



Financiado por
la Unión Europea



ANÁLISIS DE RIESGO CLIMÁTICO DE INUNDACIONES PARA LA CIUDAD DE LATACUNGA

PRODUCTO 5: INFORME FINAL DE LA CONSULTORÍA:
IDENTIFICACIÓN, DESCRIPCIÓN E INTERPRETACIÓN DE
RESULTADOS, PLANTEAMIENTO DE MEDIDAS DE ADAPTACIÓN A
CORTO, MEDIANO Y LARGO PLAZO.

Quito, 31 de julio del 2024



Financiado por
la Unión Europea



Equipo consultor:

Rommel Caiza Quinga, Ing.

Mercy Borbor Córdova, Ph. D

Luis Muñoz Pabón, Ing.

Angel Valdiviezo Ajila. M.Sc.

Verónica Almache. Ing.

ACRONIMOS

HEC-RAS	Modelado hidráulico “Hydrologic Engineering Center’s River Analysis System
HEC-HMS	Modelo Hidrológico “Hydrologic Engineering Center’s Hydrologic Modeling System.
INAMHI	Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología
INEC	Instituto Nacional de Estadística y Censos
IPCC	Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (por sus siglas en inglés)
MAATE	Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica.
MAG	Ministerio de Agricultura y Ganadería
MDT	Modelo Digital de Terreno
SGR	Secretaría de Gestión de Riesgos
SIG	Sistema de Información Geográfica
SIGTIERRAS	Sistema de Información Geográfica de Gestión de Tierras Rurales

TABLA DE CONTENIDO

ACRONIMOS	4
Índice de ilustraciones	6
Índice de tablas	7
1. Antecedentes	8
2. Objetivo y actividades.....	8
2.1. Objetivo de la consultoría	8
2.2. Objetivo del producto	9
3. Inundaciones urbanas: fuentes y causas.....	9
4. Inundaciones en la ciudad de Latacunga	11
4.1. Identificación y localización de zonas recurrentes de inundación histórica.....	12
4.2. Sistematización de evidencia científica	14
4.3. Modelos de impacto biofísico – Inundaciones fluviales	24
4.3.1. Escenarios en el periodo histórico.....	24
4.3.2. Proyecciones futuras: Años Tipo (AT) SSP5 8.5 2020-2050.....	27
4.3.3. Proyecciones futuras: “Series Largas” SSP5 8.5 2015-2100	30
4.3.4. Caracterización de zonas impactadas.	33
5. Propuesta de medidas de adaptación	37
5.1. Prioridad para la implementación	44
6. Sigüientes pasos: Integración de la gestión de riesgos y adaptación en la planificación del territorio.	50
7. Recomendaciones.....	53
8. Bibliografía.....	55
9. Anexo.....	58
Anexo 1: Archivos del taller dirigido al equipo de trabajo del GADM de Latacunga en torno al procesamiento del modelo de impactos biofísicos de inundaciones y los resultados logrados con esta consultoría	58
Anexo 2: Producto 4: Sistematización de las corridas finales del modelo de impacto biofísico para la ciudad de Latacunga.....	58
Anexo 3: Material GIS utilizado para realizar los mapas de Impacto.....	58

INDICE DE ILUSTRACIONES

Figura 1 Tipos de inundaciones urbanas. Modificado y traducido de GFDRR 2023. https://www.gfdr.org/en/publication/urban-flood-risk-handbook-assessing-risk-and-identifying-interventions	11
Figura 2 Integración del modelo de a) susceptibilidad nacional y b) densidad de eventos para c) índice de susceptibilidad urbana. Fuente: Elaboración propia	12
Figura 3 Índice de susceptibilidad urbana e infraestructuras esenciales a)Educación, b)Salud y c) Vía Estatal. Fuente: Elaboración propia.....	13
Figura 4 Climatología de precipitación mensual (1985 -2015) del cantón Latacunga, Cotopaxi.	15
Figura 5 Tendencia de la precipitación anual del periodo histórico (1985 -2015) y proyección SSP5 8.5 (2015-2100) en la ciudad de Latacunga.....	16
Figura 6 Mapa de impacto por nivel de la lámina de agua en los escenarios Tr = 5, 25, 50 y 100 años en el río Cutuchi y Pumancuchi.....	26
Figura 7 Mapa de impacto por velocidad del flujo de agua en los escenarios Tr = 5, 25, 50 y 100 años en el río Cutuchi y Pumancuchi.....	26
Figura 8 Mapa de impacto por nivel de la lámina de agua en los escenarios Tr = 50 años en el río Cutuchi y Pumancuchi en los diferentes Años Tipo	28
Figura 9 Mapa de impacto por nivel de la lámina de agua en los escenarios Tr = 100 años en el río Cutuchi y Pumancuchi en los diferentes Años Tipo.	29
Figura 10 Mapa de impacto por nivel de la lámina de agua en los escenarios de la proyección futura “series largas” SSP5 8.5 2015 -2100 en el río Cutuchi y Pumancuchi.	32
Figura 11 Las soluciones basadas en la naturaleza (SbN) consideran los servicios ecosistémicos para reducir los riesgos de desastres, contribuye a la adaptación y mitigación al cambio climático (Fuente: De las palabras a la acción, UNDRR 2021).	40
Figura 12 Esquema de un Jardín de lluvia diseñado para el Cantón Durán en el marco del proyecto RESCLIMA, ESPOL 2020	45
Figura 13 Componentes de un Sistema de Alerta Temprana. Fuente: ESPOL, 2022	47
Figura 14 Ejemplos de revegetación y estabilización de taludes en quebradas y/o cerros. Fuente: UNDRR, 2024	48
Figura 15 Ejemplo de recuperación de canales y quebradas.	49

