para la conducción de calor en sólidos, es una solución válida a la Ecuación 50:

$$f_{\phi_i z_j} = \frac{1}{2\pi r_0^2} \left[\operatorname{erf} \left(\frac{r_0 + r}{2\sqrt{k \cdot t_{fall}}} \right) + \operatorname{erf} \left(\frac{r_0 - r}{2\sqrt{k \cdot t_{fall}}} \right) \right] \cdot \operatorname{erf} \left(\frac{r_0}{2\sqrt{k \cdot t_{fall}}} \right) \quad \text{Ecuación 54}$$

en donde $r = \sqrt{x^2 + y^2}$, k es el coeficiente de difusividad atmosférica en la dirección horizontal¹⁶, t_{fall} es el tiempo total que toma el depósito del disco original sobre la superficie del terreno ($t_{fall} \cong z_j/v_{\phi_i}$), y erf es la función gaussiana de error. La función presentada en la Ecuación 54 se asume centrada espacialmente en las coordenadas finales dadas por Folch & Felpeto (2005):

$$x_{\phi_i} = x_0 + \sum_{k=j}^1 U_x(z_k) \frac{z_k - z_{k-1}}{v_{\phi_i}} \quad \text{Ecuación 55}$$

$$y_{\phi_i} = y_0 + \sum_{k=j}^1 U_y(z_k) \frac{z_k - z_{k-1}}{v_{\phi_i}} \quad \text{Ecuación 56}$$

en donde x_{ϕ_i} y y_{ϕ_i} son las coordenadas finales del centroide de la forma final elongada del disco de material ϕ_i proveniente de la posición z_j , x_0 y y_0 son las coordenadas geográficas del punto de emisión y $U_x(z)$ y $U_y(z)$ son los perfiles de velocidad del viento en las dos direcciones ortogonales. Finalmente, la masa total depositada se calcula como la suma de las contribuciones de todas las capas de la columna, y todos los tamaños de partícula considerados:

$$m(x, y) = \sum_{i=\phi_{min}}^{\phi_{max}} \sum_{j=1}^{N_z} m_{\phi_i z_j} \quad \text{Ecuación 57}$$

El resultado de la simulación se expresa por medio de la masa o carga total depositada, o incluso en términos del espesor de caída de piroclastos, asumiendo un valor de densidad. De esta manera se obtienen mapas de isópacas para erupciones simuladas que indican la variación geográfica del espesor del material depositado en la región de cálculo.

7.3.3 Modelación de proyectiles balísticos

Los proyectiles balísticos son bloques o bombas disparados desde el cráter a velocidad U_0 , los cuales son demasiado pesados como para ser sostenidos por el aire en flotación y tienen una orientación de disparo no vertical (i.e. un ángulo α_0 de disparo), lo que resulta en un proyectil que puede impactar ubicaciones cercanas con muy alta energía. La trayectoria de los proyectiles es aproximadamente parabólica. Esto se debe al efecto de arrastre con el aire circundante, el cual depende de la velocidad de avance del proyectil. Es otras palabras, si consideráramos despreciable el arrastre, el movimiento sería con exactitud parabólico. La Figura 129(a) ilustra las condiciones iniciales y trayectoria de un proyectil disparado desde un volcán.

¹⁶ Por facilidad, se considera que la difusividad vertical es despreciable y que los coeficientes de difusividad horizontal son iguales (i.e. $k = k_x = k_y$).

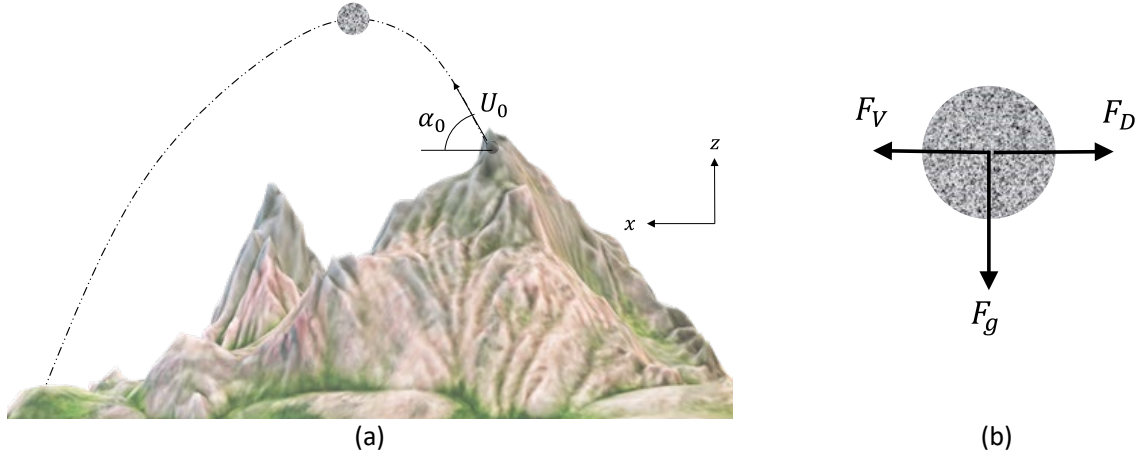


Figura 129. (a) Ilustración de las condiciones iniciales y trayectoria de un proyectil balístico. (b) Diagrama de cuerpo libre del proyectil en la posición mostrada en (a), ilustrando las fuerzas actuantes.

El proyectil, ubicado en la posición indicada en la Figura 129(a), tiene el diagrama de cuerpo libre presentado en la Figura 129(b). El bloque se encuentra sometido al efecto de, principalmente, 3 fuerzas:

- Fuerza de empuje por velocidad (F_V), derivada de las condiciones iniciales que causaron el movimiento en el cráter.
- Fuerza de arrastre (F_D), la cual es siempre contraria a la dirección de movimiento y depende de la densidad y coeficiente de arrastre del aire en esa posición.
- Fuerza gravitacional (F_g), que esencialmente corresponde al peso del proyectil, al cual puede descontarse la fuerza de flotación (usualmente mucho menor).

Otras fuerzas, como la fuerza Magnus, por ejemplo, asociada al efecto que causa la rotación del bloque durante su trayectoria, se desprecian en este modelo. A partir de la consideración de las fuerzas presentadas en la Figura 129(b), se pueden establecer las ecuaciones de movimiento del proyectil (Mastin 2001):

$$\frac{dV_x}{dt} = \frac{-V_x \cdot \rho_{aire} \cdot V \cdot A \cdot C_D}{2m} \quad \text{Ecuación 58}$$

$$\frac{dV_z}{dt} = \frac{-V_z \cdot \rho_{aire} \cdot V \cdot A \cdot C_D}{2m} - g \frac{\rho_b - \rho_{aire}}{\rho_b} \quad \text{Ecuación 59}$$

en donde V_x y V_z son las velocidades del bloque en las posiciones x y z (asumiendo que el movimiento ocurre sobre un plano vertical sin desviación de este). V es la magnitud de velocidad absoluta (i.e. $V = \sqrt{V_x^2 + V_z^2}$), A es el área de la sección transversal del bloque (i.e. una aproximación al área superficial en contacto con el medio de tránsito, en la dirección de avance), C_D es el coeficiente de arrastre, m es la masa del bloque y ρ_b es la densidad del bloque. El área (A) y la masa (m) se pueden calcular de la siguiente manera, asumiendo una forma geométrica simple para el bloque en movimiento:

$$A = D^2$$

Para cubos (cara perpendicular al flujo)
 D es la dimensión del cubo

Ecuación 60

$$A = \sqrt{3} \cdot D^2$$

Para cubos (vértice perpendicular al flujo)
D es la dimensión del cubo

$$A = \frac{1}{4} \pi D^2$$

Para esferas
D es el diámetro de la esfera

$$m = \rho_b D^3$$

Para cubos

Ecuación 61

$$m = \frac{1}{6} \rho_b \pi D^3$$

Para esferas

El coeficiente de arrastre (C_D) es una cantidad que depende de la velocidad del bloque en movimiento y de la viscosidad del medio de tránsito. Es decir, tiene necesariamente una relación con el número de Reynolds (Re)¹⁷:

$$Re = \frac{\rho_{aire} \cdot V \cdot D}{\eta}$$

Ecuación 62

en donde D es el tamaño equivalente del bloque y η es la viscosidad del aire. La dependencia de C_D con Re es decreciente, cambiando según el régimen de flujo que se desarrolle alrededor del bloque (Mastin 2001), como:

$$C_D \cong \frac{24}{Re}$$

Para $Re < 10$

$$C_D \cong \frac{18.5}{Re^{3/5}}$$

Para $Re < 10,000$

Ecuación 63

$$C_D \cong 0.5$$

Para $Re < 30,000$

Los valores de densidad y viscosidad del aire son considerados constantes en este trabajo. Sin embargo, estas cantidades usualmente cambian con la altitud, para lo cual pueden emplearse las relaciones matemáticas disponibles en la literatura (ver, por ejemplo, Mastin 2001). No se prevé que se incurra en errores importantes al considerar constantes las propiedades mencionadas.

Ahora bien, como fue observado por Hoerner (1965), las relaciones dadas en la Ecuación 63 son válidas únicamente cuando el número de Mach (Mc) es menor a, aproximadamente, 0.5. Para valores mayores, C_D empieza a incrementarse, aproximadamente como se muestra en la Figura 130, para bloques con diferentes formas. El número de Mach se calcula como:

$$Mc = \frac{V}{C}$$

Ecuación 64

en donde C es la velocidad del sonido en el medio, calculada como:

¹⁷ El número de Reynolds es una cantidad adimensional que relaciona las fuerzas inerciales con las fuerzas viscosas en dinámica de fluidos.

$$C = \sqrt{\gamma RT_{aire}}$$

Ecuación 65

En donde γ es la relación de calores específicos del aire a presión y volumen constante (i.e. $\gamma = C_p/C_v$; para el aire $\gamma \cong 1.4$).

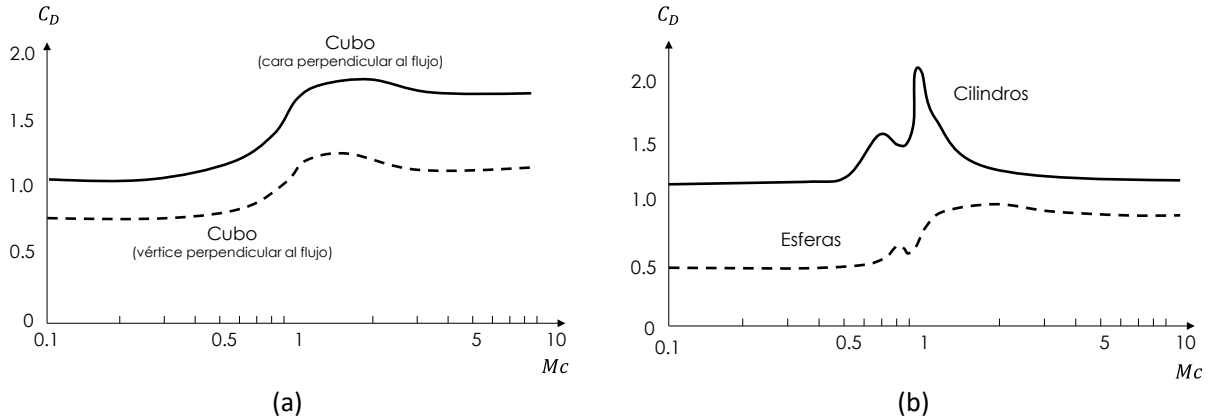


Figura 130. Variación del coeficiente de arrastre con el número de Mach, para: (a) cubo, con el flujo orientado de diferente forma; (b) cilindros y esferas. Reproducido de (Mastin, 2001)

Las ecuaciones del movimiento del proyectil se resuelven numéricamente usando el método de Runge-Kutta de cuarto orden. Esto permite encontrar la velocidad absoluta (V) en el punto de impacto del bloque. La energía derivada del impacto (E_C) corresponde a la energía cinética del bloque en el momento en que hace contacto con la superficie:

$$E_C = \frac{1}{2}mV^2$$

Ecuación 66

Esta energía es la medida de intensidad que se calcula, para cada bloque simulado. En cada pulso, se asume el posible disparo de un número predeterminado de proyectiles, con ángulos de disparo y direcciones aleatorias, saliendo del cráter a velocidad U_0 . Para cada uno de ellos, se determina la posición y energía del impacto.

7.3.4 Modelación de corrientes de densidad piroclástica

Como se ha mencionado, las corrientes de densidad piroclástica, o flujos piroclásticos, resultan del colapso de una porción densa de la columna eruptiva en la región sostenida por el empuje de gas o del colapso repentino del domo de lava. El material fragmentado se desplaza cuesta abajo por las pendientes del edificio volcánico a gran velocidad y muy alta temperatura, lo que le confiere una gran capacidad destructiva. Los flujos piroclásticos son esencialmente avalanchas secas de material caliente, compuestas por gases y fragmentos de diferentes tamaños.

Los flujos piroclásticos pueden entenderse como compuestos por un *flujo basal*, que es cercano a la superficie, de relativo poco espesor, conformado principalmente por bloques, bombas, lapilli y ceniza gruesa, y una *nube acompañante*, compuesta por ceniza gruesa, fina y gases.

7.3.4.1 Corrientes concentradas

El forzamiento principal que causa el avance del flujo piroclástico es la fuerza de gravedad, la cual condiciona principalmente el movimiento del flujo basal (corriente concentrada). Es crucial entonces contar con un modelo de elevación digital que represente apropiadamente la topografía del edificio volcánico, el cual es una capa de información georreferenciada, tipo raster, definida por una malla en donde cada celda le corresponde una altura topográfica. La Figura 131(a) ilustra un modelo de elevación digital.

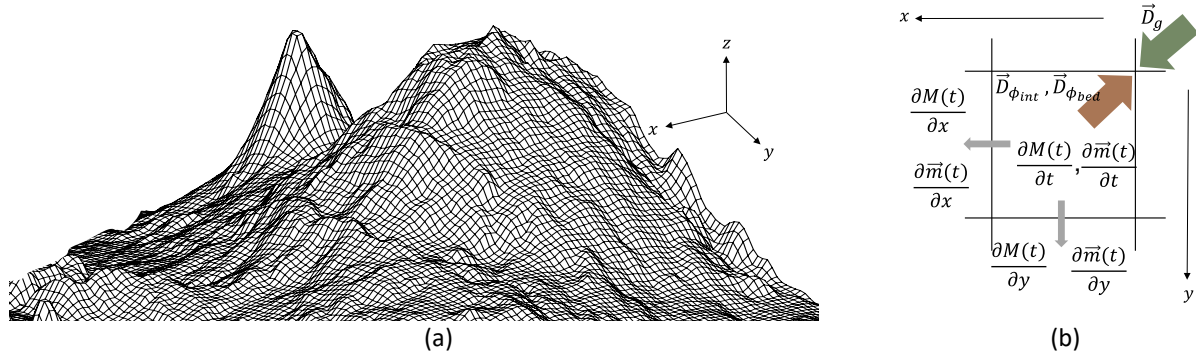


Figura 131. (a) Ilustración de un modelo digital de elevación. (b) Flujos y forzamientos considerados en el modelo bidimensional de tránsito del flujo basal, para una celda del modelo digital de elevación.

Para simular el avance de un flujo basal sobre un modelo de elevación digital, se deben entender los flujos de masa y cantidad de movimiento que ocurren en cada una de las celdas por las cuales transita el flujo. Como simplificación general, podemos suponer que el espesor del flujo basal es lo suficientemente pequeño como para despreciar el comportamiento de las variaciones en masa y cantidad de movimiento en la dirección z . Estas cantidades las consideraremos promediadas en z , lo cual nos deja con un flujo bidimensional que avanza sobre el terreno. La Figura 131(b) ilustra las variables involucradas en el tránsito del flujo por una sola celda del modelo digital del terreno, en un instante del tiempo. Dentro de esta celda, la masa (M) y la cantidad de movimiento ($\vec{m}$) cambian con el tiempo. De estas funciones nos interesarán sus tasas de cambio en el tiempo (i.e. $\partial M(t)/\partial t$, $\partial \vec{m}(t)/\partial t$). Existen también flujos espaciales de masa y de cantidad de movimiento entre la celda en consideración y sus celdas vecinas, asociados al movimiento bidimensional del flujo basal. Estos flujos describen el cambio en la masa y la cantidad de movimiento en ambas direcciones ortogonales x y y (i.e. $\partial M(t)/\partial x$, $\partial \vec{m}(t)/\partial x$, y flujos equivalentes en y). Finalmente, el forzamiento que causa el movimiento es, como se ha mencionado, esencialmente la fuerza gravitacional ($\vec{D}_g$), a la cual se oponen fuerzas de fricción interna del flujo ($\vec{D}_{\phi_{int}}$) y de fricción del flujo con el terreno natural ($\vec{D}_{\phi_{bed}}$).

El flujo bidimensional controlado por gravedad puede modelarse matemáticamente siguiendo las ecuaciones de Saint-Venant, también conocidas como ecuaciones en aguas poco profundas, y que tienen amplias aplicaciones en ciencias e ingeniería. Se trata esencialmente de un sistema de ecuaciones en derivadas parciales en donde las tasas de cambio de las variables de estado (i.e. masa y cantidad de movimiento) en el tiempo y el espacio se determinan a partir del forzamiento externo (i.e. fuerza de gravedad). El sistema de ecuaciones se puede escribir, en forma vectorial, como (Patra et al., 2005):

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \frac{\partial \vec{F}_u}{\partial x} + \frac{\partial \vec{G}_u}{\partial y} = \vec{S}_u$$

Ecuación 67

en donde $\vec{u}$, $\vec{F}_u$, $\vec{G}_u$ son los vectores de variables de estado que se conservan en el tiempo, dirección x y en dirección y , respectivamente, y $\vec{S}_u$ es el vector de fuerzas actuantes. Estos vectores se definen de la siguiente manera, considerando una densidad constante (Patra et al., 2005):

$$\vec{u} = \begin{pmatrix} h \\ hV_x \\ hV_y \end{pmatrix}$$

Ecuación 68

$$\vec{F}_u = \begin{pmatrix} hV_x \\ hV_x^2 + T_{xx} \\ hV_x V_y \end{pmatrix}$$

Ecuación 69

$$\vec{G}_u = \begin{pmatrix} hV_y \\ hV_x V_y \\ hV_y^2 + T_{yy} \end{pmatrix}$$

Ecuación 70

$$\vec{S}_u = \begin{pmatrix} 0 \\ g_x h - D_{x,\phi_{int}} - D_{x,\phi_{bed}} \\ g_y h - D_{y,\phi_{int}} - D_{y,\phi_{bed}} \end{pmatrix}$$

Ecuación 71

El vector $\vec{u}$ es un vector de variables de estado que se conservan en el tiempo, es decir la masa, expresada por medio del espesor de flujo (h), y la cantidad de movimiento en ambas direcciones ortogonales (hV_x , hV_y). Por su parte, el vector $\vec{F}_u$ define los flujos, en la dirección x , de la masa (hV_x), la cantidad de movimiento- x ($hV_x^2 + T_{xx}$) y la cantidad de movimiento- y ($hV_x V_y$), en donde participa el esfuerzo normal en x (T_{xx}) asociado a un empuje horizontal por la presión hidrostática, promediada en z , que el peso del flujo basal impone a la masa total contenida en la celda. El vector $\vec{G}_u$ describe los mismos procesos que $\vec{F}_u$, pero específicos a la dirección y . Finalmente, el vector $\vec{S}_u$, también conocido como vector de fuente, contiene los forzamientos que causan el movimiento del flujo piroclástico, es decir las fuerzas gravitacionales ($g_x h$, $g_y h$), y los que se oponen al flujo, es decir las fuerzas de fricción interna ($D_{x,\phi_{int}}$, $D_{y,\phi_{int}}$) y de fricción con el terreno natural ($D_{x,\phi_{bed}}$, $D_{y,\phi_{bed}}$). Los términos g_x y g_y corresponden a la componente de aceleración gravitacional paralela a la pendiente topográfica, en cada dirección ortogonal.

La reología del flujo es determinante en la modelación por medio de este sistema de ecuaciones. El modelo reológico más comúnmente usado para describir flujos piroclásticos es el de *Mohr-Coulomb*, el cual es adoptado en este trabajo. No obstante, existen otros modelos reológicos con diferentes aplicaciones reportadas en la literatura (Patra et al., 2005). La solución del sistema de ecuaciones que define el movimiento del flujo basal se realiza numéricamente por medio de un enfoque de diferencias finitas aplicando un solucionador de Reimman tipo HLLC¹⁸. El resultado se expresa por medio de la distribución espacial de las variables de estado (i.e. h , V_x , V_y) para cada instante del tiempo simulado. El paso de tiempo de la simulación se establece en función de la velocidad inicial del flujo y la resolución del modelo digital de elevación, con el fin de cumplir con un amplio margen el criterio de convergencia de Courant-Friedrichs-Lewy. El volumen colapsado (V_c) se introduce al modelo como una columna de material, ubicada sobre el

¹⁸ Harten-Lax-van Leer-Contact

punto de emisión del volcán, y que puede colapsar en cualquier dirección. Estas condiciones iniciales determinan el camino que seguirá el flujo basal dominado por el sistema de ecuaciones diferenciales bidimensionales. Al alterar la dirección de colapso, se pueden modelar flujos basales en diferentes direcciones (ver Figura 132).

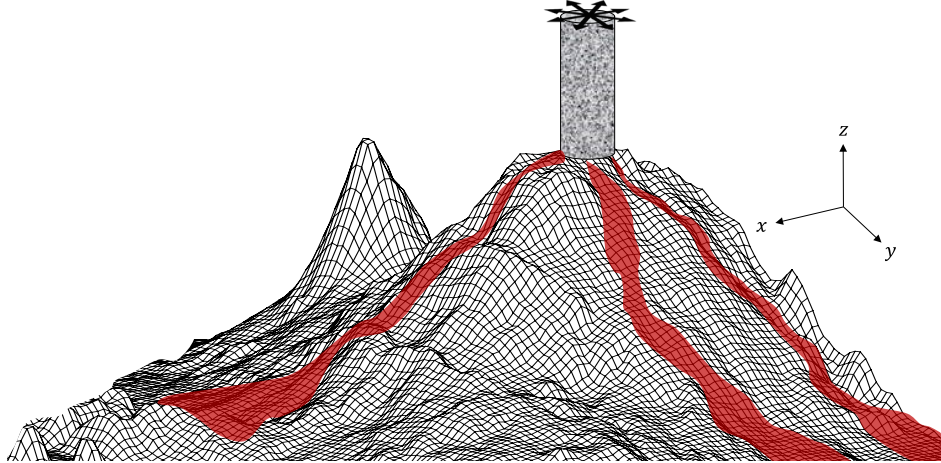


Figura 132. Ilustración de las condiciones iniciales del modelo de tránsito de flujos piroclásticos. Las manchas rojas ilustran el tránsito de un mismo volumen colapsado en diferentes direcciones. (Imagen ilustrativa no a escala).

De las variables calculadas, se determina la presión dinámica del flujo basal como medida de intensidad para el pulso simulado. La presión dinámica total en cada punto de la malla de cálculo (P_D) se determina como:

$$P_D = \frac{1}{2} \rho_s \sqrt{(V_x^2 + V_y^2)} \quad \text{Ecuación 72}$$

Dado que cada evento se compone de un número N de pulsos, los cuales pueden colapsar o no según el régimen de colapso simulado, la medida de intensidad final queda descrita como el valor máximo de presión dinámica de entre todos los pulsos colapsados, para cada celda del modelo digital de elevación.

$$P_D = \max(P_{D1}, P_{D2}, \dots, P_{DN}) \quad \text{Ecuación 73}$$

7.3.4.2 Corrientes diluidas

Al flujo basal lo acompaña una corriente de densidad piroclástica diluida, cuyo movimiento también está dominado por la gravedad, pero alterado de forma importante por la mezcla del material piroclástico con el aire circundante, generando flotación de porciones del material. Las corrientes diluidas no causan presiones dinámicas tan importantes como las corrientes concentradas, dado precisamente que su densidad es mucho menor. Sin embargo, pueden ser muy destructivas debido a su alta temperatura. Adicionalmente, pueden eventualmente alcanzar mayores distancias que las corrientes concentradas dada su relativa baja densidad.

El tránsito de corrientes diluidas, si bien está dominado por la gravedad, depende fuertemente de procesos complejos de transferencia de calor y masa con el aire circundante. Estos procesos son difíciles de modelar y de capturar en la práctica sin incurrir en altísimos costos computacionales. Por esta razón,

para este trabajo se aplica un enfoque de modelación simplificado, pero ampliamente aceptado para la modelación de flujos piroclásticos, basado en la cuantificación de las cabezas de energía potencial disponibles para el avance del flujo, o modelo de *cono de energía* (Sheridan y Malin, 1982).

El modelo del cono de energía permite caracterizar la extensión probable de flujos piroclásticos en una erupción determinada. En este modelo, la energía potencial disminuye con la distancia desde el punto de emisión como la diferencia entre la línea de energía y la topografía. La línea de energía es definida por la altura desde el vértice del cono y su ángulo de inclinación estimado. La Figura 133 presenta las principales variables del modelo.

Se define la susceptibilidad de un determinado sitio a ser alcanzado por el flujo piroclástico, como una función de la cabeza de energía con la que cuenta el flujo en ese sitio. La cabeza de energía h se define como:

$$h = H_0 + H_c - d \tan(\alpha_c) - h_0$$

Ecuación 74

En donde H_0 es la altura topográfica del punto de emisión, H_c es la altura estimada de la columna eruptiva, d es la distancia entre el punto de emisión y el punto bajo análisis, α_c es el ángulo del cono, y h_0 es la altura topográfica del punto analizado. El cono define entonces una región geográfica de posible alcance del flujo piroclástico. Es usual subdividir el cono en secciones con el fin de considerar las diferentes posibles direcciones de avance de la corriente diluida.