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Matriz de recopilación de evidencia científica para la evaluación de amenazas climáticas, tendencias y variabilidad, proyecciones, impactos y modelaciones.....	19
Tabla 2 Clasificación de las velocidades alcanzadas para determinar el nivel de impacto.....	25
Tabla 3 Matriz comparativa del Impacto Biofísico del periodo histórico de acuerdo al nivel de impacto por inundación en los TR 5, 25, 50 y 100 años, en superficie.....	26
Tabla 4 Matriz comparativa del Impacto Biofísico del periodo histórico de acuerdo al nivel de impacto por velocidad del flujo de agua en los TR 5, 25, 50 y 100 años, en longitud.....	27
Tabla 5 Variación de los años tipo en la estación M0064 de los Años Tipo que presentan mayor variabilidad.....	27
Tabla 6 Matriz comparativa del incremento de precipitación para los Tr de 50 y 100 años en función de la variación porcentual señalada.....	28
Tabla 7 Matriz comparativa del Impacto Biofísico del periodo histórico de acuerdo con el nivel de impacto por inundación en los TR 50 y 100 años para el AT1, AT4 y AT5, en superficie.....	29
Tabla 8 Matriz comparativa del Impacto Biofísico del periodo histórico de acuerdo con el nivel de impacto por velocidad del flujo en los TR 50 y 100 años para el AT1, AT4 y AT5, en longitud .	30
Tabla 9 Incremento de la precipitación en los periodos de retorno extremos para los dos periodos de tiempo (2015-2050; 2050-2100) de las proyecciones futuras “series largas”.....	30
Tabla 10 Matriz comparativa del Impacto Biofísico del periodo histórico de acuerdo con el nivel de impacto por inundación en los TR 50 y 100 años para las series largas, periodo 2015 - 2020 y 2020 – 2100, en superficie.....	32
Tabla 11 Matriz comparativa del Impacto Biofísico del periodo histórico de acuerdo con el nivel de impacto por velocidad del flujo de agua en los TR 50 y 100 años para las series largas, periodo 2015 - 2020 y 2020 – 2100, en longitud.....	33
Tabla 12 Matriz comparativa de impactos biofísicos por inundaciones y velocidad del flujo de agua para los periodos de retorno extremos (50 y 100 años) en los sectores con un nivel de impacto alto y muy alto.....	34
Tabla 13 Sitios identificados como inundables en la ciudad de Latacunga.....	36
Tabla 14 Instrumentos de política pública ecuatoriana que se relacionan con las acciones de adaptación al cambio climático y la reducción de riesgos de desastres.....	38
Tabla 15 Medidas de adaptación que pueden ser implementadas por el GAD Municipal de Latacunga.....	42
Tabla 16 Matriz de priorización de las acciones/medidas para inundaciones en la ciudad de Latacunga.....	44

1. ANTECEDENTES

Las ciudades, al concentrar una gran densidad poblacional se presentan como puntos especialmente vulnerables a los efectos del cambio climático. Esta vulnerabilidad se manifiesta en la exposición de un mayor número de habitantes a eventos climáticos extremos, como inundaciones, deslizamientos, olas de calor, heladas y sequías, lo que agrava los desafíos de la planificación urbana (IPCC, 2022; Dodman et al., 2022). En América Latina, y particularmente en Ecuador, la situación se complica aún más debido al rápido y desordenado proceso de urbanización, que ha llevado a que entre un 40 y 60% del territorio urbano esté ocupado por asentamientos informales. Estos asentamientos, sin infraestructura básica y en zonas de alto riesgo, aumentan la susceptibilidad a desastres como inundaciones y deslizamientos, lo que subraya la importancia de identificar las áreas de mayor impacto para implementar estrategias efectivas de adaptación al cambio climático y reducción del riesgo de desastres.

En respuesta a estos desafíos, el Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica (MAATE) ha desarrollado el Plan Nacional de Adaptación, que incorpora metodologías de análisis sectorial de riesgo climático basadas en modelos de impactos biofísicos para sectores clave, incluyendo los asentamientos humanos. Este plan, que marca un hito en la adaptación al cambio climático en Ecuador, propone una clasificación de abordajes metodológicos en tres niveles: construcción participativa del riesgo climático (Nivel I), análisis estadístico a través de indicadores (Nivel II), y modelación biofísica (Nivel III). Para asentamientos humanos, el Plan Nacional de Adaptación sugiere la aplicación de la modelación biofísica para evaluar el riesgo de inundaciones y de deslizamientos.

En este contexto y alineado con el esfuerzo por potenciar la transición hacia ciudades resilientes mediante un conjunto de acciones consensuadas y meditadas por el Comité Consultivo Nacional (CCN), del que forma parte la WWF como Coordinador Técnico, y en cumplimiento con los compromisos adquiridos al adherirse al Pacto Global de Alcaldes por el Clima y la Energía, se realiza la consultoría “Generación de un análisis de riesgo climático de inundaciones para la ciudad de Latacunga, mediante la modelación de impactos biofísicos”. Así, este informe busca analizar los potenciales impactos biofísicos y antrópicos a partir de los resultados alcanzados y proponer medidas de adaptación congruentes al contexto y a los niveles de riesgo climático por inundaciones estimados para la ciudad de Latacunga. La metodología empleada para este análisis sigue las directrices del Plan Nacional de Adaptación, abarca desde la revisión de información para consolidar datos de entrada requeridos hasta la modelación hidráulica e hidrológica, usando herramientas especializadas como HEC-HMS y HEC-RAS.

2. OBJETIVO Y ACTIVIDADES

2.1. OBJETIVO DE LA CONSULTORÍA

Generar un análisis de riesgo climático de inundaciones para la ciudad de Latacunga, mediante la modelación de impactos biofísicos.

2.2. OBJETIVO DEL PRODUCTO

- Compilar, analizar y sistematizar referencias bibliográficas que aporten evidencia para la interpretación de los resultados del modelo de impacto biofísico por inundaciones de la ciudad de Latacunga.
- Según los resultados del producto 2. “Identificación y localización de zonas recurrentes históricas a inundaciones” y el producto 4. “Corridos finales del modelo de impacto biofísico para inundaciones”, identificar, describir e interpretar los potenciales impactos biofísicos y antrópicos; y derivar medidas de adaptación que puedan ser asumidas por el GADM de Latacunga en el corto, mediano y largo plazo.

Como parte de las actividades en territorio desarrolladas en este producto, se tiene:

Actividad	Fecha	Lugar
Taller para la identificación y priorización de medidas de mitigación y adaptación para inundaciones.	18 de julio del 2024	Palacio Municipal
Taller teórico-práctico para el manejo de información censal para el cálculo de la vulnerabilidad	2 de agosto del 2024	Casa de los Marqueses
Presentación final de los resultados obtenidos de los modelos de impacto biofísico e identificación de medidas de adaptación que puedan ser adoptadas por el GADM de Latacunga	5 de agosto del 2024	Palacio Municipal

Nota: El detalle de estos eventos se puede ver en el ANEXO 1.