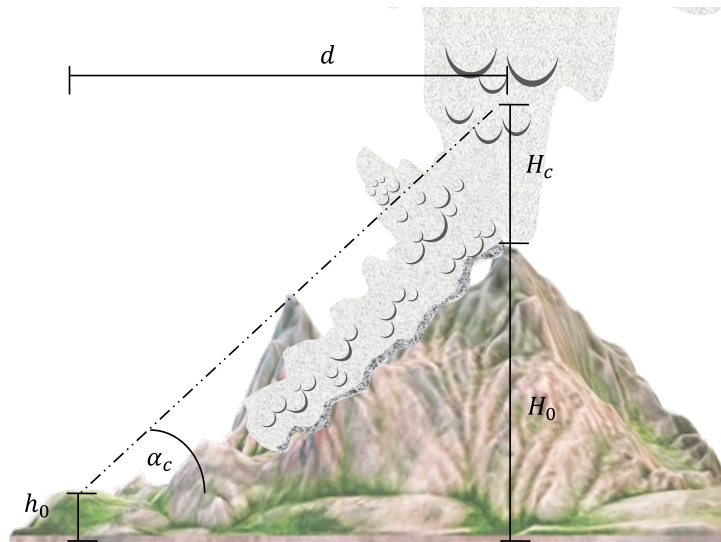


Figura 133. Ilustración de las variables involucradas en el modelo de cono de energía

Con el fin de determinar la presión dinámica, es necesario primero calcular la velocidad del flujo piroclástico. Esta velocidad puede aproximarse por medio de la relación dada por Toyos et al (2007), obtenida a partir de un análisis de regresión potencial realizado con datos de velocidad de flujo de erupciones de los volcanes Soufrière Hills (25 de junio de 1997), y Santa Helena (7 de agosto de 1980). La velocidad del flujo (V) se calcula entonces como (Toyos et al., 2007):

$$V = 0.38h^{0.68}$$

Ecuación 75

La presión dinámica se calcula como:

$$PD = \frac{1}{2} \rho \cdot V^2$$

Ecuación 76

donde ρ es la densidad media de la corriente diluida. Por facilidad, y de manera conservadora, se asume que la densidad es igual a la densidad a la salida del cráter (i.e. $\rho = \rho_0$).

7.3.5 Modelación de flujos de lodo o escombros volcánicos (lahares)

Los lahares se producen cuando el material expulsado alcanza cauces generando grandes flujos de escombros. Dado que se desplazan siguiendo los cauces de ríos y quebradas, pueden alcanzar ubicaciones relativamente lejanas al punto de emisión. En términos generales, los lahares pueden entenderse como flujos de escombros o flujos torrenciales, detonados a partir de un evento eruptivo, es decir, son flujos que arrastran material expulsado por el volcán. “Estos tipos de flujos se pueden generar durante (primarios) o después (secundarios) de las erupciones volcánicas, por una variedad de mecanismos que permiten la interacción del agua con materiales volcánicos y no volcánicos. Las fuentes de agua para formar lahares pueden provenir de nieve, de hielo, de lagos crátericos, de lluvias, de corrientes fluviales o de reservorios de agua en el interior del volcán.” (SGC, 2015).

Existen dos mecanismos principales de generación de lahares (ambos correspondientes a lahares primarios):

- *Mecanismo 1:* Como un producto derivado de la ocurrencia de flujos piroclásticos que aporten un volumen considerable de material a cauces de ríos y quebradas.
- *Mecanismo 2:* Como resultado de la ocurrencia conjunta de un evento eruptivo que deposite una cantidad de caída piroclástica o flujos piroclásticos importante en las cuencas del edificio volcánico, seguido de una lluvia importante que genere volúmenes significativos de escorrentía con la capacidad de erosionar el material superficial recientemente depositado.

La modelación de lahares se puede resumir esencialmente en el tránsito hidráulico de un flujo bifásico, con un alto contenido de material granular de múltiples tamaños. No se trata de un flujo de avalanchas secas, y tampoco de un flujo de un fluido. Esto implica reologías especiales que den cuenta de este fenómeno.

El insumo fundamental al modelo de tránsito es un volumen, un flujo, o un hidrograma que especifique el aporte de material al cauce natural. Para el *mecanismo 1* de generación, es necesario modelar primero los flujos piroclásticos e identificar cuáles de ellos pueden alcanzar los cauces naturales (ver Sección 7.3.4), con volúmenes significativos, y en donde ocurra mezcla importante con el agua contenida en el río o quebrada. Al caudal base constante (Q_{base}) del cauce considerado, se adiciona un caudal Q_{piro} que se considera ocurriendo en un tiempo muy pequeño (t_{piro}), en el cual se aporta la totalidad del volumen de flujo piroclástico que alcanza el cauce, como se ilustra en la Figura 134. El tiempo t_{piro} se aproxima como la décima parte del tiempo de concentración de la cuenca (t_c). De esta manera Q_{piro} es simplemente el volumen aportado (V_{piro}), repartido en el tiempo t_{piro} (i.e. $Q_{piro} = V_{piro}/t_{piro}$).

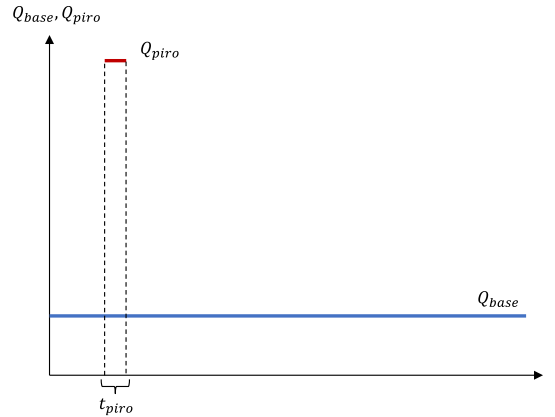


Figura 134. Ilustración del hidrograma de entrada al modelo de tránsito hidráulico para el mecanismo 1 de generación de lahares.

Para el *mecanismo 2*, el volumen de entrada al modelo de tránsito debe determinarse a partir de la ocurrencia de aguaceros importantes, posteriores a la caída de piroclastos o al depósito de flujos piroclásticos sobre el área de la cuenca de estudio. Esto implica la modelación de los productos volcánicos y la modelación de las condiciones de lluvia que pueda detonar el lahar.

En cuanto al tránsito hidráulico del lahar, este puede modelarse por medio de un enfoque bidimensional, basado en las ecuaciones de Sant Venant, en donde el material en tránsito es bifásico (fase sólida y fase líquida). En general, el enfoque es esencialmente el mismo que para los flujos piroclásticos, pero extendido al caso bifásico. La conservación de masa y la cantidad de movimiento, para las fases sólida y líquida, se expresan a través de las siguientes ecuaciones, respectivamente (Córdoba et al., 2015):

$$\frac{\partial \rho_s \varphi}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_s \varphi \vec{v}) = 0 \quad \text{Ecuación 77}$$

$$\frac{\partial \rho_s \varphi \vec{v}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_s \varphi \vec{v} \vec{v}) = \nabla \cdot T_s + f_s + \rho_s \varphi \vec{g} \quad \text{Ecuación 78}$$

$$\frac{\partial \rho_f (1 - \varphi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_f (1 - \varphi) \vec{u}) = 0 \quad \text{Ecuación 79}$$

$$\frac{\partial \rho_f (1 - \varphi) \vec{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_f (1 - \varphi) \vec{u} \vec{u}) = \nabla \cdot T_f + f_f + \rho_f (1 - \varphi) \vec{g} \quad \text{Ecuación 80}$$

en donde ρ_s es la densidad de sólidos, ρ_f es la densidad de fluidos, T_s es el tensor de esfuerzo de la fase sólida, T_f es el tensor de esfuerzo de la fase líquida, f_s son las fuerzas de interacción sobre la fase sólida, f_f son las fuerzas de interacción sobre la fase líquida, $\vec{v}$ es la velocidad de sólidos, $\vec{u}$ es la velocidad de líquidos, φ es la fracción volumétrica de sólidos, que puede asumirse constante dependiendo del problema y $\vec{g}$ es el forzamiento gravitacional que impulsa el flujo. El resultado de la solución del sistema de ecuaciones presentado permite cuantificar la presión dinámica del flujo, la cual es la medida de intensidad con la cual se define el evento de lahar para la modelación del riesgo.

7.4 Amenaza por deslizamientos

Los procesos de remoción en masa se pueden definir como el movimiento cuesta abajo de un cierto volumen de roca o suelo cerca de la superficie de la Tierra, impulsado principalmente a la fuerza de gravedad. Los movimientos en masa son una parte importante del proceso de erosión, ya que el material en altas elevaciones es transportado a elevaciones bajas en donde a su vez puede ser transportado por ríos o quebradas. Los procesos de movimiento en masa ocurren continuamente en todas las laderas, algunos muy lentamente y otros muy repentinamente, a menudo con resultados desastrosos. A cualquier movimiento perceptible cuesta abajo de roca o suelo, o una mezcla de ambos, se le conoce en términos generales como un deslizamiento. En este trabajo no se hace diferencia entre el tipo de deslizamiento causado, debido a que lo que se busca evaluar es la únicamente probabilidad de deslizamiento.

En términos generales, la evaluación de la estabilidad de laderas requiere el entendimiento de cuatro aspectos fundamentales que la gobiernan: i) las cargas actuantes sobre los bloques o porciones de material que pueden deslizarse, ii) el papel del agua en la modificación de las propiedades mecánicas de los materiales de ladera, iii) la estructura geológica del sitio y las modificaciones generada por el hombre, y iv) los eventos detonantes externos, en particular terremotos y exceso de lluvia. En este trabajo el enfoque será únicamente en deslizamientos detonados por lluvia.

Los primeros tres aspectos mencionados pueden condensarse en el concepto de susceptibilidad, el cual da cuenta de las condiciones intrínsecas que favorecen la inestabilidad. El detonante es un factor externo a la ladera, cuyo tratamiento en la modelación se explica en la sección 5 de este informe. El peligro por deslizamientos se determina en esta consultoría como una probabilidad de deslizamiento (P_L), la cual depende de la susceptibilidad (P_S) y de la probabilidad de excedencia del detonante $P(p \geq p_U)$, es decir, la probabilidad que, si se manifiesta un evento detonante, se supere un determinado umbral de intensidad (p_U).

$$P_L = P_S \cdot P(p \geq p_U) \quad \text{Ecuación 81}$$

Si extendemos estos conceptos para una modelación en la cual la lluvia está descrita por una colección de eventos (aguaceros) mutuamente excluyentes y colectivamente exhaustivos, es posible totalizar el peligro por deslizamientos en términos de tasas anuales de ocurrencia (v_L), que dependen adicionalmente de la frecuencia anual de ocurrencia (F_j) de los eventos de precipitación.

$$v_L = P_S \left[\sum_{j=1}^{Np} P(p_j \geq p_u) F_j \right] \quad \text{Ecuación 82}$$

7.4.1 Susceptibilidad a los deslizamientos

Si bien el enfoque más ampliamente usado para la modelación de la susceptibilidad es el de equilibrio límite, su aplicación en un contexto de orden nacional es muy limitada dado que requiere de información de detalle desde el punto de vista geotécnico acerca de las propiedades mecánicas y de resistencia al corte de suelos y formaciones superficiales, que usualmente no se encuentra disponible. En este trabajo se

adopta un enfoque basado en la definición de factores de propensividad que se sabe influyen o son de importancia en el problema de estabilidad de laderas.

Por ejemplo, es posible definir algunos factores de propensividad asociados a la carga, estructura geológica, y modificaciones humanas sobre las laderas en un territorio, como se ilustra en la Figura 135. La carga la podemos asociar, por ejemplo, al número de viviendas alrededor de cada ubicación en el territorio, al tipo de cobertura del terreno y a la pendiente topográfica, por mencionar algunos factores. Así mismo, la estructura geológica está asociada a las formaciones superficiales, a la cercanía a fallas geológicas o a la cercanía de cada sitio a ríos y quebradas. Finalmente, las modificaciones hechas por el hombre y que tienen incidencia en el problema las podemos asociar a, por ejemplo, la cercanía a vías, el estrato socioeconómico o la distancia al sistema de alcantarillado en el territorio. Si bien en ningún caso estamos haciendo una afirmación acerca de las cargas actuantes, la mecánica de los materiales, la geometría de las laderas, etc., si sabemos que estos aspectos reflejan en parte el problema.

Esto significa que es entonces posible encontrar una función que relacione todos los factores de propensividad, es decir las condiciones del terreno que lo hacen, en mayor o menor grado, propenso a los deslizamientos, con una medida de la susceptibilidad, que corresponde a la probabilidad que cada sitio sea inestable o no. Si bien es posible abordar este problema por múltiples caminos, la inteligencia computacional, y en particular las Redes Neuronales Artificiales (RNA), han probado ser especialmente útiles en brindar un mecanismo riguroso y detallado para modelar la susceptibilidad a los deslizamientos.

El uso de RNA como mecanismo para definir las complejas relaciones entre factores de propensividad y susceptibilidad, depende de la existencia de una base de datos de deslizamientos ocurridos en el pasado que permita su entrenamiento y validación

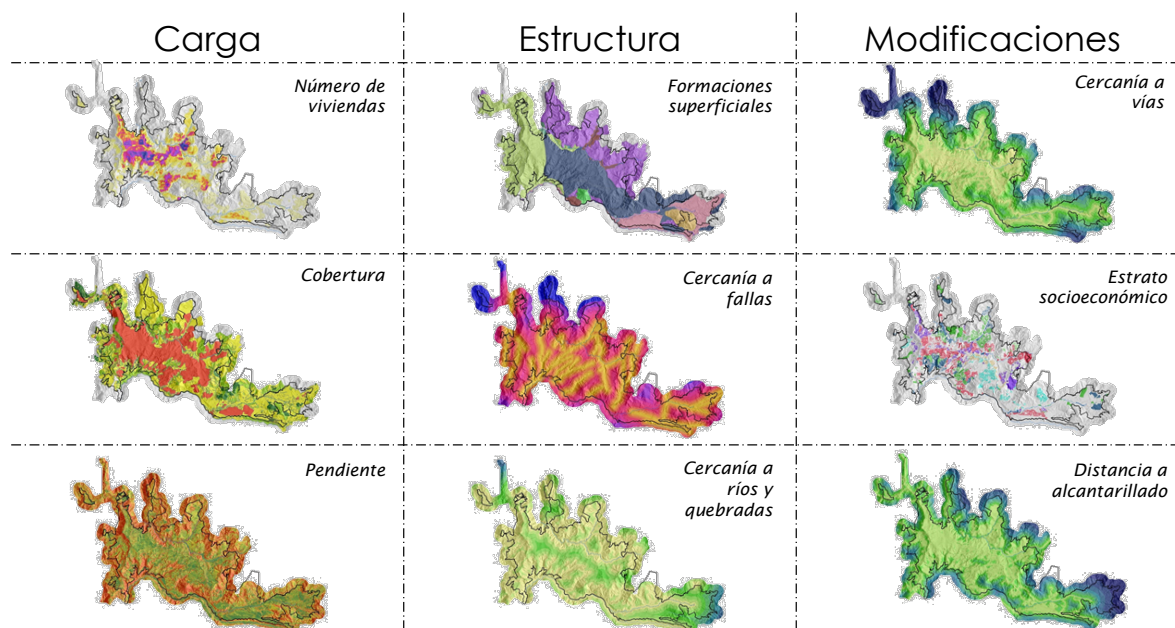


Figura 135. Ejemplos de factores de propensividad para la ciudad de Manizales, Colombia.

7.4.2 Umbrales lluvia-deslizamiento

Como se mencionó anteriormente, el peligro por deslizamientos se calcula a nivel puntual como una probabilidad, compuesta por la susceptibilidad y la probabilidad que el evento detonante supere puntualmente un determinado umbral. Este umbral es una pieza clave en el modelo, pues determina la intensidad de lluvia a partir de la cual es probable que se presenten deslizamientos en un territorio.

Existen múltiples tipos de umbrales lluvia–deslizamiento en la literatura. Los principales se pueden agrupar como: i) umbrales basados en lluvia antecedente, en donde la cantidad de precipitación previa a la ocurrencia de los deslizamientos, en diferentes escalas de acumulación, determina la posibilidad de deslizamiento; ii) umbrales de intensidad duración, los cuales se basan en información que se puede considerar inmediata, es decir, no hay periodos de acumulación incorporados, sino que se define la posibilidad de deslizamiento en función de la intensidad de lluvia, entendida como precipitación por unidad de tiempo, contra la duración de los aguaceros; y iii) umbrales generados por medio de redes neuronales, u otros enfoques de inteligencia artificial. En este punto no es posible saber cuál tipo de umbral se empleará en esta consultoría, o si se usarán combinaciones de estos tipos, dado que la información disponible aún se encuentra en revisión.

7.4.3 Aceleración crítica

Para determinar la amenaza por deslizamientos detonados por sismo se ha utilizado como aproximación la metodología propuesta por Newmark (1965) la cual utiliza un parámetro llamado *aceleración crítica*; la aceleración crítica es la aceleración mínima que detonaría un deslizamiento, y esta depende del factor de seguridad de la siguiente manera:

$$A_c = (FS - 1) \cdot g \cdot \sin \alpha$$

Ecuación 83

Donde FS es el factor de seguridad estático y α es el ángulo desde la horizontal al centro de masa del potencial deslizamiento, lo cual es aproximadamente el ángulo de pendiente. Dado que la aceleración en un evento sísmico se modela como una variable aleatoria (ver sección 7.1), entonces al definir una aceleración crítica para una ladera, es posible establecer con qué probabilidad se causará el deslizamiento en un evento sísmico simulado, calculando la probabilidad de excedencia de A_c , como se ilustra en la Figura 136.

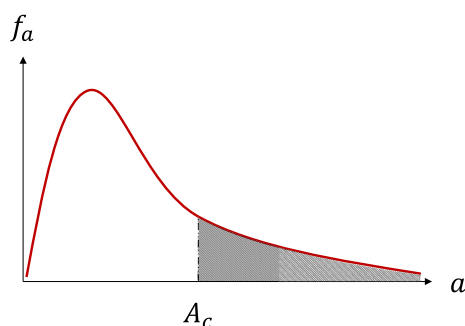


Figura 136. Ilustración del cálculo de la probabilidad de deslizamiento para un evento sísmico simulado.

8 MODELACIÓN DE LA EXPOSICIÓN

La exposición y la vulnerabilidad reflejan las condiciones del entorno socioeconómico en el cual ocurren los eventos de amenaza. La existencia de elementos expuestos en zonas susceptibles a la ocurrencia de fenómenos peligrosos, así como su susceptibilidad al daño, que se origina en el proceso social de generación y acumulación de la vulnerabilidad, condicionan la ocurrencia de los desastres de forma más determinante que la misma amenaza.

En general, un elemento expuesto es cualquier objeto, elemento, bien o activo susceptible de sufrir daño y pérdida, debido a la ocurrencia de un evento de amenaza. Como sabemos, los elementos expuestos son esenciales en la evaluación del riesgo dado que son los elementos sobre los cuales se cuantifican las pérdidas modeladas.

Podemos agrupar los elementos expuestos en función al tipo de exposición al que pertenecen como edificaciones, infraestructura, cultivos y ganadería, por mencionar algunos. Estos grupos de elementos expuestos tienen características que los diferencian entre sí, tanto en el modelo requerido para representarlos, como en su susceptibilidad al peligro.

La afectación en las edificaciones se mide, en este trabajo, en términos de los daños directos al inmueble, contenidos y lucro cesante por la interrupción en la prestación de un servicio. Las edificaciones suelen agruparse en portafolios en función del responsable final sobre las pérdidas modeladas, permitiendo la simulación de los efectos sobre grandes grupos de elementos expuestos.

Los sistemas de infraestructura constituyen uno de los tipos de exposición de mayor complejidad de modelación. Estos sistemas se componen de elementos individuales que se interconectan, conformando nodos y arcos por donde fluye algún servicio específico. Por lo tanto, los elementos que componen el sistema tienen interdependencia. La afectación tiene que ver con el daño directo a los elementos individuales, y con los cambios que ese daño directo implica a la oferta del servicio prestado. Esta consultoría se enfocará en la afectación directa a los elementos que componen los sistemas de infraestructura.

Finalmente, en el caso de la producción agropecuaria, el elemento expuesto puede entenderse como una unidad de tierra cultivada o productiva. En esta unidad confluyen múltiples aspectos como el tipo de cultivo o sistema productivo presente, el ciclo productivo, la estacionalidad del ciclo, el tipo de suelo, entre otros. La afectación se refiere principalmente a la reducción en el rendimiento de cultivos o en variaciones en la capacidad de carga animal de pasturas, lo que conlleva una pérdida en producción. Esta pérdida se refiere a un flujo económico, y no a la pérdida de un activo, como en el caso de daños en edificaciones e infraestructura.

La exposición se modela mediante capas de información georreferenciada, en donde cada elemento del portafolio de exposición tiene una representación geométrica en el espacio, y atributos que lo caracterizan. La información mínima necesaria para caracterizar los elementos expuestos es la siguiente:

- Su ubicación geográfica
- Su valor de reposición o compensación, entendido en el dominio del tipo de pérdida correspondiente al elemento evaluado

- Un código o clasificación de su vulnerabilidad

Dependiendo de la evaluación en curso, se hace necesario contar con información complementaria que permita caracterizar más específicamente cada elemento, con el fin de asociar un modelo de vulnerabilidad apropiado. Por ejemplo, para edificaciones conviene conocer su número de pisos, uso, edad, sistema estructural, entre otros aspectos. Conviene anotar que la información recopilada cubre todos los aspectos requeridos para caracterizar los elementos frente a todas las amenazas incluidas en el alcance de esta evaluación.

8.1 Exposición de edificaciones

La información de exposición de bienes inmuebles en términos de valores de reposición representa un componente fundamental en la evaluación del riesgo de desastres. Su adecuada caracterización es de gran importancia para la adecuada estimación de las pérdidas. La base de datos de elementos expuestos se puede definir mediante diferentes niveles de resolución dependiendo de la disponibilidad de la información y del tipo de análisis que se pretende llevar a cabo. En este sentido, es común el uso de información catastral, la cual provee la localización, estrato socioeconómico y avalúo de los bienes inmuebles, en conjunto con información del censo de vivienda, la cual brinda datos como material de paredes y cubierta, entre otros. Cuando no se cuenta con información detallada es necesario realizar estimaciones aproximadas que representen o den cuenta de dicho inventario de activos expuestos.

En el caso de las edificaciones, los requerimientos mínimos de información a ser incorporada en la base de elementos expuestos se indican a continuación:

- *Identificación:* Código único que identifica cada una de las edificaciones.
- *Localización:* Los elementos expuestos deben ser referenciados geográficamente para determinar la intensidad con que se verán afectados por la amenaza analizada. La localización se realiza mediante objetos geométricos geo-referenciados como puntos, líneas o polígonos.
- *Año de construcción:* el año o periodo en el que se desarrolló la construcción da cuenta de los criterios de diseño y materiales empleados, y de los sistemas constructivos característicos de dicho periodo.
- *Estrato socioeconómico:* La calidad de los materiales y de la construcción está asociada al nivel socioeconómico en el que se desarrolle.
- *Sistema estructural:* Con base en las características mencionadas anteriormente, es posible realizar la asignación del material de construcción y de una disposición general de los elementos estructurales, que denominamos sistema estructural. Dicho sistema determinará la curva de vulnerabilidad correspondiente que permitirá caracterizar el comportamiento de la estructura ante la amenaza.
- *Avalúo:* Se debe realizar la valoración económica de cada una de las edificaciones con el fin de determinar las pérdidas en términos monetarios ante un evento. Este avalúo corresponde al valor de reposición.

En base a la información que pueda recopilarse, se determinan todas las variables anteriormente listadas, con el objetivo de conformar de la manera más completa posible la información requerida.

8.2 Exposición de infraestructura

Este es uno de los portafolios más difíciles de caracterizar, tanto desde el punto de vista de la exposición como de su vulnerabilidad. Como se mencionó anteriormente, los elementos expuestos del portafolio de infraestructura existen como una red de activos interdependientes, a través de los cuales se presta algún servicio o fluye algún producto. Dichos elementos son susceptibles de dañarse luego de la ocurrencia de eventos peligrosos, derivando en pérdidas físicas directas asociadas a la reposición de los componentes dañados y la restitución de las condiciones de demanda y oferta previas al evento.

Dependiendo del sector y del tipo de elemento, el modelo de exposición debe intentar capturar los componentes del sistema de infraestructura que se está representando. La Tabla 40 presenta un listado no exhaustivo del tipo de componentes de los sectores considerados. En la medida que la información lo permita, se caracterizarán tantos componentes como se requiera y sea posible.

Tabla 40. Componentes típicos de sectores de infraestructura

Vías	Energía	Telecomunicaciones	Transporte	Agua y saneamiento
Transporte por carreteras • Carreteras y Autopistas • Puentes • Túneles • Centros de Operaciones y Gestión de Tráfico • Terminales de camiones	Generación de energía • Centrales termoeléctricas • Centrales hidroeléctricas • Centrales eléctricas de energía alternativa/renovable • Centrales Eléctricas Distribuidas • Otras centrales de generación • Generadores de respaldo • Subestaciones de Plantas Eléctricas Transmisión • Líneas de Transmisión y Torres • Subestaciones de Transmisión • Estaciones convertidoras • Centros de Control Regionales Distribución • Líneas de Distribución • Subestaciones de Distribución • Transformadores reductores	Servicios de telefonía fija • Instalaciones de conmutación • Tandems de acceso • Cableado • Puntos de operadores • Centros de datos de operadores Servicios inalámbricos • Torres de telefonía celular • Estaciones base transceptoras • Estaciones de control de estaciones base • Oficinas de conmutación móvil Servicios de transmisión • Sede de red de televisión/radio • Centros de transmisión locales • Centros de datos • Centros de operaciones	Transporte fluvial • Esclusas y canales • Presas • Muelles Transporte marítimo • Puertos marítimos (de poco calado y de gran calado) Transporte aéreo • Aeropuertos • Pistas de aterrizaje y aeródromos • Helipuertos • Instalaciones de control de tráfico aéreo y navegación Transporte masivo • Sistemas de metro • Sistemas de bus • Sistemas de tranvías y transbordadores	Abastecimiento, almacenamiento y tratamiento de agua • Activos de almacenamiento de agua cruda (depósitos y tanques) • Plantas de desalinización • Plantas de tratamiento y filtración de agua • Activos de almacenamiento de agua terminada (torres, pozos de agua y columnas de agua) Entrega de agua • Túneles de agua • Acueductos • Red de transmisión • Estaciones de bombeo • Interconexiones de tuberías • Red de distribución • Tuberías de servicio • Estaciones de control y monitoreo Recolección de aguas residuales • Entradas y tuberías principales de alcantarillado (sanitario, pluvial y combinado) Tratamiento y descarga • Almacenamiento de afluentes (tanques, pozos, estanques y cuencas) • Planta de tratamiento de aguas residuales • Instalaciones de bombeo y descarga • Estaciones de control y monitoreo

Cabe mencionar que, en el caso específico de las redes de distribución de agua potable, recolección de aguas residuales, y distribución eléctrica, es altamente probable que no sea posible modelarlas elemento a elemento, dado que no se cuenta con la información de detalle de la disposición de las redes, tipos de elementos y características geométricas, estructurales y de servicio de estos. Por esta razón, estos subsectores se modelan de forma mallada, indexado a una malla de distribución poblacional en Costa Rica, modificada de acuerdo con la cobertura del servicio agua potable, alcantarillado y acceso a energía eléctrica en el país. Esto significa que los elementos expuestos en la evaluación corresponden a píxeles de determinado tamaño, que tiene una cierta valoración y a los cuales les corresponde un cierto modelo de vulnerabilidad.

8.3 Exposición de cultivos

La actividad agrícola expuesta se cuantificará en términos de áreas de cultivo según los principales productos definidos para esta consultoría. Los elementos expuestos serán unidades de tierra cultivada, las cuales tienen una ubicación, un tipo de producto agrícola y un tipo de suelo específico. Normalmente, estas unidades se construyen geográficamente como píxeles con un nivel de resolución apropiado según la escala a de trabajo (Cardona et al., 2021).

Para cada elemento expuesto, o unidad de tierra cultivada, es necesario conocer las características del cultivo en esa ubicación. La información que se refleja en el modelo de exposición incluye el tipo de cultivo, su estacionalidad, el área sembrada y los rendimientos históricos (toneladas producidas por unidad de área).

El calendario de cultivo determina su estacionalidad. Este valor es importante pues define la duración de las diferentes etapas de desarrollo, desde su siembra hasta la madurez, como se muestra esquemáticamente en la Figura 137 y Figura 138, para cultivos transitorios y permanentes, respectivamente. Adicionalmente, indica los momentos del año en que usualmente ocurren la siembra y la cosecha. Esta información es necesaria para modelar la vulnerabilidad de los cultivos, en función de su desarrollo como función del tiempo.

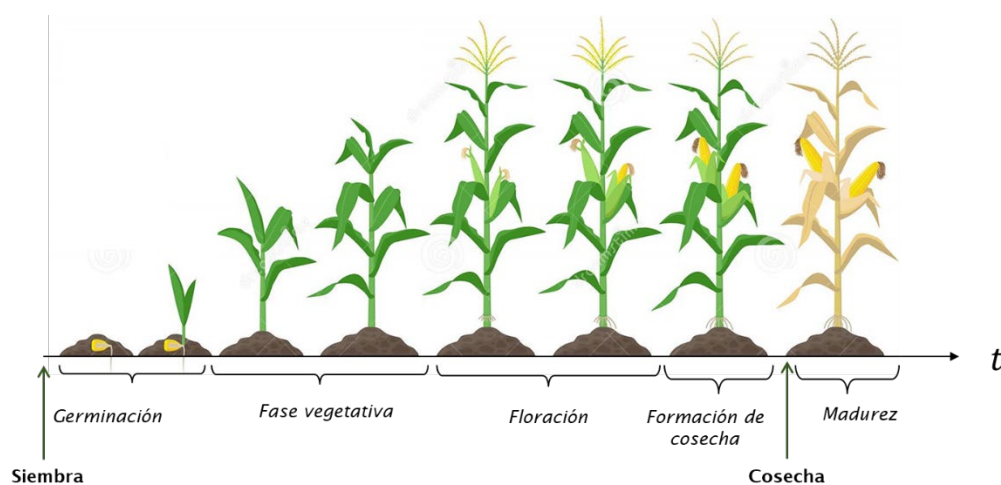


Figura 137. Ilustración de las etapas fenológicas y su duración para un cultivo transitorio.

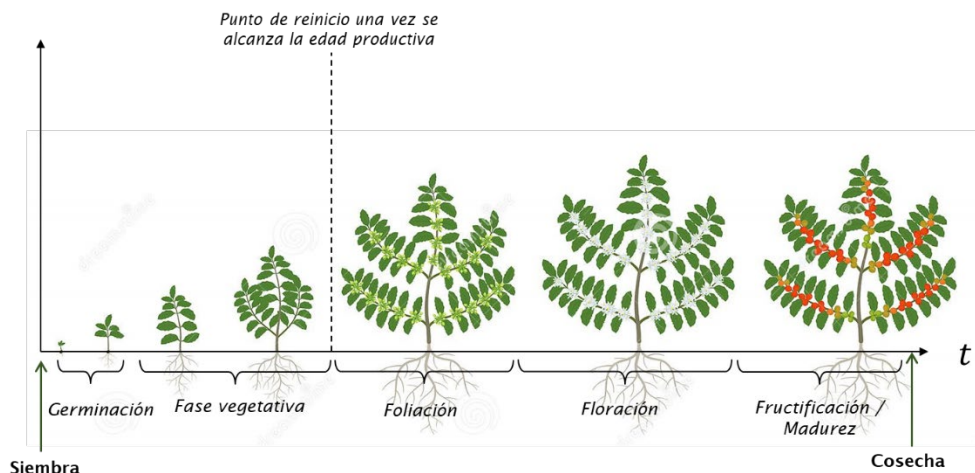


Figura 138. Ilustración de las etapas fenológicas y su duración para un cultivo permanente.

El desarrollo de los cultivos está fuertemente relacionado con la humedad en el suelo en la región radicular. Es por lo tanto necesario conocer la textura y las características del suelo que permitan estimar su capacidad de retención de agua. Los parámetros necesarios para estimar la capacidad del suelo de almacenar y retener agua se presentan en la Figura 139. Dependiendo del nivel del agua en el suelo se define la disponibilidad del agua para la planta. Es así como después de una lluvia el agua puede quedar en exceso, de la cual una fracción se convierte en escorrentía y la otra fracción se infiltra por fuerzas gravitacionales. Esta agua infiltrada pasa de un nivel de saturación (en el cual no hay contenido de aire en el suelo) al nivel que tiene el suelo de retener el agua o capacidad de campo (*field capacity* en inglés). A medida que el agua se infiltra en el suelo, las plantas pierden la posibilidad de usarla, hasta llegar al punto de marchitamiento definitivo, en el que la planta no cuenta con agua disponible y no se puede recuperar. El rango de agua disponible para la planta se ubica entre la capacidad de campo y el punto de marchitamiento, en el que el suelo es capaz de retener el agua.

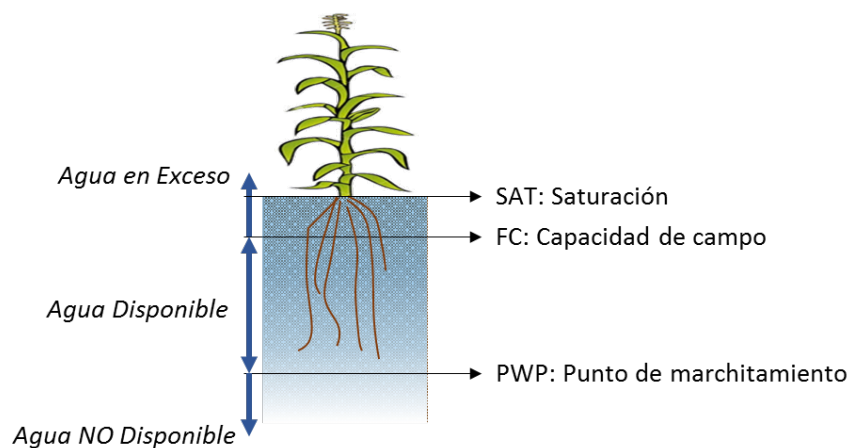


Figura 139. Ilustración de la disponibilidad del agua en el suelo

La capacidad de retener el agua en el suelo depende en gran medida de su textura. Como el suelo es un medio poroso, dependiendo del tamaño de los espacios entre partículas, está en capacidad de almacenar

más o menos agua. El tamaño de las partículas del suelo, o textura se define según su contenido de arena, limo y arcilla. Es así como suelos arenosos tienen poca capacidad de retener agua por su estructura de partículas gruesas con macroporos, mientras que suelos arcillosos, cohesivos, de partículas finas, retienen el agua en microporos y tienen una mayor capacidad de campo (Sheppard & Hoyle, 2018). Esta relación se puede ver de forma esquemática en la Figura 140, en la que se presenta el porcentaje de volumen de agua para la capacidad de campo según la textura de suelo, desde arenas con partículas gruesas hasta arcilla de partículas finas.

En la Figura 140 se puede ver como la capacidad campo o de retener agua en el suelo aumenta a medida que las partículas de suelo son más finas. Sin embargo, para que el agua sea disponible para las plantas, el contenido de agua en el suelo debe mantenerse sobre el punto de marchitamiento. Como se ve en la Figura 140, el punto de marchitamiento también aumenta en la medida que la textura del suelo es más fina. Esto se debe a que, aunque hay mayor volumen de agua retenida del suelo fino, la fuerza que se ejerce para mantener el agua en los microporos es muy alta y las plantas no tienen capacidad de succionarla. Esto está relacionado con la conductividad hidráulica del suelo.

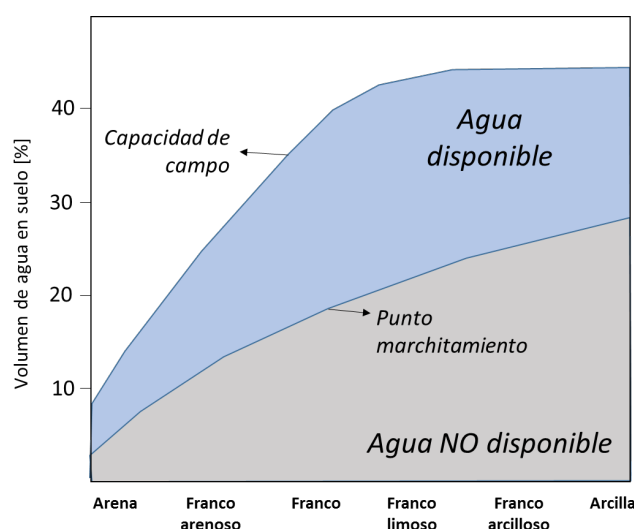


Figura 140. Esquema de retención de agua según tipo de suelo. Reproducido de Sheppard & Hoyle (2018).

La determinación de la textura del suelo se hace a partir de las fracciones de arcilla, limo y arenas que lo compongan. Esta clasificación se resume en el triángulo de clase textural del suelo, publicado por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, USDA por sus siglas en inglés. Este esquema se presenta en la Figura 141.

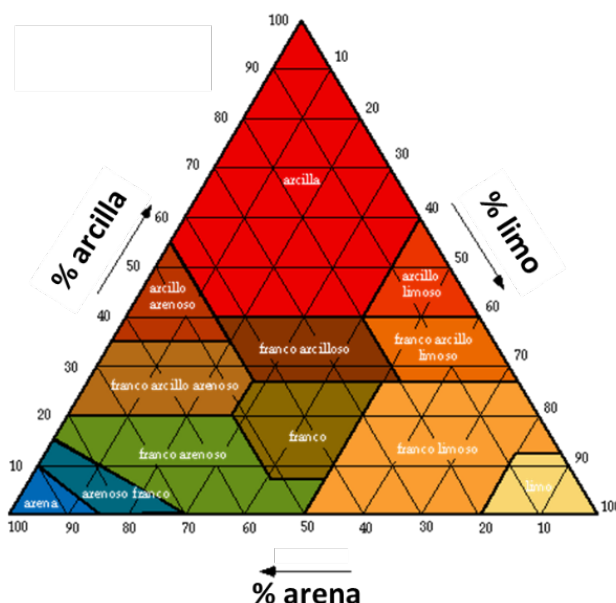


Figura 141. Triángulo de clases texturales básicas de suelos según el tamaño de partículas. Elaborado por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA).

8.4 Exposición de sistemas productivos ganaderos

Dado el alcance de esta consultoría en lo que se refiere a sistemas pecuarios (ganadería de pastoreo), una parte importante del modelo de exposición corresponde a las pasturas existentes para el pastoreo. En este modelo, y como se detalla en la sección 9.6, se le da un tratamiento a la pastura como de un cultivo, es decir, se determina su respuesta al agua y condiciones meteorológicas con el fin de determinar su rendimiento en términos de materia seca. Por lo tanto, la información requerida para caracterizar la pastura es del mismo tipo que la que se requiere para los productos agrícolas (ver sección 8.3).

Adicionalmente, se requiere información acerca de las manadas de animales de pastoreo, en cada unidad de producción ganadera. La información requerida incluye:

- Número de animales por hectárea y distribución por sexo y edad.
- Estado fisiológico de los animales (e.g. hembras embarazadas, crías lactantes, etc.).
- Peso óptimo de referencia de una unidad ganadera.
- Requerimientos de materia seca por kilogramo.

9 MODELACIÓN DE LA VULNERABILIDAD

El problema de vulnerabilidad debe abordarse de forma diferenciada para cada tipo de amenaza considerado. Esto hace que el estudio de la vulnerabilidad de las edificaciones, infraestructura, cultivos y ganadería expuestos sea altamente complejo, pues es un campo de desarrollo aún muy activo a nivel académico y de investigación.

9.1 Tipos de representación de la vulnerabilidad física

La vulnerabilidad física de los elementos expuestos puede ser representada matemáticamente de diferentes maneras, las cuales son válidas en la medida en que el modelo aplicado represente suficientemente bien la complejidad del proceso de generación de pérdidas al someter los elementos expuestos al impacto de un evento peligroso. Adicionalmente, los modelos de vulnerabilidad deben estar en la capacidad de expresar la pérdida causada de forma probabilista, de tal manera que el marco conceptual de la evaluación del riesgo (ver sección 5) pueda ser aplicado.

9.1.1 Modelo probabilista de la pérdida

En modelación del riesgo catastrófico las pérdidas se tratan como variables aleatorias. Esto permite considerar directamente en los cálculos la incertidumbre inherente a los montos de pérdida causados por uno u otro evento de un peligro que pueda manifestarse. La vulnerabilidad se define elemento por elemento dentro del portafolio de exposición, lo que significa que la pérdida a la cual se hace referencia aquí es la de un solo elemento expuesto. Para generalizar, la pérdida puede definirse como una variable en el intervalo de 0 a 1, es decir, desde cero hasta el 100% del valor expuesto del elemento (e.g., el valor de reposición de un bien inmueble, el valor de producción anual de un área cultivada, etc.). Esto significa que en adelante y en general cuando se habla de vulnerabilidad, la pérdida corresponde siempre a una pérdida relativa de acuerdo con el grado de daño; es decir, es una fracción del valor expuesto.

En general, no se cuenta con información suficiente sobre daños y pérdidas causadas en eventos históricos que permitan ajustar un modelo de probabilidad a la pérdida con base en estimaciones estadísticas. Este no es un problema exclusivo del riesgo de desastres en Costa Rica, sino una condición de base que se cumple en cualquier contexto y para cualquier amenaza en cualquier sitio. Por lo tanto, la definición de un modelo de probabilidad que describa la aleatoriedad de la pérdida es una decisión que se considera razonable y apropiada, pero es inevitablemente arbitraria. El modelo más ampliamente usado corresponde a una distribución *Beta*, propuesta por Anne Kiremidjian y otros autores en el desarrollo del documento ATC-13 y su comentario ATC-13-1 (ATC, 1985, 2002), cuyo objetivo era la definición de modelos de probabilidad para el daño causado por terremotos en California. Desde entonces, el uso de la distribución Beta como modelo de probabilidad de la pérdida se ha generalizado a nivel mundial para todas las amenazas y todo tipo de elementos expuestos, al ser un modelo cuyo uso es práctico al cumplir los siguientes criterios:

- Describe una variable aleatoria continua dentro del intervalo real $[0,1]$.
- Se define únicamente con dos parámetros (α y β).
- Admite múltiples formas como función de los valores de sus parámetros.

La función de densidad de probabilidad (f_p) de la distribución Beta se presenta a continuación.

$$f_p = \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha) \cdot \Gamma(\beta)} \cdot p^{\alpha-1} \cdot (1-p)^{\beta-1} \quad \text{Ecuación 84}$$

en donde $\Gamma(\cdot)$ es la función *Gamma*. Dado que se trata de una distribución de dos parámetros, se requiere de dos momentos de probabilidad para caracterizarla. Esto implica que los modelos de vulnerabilidad deben dar cuenta de, por lo menos, dos momentos de probabilidad. Es usual definir modelos de vulnerabilidad en términos del valor esperado ($E(p)$) y varianza ($Var(p)$) de la pérdida. De esta manera, es posible determinar el valor de los parámetros α y β mediante la aplicación del método de los momentos:

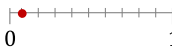
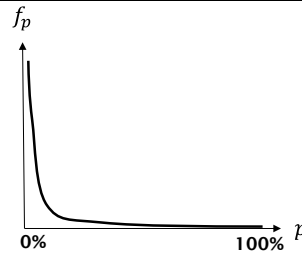
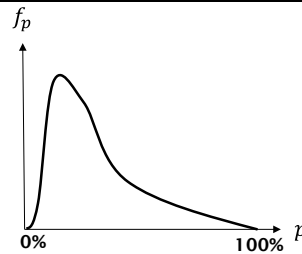
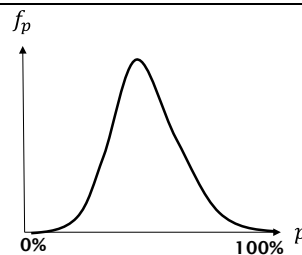
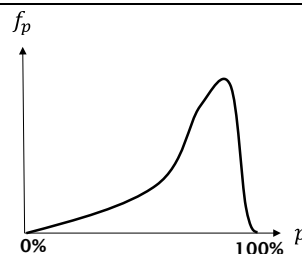
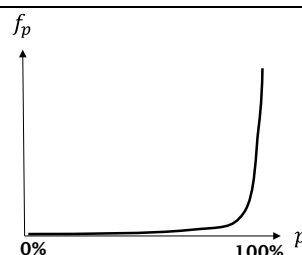
$$\alpha = \frac{1 - (1 + C^2) \cdot E(p)}{C^2} \quad \text{Ecuación 85}$$

$$\beta = \frac{\alpha \cdot (1 - E(p))}{E(p)} \quad \text{Ecuación 86}$$

En donde C es el coeficiente de variación (i.e. $C = \sqrt{Var(p)}/E(p)$). La manera como cambia de forma la distribución Beta depende entonces de los valores de los momentos de probabilidad que se estiman por medio de los modelos de vulnerabilidad. Como se mencionó, la capacidad de la distribución Beta de alterar su forma dentro del intervalo en el cual se define es uno de los criterios por los cuales es ampliamente usada en modelación del riesgo catastrófico. La Tabla 41 ilustra las formas esperadas de la distribución Beta ante diferentes combinaciones de valor esperado y varianza para la pérdida. La tabla incluye una descripción general de lo esperado ante eventos de peligro de diferente nivel de intensidad¹⁹, una ilustración de cantidades para el valor esperado y varianza dentro del intervalo [0,1], y una ilustración de la forma esperada de la distribución Beta. Puede concluirse que la distribución Beta se ajusta apropiadamente a las formas como se espera se distribuya la pérdida ante eventos de diferentes características.

¹⁹ En la Tabla 18 se describen niveles lingüísticos de intensidad con el objetivo de ilustrar el concepto. Sin embargo, en la modelación de la vulnerabilidad los momentos de probabilidad de la pérdida se indexan siempre a medidas físicas de intensidad.

Tabla 41. Ilustración de la variación de la distribución Beta ante eventos de diferente nivel de intensidad.

Descripción	Momentos de probabilidad	Distribución Beta
<u>Evento de muy baja intensidad:</u> Se espera un valor bajo de pérdida con una dispersión baja. Es decir, si la intensidad es muy baja se sabe que la pérdida será baja sin mucha variabilidad. La distribución exhibe un comportamiento exponencial negativo, con un rápido decrecimiento. Es decir que la mayor densidad de probabilidad se concentra cerca de pérdida cero, como es de esperarse ante un intensidad muy baja.	$E(p)$  $Var(p)$ 	
<u>Evento de intensidad baja:</u> Aumenta el valor esperado de la pérdida y también aumenta su varianza (es decir, la pérdida es más incierta). La distribución es más ancha, centrada más a la derecha, pero aún sesgada hacia pérdidas bajas	$E(p)$  $Var(p)$ 	
<u>Evento de intensidad intermedia:</u> El valor esperado de la pérdida es mucho mayor y la varianza es también la mayor posible. La distribución es ahora simétrica, con forma de campana, y lo más ancha posible, indicando que nos encontramos en el punto de mayor variabilidad posible para la pérdida.	$E(p)$  $Var(p)$ 	
<u>Evento de intensidad alta:</u> El valor esperado de la pérdida aumenta pero su varianza disminuye debido a que ante altas intensidades es cada vez menos incierto un nivel de daño elevado. La distribución empieza a sesgarse a la derecha hacia valores grandes de pérdida, con algo de densidad en pérdidas bajas, pero muy concentrada hacia grandes daños.	$E(p)$  $Var(p)$ 	
<u>Evento de muy alta intensidad:</u> El valor esperado de la pérdida es muy alto y su varianza pequeña debido a que no existe mucha incertidumbre acerca del nivel de daño para una intensidad muy alta. La distribución adquiere una forma de función exponencial, con un rápido crecimiento en los valores de densidad, indicando que es casi seguro que las pérdidas sean muy elevadas.	$E(p)$  $Var(p)$ 	

9.1.2 Funciones de vulnerabilidad

Las funciones de vulnerabilidad son una representación matemática de la vulnerabilidad física, que de hecho se compone de dos funciones diferentes: una función que describe la variación del valor esperado de la pérdida con la intensidad del fenómeno y otra que describe la variación de la varianza. Las funciones de vulnerabilidad son el modelo de vulnerabilidad preferido para bienes inmuebles o elementos de infraestructura en evaluaciones de riesgo catastrófico debido a que describen de manera apropiada la pérdida; es decir, su incorporación en el modelo no requiere de ningún preproceso.

La forma de las funciones de valor esperado y varianza no es totalmente libre. En general debe cumplirse lo ilustrado en la Tabla 41, es decir, la función de valor esperado es necesariamente creciente, mientras que la función de varianza debe ser primero creciente y después decreciente para dar cuenta de forma apropiada de su variabilidad esperada con la intensidad del fenómeno. Las formas funcionales más usadas en la literatura para describir funciones de vulnerabilidad son las propuestas en el documento ATC-13 (ATC, 1985, 2002), las cuales describen la variación del valor esperado y varianza de la pérdida ante cualquier medida física de intensidad (a). Para el valor esperado, se sabe que la función debe ser creciente, pero su tasa de crecimiento se asume variable a medida que la intensidad aumenta:

$$E(p) = 1 - e^{\ln\left(\frac{1}{2}\right) \cdot \left(\frac{a}{a_0}\right)^\varepsilon} \quad \text{Ecuación 87}$$

En donde a_0 corresponde a la intensidad que produce un valor esperado de pérdida de 0.5 y ε es un exponente que controla la pendiente de la curva para la intensidad a_0 .