3. INUNDACIONES URBANAS FUENTES Y CAUSAS

Las inundaciones urbanas pueden tener causas y consecuencias muy diversas. Por ejemplo, las inundaciones en ciudades costeras del Ecuador se deben a la instalación de drenajes por debajo de cotas de inundación o marea, la falta de muros de contención, mala planificación urbana o falta de protección de los ecosistemas costeros. Por otra parte, en la Sierra Ecuatoriana las inundaciones se deben principalmente al aumento de suelos impermeables y taponamiento u

obstrucción de drenajes naturales como quebradas y/o ríos que en conjunto con la deforestación de laderas generan aumentos significativos en la escorrentía superficial. Aparte de los diversos orígenes de las inundaciones, otros factores, como las variaciones en la elevación del terreno, pueden provocar comportamientos muy diferentes de las inundaciones urbanas.

El Banco Internacional de Reconstrucción y Fomento (GFDRR, por sus siglas en inglés) que es administrado por el Banco Mundial, en 2023 postula que, a partir del entendimiento de diversos eventos históricos a nivel mundial, queda claro la importancia de comprender las características de cada inundación específica, ya que pueden ser muy diferentes y requerir enfoques distintos y por lo tanto es necesario considerar aspectos específicos como:

Origen/Fuente de la inundación: lluvia directa, ríos caudalosos, costas, lagos interiores, zonas montañosas y aguas subterráneas.

Causas de la inundación: desde bloqueos, erosión, brechas o fallos estructurales (rotura de presas o diques, desbordamiento de lagos glaciares -comúnmente denominadas GLOF-, rotura de dunas, etc.) hasta la falta de capacidad de drenaje.

Geografía de la zona receptora: puede ser escarpada, plana o restringida, y también puede presentar hundimientos naturales o inducidos por el hombre.

Velocidad de inicio de la inundación: puede ser rápida con poca antelación o lenta con tiempo suficiente para tomar precauciones.

Ocurrencia conjunta de deslizamientos de tierra: incluyendo derrubios y deslizamientos de lodo.

Con estas consideraciones el GFDRR en 2023, a través de su *Manual de Riesgo de Inundaciones Urbanas: Evaluación del Riesgo e Identificación de Intervenciones*, analiza cuatro tipos principales de inundaciones urbanas: fluviales (de río), pluviales (por lluvia), costeras y repentinas (Figura 1). Concluyendo que, cada tipo de inundación requiere un enfoque de modelización diferente que contiene algunos aspectos comunes, pero también diferencias técnicas clave. Es importante tener en cuenta que un peligro de inundación también puede aumentar en condiciones futuras, por ejemplo, en zonas costeras bajas debido a la subida del nivel del mar o en algunos casos agravado por el hundimiento del terreno. Estas zonas pueden sufrir más inundaciones costeras y también ser más propensas a inundaciones pluviales por los problemas de drenaje derivados del aumento del nivel del mar.

En las ciudades en zonas altas, hay que considerar la contribución de las cuencas aportantes y la escorrentía en cuenca alta y velocidades de los flujos que pueden provocar socavamiento en puentes urbanos o acumulación de sedimentos en canales de drenaje. La morfología urbana que ha modificado los cauces naturales y la cobertura de suelo original son factores importantes que deben ser consideradas en las inundaciones urbanas. Finalmente, es importante mapear la infraestructura crítica urbana como, por ejemplo: sistemas de energía, reservorios de agua, redes de tuberías, desagües y alcantarillas que manejan el agua de lluvia y las aguas residuales, estaciones de bombeo, diques y muros de contención, puentes y vías primarias, hospitales y centros de salud, estaciones de emergencia y rescate, así como sistemas de comunicación. Luego integrar esta información con las zonas susceptibles a inundación para establecer medidas y estrategias de resiliencia y mitigación del riesgo.

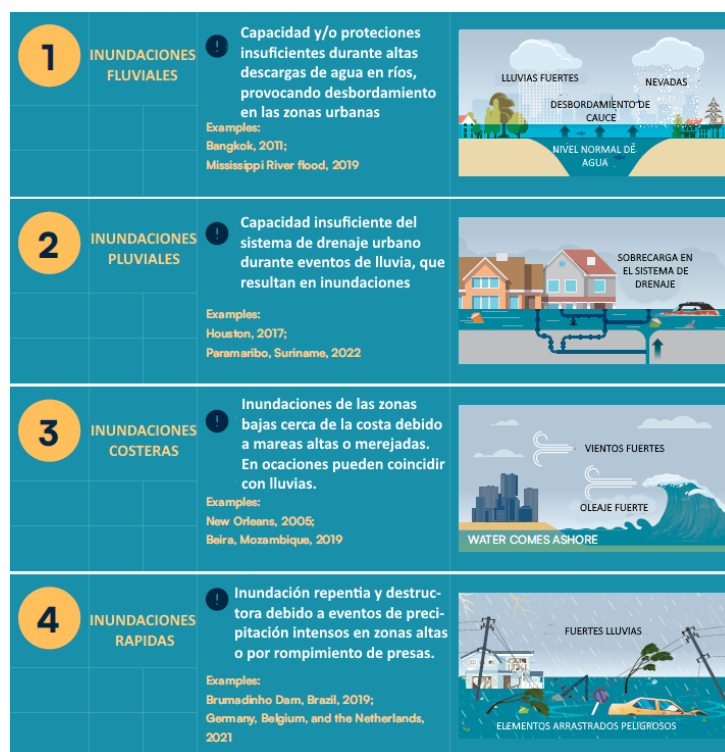


Figura 1 Tipos de inundaciones urbanas. Modificado y traducido de GFDRR 2023.
<https://www.gfdr.org/en/publication/urban-flood-risk-handbook-assessing-risk-and-identifying-interventions>

4. INUNDACIONES EN LA CIUDAD DE LATACUNGA

Los resultados presentados en esta consultoría se han enfocado exclusivamente en la evaluación de los modelos biofísicos para inundaciones fluviales en la ciudad de Latacunga. La modelación de este tipo de inundación ha sido implementada en el Plan Nacional de Adaptación, en particular para el sector de asentamientos humanos. Este enfoque específico permite una evaluación detallada del comportamiento del afluente principal durante eventos de precipitación extrema, proporcionando información clave para la planificación territorial en un ámbito de adaptación al cambio climático y reducción del riesgo de desastres.