Existe poca información para determinar la varianza de la pérdida. En este caso se asume, como se ilustra en la Tabla 41, que cuando el valor esperado de la pérdida es muy bajo la varianza también lo es. De igual forma, cuando el valor esperado de la pérdida es muy alto, la varianza es de nuevo muy baja. Para valores intermedios es difícil precisar, con bases empíricas, cuánto vale la varianza de la pérdida. Para modelar la variación de la varianza de la pérdida se emplea comúnmente la siguiente expresión (ATC, 1985, 2002):

$$Var(p) = Q \cdot (E(p))^{r-1} \cdot (1 - E(p))^{s-1} \quad \text{Ecuación 88}$$

En donde Q y s se definen como:

$$Q = \frac{V_{max}}{D_0^{r-1}(1 - D_0)^{s-1}} \quad \text{Ecuación 89}$$

$$s = \frac{r - 1}{D_0} - r + 2 \quad \text{Ecuación 90}$$

En donde V_{max} es la varianza máxima, D_0 es el nivel de daño para el que ocurre esta varianza máxima y r es un exponente que determina la forma de la función (usualmente se usa $r = 3$). La Figura 142 muestra una ilustración de una función de vulnerabilidad. Nótese las formas de las funciones de valor esperado y varianza.

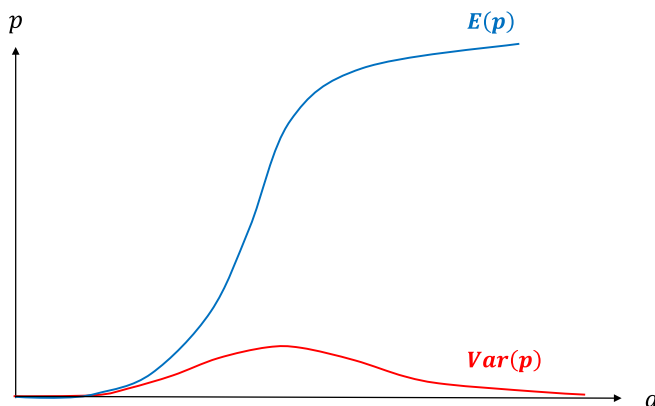


Figura 142. Ilustración de una función de vulnerabilidad

Las funciones de vulnerabilidad se determinan y establecen para tipos de elementos expuestos, siguiendo una categorización por tipos constructivos. Esto significa que una misma función puede describir el comportamiento de múltiples elementos expuestos que pertenecen al mismo tipo constructivo. Esto tiene sentido dada la naturaleza probabilista de las funciones de probabilidad, la cual permite modelar el comportamiento de elementos expuestos similares. La tipificación o categorización de los elementos expuestos se establece en el modelo de exposición en función, típicamente, de las características físicas de los elementos y el tipo de afectación o daño que la amenaza causa sobre estos.

9.1.3 Vulnerabilidad binaria

En algunos casos específicos es necesario definir modelos de vulnerabilidad binaria. Estos modelos son aplicables a contextos en los cuales la vulnerabilidad no admite una gradación con la intensidad, bien porque el elemento expuesto es altamente vulnerable, o porque el peligro es de tal grado de intensidad que es irresistible para los elementos expuestos. En otras palabras, es un modelo apropiado en contextos en los cuales la vulnerabilidad se satura. Este modelo se define mediante una intensidad umbral (a_T) que, en caso de superarse, supone un daño total al elemento (i.e. pérdida del 100%) con una cierta probabilidad (p_d). La ocurrencia de una pérdida total o no se define entonces como una variable aleatoria tipo Bernoulli, con parámetro p_d , por lo cual el valor esperado y varianza de la pérdida quedan establecidos como:

$$E(p) = \begin{cases} p_d & \text{si } a \geq a_T \\ 0 & \text{si } a < a_T \end{cases} \quad \text{Ecuación 91}$$

$$Var(p) = \begin{cases} p_d \cdot (1 - p_d) & \text{si } a \geq a_T \\ 0 & \text{si } a < a_T \end{cases} \quad \text{Ecuación 92}$$

9.1.4 Otros modelos de vulnerabilidad

En general puede afirmarse que cualquier modelo matemático que esté en capacidad de establecer valores para $E(p)$ y $Var(p)$ es válido para ser usado en la modelación del riesgo. Algunos tipos de elementos expuestos, por su propia naturaleza, no admiten ser modelados por medio de funciones de vulnerabilidad o mediante vulnerabilidad binaria. En el caso específico de esta consultoría, la

vulnerabilidad de la producción agropecuaria ante inundaciones y sequías debe ser abordada con un tipo de modelo especial.

La modelación de la vulnerabilidad en cultivos se realiza en este trabajo siguiendo la metodología de cálculo de rendimientos definida por la FAO (*Food and Agriculture Organization* de Naciones Unidas, por sus siglas en inglés). La vulnerabilidad se define en términos de la pérdida de rendimiento que sufre el cultivo durante un período productivo afectado por un periodo seco o por anegamiento del terreno. Por su parte, la vulnerabilidad en la ganadería se cuantifica en función de la capacidad de las pasturas o cultivos de forraje de proveer el contenido calórico suficiente como para mantener la producción derivada de los animales, midiendo la capacidad de carga animal de un territorio y sus variaciones por efectos de los peligros simulados.

9.1.5 Asignación de tipos de modelos de vulnerabilidad

Para la modelación del riesgo para las amenazas y sectores definidos en esta consultoría, es necesario emplear diferentes tipos de modelos de vulnerabilidad. Como resumen general, la Tabla 42 muestra el tipo de modelo empleado en cada caso.

Tabla 42. Tipos de modelo de vulnerabilidad empleados según la combinación peligro-sector.

Exposición Amenaza	Edificaciones	Infraestructura	Agricultura	Ganadería
<i>Sismo</i>	Función de vulnerabilidad	Función de vulnerabilidad		
<i>Inundación fluvial</i>	Función de vulnerabilidad	Función de vulnerabilidad	Modelo especial	Modelo especial
<i>Inundación costera</i>	Función de vulnerabilidad			
<i>Sequía</i>			Modelo especial	Modelo especial
<i>Erupción volcánica</i>		Función de vulnerabilidad / Vulnerabilidad binaria		
<i>Deslizamientos</i>		Vulnerabilidad binaria		
<i>Tsunami</i>	Función de vulnerabilidad			

A continuación, se presentan detalles acerca del enfoque a emplear para el desarrollo de los diferentes modelos de vulnerabilidad presentados en la Tabla 41, excepto aquellos que corresponden a una vulnerabilidad binaria dado que no se requieren de más elementos para su desarrollo.

9.2 Vulnerabilidad de edificaciones

9.2.1 Vulnerabilidad sísmica

Para establecer la vulnerabilidad sísmica de una edificación, se hace uso de su capacidad ante carga lateral, condensada aproximadamente en su *curva de capacidad*. Se utiliza la curva de capacidad de una estructura para determinar el comportamiento elástico e inelástico de la misma frente a sollicitaciones sísmicas, lo que permite obtener una función de vulnerabilidad en términos de intensidades de movimiento fuerte. La

ecuación empleada en este caso para determinar el valor esperado de la pérdida tiene la misma forma que la Ecuación 87 del ATC-13 (ATC, 1985, 2002), pero modificada para ser expresada en términos de la deriva de entrepiso, así (Miranda, 1999; Ordaz, 2000):

$$E[p|\gamma_i] = K_1 K_2 K_3 K_4 \left(1 - e^{\ln 0.5 \left(\frac{\gamma_i}{\gamma_0} \right)^\varepsilon} \right) \quad \text{Ecuación 93}$$

En donde γ_i es la deriva de entrepiso máxima, γ_0 y ε son parámetros que se definen en función del sistema estructural, y los factores K son factores que modifican la vulnerabilidad al considerar irregularidades en planta (K_1) o en altura (K_2), golpeteo con edificaciones vecinas (K_3), daños previos no reparados o columnas cortas y otros (K_4).

La deriva de entrepiso máxima, γ_i , se determina a partir de la aceleración espectral a través de la siguiente expresión:

$$\gamma_i = \frac{\beta_1 \beta_2 \beta_3 \beta_4 (\eta N^\rho)^2}{4\pi^2 N_h} \cdot Sa(T) \quad \text{Ecuación 94}$$

En donde β_1 es la relación entre el máximo desplazamiento lateral en el nivel superior de la estructura y el desplazamiento espectral, considerando un modelo de comportamiento elástico lineal. Este factor depende del tipo estructural y del número de pisos de la estructura. Se calcula a partir de la solución de la ecuación diferencial que describe el comportamiento de un sistema acoplado, compuesto por una viga continua de cortante y otra de flexión, sometido a carga lateral que varía con la altura. Esta ecuación considera la forma de aplicación de la carga lateral, dada por el parámetro adimensional α , y del grado de participación de las deformaciones laterales de corte y de flexión en el sistema. Por ejemplo, en un edificio flexible construido a base de pórticos de concreto (sin muros estructurales ni arriostramiento) dominan las deformaciones laterales de corte, mientras que en una construcción con muros de concreto reforzado, las deformaciones de flexión son las predominantes. Más información sobre cómo estimar estos parámetros se encuentra en Miranda (1997), donde se presentan resultados en la estimación de desplazamientos laterales máximos utilizando este enfoque.

β_2 describe la relación entre la máxima distorsión de entrepiso y la distorsión global de la estructura, que se define como el máximo desplazamiento lateral en la azotea dividido por la altura total. β_2 depende del grado de participación de las deformaciones laterales de corte y flexión, y del tipo estructural. Tiene en cuenta el hecho que en general las deformaciones laterales durante un sismo intenso no se distribuyen uniformemente con la altura de la edificación, pero que hay una tendencia a concentrar grandes deformaciones de entrepiso en algunos niveles (ver Miranda, 1997).

β_3 expresa la relación entre el máximo desplazamiento lateral del modelo de comportamiento inelástico, y el desplazamiento máximo del modelo elástico lineal. Este factor depende de la demanda de ductilidad al desplazamiento, el periodo fundamental de vibración de la estructura y el tipo de suelo que la soporta. Se calcula con funciones que han sido calibradas con estudios estadísticos de relaciones entre el máximo desplazamiento lateral de osciladores de un grado de libertad con comportamiento inelástico, y sus contrapartes en comportamiento elástico. Dichas calibraciones han sido realizadas para osciladores sometidos a cientos de acelerogramas registrados en diferentes tipos de suelo. Para estructuras sobre

suelos blandos, β_3 no sólo depende del periodo fundamental de vibración de la estructura sino de la relación entre este y el periodo dominante del suelo. Para más información sobre este parámetro véase Miranda (1991), Miranda (1993) y Miranda (1997). La demanda de ductilidad global de la estructura se estima con la aceleración espectral asociada al periodo de vibración de la estructura, la resistencia ante cargas laterales de la misma, y el factor de reducción de las cargas aplicadas. La resistencia lateral de la estructura depende de su ubicación y la edad, lo que hace posible clasificar las estructuras en términos de normativas y códigos de construcción vigentes en el momento de ser construidas.

β_4 es la relación entre los factores β_2 elástico e inelástico. Este factor tiene en cuenta que la distribución de la carga lateral con la altura es diferente en el modelo elástico y en el inelástico. En el caso de comportamiento inelástico se produce una gran concentración de fuerza. Este factor depende del número de pisos y del nivel de deformación inelástica de la estructura, que se mide en términos de la demanda de ductilidad al desplazamiento. Para más información al respecto véase Miranda (1997).

η y ρ son factores para estimar el periodo fundamental de la estructura a partir del número de pisos, N :

$$T = \eta N^\rho \quad \text{Ecuación 95}$$

Estos factores dependen de la ubicación de la estructura, el tipo estructural, el tipo de suelo y el año de construcción. Tienen en cuenta el hecho de que la rigidez lateral de las estructuras localizadas en zonas de alta sismicidad es mayor que el de estructuras ubicadas en zonas de baja sismicidad. También consideran que las estructuras construidas sobre suelos blandos son más flexibles que las construidas en suelos firmes debido a la flexibilidad de la cimentación. Estos parámetros han sido calibrados con modelos analíticos, resultados experimentales y diferentes consideraciones siguiendo los requerimientos que se presentan en las normas de diseño y construcción.

h es la altura de cada piso de la estructura, que depende del tipo estructural, la ubicación geográfica y la fecha de construcción.

$Sa(T)$ es la aceleración espectral, que depende del periodo fundamental de vibración, el amortiguamiento de la estructura y la amenaza sísmica en el sitio.

Para determinar todos los parámetros necesarios para aplicar la Ecuación 93 se utiliza la curva de capacidad de la estructura. La curva de capacidad (conocida también como curva de *pushover*) representa una aproximación suficiente de su comportamiento esperado tanto en el rango elástico como en el inelástico ante cargas sísmicas horizontales. Los métodos para calcular estas curvas se presentan en ATC-13 (1985, 2002). El análisis considera las variaciones en la rigidez, en el periodo estructural y en el amortiguamiento para niveles progresivos de deformación de entrepiso.

La Figura 143 ilustra la representación típica de una curva de capacidad de una edificación cualquiera. Esta se expresa normalmente en términos del cortante basal y el desplazamiento correspondiente a nivel de cubierta.

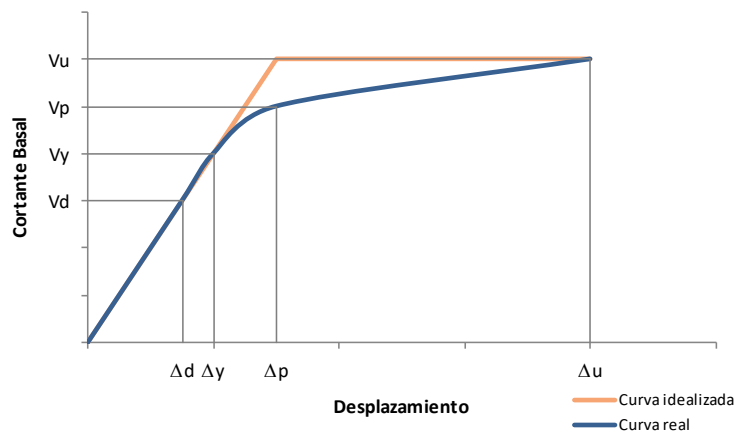


Figura 143. Ilustración de la curva de capacidad, real e idealizada, de un sistema estructural

9.2.2 Vulnerabilidad de edificaciones ante inundaciones

En este trabajo la vulnerabilidad de las edificaciones se basa en la definición de arquetipos. Los arquetipos son modelos conceptuales de la edificación, en los cuales es posible representar las características y condiciones de los diferentes elementos que componen el edificio, tanto desde el punto de vista estructural y de elementos constructivos, hasta los contenidos. Con esta representación es posible combinar funciones de pérdida específicas de los componentes de la edificación para obtener una función de vulnerabilidad total.

En términos generales, puede afirmarse que la pérdida total derivada de la afectación de una inundación sobre un elemento expuesto corresponde a la suma de las pérdidas individuales de todos los componentes de dicho elemento. La Figura 144 presenta de manera esquemática el tipo de contenidos en edificaciones de, por ejemplo, salud.



Figura 144. Ilustración del tipo de contenidos en una edificación del sector salud

Se definirán diferentes arquetipos, tratando de cubrir los diferentes tipos de edificaciones según su sector de uso y sus características en términos de estructura y construcción típica. Un arquetipo cualquiera se define por medio de su colección de componentes. Cada componente tiene una condición en el arquetipo, definida por su posición (piso), cimentación local, hermetismo al agua, protección (provista por otros componentes) y tipo (térmico, mecánico, eléctrico, electromecánico o constructivo). Cada componente tiene también un valor económico, el cual aporta al valor total de reposición del edificio. Adicionalmente, cada componente se caracteriza por una función de daño, la cual relaciona la profundidad de inundación en la ubicación relativa del componente, con los momentos de probabilidad de la pérdida del mismo.

La función de vulnerabilidad resultante se obtiene de la combinación ponderada de todas las funciones de daño individuales, desplazadas según su posición vertical en el arquetipo, y ponderadas de acuerdo con el valor individual de cada componente. La Figura 145 ilustra la conformación de una función de vulnerabilidad basada en arquetipos.

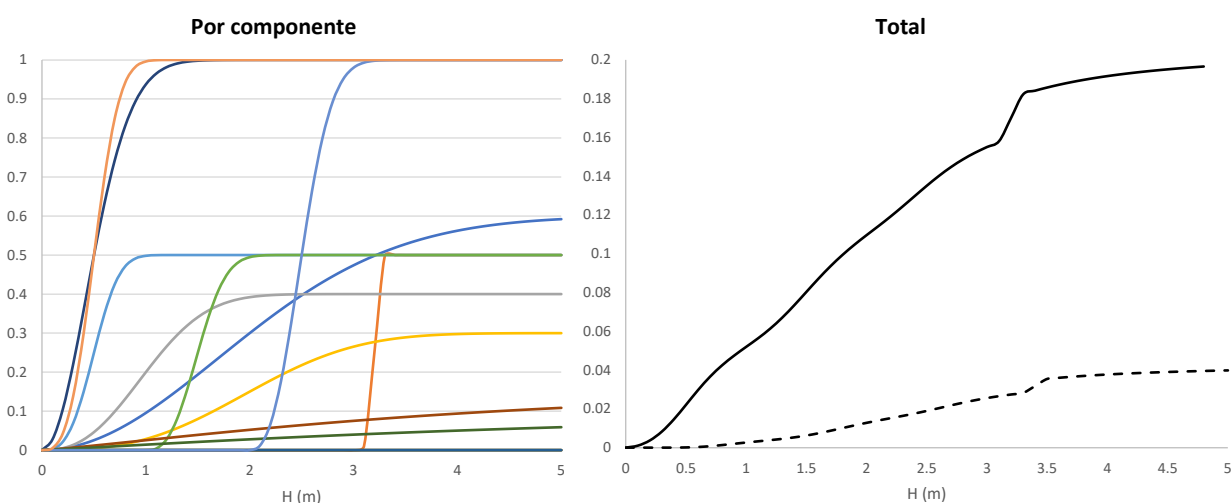


Figura 145. Ilustración de una función de vulnerabilidad de un arquetipo

9.3 Vulnerabilidad de elementos de infraestructura

Para el caso de elementos de infraestructura, se plantea también el uso de un enfoque basado en arquetipos, para todas las amenazas y todo tipo de componentes. Los arquetipos de componentes de infraestructura son representaciones simplificadas de los diversos subcomponentes que componen un activo de infraestructura, que incluye edificaciones, estructuras, maquinaria, equipos eléctricos o electrónicos, entre otros. Estos subcomponentes contribuyen de manera colectiva al funcionamiento del activo de infraestructura, cada uno exhibiendo características y respuestas únicas a las amenazas en función de su posición en el arquetipo. Por lo tanto, cada subcomponente posee funciones de vulnerabilidad distintas que contribuyen a la función de vulnerabilidad del arquetipo en su conjunto. La evaluación del estado de un componente implica la definición de diversas características, como elevación, tipo de cimentación, resistencia al agua, protección por otros componentes y tipo de componente. Aunque esta lista de características no es exhaustiva, se considera suficiente para caracterizar la condición de cualquier componente dentro del arquetipo. Además, todos los elementos dentro del arquetipo tienen diferentes niveles de importancia en su funcionamiento. Aunque la asignación de importancia en función del costo podría generar debate, este criterio se adopta como indicador para evaluar la importancia de cada componente en la mayoría de los arquetipos. Las funciones de vulnerabilidad individuales se agregan para la misma amenaza, lo que resulta en una

función general para el arquetipo, con participaciones de valor que actúan como ponderaciones. A modo de ilustración, la Figura 4 presenta funciones de vulnerabilidad correspondientes a tres arquetipos de centrales de generación de energía térmica, evaluados frente a diversas amenazas.

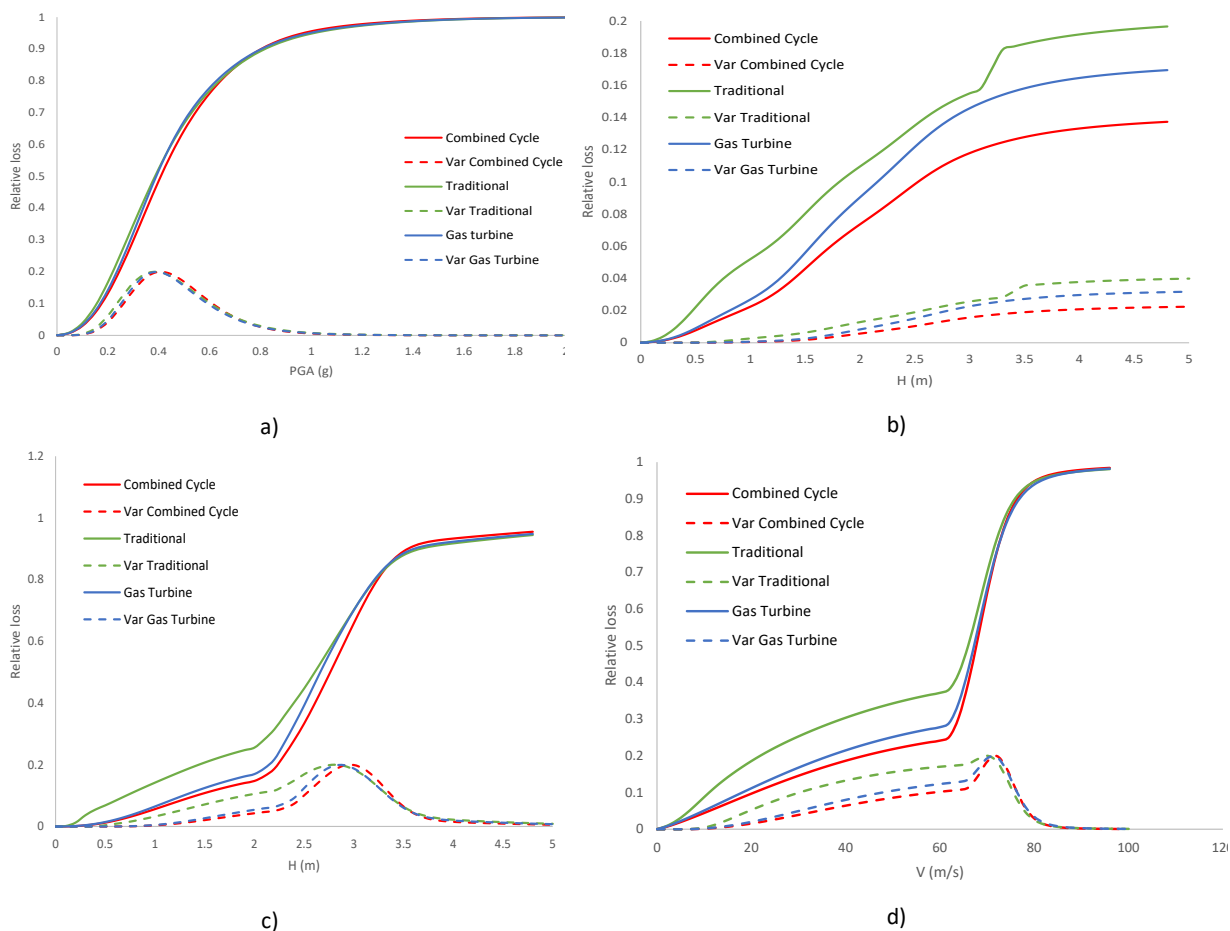


Figura 146. Funciones de vulnerabilidad para tres arquetipos de plantas de generación térmica de energía ante a) terremoto, b) inundación, c) tsunami y d) vientos fuertes.

9.4 Vulnerabilidad de cultivos a extremos meteorológicos

Se emplea en este trabajo el enfoque de simulación propuesto por Bernal et al., (2017). La modelación del rendimiento se realiza siguiendo el marco conceptual dado por la FAO. La pérdida ante un peligro hidrometeorológico simulado se define en términos de la pérdida de rendimiento que sufre el cultivo. Dado que se aplica un modelo agronómico de respuesta de cultivos, no se emplearán curvas o funciones de vulnerabilidad.

El modelo de respuesta de cultivos tiene cuatro componentes principales: el clima (en términos de temperatura, precipitación, demanda por evaporación y concentración de dióxido de carbono), los cultivos (procesos de desarrollo, crecimiento y rendimiento), el suelo (balance de agua y sal) y el manejo y administración (prácticas agrícolas) (Steduto et al., 2012).

La temperatura influye en el desarrollo de los cultivos y la precipitación es determinante para el balance hídrico del suelo en la zona radicular. Por lo tanto, las principales variables climáticas para el modelo son las temperaturas máximas y mínimas diarias del aire, las precipitaciones diarias totales y la demanda evaporativa de la atmósfera, expresadas como evapotranspiración. La temperatura sigue un procedimiento muy similar a la precipitación. La evapotranspiración, por su parte, se calcula siguiendo el método propuesto por Penman-Monteith (ver Anexo 1). Adicionalmente, la concentración de dióxido de carbono (CO_2) se incluye en la evaluación, ya que es un aspecto que afecta la expansión del cultivo y la conductancia estomática. Los valores por defecto de las concentraciones anuales de CO_2 se miden en el Observatorio Mauna Loa, en Hawái²⁰.

Los cultivos se modelan en términos de los procesos biológicos, físicos y químicos que determinan su rendimiento. El modelo permite evaluar cómo los cultivos crecen y se desarrollan a lo largo de su ciclo de crecimiento específico, creciendo el follaje, profundizando sus raíces y acumulando biomasa. Todas las etapas fenológicas (o etapas de crecimiento) se consideran en el modelo: vegetativo, floración, formación de rendimiento y maduración, incluyendo etapas fenológicas distintas para cultivos herbáceos o forrajeros.

La fenología se refiere a las etapas de desarrollo de los cultivos y su duración, que se puede definir en días de grado de crecimiento (GDD – *Growing Degree Days*) o días calendario. La cobertura vegetal (CC – *Canopy Cover*) es la representación de la cantidad de follaje, la cual se considera proporcional a la cantidad de agua transpirada y la cantidad de biomasa producida. El subcomponente de profundidad de enraizamiento modela el proceso en el cual las raíces se profundizan a una tasa relativa constante mientras que la planta está creciendo hasta la fase de formación de rendimiento. El modelo puede incluir los efectos de capas de suelo o nivel freático superficial que restringen de crecimiento de las raíces.

En la Figura 147 se muestran las curvas de la cobertura vegetal y profundidad de la raíz, como función del tiempo. La curva en la parte superior representa el desarrollo de la cobertura vegetal a partir de la expansión (CGC: coeficiente de crecimiento vegetal – *Canopy Growth Coefficient*) y la disminución (CDC: coeficiente de disminución vegetal – *Canopy Decline Coefficient*). La cobertura vegetal se expresa como una fracción de suelo sombreado por las hojas o partes aéreas de las plantas, siendo su nivel máximo (CC_x) específico del cultivo. La segunda curva representa la profundidad de enraizamiento efectiva, desde su valor mínimo (Z_n) en el momento de la siembra hasta su valor máximo (Z_x) en la fecha que se alcanza la madurez del cultivo. Este conjunto de curvas representa el desarrollo del cultivo y su interacción con los sistemas de suelo y aire.

²⁰ www.esrl.noaa.gov/gmd/obop/mlo/

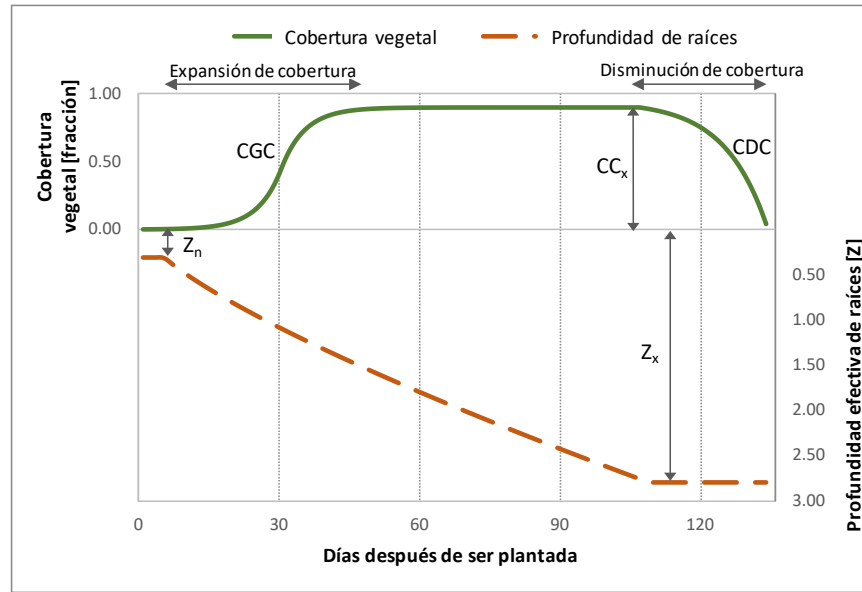


Figura 147. Ilustración del desarrollo en el tiempo de la cobertura vegetal y la profundidad de enraizamiento. Adaptado de Steduto et al., 2012.

El modelo permite calcular la transpiración de los cultivos separadamente de la evaporación del suelo. El subcomponente de transpiración de cultivos determina el uso de agua de la planta cuando no hay estrés que limite la apertura estomática. La evaporación del suelo considera la pérdida de agua de la superficie del suelo húmedo no sombreado por la vegetación. La producción de biomasa se define como:

$$B = WP * \sum Tr \quad \text{Ecuación 96}$$

en donde B es la biomasa producida acumulada, Tr es la transpiración del cultivo sumada durante el período de producción de la biomasa y WP es el parámetro de productividad del agua medido como la cantidad de biomasa seca (kilogramos) por unidad de área (m^2) y de agua transpirada (mm). La robustez del modelo depende de la naturaleza conservadora del WP que permanece constante en un rango de ambientes, cuando se normaliza para demandas evaporativas.

Finalmente, se utiliza un índice de cosecha HI para estimar el rendimiento Y de la biomasa producida B . Al hacer esta distinción entre la biomasa y el rendimiento, se pueden evaluar por separado los efectos de los fenómenos climáticos sobre la producción de biomasa y la cosecha.

$$Y = HI * B \quad \text{Ecuación 97}$$

La Figura 148 muestra la función del cambio del índice de cosecha HI en el tiempo para cultivos de frutas o granos, para el período de formación del rendimiento (fase de floración hasta la madurez fisiológica). HI comienza a partir de cero, en un crecimiento lento pero acelerado seguido por una tasa de aumento constante hasta que se alcanza el rango superior HI_0 . Este nivel superior es el índice de cosecha de los cultivos en condiciones óptimas, es específico del tipo de cultivo y usualmente se dispone de datos para su determinación.

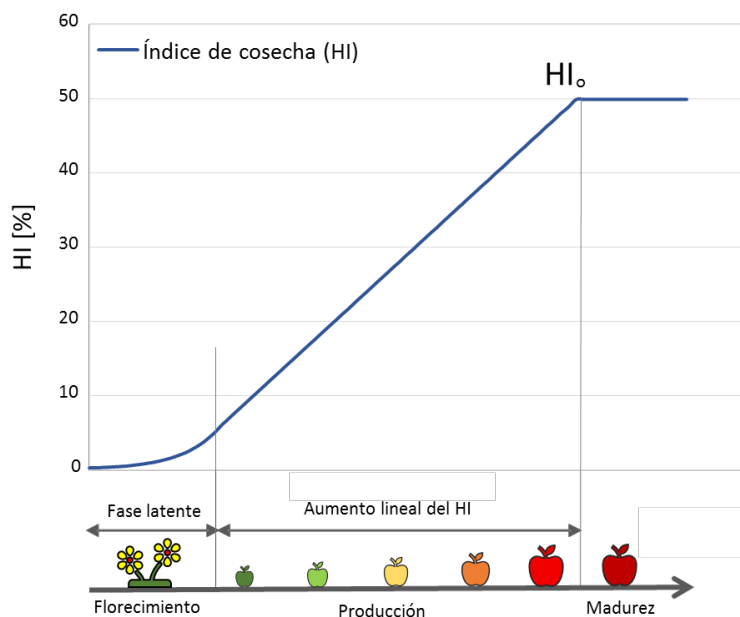


Figura 148. Ilustración del cambio en el tiempo del índice de cosecha (HI) para cultivos de frutas o granos. Adaptado de Steduto et al., 2012

El suelo, por su parte, se modela como un perfil en profundidad y las características del nivel freático dentro del sistema radicular de la planta, expresando la región radicular como un volumen de control en donde se estima el balance de agua. El suelo puede ser subdividido en capas de profundidad variable, cada una con diferentes características físicas como el contenido de agua en el suelo saturado, el límite superior de agua contenida o capacidad de campo (FC – *Field Capacity*), el punto de marchitamiento permanente (PWP – *Permanent Wilting Point*) o límite inferior del nivel de agua, y la conductividad hidráulica del suelo saturado (K_{sat}). Estos valores son los insumos para determinar la evaporación del suelo, el drenaje interno, la percolación profunda, el escurrimiento superficial y la capilaridad.

La Figura 149 muestra una representación simplificada del modelo del sistema radicular, donde D_r representa el agotamiento de la raíz y W_r es la profundidad equivalente del agua. El agua disponible total (TAW – *Total Available Water*) es la cantidad de agua retenida en la zona de raíces entre la capacidad de campo (límite superior) y el punto de marchitamiento permanente (límite inferior).

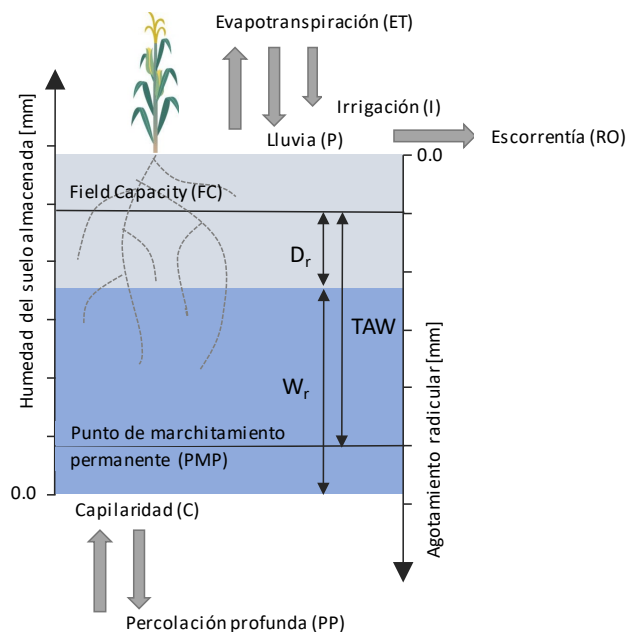


Figura 149. Ilustración del volumen de control de la zona radicular. Adaptado de Steduto et al., 2012

El balance hídrico dentro de la zona radicular se calcula día a día, y para cualquier momento del desarrollo del cultivo. Los caudales de agua entrantes considerados en el modelo son provistos por las lluvias, el riego (en caso de existir) y la capilaridad. Por otro lado, los flujos de agua salientes considerados en el modelo son el escurrimiento, la evapotranspiración y la percolación profunda.

Adicionalmente a los componentes que dominan el desarrollo de los cultivos, se incluye en este caso la definición de coeficientes de estrés (K_s), los cuales son funciones matemáticas que modifican ciertos parámetros asociados al efecto nocivo causado por fenómenos climáticos. Como se observa en la Figura 150 los valores de K_s varían entre 0 (estrés total) y 1 (sin estrés), siguiendo una función lineal o convexa.

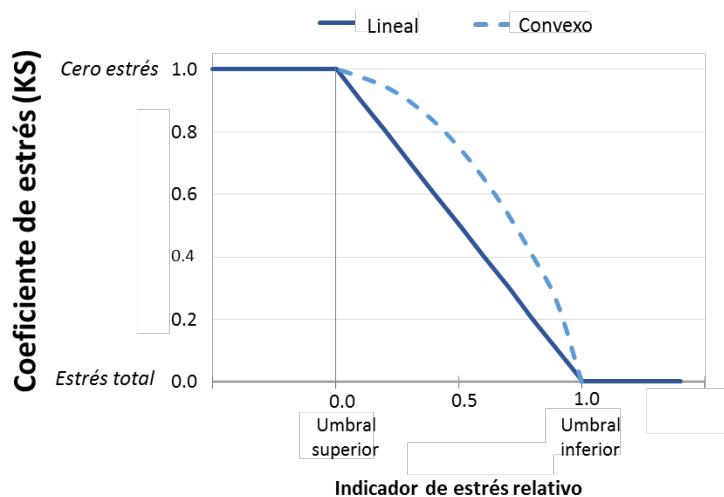


Figura 150. Función del coeficiente de estrés. Adaptado de Steduto et al., 2012

El modelo permite calcular los efectos de fenómenos climáticos en el crecimiento de la cobertura vegetal, la conductancia estomática, la senescencia temprana, la profundización de la raíz y el índice de cosecha. La Figura 151 muestra estos cinco procesos (líneas punteadas), dentro del esquema general de desarrollo de rendimiento en cultivos. Un resumen general del proceso de cálculo se presenta a continuación. Nótese que todos los pasos del proceso se calculan en intervalos de tiempo diarios.

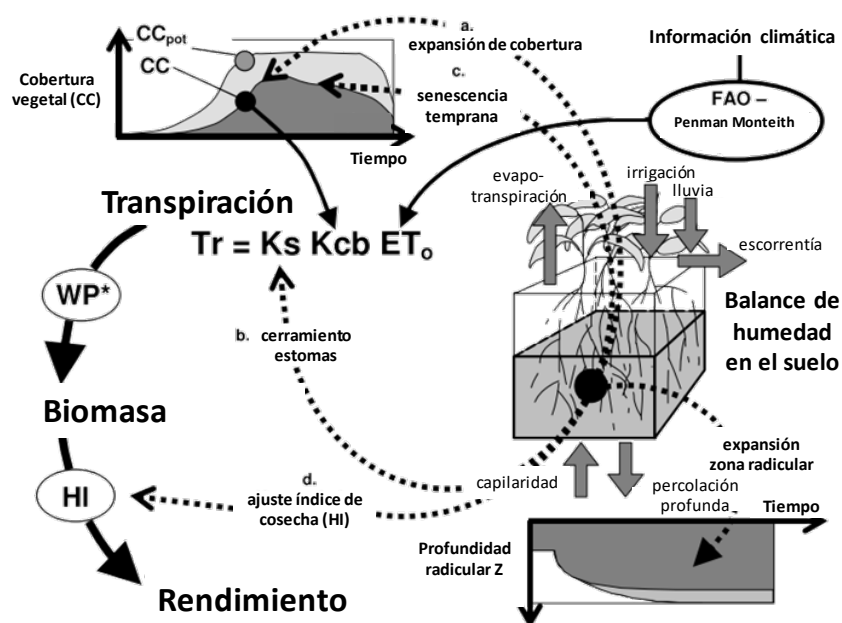


Figura 151. Representación esquemática del modelo de respuesta del cultivo. Adaptado de Raes et al., 2011

1. *Balance del agua en el suelo:* determina la cantidad de agua almacenada en la zona radicular, contabilizando los flujos de agua entrante y saliente.
2. *Expansión de la cobertura vegetal:* Se simula la expansión de la cobertura verde, mediante la reducción del coeficiente de crecimiento vegetal por el coeficiente de estrés para la expansión de cobertura $K_{s,exp,w}$ y modificando el coeficiente de disminución de cobertura por coeficiente de estrés hídrico de senescencia temprana $K_{s,sen}$.
3. *Transpiración:* se calcula el potencial de evaporación de la atmósfera considerando un coeficiente de cultivo K_{cb} y el coeficiente de estrés hídrico K_s , como se muestra en la Ecuación 98.

$$Tr = K_s(K_{cb}CC^*)ET_0$$

Ecuación 98

El coeficiente de transpiración del cultivo K_{cb} es un parámetro que debe ser ajustado continuamente en función de la cobertura vegetal simulada, con el fin de considerar los efectos de envejecimiento y senescencia. El coeficiente de estrés K_s utilizado es un coeficiente de estrés por taponamiento estomático $K_{s,sto}$, también con valores entre 1 (sin estrés) y 0 (total estrés).

4. *Biomasa arriba de la superficie:* La relación entre la biomasa producida y el agua consumida por un cultivo específico se conoce es la productividad del agua (WP), la cual tiende a ser lineal, como

se muestra en la Ecuación 99. Para incluir condiciones alteradas, se emplea la productividad del agua normalizada WP^* en la simulación del desarrollo de biomasa sobre el suelo. La normalización se realiza para la concentración atmosférica de CO_2 y la demanda evaporativa de la atmósfera (Dirk Raes et al., 2011).

La producción de biomasa arriba de la superficie se calcula, para un paso de tiempo diario, de la siguiente manera:

$$B = WP^* \sum_i \frac{Tr_i}{ET_{O_i}} \quad \text{Ecuación 99}$$

en donde la productividad del agua normalizada WP^* se multiplica por la relación entre la transpiración del cultivo y la evapotranspiración de referencia del día de cálculo $\frac{Tr_i}{ET_{O_i}}$ (expresión que se agrega durante todo el periodo de desarrollo del cultivo).

5. *Rendimiento*: Como se mencionó anteriormente, el rendimiento se calcula de multiplicar la biomasa sobre el suelo por un índice de cosecha, que depende del tipo de cultivo. Para considerar el estrés hídrico, debe ajustarse el índice de cosecha de su valor de referencia HI_o en condiciones óptimas, a su valor en condiciones reales, mediante la inclusión del coeficiente de estrés:

$$Y = K_s * HI_o * B \quad \text{Ecuación 100}$$

La pérdida en producción se calcula como la diferencia entre el rendimiento calculado, y el rendimiento esperado en condiciones óptimas, multiplicada por el área productiva y el costo al productor del producto agrícola.

$$P = (Y_{op} - Y) \cdot A \cdot C \quad \text{Ecuación 101}$$

9.5 Vulnerabilidad de los cultivos al anegamiento

La metodología para estimar la respuesta de cultivos a condiciones de exceso de agua (inundación, anegamiento, suelo saturado) considera las características fenológicas de las plantas que determinan su respuesta biológica a la falta de oxígeno en el suelo derivado de la saturación del suelo. Generalmente, los eventos de exceso de humedad en el suelo tienen un impacto directo en los procesos químicos y biológicos que ocurren tanto en la planta como en el suelo, con impactos a corto y largo plazo en el desarrollo de la planta. El primer efecto es la disminución de oxígeno en el suelo, por lo que las raíces no están en capacidad de obtener el oxígeno necesario para procesos de división celular, crecimiento y transporte de nutrientes. Esta condición se vuelve crítica al incrementarse la temperatura del aire, haciendo que la falta de oxígeno se acentúe en altas temperaturas en suelo anegados.

La susceptibilidad de los cultivos determina su respuesta biológica a la falta de oxígeno, por lo que cultivos resistentes a inundaciones tienen una tasa de pérdida de rendimiento menor que cultivos que pierden su capacidad de recuperación luego de un periodo largo en condiciones de suelo saturado. En otras palabras, la susceptibilidad de los cultivos define su rendimiento ante una situación de exceso hídrico en el suelo.

La modelación de la vulnerabilidad se realiza haciendo uso de curvas de vulnerabilidad, que relacionan la pérdida en el rendimiento con la altura de agua acumulada en la superficie. Estas curvas se obtienen en base al modelo de respuesta de cultivos al agua, presentado en la sección 9.4. La vulnerabilidad se define en términos de la pérdida de rendimiento que sufre el cultivo durante un período prolongado en el que el suelo está saturado y se presenta acumulación de agua en la superficie.

9.5.1 Respuesta de los cultivos a suelos saturados

Las condiciones de estrés por exceso de agua son representadas por un coeficiente de estrés (K_{saer}) y un umbral para los indicadores de estrés. K_{saer} es un modificador que cuantifica la intensidad del efecto que produce el estrés por falta de oxígeno en los procesos de crecimiento específicos para un cultivo. Como se observa en la Figura 152, los valores de K_{saer} varían entre 0 (estrés total) y 1 (sin estrés), siguiendo una función lineal. Los umbrales para el estrés hídrico están relacionados con el volumen de aire con respecto al volumen total de poros en el suelo. Es así como el coeficiente de estrés es cero cuando el suelo está aireado mientras que el estrés es máximo (y su valor igual a uno) cuando el suelo está saturado como producto de la inundación y no hay oxígeno disponible para la planta.

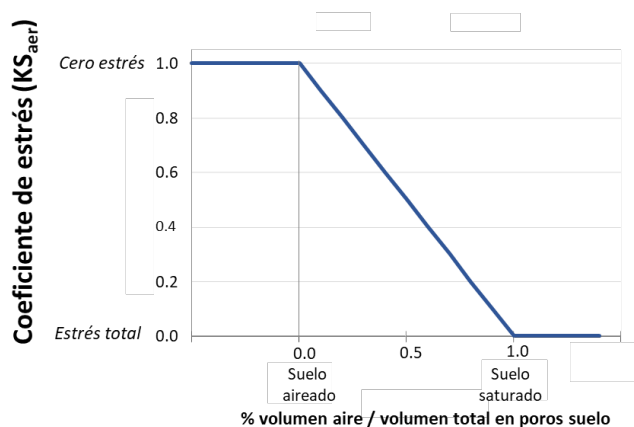


Figura 152. Función del coeficiente de estrés por falta de oxígeno (K_{saer}) (A partir de Steduto et al., 2012)

El coeficiente K_{saer} altera el valor de transpiración calculada para el suelo, lo que también altera el cálculo de la evapotranspiración total y la producción de biomasa.

$$Tr = K_{saer}(K_{cb}CC^*)ET_o \quad \text{Ecuación 102}$$

La susceptibilidad del cultivo se especifica al establecer el valor del umbral superior que indica, para cada tipo de cultivo, cuál es el volumen de agua en poros del suelo considerado saludable y no restrictivo para su crecimiento. También se debe establecer el número de días que debe permanecer el suelo saturado para considerar que la deficiencia de aireación es perjudicial para la planta.

9.6 Vulnerabilidad de sistemas productivos ganaderos

La modelación de la vulnerabilidad del sector pecuario se basa en la evaluación de las características fisiológicas de los animales que determinan su respuesta biológica al consumo de alimento. La

disponibilidad de alimento se obtiene a partir de la respuesta de pasturas naturales (u otro cultivo de forraje consumido directamente y producido en el lugar de pastoreo) a la disponibilidad de agua, que puede reducirse en condiciones de déficit hídrico. La ocurrencia de heladas u otros fenómenos meteorológicos modifica el volumen de materia seca que se ofrece el animal. Por otro lado, la demanda de alimento depende del tipo de animal, su edad, peso, estado fisiológico y condiciones ambientales (temperatura y lluvia). Entonces, la susceptibilidad de los animales relaciona la demanda y oferta de alimento, y las pérdidas se determinan a partir de la relación entre el volumen de alimento que dejan de consumir los animales y el alimento que deberían consumir para alcanzar el peso óptimo.

La vulnerabilidad se define en términos de la disminución de alimento consumido por los animales durante, por disminuciones en el rendimiento de producción de materia seca de pastura natural. Dado que se aplica un modelo fisiológico de reducción de ingesta de alimentos, no se emplearán curvas o funciones de vulnerabilidad. La metodología propuesta por este grupo consultor es la única actualmente que utiliza un modelo de esta complejidad en la evaluación probabilista del riesgo en el sector pecuario.

9.6.1 Rendimiento de pasturas naturales

Siguiendo el modelo de respuesta de cultivos a la disponibilidad de agua propuesto por la FAO y presentado en la sección 9.4, se estima el rendimiento de pasturas naturales en condiciones de estrés por temperatura. La Figura 153 muestra el esquema de cálculo de la oferta de masa seca utilizable obtenido a partir de la producción de biomasa de la pastura natural. El procedimiento inicia con la definición de las condiciones de clima (en series diarias de precipitación y temperatura) que definen eventos de helada. También se define el tipo de suelo y tipo de pasto que depende de la localización dentro del país. Para ajustar los resultados a las condiciones locales de clima y producción de pastura como alimento para animales, se debe incluir también un valor de referencia de rendimiento del pasto, siendo ideal que este rendimiento está desagregado por meses o estaciones del año, según la información disponible lo permita.

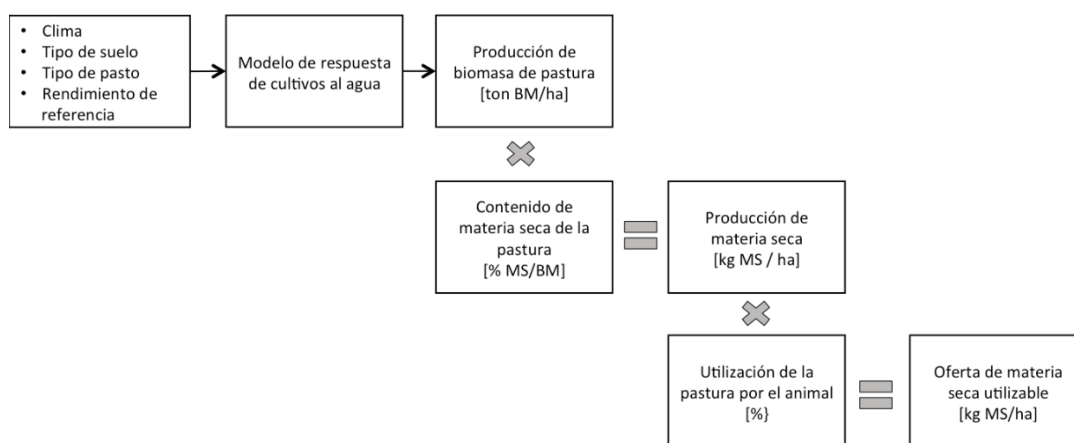


Figura 153. Esquema para el cálculo de la oferta de masa seca utilizable a partir de biomasa de pastura

Con la información de clima, tipo de pasto y tipo de suelo se puede estimar la respuesta del pasto a la disponibilidad de agua durante un evento peligro. El resultado principal es la cantidad de biomasa que se produce durante el año en el que ocurre el evento simulado.

Luego, entendiendo que en la materia seca del alimento se concentran sus nutrientes, es necesario conocer el porcentaje de masa seca de la pastura para saber cuál es la proporción total del alimento que es aprovechable por el animal. Finalmente, al considerar que no todo el alimento que tiene disponible un animal es consumido, se define un porcentaje de utilización de la pastura. La utilización es la proporción del alimento ofrecido que efectivamente es consumido. Los factores que afectan el porcentaje de utilización de una pastura incluyen la accesibilidad, el método de pastoreo, la estación del año y la pérdida de forraje (por pisoteo, muerte de hojas, deyecciones entre otros). En conclusión, los factores de contenido de biomasa en el pasto y su utilización definen la cantidad de materia seca utilizable que contiene los nutrientes para alimentar los animales. Esta materia seca es la oferta de alimento que tendrá el grupo de animales que se alimenta en cierta área definida según la escala de análisis.

9.6.2 Consumo de pasto como alimento principal de los animales

La actividad pecuaria busca producir animales sanos que deriven en el aprovechamiento de su carne, piel o leche. La producción pecuaria entonces busca alimentar a los animales de forma que alcance su peso estándar de referencia, según su especie y estado fisiológico, para el momento del beneficio o venta del animal. La producción de ganado por pastoreo está limitada al consumo voluntario de pasturas, razón por la que se debe estimar este consumo voluntario para establecer la cantidad de pastura que se debe ofrecer a los animales. El modelo de vulnerabilidad del sector pecuario de este estudio calcula el consumo real del animal en dos componentes principales: el consumo potencial que depende del animal y el consumo relativo que ofrece la pastura.