Sin embargo, es importante subrayar que, en una ciudad andina como Latacunga, las inundaciones pluviales también representan un impacto significativo en los asentamientos humanos, causadas principalmente por la escorrentía superficial y taponamiento de sistemas de drenaje en áreas urbanizadas. Una aproximación del nivel de impacto para este tipo de inundaciones se presenta en un modelo de susceptibilidad urbana en el producto 4 de esta consultoría y en el anexo 2 de este producto.

Bajo este contexto, en esta sección se presenta la descripción e interpretación de los potenciales impactos biofísicos y antrópicos; y que permita derivar en medidas de adaptación aplicables por el GADM de Latacunga. En tal sentido, esta sección se divide en los siguientes acápite:

- i) Identificación y localización de zonas recurrentes de inundación

- ii) Sistematización de evidencia científica para interpretación de resultados de impacto biofísico.
- iii) Modelos de impacto biofísico.

4.1. IDENTIFICACIÓN Y LOCALIZACIÓN DE ZONAS RECURRENTES DE INUNDACIÓN HISTÓRICA

En el marco de esta consultoría, se identificaron y localizaron las zonas recurrentes de inundaciones en la ciudad de Latacunga. La metodología¹ aplicada responde a la integración del mapa de susceptibilidad a inundaciones del MAATE (2023) (Figura 2a) y la densidad de eventos de inundación de la ciudad (la Secretaría de Gestión de Riesgos (SGR) del 2010 al 2024 y del Cuerpo de Bomberos de Latacunga (2020-2024) (Figura 2b). La operación booleana utilizada es un producto espacial entre la susceptibilidad y la frecuencia de eventos (densidad) para luego ser reclasificada en cinco clases (1. Muy bajo, 2. Bajo, 3. Medio, 4. Alto, 5. Muy Alto) (Figura 2c).

De este análisis se reveló que varias áreas críticas con alta susceptibilidad a inundaciones generalmente coinciden con sectores de baja elevación, alta densidad urbana, y sistemas de drenaje insuficientes. En áreas urbanas densamente pobladas, la susceptibilidad es alta por la significativa impermeabilidad del terreno, causada por superficies duras como el concreto y el asfalto, lo que incrementa mucho el volumen de escorrentía superficial. En la figura 2c se puede apreciar que la zona centro sur de la ciudad en los sectores de San Felipe, Terminal Terrestre y Belisario Quevedo presenta los mayores niveles de exposición a inundaciones (Alta, Muy Alta). En términos generales el 14% (6.3 Km²) de la zona urbana de la ciudad presenta un nivel de exposición a inundaciones “Alto”, mientras que el 8% (3.6 Km²) se encuentra en “Muy Alto”.

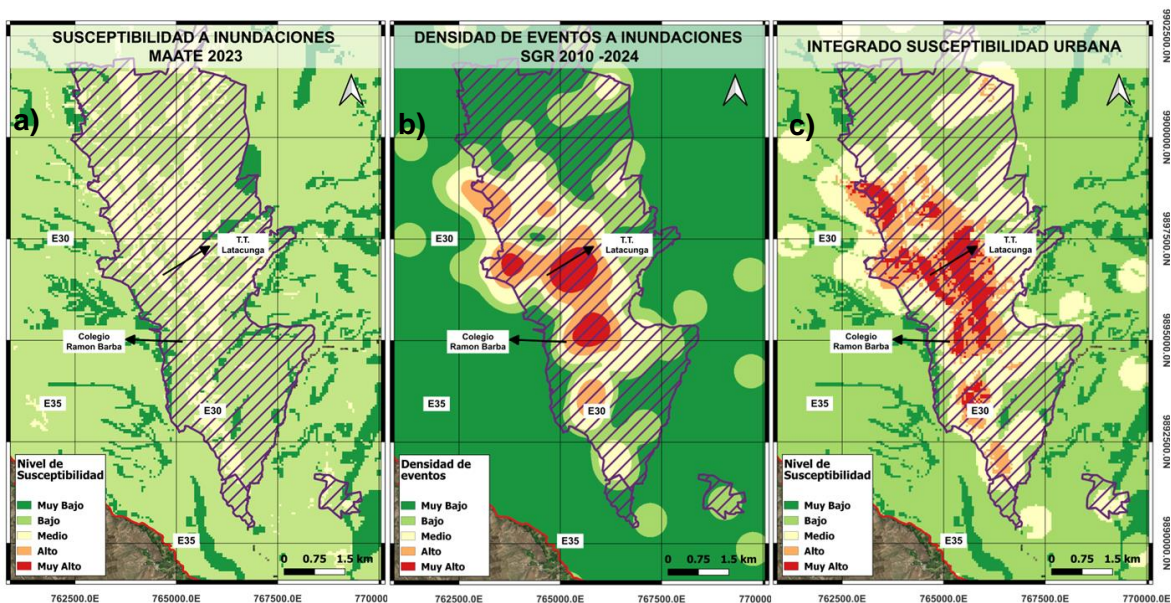


Figura 2 Integración del modelo de a) susceptibilidad nacional y b) densidad de eventos para c) índice de susceptibilidad urbana. Fuente: Elaboración propia

¹ El detalle de esta identificación se presenta en el informe técnico “Sistematización del proceso de identificación y localización de zonas recurrentes históricas a inundaciones en la ciudad de Latacunga”.

A partir de estos resultados se integró el índice de susceptibilidad urbana (figura 2c) y la infraestructura esencial de la ciudad; educación, salud y vías. De tal manera que, en el sector educativo, las unidades educativas analizadas que están en zonas de susceptibilidad muy alta corresponden al 29 % secundaria (17% en Alta), el 10 % Educación inicial (0% en Alta), el 17 % Básica (5% en Alta) y el 12 % Superior (5% en Alta).

En relación con la infraestructura de salud se tiene que el 15 % de hospitales de primer nivel se encuentran en zonas con un nivel de susceptibilidad “Muy Alta” y el 8% en un nivel “Alto”. Respecto a los hospitales de segundo nivel, el 66% se encuentra en zonas de nivel “Alto”. Los centros de salud o centros ambulatorios ubicados en las zonas rurales son los menos expuestos.

Y para el sector de movilidad se observa que la vía E30 que cruza la ciudad para luego conectarse con La Mana es la más expuesta. En el tramo de la Empresa Pública de Movilidad y Terminal Terrestres (Centro - Sur) se tiene un tramo de al menos 1.9 km con nivel “Muy Alto” y 2 Km con nivel “Alto”. Mientras que el tramo que conecta el terminal con el redondel de Pujilí tiene 1.1 Km “Muy Alto” y 0.3 Km en nivel “Alto”.

En la figura 3a, 3b y 3c se presentan los mapas del índice de susceptibilidad urbana para cada sector esencial analizado.

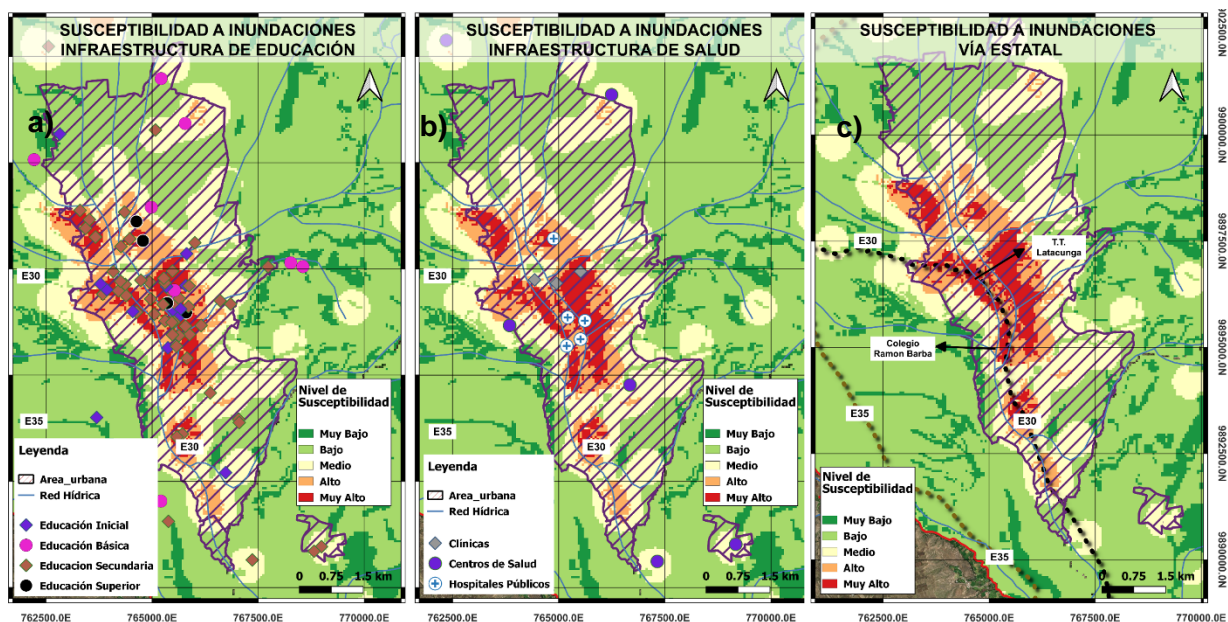


Figura 3 Índice de susceptibilidad urbana e infraestructuras esenciales a)Educación, b)Salud y c) Vía Estatal. Fuente: Elaboración propia

Además, en esta etapa se identificó que sectores como:

- San Felipe – Barrio Chantan
- San Felipe – Barrio 4 esquinas

- Sector del Hospital General Latacunga
- Parque Náutico
- Sector del conjunto habitacional Belo Horizonte
- Isimbo 1
- Isimbo 2

Aunque sufren inundaciones, se clasifican como inundaciones pluviales producto de la escorrentía urbana en las zonas altas con una limitada red de drenaje o alcantarillado, que no puede colectar el volumen de la escorrentía durante un evento de lluvia extremo. Como se mencionó en la sección anterior, el tipo de inundaciones pluviales no están consideradas en el marco de esta consultoría, sin embargo, son incluidas dentro del análisis y priorización de las medidas de adaptación (sección 5).

La información obtenida de este análisis es fundamental para la formulación de medidas de adaptación y el desarrollo de ordenanzas municipales que promuevan un enfoque integral en la gestión del riesgo, incorporando soluciones basadas en la naturaleza junto con las infraestructuras tradicionales. Este enfoque integral, que busca construir de manera más resiliente y reducir el riesgo de desastres en áreas urbanas, resulta esencial para enfrentar los desafíos actuales y futuros. La integración de estos datos y los modelos de impacto biofísico, como se detalla en la sección 4.3.4, contribuirá de manera significativa a fortalecer la resiliencia urbana frente a eventos de inundación, asegurando que las comunidades sean más resilientes.

4.2. SISTEMATIZACIÓN DE EVIDENCIA CIENTÍFICA

En esta sección se busca sistematizar los principales hallazgos de los análisis climáticos, modelación hidrológica, hidráulica, integrados en SIG respaldados por argumentos y referencias científicas, que demuestran que la intensidad de la precipitación diaria está aumentando en la región de los Andes tropicales (Alta confianza). En este análisis se ha aplicado un enfoque robusto de tendencias estadísticas (históricas y de proyecciones futuras), de integración de modelos climáticos, hidrológicos, hidráulicos con álgebra de mapas en un SIG para evaluar más confiablemente la escala de Latacunga.

La comprensión de los patrones climáticos y su variabilidad es esencial para la identificación de tendencias históricas de precipitación y caudales, junto con proyecciones futuras que puedan influir en la magnitud y frecuencia de eventos de inundación. Según Vervoort et al. (2023), la integración de datos históricos y modelados proporciona una visión más comprensiva del comportamiento hidrológico en regiones montañosas como los Andes, donde Latacunga se ubica. Además, la investigación de Alfieri et al. (2022) enfatiza la importancia de utilizar modelos de alta resolución espacial y temporal para capturar con mayor precisión los eventos extremos, lo cual es esencial para la región andina ecuatoriana y contextualizarlo a nivel del cantón y de la ciudad de Latacunga.