El consumo potencial de la pastura depende de las características del animal (peso y estado fisiológico), y se define como la cantidad de alimento que puede consumir en condiciones de abundancia y alta calidad. El consumo aumenta a medida que aumenta el peso del animal y si su requerimiento de energía es mayor. Por otro lado, el consumo de alimento puede disminuir en condiciones de estrés térmico o durante una enfermedad. El consumo potencial puede modelarse mediante la siguiente ecuación.

$$I = j \cdot A \cdot Z(1.7 - Z) \cdot CF \cdot m \cdot p \cdot t \quad \text{Ecuación 103}$$

En donde j es un factor que depende de la especie del animal (por ejemplo, 0.025 para bovinos), A es el peso óptimo de referencia del animal (kg), Z es el tamaño relativo del animal y CF es un factor de condición del animal al momento de hacer el análisis. Los factores m, p, t hacen referencia a correcciones del consumo potencial por lactancia, destete y estrés térmico, respectivamente. A continuación, se describen en detalle los factores que determinan el consumo potencial de pasturas.

El límite máximo de consumo de pasturas está definido por la demanda de energía del animal y su capacidad física para alimentarse, que en términos relativos depende de su tamaño. Se emplea un modelo potencial para establecer una curva de crecimiento del animal.

$$N = A - (A - B)^{-kTA^{-0.27}} \quad \text{Ecuación 104}$$

En donde N es el valor límite del peso normal (kg), A es el peso óptimo de referencia (kg), B es el peso del animal al nacer (kg), T es la edad del animal en meses y k es un factor que depende de la especie. A partir del peso normal se puede establecer el tamaño relativo del animal Z (fracción de 1) como la relación entre

N y A . La condición del animal RC hace referencia la relación entre el peso actual del animal W con respecto al peso normal del animal en esa edad ($RC = W/N$). Valores de $RC > 1$ indican que el animal supera el peso definido por la curva de crecimiento. En ese caso, se debe ajustar el consumo potencial de alimento con el factor CF como se muestra en la siguiente ecuación. Si $RC < 1$, entonces $CF = 1$.

$$CF = RC(1.5 - RC)/0.5 \quad \text{Ecuación 105}$$

Es sabido que los animales, durante la lactancia, incrementan su consumo voluntario, para compensar el gasto de energía de producir leche. El aumento del consumo depende del tiempo desde el parto y el número de hijos, y se calcula a partir del factor m .

$$m = 1 + aM^b \exp(b(1 - M))L \cdot D \quad \text{Ecuación 106}$$

En donde $M = T/c$, o la relación entre el día de lactancia y el tiempo al máximo consumo potencial, L define el efecto de la condición del animal en el momento del parto y D es la relación entre la producción actual y la producción óptima de leche.

El consumo potencial de pastura de animales en sus primeras semanas de vida depende del desarrollo del rumen más que de su peso. La proporción de alimento proveniente de pastura p se define como

$$p = (1 - P_{milk}) / (1 + \exp(-a(T - X))) \quad \text{Ecuación 107}$$

Donde P_{milk} es la proporción de leche en la dieta del animal, T es el número de días desde el nacimiento, X es un tiempo de referencia que depende de la especie, así como el coeficiente a .

Durante el pastoreo, los animales pueden sufrir estrés por temperatura del aire que afecta su consumo potencial de alimento. En el caso de bajas temperaturas, se puede evidenciar un aumento de consumo hasta de 1% por cada grado Celsius por debajo de la temperatura crítica definida para cada especie. Por el otro lado, con altas temperaturas, el consumo potencial de alimento puede disminuir hasta 2% por cada grado Celsius por encima de la temperatura máxima de referencia de especies bovinas y 1% por cada grado Celsius para otras especies. El ajuste del consumo por estrés hídrico se define en el término t de la Ecuación 103.

El consumo relativo se entiende como la proporción del consumo potencial que se espera el animal consuma en condiciones restringidas, en términos de la disponibilidad y calidad del pasto. Este consumo se mide en una escala entre 0 y 1. El consumo relativo aumenta a medida que el pasto es de mayor calidad y es de fácil acceso. La estimación del consumo relativo de pasturas es compleja por la alta variabilidad de especies que se pueden encontrar en las praderas naturales y la naturaleza selectiva en el momento de tomar el alimento, ya que los animales se alimentan primero de las hojas de mejor calidad y deciden no consumir tallos, hojas muertas o pisadas. A continuación, se describen en detalle los factores que determinan el consumo relativo de pasturas.

La calidad de la pastura se relaciona con su digestibilidad, que es lo mismo que el tiempo que le toma al alimento pasar por el sistema digestivo del animal. Se estima que hay una relación positiva entre la capacidad de digestión del alimento con el consumo voluntario, que se expresa como

$$pRQ = 1 - 1.7 * (\max\{(0.8 - (1 - P_{legume})g) - D\}, 0.0) \quad \text{Ecuación 108}$$

En donde RQ es la digestibilidad relativa, P_{legume} es la proporción de leguminosas en la pastura, D es la digestibilidad de la pastura y g es un factor del tipo de pasto según su ruta de fotosíntesis (0 para pastos tipo C3 y 0.16 para pastos tipo C4).

En el caso de animales de pastoreo, cuando la disponibilidad de alimento es alta, el consumo real depende únicamente de factores relacionados al consumo voluntario y a la calidad de la pastura. Si la cantidad de alimento baja de cierto umbral (del orden de 3 ton de materia seca/ha para ganado bovino, por ejemplo), la disponibilidad de alimento disminuye y de manera progresiva, la actividad de pastoreo se vuelve más difícil y requiere mayor energía. En este estudio se relaciona la disponibilidad relativa F de la pastura con la biomasa B , considerando que el incremento en el consumo de biomasa es inverso a la disponibilidad relativa.

$$p \frac{dF}{dB} = 1 - F \quad \text{Ecuación 109}$$

$$pF = 1 - \exp(-aB) \quad \text{Ecuación 110}$$

Donde a es la tasa constante, que depende de la estructura de la pastura y del tipo de animal. El modelo de consumo de pasturas naturales requiere también incluir el efecto de la ingesta selectiva de pasturas. No se puede considerar que los animales consumen todo lo que tienen disponible, se debe incluir el efecto de selección (los animales en el momento de tomar el alimento prefieren hojas vivas sobre las hojas muertas, hojas jóvenes sobre las maduras, y hojas más que tallos, por ejemplo). Entonces es importante conocer la proporción de alimento que prefiere los animales, con respecto al total de pastura. Se define el índice de selectividad IS a partir de la disponibilidad del forraje B (kg MS/ha) y su digestibilidad D_{fd} (%).

$$IS = \max \{a \cdot \ln(D_{fd} - b) + c + d \cdot B + 1, 1\} \quad \text{Ecuación 111}$$

Donde $a = -0.249$, $b = 23.7$, $c = 0.939$, $d = 8.3 \times 10^{-5}$. Este índice es utilizado como multiplicador de la digestibilidad del forraje disponible D_{fd} para estimar la digestibilidad del forraje seleccionado D_{fs}

$$D_{fs} = IS \cdot D_{fd} \quad \text{Ecuación 112}$$

En el caso del cálculo del consumo relativo de pasturas no se considera limitaciones por el contenido de proteína o minerales en la oferta de pastos. Tampoco se considera el efecto de la disponibilidad de agua como factor que mejore la digestibilidad del alimento.

El consumo real C (kg MS) es el producto entre el consumo potencial I y el consumo relativo, que se da en función de la disponibilidad del forraje F , la calidad relativa RQ y la selectividad IS , como se muestra en la siguiente ecuación.

$$C = I * F * RQ * IS \quad \text{Ecuación 113}$$

La estimación de las pérdidas en el sector pecuario se hace en función de la diferencia entre la carga y la capacidad de sostener animales en cada unidad de tierra ganadera. La capacidad de cada unidad de tierra ganadera está dada por la relación entre la oferta de alimento, entendida como la producción de materia seca, y la demanda de alimento, entendida bajo el consumo real de materia seca considerando el consumo

potencial y relativo de cada tipo de animal. La capacidad es entonces la cantidad de unidades ganaderas que se pueden alimentar en una cierta área y se expresa en número de UG/ha.

$$Capacidad = \frac{Oferta\ de\ alimento}{Demanda\ de\ alimento} = \frac{Producción\ de\ MS}{Consumo\ real\ de\ MS\ por\ animal} \quad \text{Ecuación 114}$$

La pérdida, en términos económicos, es entonces la diferencia entre la carga actual de la unidad de tierra ganadera y la capacidad de ésta para alimentarlos, que define para cuántos animales falta el alimento en condiciones meteorológicas simuladas. Esta diferencia se multiplica por el avalúo de cada animal, según el sistema productivo que se esté considerando.

$$Pérdida = (Carga_{UTG} - Capacidad_{UTG}) * Avalúo_{SP} \quad \text{Ecuación 115}$$

10 BIBLIOGRAFÍA

- Akaike, H. (1974). A new look at the statistical model identification. *IEEE Transactions on Automatic Control*, AC-19, 716–723
- Adrián, J. & Chacón, E. (2019). Adaptación al cambio climático y gestión del riesgo de desastres en Costa Rica. San José, Costa Rica: UNA.
- Aguilar, I., & Alvarado, G. E. (2014). Pérdidas humanas y económicas causadas por el vulcanismo en Costa Rica entre 1953 y 2005. *Revista Geológica de América Central*, 51, 93-128.
- Alfaro, E. J. (2007). Ciclos secos y lluviosos en Centroamérica y sus relaciones con el Atlántico y el Pacífico Tropical. *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos*, 10(2), 76-84.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop requirements. *Irrigation and Drainage Paper No. 56*, FAO, (56), 300. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2010.12.001>
- Alonso-Henar, J., Montero, W., Martínez-Díaz, J. J., Álvarez-Gómez, J. A., & Zúñiga, F. R. (2013). The Aguacaliente fault, source of the Cartago 1910 destructive earthquake (Costa Rica). *Terra Nova*, 25(1), 60-67.
- Alvarado Induni, G., Muller, C., Pacheco, J., Angarita, M., Sánchez, B., & Avaró, G. (2020). El deslizamiento de las Torres del Irazú del 2020 (Costa Rica): antecedentes, colapso y situación actual. Technical Report.
- Alvarado Rojas, M., Durán Vargas, D., Fallas Corrales, K., Hernández Araya, L. D., & Valverde Sánchez, R. (2006). Amenazas y vulnerabilidad: El caso de los ríos Reventado y Toyogres, Cartago. *Reflexiones*, 85(1-2), 331-349.
- Alvarado, G. E. (2005). *Costa Rica: Land of Volcanoes*. San José, Costa Rica: Editorial Universidad de Costa Rica.
- Alvarado, G. E. (2011). *Los volcanes de Costa Rica*. 3ª ed. San José, Costa Rica: EUNED.
- Alvarado, G. E. (2021). Clasificación de la amenaza volcánica en Costa Rica. En CNE (Ed.), *Amenaza volcánica en Costa Rica* (pp. 10-29). San José, Costa Rica: CNE.
- Alvarado, G. E., & Patiño, L. F. (2017). The history of volcanology in Costa Rica: From the Amerindian legends to the beginning of the twenty-first century. En: *Geological Society, London, Special Publications*, 442(1), 139-163.
- Alvarado, G. E., & Schröder, W. (2011). Mapa geológico de Costa Rica y principales amenazas geológicas. Escala 1:400,000. San José: ICE.
- Alvarado, G. E., Benito, B., Staller, A., Climent, Á., Camacho, E., Rojas, W., Marroquín, G., Molina, E., Talavera, J. E., Martínez-Cuevas, S., et al. (2017). The new Central American seismic hazard zonation: Mutual consensus based on up-to-date seismotectonic framework. *Tectonophysics*, 721, 462–476. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2017.10.013>

- Alvarado, G. E., Brenes-André, J., Núñez, D., Borbon, J., Ramírez, M. A., Alpízar, Y., Núñez, S., Sibaja, J. P., & Esquivel, L. (2023). Actualización del análisis del peligro volcánico del Arenal, Costa Rica. Instituto Costarricense de Electricidad (ICE).
- Alvarado, G. E., Brenes-André, J., Venegas, L., Alpízar, Y., Núñez, S., Sánchez, M., Abarca, K., Abarca, J., Báez, W. A., Sibaja, J. P., Esquivel, L., & Arcia, T. (2022). Análisis del peligro volcánico del Rincón de la Vieja, Costa Rica. Instituto Costarricense de Electricidad (ICE).
- Alvarado, G. E., Campos-Durán, D., Brenes-André, J., Alpízar, Y., Núñez, S., Esquivel, L., Sibaja, J. P., & Fallas, B. (2021). Peligros volcánicos del Irazú, Costa Rica. Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias (CNE), Unidad de Investigación y Análisis del Riesgo.
- Alvarado, G. E., Esquivel, L., Sánchez, B. E., & Alfaro, J. C. (2020). Actualización del peligro volcánico del Poás, Costa Rica. Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias (CNE), Unidad de Investigación y Análisis del Riesgo.
- Alvarado, G. E., Esquivel, L., Sánchez, B. E., & Alfaro, J. C. (2020). Peligro volcánico del Turrialba, Costa Rica. Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias (CNE), Unidad de Investigación y Análisis del Riesgo.
- Alvarado, G., Vega, A., Campos, N., & Chaves, I. (2014). El riesgo derivado de la amenaza volcánica en Costa Rica. San José, Costa Rica: CNE.
- Andersen, E. Sparre. (1957). On the collective theory of risk in case of contagion between claims. Trans. XVth Int. Congress Actuaries. Vol. 2. No. 6. 1957.
- Arroyo-Solórzano (2023). Riesgo sísmico ante terremotos potencialmente perjudiciales en la Gran Área Metropolitana de Costa Rica (GAM) (in English: Seismic risk assessment for potentially damaging earthquakes in the Metropolitan Area of Costa Rica (GAM)). Revista Geológica de América Central, 68, 2023, doi: 10.15517/rgac.2023.54878.
- Arroyo-Solórzano, M., & Linkimer, L. (2021). Spatial variability of the b-value and seismic potential in Costa Rica. Tectonophysics. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2021.228951>
- Astorga, Y. (2019). “En los últimos 5 años, Costa Rica enfrentó la sequía más severa de los últimos 75 años”. iAgua – Entrevista (2 oct 2019).
- Avard, G., Mora, M., Bakkar, H., Alvarado, G. E., & col. (2021). Volcano hazard and surveillance in Costa Rica. Volcanica, 4(S1), 141-161.
- Baker, S. (2020). Pasture recovery after bushfires. NSW DPI Pastures, Tamworth.
- Banimahd, S. A., & Khalili, D. (2013). Factors Influencing Markov Chains Predictability Characteristics, Utilizing SPI, RDI, EDI and SPEI Drought Indices in Different Climatic Zones. Water Resources Management, 27(11), 3911–3928. <https://doi.org/10.1007/s11269-013-0387-z>
- Barquero, J. (1977). El volcán Irazú y su actividad. Heredia, Costa Rica: Universidad Nacional.

- Barquero, R. (Ed.). (2005). Los principales volcanes activos de Costa Rica. San José, Costa Rica: RSN-UCR/ICE.
- Bernal, G., Cardona, O.D., Marulanda, M., Carreño, M. L. (2021). Dealing with Uncertainty using Fully Probabilistic Risk Assessment for Decision Making. Chapter 14 in: Eslamian, S., & Eslamian, F. (Eds): Handbook of Disaster Risk Reduction for Resilience. Springer.
- Birkel Dostal, C. (2006). Sequía hidrológica en Costa Rica: ¿Se han vuelto más severas y frecuentes en los últimos años? Revista Reflexiones, 85(1-2), 31-45.
- Bloemendaal, N., Haigh, I. D., de Moel, H., Muis, S., Haarsma, R., & Aerts, J. C. J. H. (2020). Generation of a global synthetic tropical cyclone hazard dataset using STORM. Scientific Data, 7(1), 1-12. [40]. <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0381-2>, <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0381-2>
- Bonilla Vargas, A. (2014). Patrones de sequía en Centroamérica. www.gwpcentroamerica.org
- Bonilla, A. (2014). Patrones de sequía en Centroamérica: impacto en la producción de maíz y frijol y uso del índice normalizado de precipitación. Ponencia, UICN/Universidad de Costa Rica.
- Brenes, A., & Bonilla, A. (2012). La Niña 2010-2012. Estudio de caso Costa Rica. Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction, GAR 2013. Corporación OSSO.
- Brunner, G., & Bonner, V. (1994). Hydrologic Engineering Center - River Analysis System HEC-RAS (TP-147). Retrieved from <http://www.hec.usace.army.mil/publications/TechnicalPapers/TP-147.pdf>
- Burbach, G. V., Frohlich, C., Pennington, W. D., & Matumoto, T. (1984). Seismicity and tectonics of the subducted Cocos plate. Journal of Geophysical Research, 89(B9), 7719-7735.
- Calderón, A., & Silva, V. (2019). Probabilistic seismic vulnerability and loss assessment of the residential building stock in Costa Rica. Bulletin of Earthquake Engineering, 17(8), 1257-1284.
- Campos-Durán, D., & Barrantes-Castillo, G. (2020). Evaluación de la vulnerabilidad asociada a la actividad del volcán Turrialba (2010-2017) en Santa Cruz de Turrialba. Revista Geológica de América Central, 63, 67-86.
- CAPRA. (s.f.). Análisis probabilista de amenazas y riesgos naturales - Amenaza por deslizamientos en el distrito de Orosí.
- Carbon Decisions International (CDI). (2015). Patrones y factores de cambio de la cobertura forestal natural de Costa Rica, 1987-2013. Informe preparado para el Gobierno de Costa Rica bajo el Fondo de Carbono del Fondo Cooperativo para el Carbono de los Bosques (FCPF).
- Cardona, O., Ordaz, M., Mora, M., Salgado, M., Bernal, G., Zuloaga, D., González, D. (2013). Global Risk Assessment: A fully probabilistic seismic and tropical cyclone wind assessment. Bogotá: International Journal of Disaster Risk Reduction.
- Cardona, O., Ordaz, M., Yamín, L., Arámbula, S., Marulanda, M., & Barbat, A. (2008). Probabilistic seismic risk assessment for comprehensive risk management modeling for innovative risk transfer and loss financing mechanisms. Beijing: 14 WCEE.

- Cardona, O.D. (1986a). Análisis de vulnerabilidad y evaluación del riesgo sísmico. Seminario Nacional sobre Prevención y Manejo de Catástrofes Naturales, Asociación de Ingenieros Estructurales, octubre 1986, Medellín.
- Cardona, O.D. (1986b). Estudios de vulnerabilidad y evaluación del riesgo sísmico: Planificación física y urbana en áreas propensas. Simposio International sobre Neotectónica y Riesgos Volcánicos, Revista CIAF No. 11, diciembre 1986, Bogotá.
- Cardona, O.D. (1986c). Estudios de vulnerabilidad y evaluación del riesgo sísmico: Planificación física y urbana en áreas propensas. Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. Reporte AIS-33. diciembre 1986, Bogotá.
- Cardona, O.D. (1989). Enfoque metodológico para la evaluación de la amenaza, la vulnerabilidad y el riesgo sísmico. Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica. No. 37, diciembre 1989, México, DOI: 10.18867/ris.37.304
- Cardona, O.D. (1990). Términos de uso común en manejo de riesgos. Reporte AGID No. 13. 1er Simposio Andino de Geología Ambiental, 1ª Conferencia Colombiana de Geología Ambiental. Pag 587-593. Medellín.
- Cardona, O. D. (2001). Estimación holística del riesgo sísmico utilizando sistemas dinámicos complejos. Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña. CD: Premios de Investigación Social sobre protección civil, para tesis doctorales, 2002. Dirección General de Protección Civil, Ministerio del Interior, España.
- Castellanos, E. J., et al. (2022). Brechas de adaptación al cambio climático en Centroamérica: desafíos para la resiliencia regional. *Frontiers in Climate*, 4, 934115.
- Castillo, M., & Peraldo, G. (2000). Historia de la vulcanología en Costa Rica. En A. Ruiz & L. Camacho (Eds.), *Memorias del Simposio en Geología Centroamericana* (pp. 15-28). San José: UCR.
- Castro-Vincenzi, J. (2024, 19 de abril). Costa Rica amidst climate change: Navigating the economic perils and opportunities. *ReVista: Harvard Review of Latin America*.
- CATIE, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. (2018a). Prácticas efectivas para la reducción de impactos por eventos climáticos: Cultivo de caña de azúcar en Costa Rica. Recuperado el 13 de marzo de 2024, de <https://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/F01-8327.pdf>
- CATIE, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. (2018b). Prácticas efectivas para la reducción de impactos por eventos climáticos en el cultivo de café en Costa Rica. Recuperado el 13 de marzo de 2024, de <https://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/F01-8206.pdf>
- CATIE, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. (2018c). Ficha técnica para sistemas productivos con ganado bovino. Recuperado el 13 de marzo de 2024, de <https://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/L01-8412.pdf>
- CATIE, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. (2018d). Acciones para fortalecer la adaptación y mitigación del cambio climático en el sector cafetalero de Costa Rica.

- Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE); ITEC S.A.S.; INGENIAR LTDA.; EAI S.A.; International Strategy for Disaster Reduction (ISDR). (2013). Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction, GAR 2013. Modelación probabilista de riesgos naturales en el nivel global: el modelo global del riesgo. Modelos globales de terremoto y ciclón y evaluación de riesgo de desastres de los países para las amenazas de terremoto, ciclón e inundaciones.
- CEPAL. (2010). La economía del cambio climático en Centroamérica: Reporte Técnico 2010. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), México.
- Chacón Soto, V. (2023, 21 de junio). Científicos alertan aumento en nivel del mar en todas las zonas costeras del país. Semanario Universidad.
- Chen, C., I. Noble, J. Hellman, Murillo, M., Chawla, N. (2015). University of Notre Dame Global Adaptation Index: Country Index Technical Report. USA: University of Notre Dame. Disponible en: <https://gain.nd.edu/our-work/country-index/>
- Chen, W., Moriya, K., Sakai, T., Koyama, L., & Cao, C. (2014). Monitoring of post-fire forest recovery under different restoration modes based on time series Landsat data. European Journal of Remote Sensing, 47(1), 153-168.
- Chow, V. T., Maidment, D. R., Mays, L. W., & Saldarriaga, J. G. (1994). Hidrología aplicada (No. 551.48 C4H5).
- CIMNE, ITEC S.A.S., INGENIAR LTDA., EAI S.A. (2012) Probabilistic modelling of natural risks at the global level: Global Risk Model. Background paper for the GAR13.
- CNE – Comisión Nacional de Emergencias (2015). Política Nacional de Gestión del Riesgo 2016-2030. San José, Costa Rica: CNE.
- CNE – Comisión Nacional de Emergencias (2020). Clasificación de la amenaza volcánica y evaluación de la red de monitoreo (Informe técnico). San José, Costa Rica: CNE-OVSICORI-RSN.
- CNE. (2023). CNE brinda monitoreo y vigilancia. El Observador CR.
- Colegio Federado de Ingenieros y de Arquitectos de Costa Rica (CFIA). (2010). Código Sísmico de Costa Rica 2010 (4.ª ed.). Cartago: Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- Comisión Nacional de Emergencia. (2014). PLAN GENERAL DE LA EMERGENCIA POR SEQUIA.
- Comisión Nacional de Emergencias (CNE). (2016). Política Nacional de Gestión del Riesgo 2016-2030. San José, Costa Rica.
- Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias. (s.f.). Deslizamientos, inundaciones, sismos. Costa Rica.
- Contraloría General de la República (CGR). (2017). Presión sobre la hacienda pública en un contexto de variabilidad y cambio climático: Desafíos para mejorar las condiciones presentes y reducir los impactos futuros. San José, Costa Rica: CGR.