La evidencia científica sugiere que el cambio climático está alterando los patrones de precipitación, aumentando tanto la frecuencia como la intensidad de los eventos extremos. En estudios como los de IPCC (2022) y Kundzewicz et al. (2022), Pabon et al, 2020 se destaca que las proyecciones climáticas para regiones andinas muestran una tendencia hacia precipitaciones más intensas y concentradas en periodos más cortos (Vuille et al 2000). En este estudio, se evidenciaron tendencias y patrones de precipitación similares hacia el noreste y centro del cantón

Latacunga, lo que podría exacerbar los riesgos de inundación. Estos hallazgos deben ser integrados en los modelos de adaptación al cambio climático y gestión de riesgos para desarrollar estrategias de planificación territorial (Llambi et al., 2021).

Asimismo, la incorporación de estudios sobre la resiliencia de los ecosistemas locales y su capacidad de mitigación frente a eventos de inundación es crucial. Según *IPCC (2022)*, las áreas con una alta biodiversidad y vegetación natural presentan una mayor capacidad de absorción de agua, lo que puede reducir la severidad de las inundaciones (Llambi & Garces, 2021).

Bajo este contexto, los resultados de los modelos de impacto biofísicos, especialmente en áreas como Latacunga, donde los fenómenos extremos pueden tener repercusiones significativas en el territorio parten de la caracterización climática² realizada en este estudio. Esta caracterización se da en función de la información climática oficial del Ministerio del Ambiente Agua y Transición Ecológica planteada en el Plan Nacional de Adaptación con una resolución de 10 km para el período 1985-2015, lo que permite una visión detallada de la climatología del cantón, además de establecer una línea base sobre la cual se pueden evaluar las tendencias (proyecciones SSP5-8.5 2020-2050 (Años Tipo) y SSP5 8.5 2015-2100 (Series largas) e impactos futuros.

La identificación de patrones de precipitación y temperatura es crucial para anticipar posibles escenarios de riesgo basados en la data climática histórica (Potter et al., 2023). Los picos de precipitación en los meses de marzo y abril, así como un segundo máximo relativo en octubre y noviembre, destacan un régimen bimodal de precipitación (Figura 4), que es característico de la región Interandina (Campozano et al., 2016). Este conocimiento es vital para centrar esfuerzos para aumentar la adaptación de los territorios, reducir los riesgos y preparación en las épocas de mayor riesgo. La literatura respalda la importancia de caracterizar adecuadamente los patrones climáticos locales para mejorar la precisión de los modelos predictivos y la planificación de adaptación y respuesta (Maldonado, Becerra y Cuesta, 2012).

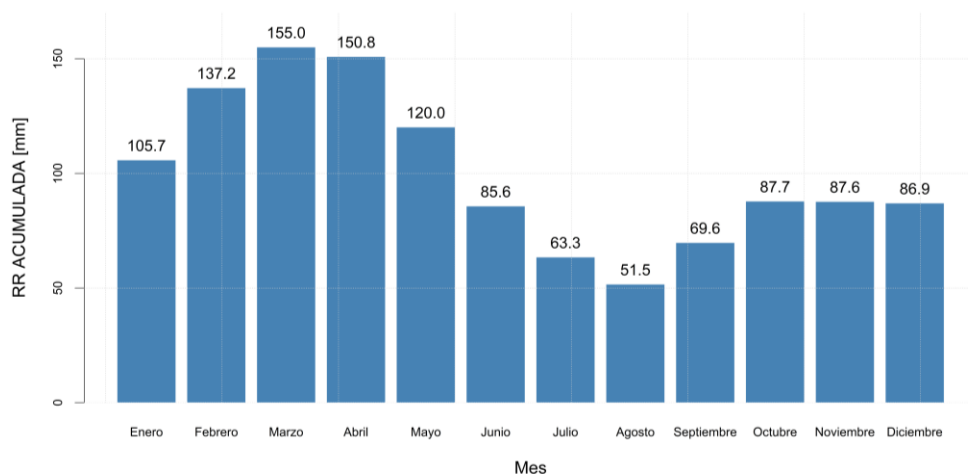


Figura 4 Climatología de precipitación mensual (1985 -2015) del cantón Latacunga, Cotopaxi.

² La caracterización climática de la ciudad de Latacunga se puede observar con mayor detalle en el informe técnico “Sistematización de las corridas finales del modelo de impacto biofísico para la ciudad de Latacunga (Producto 4)”.

Con la base de la información histórica, se planteó la evaluación de los escenarios de cambio climático para determinar, a partir de datos modelados, las tendencias de variación en variables climáticas como la precipitación y las temperaturas. La interacción de los datos climáticos históricos con las bases de eventos de inundaciones reportados permite establecer relaciones de causalidad y construir una base de comprensión sólida para la evaluación de posibles eventos futuros. Los escenarios climáticos proyectados, como los "Años Tipo" del escenario SSP5 8.5 (2020-2050), y las series largas SSP5 8.5 2015-2100, permiten anticipar las condiciones climáticas que podrían presentarse en el futuro (MAATE, 2023).

Estos Años Tipo representan diferentes configuraciones climáticas plausibles que podrían ocurrir en el periodo 2020-2050, y ofrecen un marco para centrar los esfuerzos de mitigación y adaptación en la preparación ante eventos extremos futuros. El análisis de variaciones en el percentil 95th de precipitación en estos escenarios muestra un posible incremento en la intensidad de los eventos extremos, con un aumento proyectado de entre 3 y 6 mm/día en los eventos más severos. Esto sugiere que el umbral de precipitación extrema crecerá, lo que indica una mayor probabilidad de eventos de mayor intensidad en el futuro. De igual manera, las denominadas "Series Largas" aunque no capturan completamente la extrema variabilidad observada en el pasado, la precipitación sugiere una tendencia positiva, manteniéndose en un rango más estrecho entre 600 mm y 800 mm anuales (Figura 5). Los resultados de las proyecciones futuras reflejan los posibles efectos del cambio climático en la región y los desafíos inherentes a la modelación climática en regiones específicas.