- Copernicus Climate Change Service. (2017). ERA5: Fifth generation of ECMWF atmospheric reanalyses of the global climate. Copernicus Climate Change Service Climate Data Store (CDS). Retrieved from <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/home>
- Corrales, L. (2017). Cambio climático: Impactos y desafíos para Costa Rica. San José, Costa Rica: Programa Estado de la Nación.
- Coto-Cedeño, W. I. (2018). Ash clouds, fields of sand: Volcanic activity in Costa Rica and its impact on the agriculture sector, 1950–2017. *Revista Geográfica de América Central*, 62(1), 98-127.
- Cramér, H. (1930) On the Mathematical Theory of Risk, Skandia Jubilee Volume, Stockholm. Cruz, M. G., Alexander, M. E., & Wakimoto, R. H. (2003). Assessing canopy fuel stratum characteristics in crown fire prone fuel types of western North America. *International Journal of Wildland Fire*, 12(1), 39-50.
- Cruz Roja Costarricense. (2024a). Informe de Situación #1: Lluvias Intensas - Noviembre 2024.
- Cruz Roja Costarricense. (2024b). Informe de Situación #2: OPERACIÓN: Lluvias Intensas - Noviembre 2024.
- DeMets, C., Gordon, R. G., Argus, D. F., & Stein, S. (2010). Geologically current plate motions. *Geophysical Journal International*, 181(1), 1-80.
- Dirección de Cambio Climático, & Ministerio de Ambiente y Energía. (2022). Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático 2022-2026.
- Embrechts, P., Klüppelberg, C., Mikosch, T. 2012. *Modelling Extremal Events for Insurance and Finance*. Springer-Verlag. Berlin
- ERN (Equipo Regional de Evaluación de Riesgos) (2014). Escenario de riesgo volcánico en San José, Costa Rica (Informe ERN-CAPRA-R5-T2.16). México: BID.
- Escoto Castillo, Ana, Sánchez Peña, Landy, & Gachuz Delgado, Sheila. (2017). Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSP): nuevas maneras de comprender el cambio climático y social. *Estudios demográficos y urbanos*, 32(3), 669-693. <https://doi.org/10.24201/edu.v32i3.1684>
- Escoto, Ana & Sanchez, Landy & Gachuz, Sheila. (2017). Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSP): nuevas maneras de comprender el cambio climático y social. *Estudios demográficos y urbanos*. 96. 669-693. [10.24201/edu.v32i3.1684](https://doi.org/10.24201/edu.v32i3.1684)
- Evaluación de Riesgos Naturales - América Latina - Consultores en Riesgos y Desastres [ERN-CAPRA]. (s.f.). Análisis probabilista de amenazas y riesgos naturales - Revisión de eventos históricos importantes (Informe Técnico ERN-CAPRA-T2-1, Tomo II).
- Evaluación de Riesgos Naturales ERN – América Latina. (2009). Modelación Probabilista de Amenazas Naturales. Informe ERN-CAPRA-T2-3. <http://www.ecapra.org>.
- FAO, & UNESCO. (2025). Mapa Mundial de Suelos de FAO/UNESCO | Portal de Suelos de la FAO | Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Retrieved March

- 10, 2025, from <https://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/mapas-historicos-de-suelos-y-bases-de-datos/mapa-mundial-de-suelos-de-faunesco/es/>
- FAO. (2010). Wildland fire management terminology (Updated July 2010).
- FAO. (2014). Impacto del fenómeno de El Niño 2014 en la seguridad alimentaria de Mesoamérica. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Panamá.
- FAO. (2020). Harmonized World Soil Database. Recuperado de <http://www.fao.org/soils-portal/datahub/soil-maps-and-databases/harmonized-world-soil-database-v12/en>
- Fernández, W., Amador, J., & Campos, M. (2006). Impacts and Adaptation to Climate Change and Extreme Events in Central America. San José, Costa Rica: Centro de Investigaciones Geofísicas, UCR.
- Freitas Guimarães, L., Nieto-Torres, A., Bonadonna, C., & Frischknecht, C. (2021). A new inclusive volcanic risk ranking, Part 2: Application to Latin America. *Frontiers in Earth Science*, 9, 757742.
- Gao, X., Shuiqing, L., Dongxue, M., Yahao, L., Po, H. (2024) Development of a novel storm surge inundation model framework for efficient prediction. *Geosci. Model Dev.*, 17, 5497–5509, 2024
- Global Programme on Risk Assessment and Management for Adaptation to Climate Change. Coautores: Mechler, R. (lead author, IIASA); Schindler, S. (GIZ); Hanke, N. (GIZ); Högl, M. (GIZ); Siebert, M. (GIZ). Evaluación de riesgos relacionados con el clima. Una metodología de 6 pasos. Disponible en: <https://www.adaptationcommunity.net/climate-risk-assessment-management/>
- Global Water Partnership (GWP). (2020). Hacia políticas de gestión de la sequía en Centroamérica. GWP Centroamérica – CCAD, Nota informativa. González, R., Anzúles, A. S., Vera, A. Z., & Riera, L. B. (1994). Manual de pastos tropicales para la Amazonía ecuatoriana. Francisco de Orellana, Ecuador. INIAP, 32-35.
- Gornitz, V. (1995). Sea-level rise: A review of recent past and near-future trends. *Earth Surface Processes and Landforms*, 20(1), 7-20.
- Gutiérrez R., H. J. (2001). Vulnerabilidad de las coberturas vegetales de Colombia, aproximación a un modelo para la evaluación de la vulnerabilidad de las coberturas vegetales de Colombia ante un posible cambio climático utilizando SIG. Bogotá, Colombia: IDEAM. - p.v.: i.
- Gutiérrez, J. A. (2012). Seismic Risk Prevention in Costa Rica: A Successful 39 Year Experience. En 15th World Conference on Earthquake Engineering (15WCEE), Lisboa, Portugal. (Paper No. 567).
- GWPCAM, G. W. P. C. A. (2014). Sequía 2014: Un escenario que se puede prevenir. www.gwpcentroamerica.org
- Hidalgo Leiva, D., Linkimer, L., Arroyo, I., Arroyo-Solórzano, M., Piedra, R., Climent, A., Díaz, V., Esquivel, L., Alvarado, G., Castillo, R., Carranza-Morales, M., Cerdas-Guntanis, L., Escalante-Meza, J., Lobo-Aguilar, S., Rodríguez, M., & Rojas, W. (2022). The 2022 seismic hazard model for Costa Rica. *Bulletin of the Seismological Society of America*. <https://doi.org/10.1785/0120220119>

- Hidalgo, H. G., & Alfaro, E. J. (2012). Some physical and socio-economic aspects of climate change in Central America. *Revista de Climatología*, 12, 1-12.
- Hidalgo, H. G., & Alfaro, E. J. (2015). Skill of CMIP5 climate models in reproducing 20th century basic climate features in Central America. *International Journal of Climatology*, 35, 3397-3411.
- Hidalgo-Leiva, D. A., Linkimer, L., Arroyo, I. G., Arroyo, M., Piedra, R., Climent, Á., ... & Alvarado, G. E. (2023). The 2022 Seismic Hazard Model for Costa Rica. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 113(1), 23-41.
- IKI, Iniciativa Climática Internacional (2023). NAMA Café Costa Rica | IKI Centroamérica & Caribe. Retrieved March 13, 2025, from <https://iki-cac.org/hub-innovacion-clima-biodiversidad/acciones-climaticas-innovadoras/sistemas-alimentarios-y>
- Imbach, P., et al. (2017). Climate change, ecosystems and smallholders: A socio-ecological assessment in the tropics. *Climatic Change*, 141(1), 123-137.
- INGENIAR (2014). Global Risk Model v2 for the Global Assessment Report (GAR-15) on disaster Risk Reduction. UNDRR
- Instituto de Innovación y Transferencia de Tecnología Agropecuaria (INTA). (2015). Manual de definición de clases y especificaciones cartográficas de la Leyenda CLC-CR, para la generación de mapas de uso y cobertura de la tierra de Costa Rica. MAG, INTA, FITTACORI, SUNII.
- Instituto Meteorológico Nacional (IMN) & Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE). (2000). Primera Comunicación Nacional a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático. San José, Costa Rica: MINAE.
- Instituto Meteorológico Nacional (IMN) & Ministerio de Ambiente y Energía (MINAET). (2008). El clima de Costa Rica: Su variabilidad y cambio climático. San José, Costa Rica: MINAET.
- Instituto Meteorológico Nacional (IMN) & Ministerio de Ambiente y Energía (MINAET). (2009). Segunda Comunicación Nacional a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. San José, Costa Rica: MINAET.
- Instituto Meteorológico Nacional (IMN) & Ministerio de Ambiente y Energía (MINAET). (2011). Análisis del riesgo actual del sector hídrico de Costa Rica ante el cambio climático. San José, Costa Rica: IMN-MINAET/PNUD.
- Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC). (2015). VI Censo Nacional Agropecuario: Resultados generales (1ª ed.). INEC. ISBN: 978-9968-683-96-8. <https://inec.cr/estadisticas-fuentes/censos/censo-agropecuario-2014>
- Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC). (2024). Encuesta Nacional Agropecuaria: Resultados generales de la actividad agrícola y forestal (Edición 2023) [Informe anual, recurso electrónico]. INEC. ISSN: 2215-552X. <https://inec.cr/estadisticas-fuentes/encuestas/encuesta-nacional-agropecuaria?filtertext=2023&page=2>

- inta, Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria, & sector AGRO ALIMENTARIO. (2022). Medidas de adaptación al Cambio Climático, Sistemas Pecuarios, Guía Técnica.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2022). Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the IPCC (Chap. 12: Central and South America). Cambridge: Cambridge University Press.
- International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies (IFRC). (2023). Early Action Protocol Summary: Costa Rica | Floods caused by Tropical Cyclones.
- INVU – Instituto Nacional de Vivienda y Urbanismo (2017). Guía para la integración de la gestión del riesgo en el ordenamiento territorial. San José, Costa Rica: INVU.
- IPCC. (2014). Cambio Climático 2014: Impactos, adaptación y vulnerabilidad – Resumen para Responsables de Políticas. Quinto Informe de Evaluación del IPCC, Ginebra.
- IPCC. (2021). AR6 Climate Change 2021: The Physical Science Basis.
- IPCC. (2022). Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability – Summary for Policymakers. Sexto Informe de Evaluación del IPCC, Ginebra.
- JPL NASA, J. P. L. (2019, August 8). NASA Gauges Plant Stress in Costa Rican Drought. <https://www.jpl.nasa.gov/news/nasa-gauges-plant-stress-in-costa-rican-drought/>
- Kirgman, J.F.C. (1992). Poisson Processes. Clarendon Press
- Knapp, K. R., M. C. Kruk, D. H. Levinson, H. J. Diamond, and C. J. Neumann, 2010: The International Best Track Archive for Climate Stewardship (IBTrACS): Unifying tropical cyclone best track data. Bulletin of the American Meteorological Society, 91, 363-376. doi:10.1175/2009BAMS2755.1
- Kolarsky, R. A., Mann, P., & Montero, W. (1995). Forearc deformation related to the subduction of the Cocos Ridge, southeastern Costa Rica. En P. Mann (Ed.), Geologic and Tectonic Development of the Caribbean Plate in Southern Central America (Geological Society of America Special Paper 295, pp. 215-242).
- Kull, D. W., & Feldman, A. D. (1998). Evolution of Clark's unit graph method to spatially distributed runoff. Journal of Hydrologic engineering, 3(1), 9-19.
- La Ruta del Clima. (2021). Una Ley Marco de Cambio Climático para Costa Rica: Estructuras básicas y ejemplos. San José, Costa Rica: La Ruta del Clima.
- LaFemina, P., Dixon, T., Malservisi, R., & otros. (2009). Fore-arc motion and Cocos Ridge collision in Central America. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 10(5), Q05S14.
- Linkimer, L., & Alvarado, G. E. (2014). Sismicidad histórica de Costa Rica (1821–2013). San José, Costa Rica: Red Sismológica Nacional (UCR-ICE).

- Linkimer, L., Arroyo, I. G., Alvarado, G. E., Arroyo, M., & Bakkar, H. (2018). The National Seismological Network of Costa Rica (RSN): An Overview and Recent Developments. *Seismological Research Letters*, 89(2A), 392-401.
- Linkimer, L., Böse, M., Clinton, J., & otros. (2021). Preliminary Results of an Earthquake Early Warning System in Costa Rica. *Frontiers in Earth Science*, 9, 700843.
- Lizano Araya, M. A., Lizano Rodríguez, O. G., & Alfaro Herrera, E. J. (2023). Escenarios de inundación ante el aumento del nivel del mar por Cambio Climático, para las Playas del Coco, Tamarindo y Sámara, Costa Rica. *Entorno Geográfico*, (25), 1-24.
- Lizano, O. G. (2013). Erosión en las playas de Costa Rica, incluyendo la Isla del Coco. *InterSedes*, 14(27), 6-27.
- Lizano, O. G. (2014). Algunos impactos costeros en Costa Rica debido al calentamiento global. *Ambientico*, (246), 23-28.
- Lizano, O. G. (2014b). La dinámica oceanográfica al frente del Humedal Nacional Térraba-Sierpe (HNTS) y su relación con la muerte del manglar. *Revista de Biología Tropical*, 62(4).
- Lizano, O. G., & Gutiérrez, A. (2011). Erosión en las costas de Costa Rica, un problema de todos. *En Torno a la Prevención*, 7, 14-16.
- Løvholt F., Glimsdal, S., Harbitz, C., Horspool, N., Smebye, H., Del bono, A., Nadim, F. (2014). Global tsunami hazard and exposure due to large co-seismic slip. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, Volume 10, Part B, December 2014, Pages 406–418. doi:10.1016/j.ijdr.2014.04.003.
- Lücke, O. H., & Arroyo, I. G. (2015). Density structure and geometry of the Costa Rican subduction zone: Evidence from 3-D local earthquake tomography. *Solid Earth*, 6(4), 1169-1198.
- Lundberg, F. (1903) Approximerad Framställning av Sannolikehets-funktionen. Återförsäkring av Kollektivrisker (Producción aproximada de la función de probabilidad. Reaseguro de Riesgos Colectivos), Almqvist & Wiksell, Uppsala.
- Mace, G. M., M. Barrett, N. D. Burgess, S. E. Cornell, R. Freeman, M. Grooten, & A. Purvis. (2018). Aiming Higher to Bend the Curve of Biodiversity Loss, *Nature Sustainability*, 1, 448–451.
- MAG, Ministerio de Agricultura y Ganadería (2013). NAMA-AGRICOLA Acción de Mitigación Nacionalmente Apropiaada en el sector Agrícola de Costa Rica.
- MAG, Ministerio de Agricultura y Ganadería (2016). NAMA Ganadería - Ganadería bovina en Costa Rica. www.fb.com/namaganaderia
- Marshall, J. S., Anderson, R. S., & Mendoza, J. (2000). Strike-slip faulting along the North Panama Deformed Belt and uplift of the Talamanca Range (Costa Rica–Panamá). *Geology*, 28(10), 907-910.
- Marulanda, M., Cardona, O., Mora, M., & Barbat, A. (2014). Design and implementation of a voluntary collective earthquake insurance policy to cover low-income homeowners in a developing country. *Barcelona: Natural Hazards Journal*.

- Melson, W. G., & Sáenz, R. (1968). The 1968 eruption of Volcán Arenal, Costa Rica: Preliminary summary of field and laboratory studies. Washington, DC: Smithsonian Institution.
- MINAE – Ministerio de Ambiente y Energía (2018). Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático 2018-2030. San José, Costa Rica: Dirección de Cambio Climático.
- Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE). (2015). Estrategia Nacional REDD+ Costa Rica. MINAE. <https://www.forestcarbonpartnership.org/sites/fcp/files/2015/October/8-Costa%20Rica%20Borrador%20de%20la%20Estrategia%20Nacional%20REDD+Spanish%20v%2030%20Sept.pdf> Recuperado el 7 de marzo de 2024.
- Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE). (2018). Política Nacional de Adaptación al Cambio Climático 2018-2030. San José, Costa Rica.
- Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE). (2018). Política Nacional de Adaptación al Cambio Climático 2018-2030. San José, Costa Rica: MINAE.
- Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE). (2022). Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático 2022-2026. San José, Costa Rica.
- Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE). (2022). Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático de Costa Rica 2022-2026. San José, Costa Rica: MINAE (Dirección de Cambio Climático).
- Ministerio de Ambiente, Energía y Telecomunicaciones (MINAET). (2009). Estrategia Nacional de Cambio Climático. San José, Costa Rica: MINAET.
- Montero, W. (1989). Los terremotos en la historia de Costa Rica (1821-1930). San José, Costa Rica: Editorial Universidad de Costa Rica.
- Montero, W. (1994). Neotectonics and related stress distribution in a subduction collision zone—Costa Rica. En S. K. Seth & W. D. Means (Eds.), *Geology of an Evolving Arc: 75th Anniversary of the Central American Geological Society* (Geological Society of America Special Paper 295, pp. 115-140).
- Montero, W., Denyer, P., Barquero, R., Alvarado, G. E., & Cowan, H. (1998). Map and database of Quaternary faults and folds in Costa Rica and its offshore regions. U.S. Geological Survey Open-File Report 98-481.
- Mora, M. M. (2024). Historia y desarrollo de la vulcanología en Costa Rica desde las publicaciones periódicas de finales del siglo XIX al XXI. *Revista Geológica de América Central*, 64, 15-32.
- Mora, M., Bakkar, H., Alvarado, G. E., & col. (2022). Volcanic monitoring and hazard assessment in Costa Rica. En W. Torres & G. Soto (Eds.), *Volcano Observatories in Latin America* (pp. 33-50). San José: UNA Press.
- Morales, M. (2018). Brechas de conocimiento en adaptación al cambio climático: Informe de diagnóstico Costa Rica. Red Regional de Cambio Climático y Toma de Decisiones – Proyecto LatinoAdapta (UNESCO-UNITWIN). San José, Costa Rica.

- Morales, R., & Liao, A. (1999). Amenazas volcánicas en Costa Rica: una estrategia de prevención. *Revista Costarricense de Salud Pública*, 8(15), 53-63.
- Nicholls, R. J., & Cazenave, A. (2010). Sea-Level Rise and Its Impact on Coastal Zones. *Science*, 328(5985), 1517-1520.
- NORSAR et. al. Proyecto regional RESIS II – Evaluación de la Amenaza sísmica en Centroamérica. 2008.
- OACG, O. del A. y C. G. (2025). Observatorio de Sequía. <https://oacg.fcs.ucr.ac.cr/index.php/observatorio-de-sequia-una>
- Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica, OVSICORI-UNA. (2022). Informe anual de sismicidad 2021. Heredia, Costa Rica: Universidad Nacional.
- Ordaz M., Martinelli F., Aguilar A., Arboleda J., Meletti C. and D’Amico V. (2015). CRISIS 2015, Program for computing seismic hazard. Instituto de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México. México City, México.
- Orozco Montoya, R. A., & Brenes Maykall, A. (2023). Evolución del riesgo en el territorio nacional: implicaciones y desafíos para la política pública. Consejo Nacional de Rectores.
- OVSICORI-UNA (2016). Informe de actividad del volcán Turrialba, 2014-2016. Heredia, Costa Rica: OVSICORI, Universidad Nacional.
- OVSICORI-UNA (2017). Reporte especial: Erupción freática del volcán Poás (Abril 2017). Heredia: Universidad Nacional.
- OVSICORI-UNA (2019). Boletín de vigilancia volcánica: Rincón de la Vieja 2011-2019. Heredia: Universidad Nacional.
- Peraldo, G., & Montero, W. (1994). Los temblores del período colonial en Costa Rica, 1538–1821. Cartago, Costa Rica: Editorial Tecnológica.
- Pérez Arrieta, N. (2013). Análisis de vulnerabilidad ante sismos y deslizamientos del sector de Jucó de Orosi de Paraíso de Cartago. Universidad Central.
- Pesaresi, M.; Politis, P. (2023): GHS-BUILT-H R2023A - GHS building height, derived from AW3D30, SRTM30, and Sentinel2 composite (2018).European Commission, Joint Research Centre (JRC) PID: <http://data.europa.eu/89h/85005901-3a49-48dd-9d19-6261354f56fe>, doi:10.2905/85005901-3A49-48DD-9D19-6261354F56FE
- Peters, J., & Easton, D. (1996). Runoff Simulation Using Radar Rainfall Data. *Water Resources Bulletin*, 32(4), 753–760.
- Poleo, D., Solano, E., & Stolz, W. (2014). La Oscilación Madden-Julian y las precipitaciones extremas en Costa Rica. *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos*, 13. Instituto Meteorológico Nacional, Costa Rica.

- Pounds, J. A., Bustamante, M. R., Coloma, L. A., Consuegra, J. A., Fogden, M. P. L., Foster, P. N., ... & Young, B. E. (2006). Widespread amphibian extinctions from epidemic disease driven by global warming. *Nature*, 439(7073), 161-167.
- Programa Estado de la Nación. (2022). Vigésimo Octavo Informe Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible. San José, Costa Rica.
- Protti, M., González, V., Newman, A., & otros. (2014). Nicoya earthquake rupture anticipated by geodetic measurement of the locked plate interface. *Nature Geoscience*, 7(2), 117-121.
- Protti, M., Güendel, F., & McNally, K. (1995). Correlation between the age of the subducting Cocos Plate and the geometry of the Wadati-Benioff zone under Nicaragua and Costa Rica. En P. Mann (Ed.), *Geologic and Tectonic Development of the Caribbean Plate in Southern Central America* (GSA Special Paper 295, pp. 309-326).
- Quesada-Hernández, L. E., Hidalgo, H. G., & Alfaro, E. J. (2020). Asociación entre algunos índices de sequía e impactos socio-productivos en el Pacífico Norte de Costa Rica. *Revista de Ciencias Ambientales (Costa Rica)*, 54(1), 29-48.
- Quesada-Hernández, L. E., Hidalgo, H. G., Alfaro, E. J., Quesada-Hernández, L. E., Hidalgo, H. G., & Alfaro, E. J. (2020). Asociación entre algunos índices de sequía e impactos socio-productivos en el Pacífico Norte de Costa Rica. *Revista de Ciencias Ambientales*, 54(1), 16–32. <https://doi.org/10.15359/RCA.54-1.2>
- Quesada-Román, A. (2020). Landslides and floods zonation using geomorphological analyses in a dynamic catchment of Costa Rica. *Journal Title, Volume(Issue), pages*.
- Quesada-Román, A., Hidalgo, H. G., & Alfaro, E. J. (2024). Assessing the impact of tropical cyclones on economic sectors in Costa Rica, Central America. *Tropical Cyclone Research and Review*, 13, 196-207.
- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T. C., & Fereres, E. (2011). FAO cropwater productivity model to simulate yield response to water AquaCrop. In *Reference Manual of AQUACROP* (p. 56).
- Reguero, B. G., Losada, I. J., Díaz-Simal, P., Méndez, F. J., & Beck, M. W. (2015). Effects of Climate Change on Exposure to Coastal Flooding in Latin America and the Caribbean. *PLOS ONE*, 10(7), e0133409.
- República de Costa Rica (2006). Ley No. 8488: Ley Nacional de Emergencias y Prevención del Riesgo. La Gaceta, N°8 (11-01-2006).
- República de Costa Rica. (2005). Ley Nacional de Emergencias y Prevención del Riesgo, Ley N° 8488. La Gaceta N°11 (11-1-2006). San José, Costa Rica: Asamblea Legislativa.
- Retana, J. A. (2012). Eventos hidrometeorológicos extremos lluviosos en Costa Rica desde la perspectiva de la adaptación al cambio en el clima. *Tropical Journal of Environmental Sciences*.
- Retana, J. A., Molina, M. J., Calvo, M., & Sanabria, N. (s.f.). Descripción de riesgo ante eventos hidrometeorológicos extremos en los cantones de Bagaces, Tilarán, Abangares y los distritos de Lepanto, Cóbano y Paquera. Instituto Meteorológico Nacional.

- Rodríguez, J. (2018). Análisis de la Gestión de los Eventos de Sequía ante el Cambio Climático en los Sectores Agropecuario e Hídrico del Cantón de Hojancha, Guanacaste, Costa Rica.
- Rodríguez, L. (2019). Costa Rica enfrentó 134 conflictos por el agua en una década. *Semanario Universidad – Universidad de Costa Rica* (27 mar 2019).
- Rosenzweig, C., A. Iglesias, X. B. Yang, P. R. Epstein, & E. Chivian. (2001). Climate Change and Extreme Weather Events – Implications for Food Production, Plant Diseases, and Pests, *Global Change and Human Health*, 2(2), 90–104.
- Ruiz Cubillo, P., & Soto, G. (2014). Preparación del mapa de susceptibilidad a deslizamientos utilizando imágenes LiDAR en los Cerros de Escazú, cantones Aserrí, Desamparados, Alajuelita, Santa Ana y Escazú, Costa Rica. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.33311.76967>
- Salazar, M., Alvarado, G. E., Madrigal, J., & Monestel, Y. (2019). Deslizamientos históricos importantes en el volcán Barva (Costa Rica) y su transformación en flujos de escombros volcánicos. *Revista Geológica de América Central*, 61, 107-119. doi: 10.15517/rgac.v61i0.40090
- Salgado, D. (2009). Inundaciones y gestión del riesgo de desastres. Retos para su reducción y mitigación.
- Salgado, M. A., Zuloaga-Romero, D., Cardona, O. D. (2013). Evaluación probabilista del riesgo sísmico en Bogotá y Manizales con y sin la influencia de la Caldas Tear. *Revista de Ingeniería, Facultad de Ingeniería, Universidad de los Andes*, No. 38. Bogotá Junio. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0121-49932013000100002
- Salgado-Gálvez, M., Ordaz, M., Singh, K., Cardona, O., Reinoso, E., Aguado, A., Zuloaga Romero, D., Garnica, B., & Bernal, G. (2018). Homogeneous and continuous probabilistic seismic hazard model for Latin America and the Caribbean. Presentado en la 16th European Conference on Earthquake Engineering, Thessaloniki, Grecia, junio de 2018.
- Sánchez, F. (2015). HEC-HMS Manual elemental.
- Schmidt, V., Moya, A., Climent, A-, Rojas, W. & Boschini, I. (2005). Microzonificación sísmica de San José, Costa Rica. (In English: Seismic Mizcrozonation of San José, Costa Rica). Universidad de Costa Rica
- Schwarz, G. (1978). Estimating the Dimension of a Model. *Annals of Statistics*, 6: 461–464.
- Sequeira-Arguedas, J. M. (2021). Geología, geomorfología y ocurrencia de deslizamientos en la cuenca alta del Río Virilla, Costa Rica. Universidad de Costa Rica.
- Sheffield, J., Goteti, G., & Wood, E. F. (2006). Development of a 50-year high-resolution global dataset of meteorological forcings for land surface modeling. *Journal of Climate*, 19(13), 3088–3111. <https://doi.org/10.1175/JCLI3790.1>
- Sheppard, J., & Hoyle, F. (2018). Water availability. Recuperado de <http://soilquality.org.au/factsheets/water-availability>
- Sistema Nacional de Información Territorial (SNIT). (2024). Serie de mapas de cobertura y usos de la tierra de Costa Rica - REDD (MC) (Ediciones 2021, 2019, 2017, 2015, 2013) [Capas ráster]. SNIT.

https://www.snitcr.go.cr/ico_servicios_ogc_info?k=bm9kbzo6ODY=&nombre=Secretar%C3%ADa%20REDD+ Recuperado el 7 de marzo de 2024.