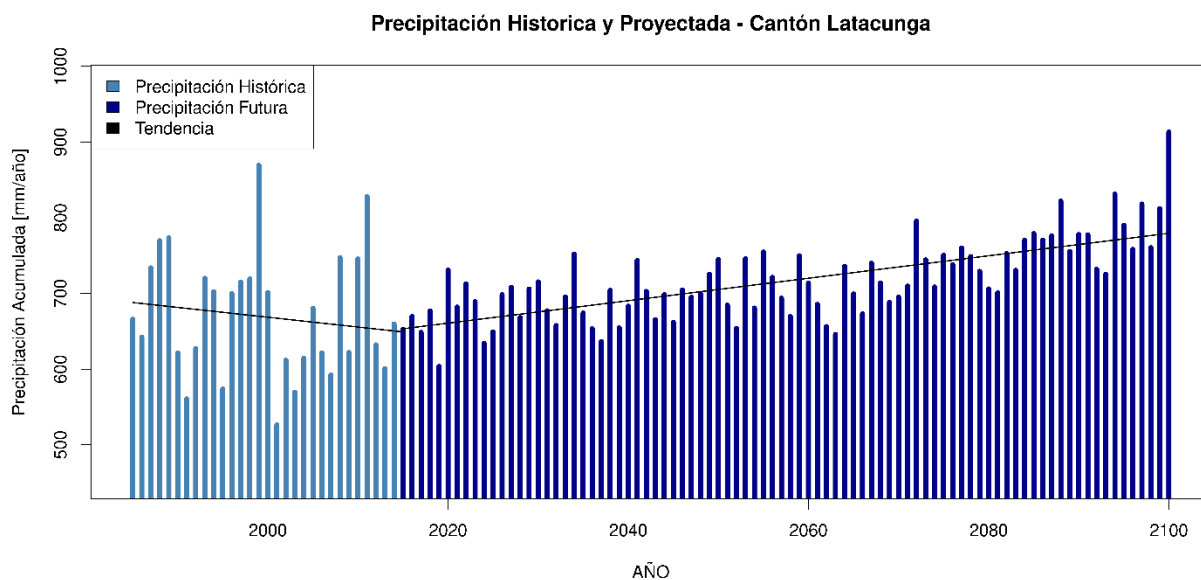


Figura 5 Tendencia de la precipitación anual del periodo histórico (1985 -2015) y proyección SSP5 8.5 (2015-2100) en la ciudad de Latacunga.

La comprensión detallada de los patrones climáticos históricos y proyectados establece un fundamento sólido para aplicar modelos de impacto biofísico, especialmente en relación con inundaciones. La identificación de tendencias de cambio en la precipitación y la temperatura proporciona información clave para ajustar los modelos que simulan el comportamiento de las cuencas hidrográficas y la respuesta del terreno ante eventos climáticos extremos, lo que es

esencial para planificar adecuadamente las intervenciones de mitigación y adaptación en Latacunga.

Además, la integración de la data histórica y los patrones de cambio en función de indicadores climáticos extremos permiten el cálculo de períodos de retorno (Tr^3) y su variación en el futuro. La representación de los modelos de impacto biofísico para inundaciones en función de los Tr son una herramienta efectiva para la gestión del riesgo, ya que nos permite superar las limitaciones de un conjunto de datos históricos fijo al extrapolar basándonos en principios estadísticos y físicos científicamente justificados.

Los modelos que utilizan series futuras mejoran la precisión de las estimaciones de riesgo desde una perspectiva a largo plazo, en lugar de depender únicamente de un registro corto de datos, lo que permite una mejor comprensión de las inundaciones.

La utilidad de usar períodos de retorno (Tr) radica en la capacidad de evaluar la probabilidad y la frecuencia de eventos extremos, como inundaciones, tormentas, terremotos, entre otros, y planificar adecuadamente para mitigar sus impactos (Buytaert et al., 2006). Aquí hay algunos ejemplos para ilustrar su utilidad:

- **Planificación de Infraestructura**

Ejemplo: Si una ciudad está diseñando un nuevo sistema de drenaje urbano, conocer el período de retorno de una inundación de gran magnitud (por ejemplo, una vez cada 50 años) ayuda a dimensionar el sistema para manejar dicho evento.

- **Construcción de Edificaciones:**

Ejemplo: Al construir una represa, es crucial considerar eventos extremos, como lluvias intensas. Si los ingenieros saben que una tormenta severa con un período de retorno de 500 años podría ocurrir, diseñarán la represa para soportar tales condiciones y prevenir posibles desastres.

- **Gestión de Riesgos en Seguros:**

Ejemplo: Las compañías de seguros utilizan períodos de retorno para evaluar el riesgo de desastres naturales y calcular las primas de seguro.

- **Planificación Urbana y Zonas de Inundación:**

Ejemplo: Al desarrollar planes de uso del suelo, los planificadores urbanos utilizan períodos de retorno para identificar y designar zonas de alto riesgo. Si un área se inunda una vez cada 20 años, esa información se utilizará para limitar el desarrollo en esa zona o para implementar medidas de protección adicionales, como diques o sistemas de drenaje mejorados (Dharmarathne et al., 2024).

- **Preparación para Desastres:**

Ejemplo: Las direcciones de gestión de riesgos y emergencias utilizan períodos de retorno para desarrollar planes de respuesta y evacuación. Conociendo que una gran tormenta tiene un período de retorno de 50 años, las comunidades pueden preparar protocolos de emergencia y realizar simulaciones y simulacros para estar listas cuando ocurra el evento.

³ Indicador de precipitaciones extremas que determinan la probabilidad de ocurrencia de algún evento de precipitación con cierta magnitud durante un periodo de tiempo específico (Jiao et al., 2024). Por ejemplo, si un evento tiene un periodo de retorno de 200 años, esto no significa que el evento ocurra cada 200 años, sino que la probabilidad de ocurrencia en un año es del 0.5%.

Integración de las proyecciones climáticas en los modelos de impacto biofísico

Esta integración de las proyecciones climáticas con los modelos de impacto biofísico para inundaciones, HEC-HMS y HEC-RAS permite generar escenarios de caudales y niveles de agua futuros bajo diferentes trayectorias de emisiones, considerando incertidumbres inherentes a las proyecciones climáticas. En el caso de este estudio se realiza para escenarios de cambio climático SSP5 8.5⁴.