- Sistema Nacional de Monitoreo de la Cobertura y Uso de la Tierra y Ecosistemas (SIMOCUTE). (2019, junio). Diagnóstico de mapeo sobre cobertura y uso de la tierra y ecosistemas. SIMOCUTE. https://simocute.go.cr/assets/documents/Diagn%C3%B3stico_de_Mapeo_sobre_Cobertura_y_Uso_de_la_Tierra_y_Ecosistemas.pdf Recuperado el 13 de marzo de 2024.
- Small, C., & Naumann, T. (2001). The global distribution of human population and recent volcanism. *Environmental Hazards*, 3(3-4), 93-109.
- Smithsonian GVP – Global Volcanism Program (2013). Costa Rica: Holocene volcanoes and historical eruptions. Smithsonian Institution.
- SNIT, S. N. de I. T. (2025). Instituto Geográfico Nacional Costa Rica. Retrieved March 10, 2025, from https://www.snitcr.go.cr/ico_servicios_ogc_info?k=bm9kbzo6NTA=&nombre=INTA
- Soil Conservation Service. (1971). National engineering handbook, Section 4: Hydrology USDA, Springfield, VA.
- Soil Conservation Service. (1986). Urban hydrology for small watersheds, Technical Release 55. USDA, Springfield, VA.
- Soto Zúñiga, B. (2013). Las condiciones de sequía y estrategias de gestión en Costa Rica. Informe técnico nacional, Instituto Meteorológico Nacional – Programa NDMP, San José.
- Soto Zúñiga, B. (2013). Las condiciones de sequía y estrategias de gestión en Costa Rica. Recuperado de https://www.droughtmanagement.info/literature/UNW-DPC_NDMP_Country_Report_Costarica_2013.pdf
- Soto, B. (2013). Las condiciones de sequía y estrategias de gestión en Costa Rica. http://elpais.cr/frontend/noticia_detalle/1/75950
- Stine, C. M., & Banks, N. G. (1991). Costa Rica Volcano Profile (USGS Open-File Report 91-591). Reston, VA: United States Geological Survey.
- Suppasri, A., Mas, E., Charvet, I., Gunasekera, R., Imai, K., Fukutani, Y., Abe, Y., Imamura F. (2013). Building damage characteristics based on surveyed data and fragility curves of the 2011 Great East Japan tsunami. *Nat Hazards* (2013) 66:319–341. DOI 10.1007/s11069-012-0487-8
- Umaña González, P., & Blanco Picado, P. (2016). Deslizamientos en San José. UCR Ciencia + Tecnología.
- UNDRR – United Nations Office for Disaster Risk Reduction (2015). Implementing the Sendai Framework: Lessons from Costa Rica. Global Platform 2017 Publications. Geneva: UN.
- UNDRR (2022). Costa Rica: Voluntary national report for the midterm review of the Sendai Framework. Geneva: United Nations.
- UNISDR. (2015). Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015-2030. Naciones Unidas, Ginebra.

- United Nations Development Programme (UNDP). (2021). Scaling up Climate Ambition on Land Use and Agriculture (SCALA) in Costa Rica [sitio web]. Recuperado de <https://www.adaptation-undp.org/projects/scala-costa-rica>
- United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR). (2022). Costa Rica is making firm progress in its knowledge of systemic risk. Recuperado de [UNDRR.org](https://www.undrr.org) (08-04-2022).
- United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR). Terminology. <https://www.undrr.org/terminology/hazard>
- United Nations Office for the Coordination of Humanitarian Affairs (UNOCHA). (2015). Sequía en el Corredor Seco Centroamericano – Informe de situación. Naciones Unidas, Nueva York.
- US Army Corps of Engineers. (2000). Hydrologic Modeling System HEC-HMS, Technical Reference Manual. Hydrologic Engineering Center.
- Vallejos Vásquez, S., Esquivel Valverde, L., & Hidalgo Madrigal, M. (2012). Histórico de desastres en Costa Rica (Febrero 1723 - Setiembre 2012). Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias.
- Van der Ploeg et al. (2010). The TEEB Valuation Database: overview of structure, data and results. En Foundation for Sustainable Development. Wageningen, the Netherlands.
- Van der Zee, A., et al. (2012). Estudio de caracterización del Corredor Seco Centroamericano (Países CA-4) – Tomo I. CCAD/SICA – OCHA, San José.
- Villalobos, J. (2015). Percepción del riesgo volcánico y conocimiento de planes de emergencia en comunidades cercanas al volcán Poás. *Revista Geográfica de América Central*, 54, 143-158.
- Villalobos-Sequeira, J., Centeno-Morales, J., Cordero-Cordero, S., Anchia-Leitón, D., & González-Varela, M. (2024). Assessing the social vulnerability to floods in Pandora Oeste, Limón, Costa Rica, Central America. *REDER*, 8(2), 228-240.
- 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. *Tecnología en Marcha*, 35(4), 28-44.
- Waylen, P., Caviedes, C., & Quesada, M. (1996). Interannual variability of monthly precipitation in Costa Rica. *International Journal of Climatology*, 16(2), 173-193.
- Wilks, D. S. Department of E. & A. S. C. U. (2006). Statistical methods in the atmospheric sciences. In *International Geophysics Series* (Vol. 59). <https://doi.org/10.1002/met.16>
- World Bank. (2010). Disaster Risk Management in Latin America and the Caribbean Region: GFDRR Country Notes - Costa Rica.
- World Bank. (2021). Climate Risk Country Profile: Costa Rica. Washington, DC: The World Bank Group.
- World Food Programme (WFP). (2015). Análisis inicial del impacto de la sequía en la seguridad alimentaria en Guatemala, El Salvador y Honduras. WFP – UNOCHA (Informe en línea).

World Meteorological Organization (WMO). (2023). Estado del Clima en América Latina y el Caribe 2023. Organización Meteorológica Mundial, Ginebra.

Zeballos, A., Ramírez-Cortés, F., Ishizawa, O., & Pita, G. (2016). Análisis de los resultados de la evaluación del riesgo sísmico y las funciones de vulnerabilidad de la red del Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados. Washington, DC: Global Facility for Disaster Reduction and Recovery (GFDRR) – Banco Mundial.

A.1 CÁLCULO DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA

El cálculo de la serie de evapotranspiración potencial se hace siguiendo el Manual *Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop requirements* (Allen et al., 1998). En esta sección se explica de forma general el procedimiento para aplicar la metodología de Penman-Monteith de la FAO. Para más información, consultar el estudio de la FAO publicado en el Artículo 56 de la división de Riego y Drenaje.

La evapotranspiración de referencia se entiende como el potencial de evaporación de la atmósfera; se calcula en una superficie vegetal uniforme sin restricciones hídricas. La superficie de referencia es un cultivo hipotético con una altura asumida de 0,12 m, una resistencia superficial fija de 70 s/m y un albedo de 0,23 (Allen et al., 1998); es independiente del tipo de cultivo, de su desarrollo o de su manejo. Al no tener restricciones en el contenido de agua, las características del suelo tampoco influyen en su resultado. Estas condiciones permiten comparar los resultados en diferentes localizaciones o estaciones para evaluar las condiciones evaporativas de la atmósfera ya que el ETo únicamente varía según las condiciones climáticas presentes.

A.1.1 Método de Penman-Monteith

El método de Penman-Monteith permite cuantificar los procesos de evaporación (vaporización de agua desde una superficie: suelo, vegetación húmeda) y transpiración (vaporización del agua contenida en los tejidos vegetales), que ocurren simultáneamente. Los parámetros necesarios para el cálculo son el brillo solar, la temperatura, la humedad, la velocidad del viento (asociada con la evaporación), el flujo de vapor y la resistencia aerodinámica (asociada con la transpiración).

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad \text{Ecuación A. 1}$$

en donde

ET_0 es la evapotranspiración de referencia [mm/d]

R_n es la radiación neta [MJ/m²d] (Ecuación A. 24)

G es el flujo de calor del suelo [MJ/m²d]

γ es la constante psicrométrica [kPa/°C] (Ecuación A. 3)

T es la temperatura promedio diaria [°C]

u_2 es la velocidad del viento (a 2m de la superficie) [m/s]

$(e_s - e_a)$ representa el déficit de presión de vapor [kPa] (Ecuación A. 5) y (Ecuación A. 12)

Δ es la pendiente de la curva de presión de vapor [kPa/°C] (Ecuación A. 6)

El término 0.408 convierte la radiación neta de MJ/m²d al valor equivalente de evaporación en mm/día.

La aplicación de la metodología de Penman-Monteith implica la recopilación de información meteorológica que puede no estar disponible en todos los casos. Los parámetros meteorológicos faltantes se establecen a partir de criterio de expertos, información meteorológica general de la región y las reglas

de cálculo recomendadas por la FAO (Raes, 2009). Para el caso del presente estudio, se cuenta con la base de datos de la Universidad de Princeton (Sheffield et al., 2006) de parámetros climáticos que incluye radiación, presión atmosférica, velocidad de viento y humedad específica.

A. 1.2 Parámetros atmosféricos

A. 1.2.1 Presión atmosférica P

La presión atmosférica es la presión ejercida por el peso de la atmósfera terrestre. La presión atmosférica se puede calcular a partir de la elevación sobre el nivel del mar, en el punto de interés.

$$P = 101.3 \left(\frac{293 - 0.0065z}{293} \right)^{5.26} \quad \text{Ecuación A. 2}$$

donde

P es la presión atmosférica [kPa]

z es la elevación sobre el nivel del mar [m]

En caso de contar con mediciones de la presión atmosférica en estaciones de monitoreo, se utiliza el valor registrado cuidando que las unidades sean las correctas (pascales).

A. 1.2.2 Constante psicrométrica γ

La constante psicrométrica se define como:

$$\gamma = \frac{c_p P}{\varepsilon \lambda} = 0.664742 \times 10^{-3} P \quad \text{Ecuación A. 3}$$

donde

γ es la constante psicrométrica [kPa/°C]

P es la presión atmosférica [kPa]

λ es el calor latente de vaporización, 2.45 MJ/kg a 20°C

c_p es el calor específico a presión constante, 1.013×10^{-3} MJ/kg°C

ε es el cociente del peso molecular de vapor de agua/aire seco, 0.622

A. 1.3 Temperatura del aire

Sin información de temperatura no se puede calcular la evapotranspiración de referencia. La temperatura media diaria del aire (T_{media}) se emplea en la ecuación de Penman-Monteith para calcular la pendiente de la curva de la presión de saturación de vapor (Δ) y del impacto de la densidad media del aire (P_a). Los valores de temperatura media se obtienen de registros medidos en estaciones meteorológicas o son reportados dentro de las bases de datos globales como la publicada por la Universidad de Princeton. En el caso del cálculo de la serie de evapotranspiración para las series modeladas, que luego se utilizan en el

análisis probabilista del riesgo, la serie de temperatura modelada se utiliza directamente en la ecuación de Penman-Monteith.

A. 1.4 Humedad del aire

A. 1.4.1 Presión media de vapor de la saturación e_s

La presión media de vapor de saturación se calcula como:

$$e^o(T) = 0.6108 * \exp\left(\frac{17.27T}{T + 237.3}\right) \quad \text{Ecuación A. 4}$$

donde

$e^o(T)$ es la presión de saturación de vapor a la temperatura del aire T [kPa]

T es la temperatura del aire [°C]

La presión media de vapor de saturación se calcula a partir de la temperatura máxima y mínima diaria:

$$e_s = \frac{e^o(T_{max}) + e^o(T_{min})}{2} \quad \text{Ecuación A. 5}$$

donde

e_s es la presión media de saturación de vapor [kPa]

T_{max} es la temperatura máxima diaria del aire [°C]

T_{min} es la temperatura mínima diaria del aire [°C]

Se recomienda el cálculo de la presión media de vapor de saturación a partir de las temperaturas máximas y mínimas diarias, dado que el cálculo con la temperatura media puede llevar a subestimación del parámetro por la naturaleza no lineal de la relación presión de vapor-temperatura.

A. 1.4.2 Pendiente de la curva de presión de saturación de vapor Δ

La pendiente de la curva de presión de saturación de vapor para una cierta temperatura T se define como:

$$\Delta = \frac{4098 * \left[0.6108 * \exp\left(\frac{17.27T}{T + 237.3}\right)\right]}{(T + 237.3)^2} \quad \text{Ecuación A. 6}$$

donde

Δ es la pendiente de la curva de presión de vapor [kPa/°C]

T es la temperatura media del aire [°C]

A. 1.4.3 Presión real de vapor e_a

Según el manual de la FAO, la presión real de vapor se puede derivar de la temperatura del punto de rocío (Tdew), de datos psicrométricos o de datos de la humedad relativa. El método que utilizar depende de la disponibilidad de datos.

- e_a a partir de la temperatura del punto de rocío (Tdew)

$$e_a = e^\circ(T_{dew}) = 0.6108 * \exp\left(\frac{17.27T_{dew}}{T_{dew} + 237.3}\right) \quad \text{Ecuación A. 7}$$

- e_a a partir de la humedad máxima (RHmax) y mínima (RHmin)

$$e_a = \frac{e^\circ(T_{\min})RH_{\max} + e^\circ(T_{\max})RH_{\min}}{2} \quad \text{Ecuación A. 8}$$

- e_a a partir de la temperatura de la humedad relativa máxima

$$e_a = e^\circ(T_{\max})RH_{\min} \quad \text{Ecuación A. 9}$$

- e_a a partir de la temperatura de la humedad relativa media

Para este estudio, se hace uso de la base de datos de la Universidad de Princeton (Sheffield et al., 2006), que incluye la humedad específica media entre los parámetros que reporta.

A partir de la humedad específica, se calcula la humedad relativa:

$$RH = 0.263 P shum \left[\exp\left(\frac{17.67(T - T_o)}{T - 29.65}\right) \right]^{-1} \quad \text{Ecuación A. 10}$$

donde

RH es la humedad relativa [-]

P es la presión atmosférica [Pa]

shum es la humedad específica [-]

T es la temperatura media [Kelvin]

T_o es la temperatura de referencia, 273.16 K

Lo que es equivalente a:

$$RH = \frac{P shum}{0.622 e_s} \quad \text{Ecuación A. 11}$$

donde e_s es la presión media de saturación de vapor [kPa].

Una vez se tiene el valor de la humedad relativa, la presión real de vapor se calcula como:

$$e_a = e^{\circ}(T_{media})RH_{media} \quad \text{Ecuación A. 12}$$

donde e_a es la presión real de saturación de vapor [kPa] y RH la fracción de la humedad relativa. Si el valor de RH se da en porcentaje, se debe ingresar el valor de la fracción a la ecuación anterior.

A. 1.5 Radiación

El cálculo de la radiación neta se puede hacer a partir de parámetros como la radiación extraterrestre, la radiación solar, la radiación de cielo despejado y la radiación de onda larga, a partir de constantes y funciones previamente calibradas. También se puede hacer el cálculo a partir de mediciones de radiación registrados en estaciones especializadas o incluidos en los registros de bases de datos que incluyen información de radar. A continuación, se muestran las posibilidades para el cálculo de la radiación neta.

A. 1.5.1 Radiación extraterrestre

La radiación extraterrestre se calcula a partir de la latitud y el día del año, a partir de las siguientes funciones:

$$R_a = \frac{24 * 60}{\pi} G_{sc} d_r [\omega_s \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \cos(\omega_s)] \quad \text{Ecuación A. 13}$$

donde

R_a es la radiación extraterrestre [MJ/m²d]

G_{sc} es la constante solar = 0,082 MJ/m²min

d_r es la distancia relativa inversa Tierra-Sol [-] (Ecuación A. 14)

ω_s es el ángulo de radiación a la puesta del sol [rad]

φ es la latitud [rad] (Ecuación A. 16)

δ es la declinación solar [rad] (Ecuación A. 15)

La distancia relativa inversa Tierra-Sol, d_r , y la declinación solar, δ , están dadas por:

$$d_r = 1 + 0.033 * \cos\left(\frac{2\pi}{365}J\right) \quad \text{Ecuación A. 14}$$

$$\delta = 0.409 * \sin\left(\frac{2\pi}{365}J - 1.39\right) \quad \text{Ecuación A. 15}$$

donde J es el número del día del año entre 1 (1 de enero) y 365 (31 de diciembre).

El ángulo de radiación a la hora de la puesta del sol, ω_s , se da por:

$$\omega_s = \arccos[-\tan(\varphi) \tan(\delta)]$$

Ecuación A. 16

A. 1.5.2 Duración máxima de la insolación (N)

La duración máxima de la insolación N, está dada por:

$$N = \frac{24}{\pi} \omega_s$$

Ecuación A. 17

donde ω_s es el ángulo de radiación a la hora de la puesta del sol calculado con la Ecuación A. 15. El número máximo de horas de luz o insolación se utiliza para calcular la radiación solar.

A. 1.5.3 Radiación solar o de onda corta

Los valores de radiación solar se pueden obtener de mediciones directas o se pueden calcular utilizando la fórmula de Angstrom, que relaciona la radiación solar extraterrestre (R_a) con la duración de la insolación (N).

- Cálculo a partir de la fórmula de Angstrom

$$R_s = \left(a_s + b_s \frac{n}{N} \right) R_a$$

Ecuación A. 18

donde

R_s es la radiación solar o de onda corta [MJ/m²d]

n es la duración real de la insolación [horas]

N es la duración máxima posible de la insolación [horas] (Ecuación A. 20)

R_a es la radiación extraterrestre [MJ/m²d] (Ecuación A. 13)

a_s es la constante de regresión, que expresa la fracción radiación extraterrestre que llega a la tierra en días muy nublados ($n = 0$), $a_s = 0.25$ si no existe calibración

$a_s + b_s$ es la fracción de la radiación extraterrestre que llega a la tierra en días despejados ($n = N$), $b_s = 0.50$ si no existe calibración

La radiación solar neta, que es la diferencia entre la radiación solar entrante y la reflejada se calcula como:

$$R_{ns} = (1 - \alpha) R_s$$

Ecuación A. 19

donde α es el albedo o coeficiente de reflexión del cultivo. Al calcular la evapotranspiración de referencia, el albedo para el cultivo estándar es 0.23.

- Mediciones disponibles

Para la base de datos de variables climáticas de la Universidad de Princeton, se cuenta con información diaria de mediciones de radiación solar. El parámetro que se relaciona con la radiación solar o radiación

de onda corta es $dswrf$ o *downward shortwave radiation*. Esta radiación es la de onda corta de entrada a la atmósfera, equivalente a R_s calculada a partir de la Ecuación A. 19. Para calcular el valor neto de radiación de onda corta se debe estimar el valor de reflexión de la onda corta, que se estima a partir del albedo:

$$R_{ns} = dswrf * (1 - \alpha) \quad \text{Ecuación A. 20}$$

donde $dswrf$ es el valor medido de radiación de onda corta expresado en MJ/m²d.

A. 1.5.4 Radiación neta de onda larga

La radiación neta de onda larga se puede obtener a partir de mediciones o haciendo uso de la ley de Stefan-Boltzmann, que para esta metodología es corregida para incluir el efecto de la humedad y la nubosidad en la radiación de onda larga.

- A partir de la ley Stefan-Boltzmann

$$R_{nl} = \sigma \left[\frac{T_{max,K}^4 + T_{min,K}^4}{2} \right] (0.34 - 0.14\sqrt{e_a}) \left(1.35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0.35 \right) \quad \text{Ecuación A. 21}$$

donde

R_{nl} es la radiación neta de onda larga [MJ/m²d]

σ es la constante de Stefan-Boltzmann, 4.903×10^{-9} MJ/K⁴m²día

$T_{max,K}$ la temperatura máxima absoluta diaria [K]

$T_{min,K}$ la temperatura mínima absoluta diaria [K]

e_a es la presión de vapor real [kPa],

R_s/R_{so} es la radiación relativa de onda corta (valores $\leq 1,0$)

R_s es la radiación solar medida o calculada [MJ/m²d]

R_{so} es la radiación en un día despejado [MJ/m²d] (Ecuación A. 22)

La radiación solar en un día despejado R_{so} se calcula como:

$$R_{so} = (0.75 + 2 \times 10^{-5} z) R_a \quad \text{Ecuación A. 22}$$

donde z es la elevación de la estación o punto de interés sobre el nivel del mar [m].

- Mediciones disponibles

Para la base de datos de variables climáticas de la Universidad de Princeton, se cuenta con información diaria de mediciones de radiación solar. El parámetro que se relaciona con la radiación de onda larga es

dlwrf o *downward longwave radiation*. Esta radiación es la de onda larga de entrada a la atmósfera. Para calcular el valor neto de radiación de onda larga R_{nl} se considera que la cantidad de emisión de energía de onda larga es proporcional a la temperatura absoluta de la superficie elevada a la cuarta potencia siguiendo la ecuación de Stefan-Boltzmann:

$$R_{nl} = dlwrf - (\varepsilon_o \sigma T_{media,K}^4 + (1 - \varepsilon_o) * dlwrf) \quad \text{Ecuación A. 23}$$

donde

$dlwrf$ es el valor medido de radiación de onda larga [MJ/m²d]

ε_o es la emisividad, 0.98 para vegetación

σ es la constante de Stefan-Boltzmann, 4.903×10^{-9} MJ/K⁴m²día

$T_{media,K}$ la temperatura media diaria [K]

El término $(\varepsilon_o \sigma T_{media,K}^4 + (1 - \varepsilon_o) * dlwrf)$ expresa la radiación de onda larga reflejada a la atmósfera.

A. 1.5.5 Radiación neta

La radiación neta (R_n) es la diferencia entre la radiación neta de onda corta (R_{ns}) y la radiación neta de onda larga (R_{nl}):

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad \text{Ecuación A. 24}$$

Los valores de radiación neta de onda corta y larga se pueden obtener a partir de funciones teóricas (Ecuación A. 19 y Ecuación A. 21) o de mediciones (Ecuación A. 20 y Ecuación A. 23).

A. 1.6 Velocidad del viento

La velocidad del viento se debe incluir en el cálculo de la evapotranspiración, y se expresa como el promedio de la variable en un día. Las mediciones en estaciones deben establecer a qué altura se hacen, ya que la velocidad aumenta con la altura, debido a la fricción de la superficie. La velocidad de viento para el uso en la ecuación Penmann-Monteith debe ser a 2 m. Para mediciones para alturas diferentes se deben corregir de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$u_2 = u_z \frac{4.87}{\ln(67.8z - 5.42)} \quad \text{Ecuación A. 25}$$

donde

u_2 es la velocidad del viento a 2 m sobre la superficie [m/s]

u_z es la velocidad del viento medida a z metros sobre la superficie [m/s]

z es la altura de medición sobre la superficie [m]

En caso de no contar con información medida de velocidad del viento, la FAO en su publicación No. 56 recomienda los siguientes valores:

Viento suave $u_2 = 0.5 \text{ m/s}$

Viento suave a moderado $u_2 = 2 \text{ m/s}$

Viento moderado a fuerte $u_2 = 4 \text{ m/s}$

Viento fuerte $u_2 = 5.5 \text{ m/s}$

A. 1.7 Variables climáticas a partir de base de datos Universidad de Princeton

Para hacer uso de información contenida en bases de datos, se debe verificar que las variables climáticas se ajusten a los parámetros de entrada de la ecuación de Penmann-Monteith. Por ejemplo, para hacer uso de la información contenida en la base de datos de la Universidad de Princeton se deben hacer los siguientes ajustes:

- Radiación

Las unidades de radiación de la base de datos son watts por metro cuadrado [W/m^2], que se transforman a mega julios por metro cuadrado [MJ/m^2] para el uso de la ecuación de Penmann-Monteith. Hay que considerar que la información de la base de datos es radiación entrante de onda corta o larga, no es la radiación neta.

- Humedad relativa

La información contenida en la base de datos es humedad específica. Se debe hacer el ajuste, siguiendo la Ecuación A. 10 o la Ecuación A. 11 para obtener el valor de humedad relativa.

No se hacen ajustes para la velocidad del viento o la presión atmosférica.

El procedimiento que se sigue para calcular la evapotranspiración, a partir de la información histórica de variables climáticas diferentes a temperatura, considera la variación en el tiempo de estas variables. Es decir, para cada punto donde hay información entre los años 1981 y 2010, se calcula la media multianual del parámetro en grupos de 10 días o decadales. Con esto, se obtienen 36 valores medios en el año que consideran la estacionalidad de cada variable. Por ejemplo, en época de verano el aire caliente tiende a almacenar mayor cantidad de vapor de agua que época de invierno. El cálculo del valor de la evapotranspiración de referencia diaria toma los valores del respectivo decadal del día en que se está haciendo el cálculo.

Las medias decadales (o de grupos de 10 días consecutivos) de los parámetros climáticos diferentes a la temperatura media se utilizan tanto para el cálculo de la serie de evapotranspiración histórica como la serie simulada. No se hace una modelación o simulación estocástica de estas variables (radiación, humedad, velocidad del viento o presión atmosférica) porque se requiere de modelos meteorológicos complejos que consideren interacciones físicas que sobrepasan el alcance de este proyecto.