Investigaciones recientes han demostrado que la incorporación de escenarios de cambio climático en HEC-HMS y HEC-RAS mejora la capacidad de los modelos para predecir la respuesta de cuencas y sistemas fluviales a eventos extremos en el futuro, lo que es crucial para la planificación a largo plazo de infraestructuras y la gestión de riesgos hídricos.

Aplicaciones y Estudios de Caso

- **Estudio de Caso en el Río Nzoia, Kenia:** Ghimire et al. (2019) utilizaron HEC-HMS junto con proyecciones climáticas para evaluar la respuesta hidrológica del río Nzoia a diferentes escenarios de cambio climático. El estudio mostró un aumento en la magnitud y frecuencia de eventos extremos, lo que llevó a recomendaciones para mejorar las infraestructuras de defensa contra inundaciones.
- **Evaluación de Inundaciones en el Río Santa Lucía, Uruguay:** Mendoza et al. (2018) aplicaron HEC-RAS para modelar la propagación de inundaciones en el río Santa Lucía bajo escenarios de cambio climático, encontrando que la capacidad actual del cauce podría ser superada en eventos extremos futuros, lo que subraya la necesidad de reevaluar las políticas de manejo de cuencas. En la sección 4.3 se da mayor detalle al uso de los modelos de impacto biofísico y su interpretación.

HEC-HMS y HEC-RAS son herramientas que, al integrarse con proyecciones de cambio climático, permiten una planificación más informada y adaptable frente a los desafíos del cambio climático. Su capacidad para simular y proyectar impactos hidrológicos e hidráulicos bajo condiciones futuras es fundamental para la gestión sostenible de los recursos hídricos, la adaptación al cambio climático y la mitigación del riesgo de desastres.

En el presente análisis y en la revisión de literatura, se establece evidencia científica de como el cambio y la variabilidad climática están modificando significativamente los periodos de retorno de precipitación y caudales en los Andes tropicales. La intensificación de la precipitación extrema y los cambios en la estacionalidad y patrones de caudal están acortando estos periodos de retorno, lo que aumenta la frecuencia y severidad de eventos como inundaciones. Esto tiene importantes implicaciones para la planificación de infraestructuras, la gestión de riesgos y las estrategias de adaptación, que deben ajustarse continuamente para enfrentar estos desafíos.

Adicionalmente, a los objetivos planteados a inicios de esta consultoría en la cual solo se planteaba el modelamiento de inundaciones fluviales (Ej. por desbordamientos de ríos), se pudo identificar que estas, no son las únicas que pueden impactar la ciudad. Por eso se decidió hacer

⁴ Escenario más extremo que asume que aún se tiene una muy alta dependencia de los combustibles fósiles, y se tendría un bajo crecimiento en la población, un elevado crecimiento económico y un alto desarrollo humano; por lo que representa un elevado nivel de desafío para la mitigación (IPCC, 2022)

un modelado de susceptibilidad a inundaciones de tipo pluvial (generadas por la acumulación de agua lluvia en zonas bajas o de alta pendiente), para resaltar zonas propensas a inundaciones en sectores fuera del río Cutuchi (Figura 4). Este hallazgo permitió reflexionar sobre la necesidad de reconsiderar utilizar un único modelo para la evaluación del impacto biofísico frente a inundaciones en el sector de asentamientos humanos e identificar previamente el tipo y propósito específico del modelamiento de inundación como el elemento más esencial en el modelado de inundaciones urbanas como se recomienda en el estudio de Qi et al. (2021).

En la tabla 1 se han recopilado algunas referencias científicas que han analizado los temas de amenazas climáticas, tendencias y variabilidad, proyecciones, impactos y modelaciones para identificar zonas con riesgos biofísicos.

Las afirmaciones o hallazgos son expuestos en función de los resultados obtenidos en esta consultoría, en especial al informe técnico “Sistematización de las corridas finales del modelo de impacto biofísico para la ciudad de Latacunga” (Producto 4).

Tabla 1 Matriz de recopilación de evidencia científica para la evaluación de amenazas climáticas, tendencias y variabilidad, proyecciones, impactos y modelaciones

	Afirmación o Hallazgo	Evidencia en Latacunga	Referencias científicas
1	Aumento en la cantidad de precipitación en el periodo histórico.	La evaluación de la precipitación acumulada anualmente evidenció una tendencia negativa para el periodo (1985-2015). Se aprecia que esta tendencia está fuertemente influenciada por los valores de precipitación acumulada de años de precipitaciones intensas como 1997 – 1998, por lo que existe un sesgo que se debería evaluar con una serie de valores más extensa para obtener conclusiones robustas. Hay un crecimiento notable de la precipitación en el período 2000 – 2015, que coincide con las referencias científicas, pero que por la poca cantidad de datos (16 valores) no brinda	La precipitación es una de las variables de evaluación más complicadas, que requieren bases de datos sólidas y verificadas con información de estaciones meteorológicas. La tendencia positiva hacia el final del periodo histórico (2000 - 2015) se alinea con las evidencias globales y regionales del aumento en la cantidad de precipitación. IPCC (2022). Pabón-Caicedo, et al. (2020).

		información robusta con el uso de índices.	
2	Aumento de frecuencia de eventos extremos de precipitación en el periodo histórico.	La evaluación de los días que superan el percentil 95 de precipitación (lluvias intensas) tiene una tendencia positiva en la serie histórica. Otros estudios han evaluado que este cambio está acompañado de un incremento en el número de días sin precipitación. Es decir que, mientras la cantidad anual de precipitación sugiere un aumento, los eventos extremos incrementan porque la precipitación se concentra en menos días.	Estos hallazgos son aún discutidos en la comunidad internacional por la alta variabilidad de la precipitación y sus múltiples influencias, pero existen estudios que refuerzan estos hallazgos con series de datos más sólidas. Se tiene así: <i>IPCC (2022), Ruiz et al. 2008, Urrutia & Vuille 2009, Barros et al. 2014, Magrin et al. 2014, Vuille et al. 2015, Fuentes- Castillo et al. 2020.</i>
3	Variación en patrones de la estacionalidad.	El análisis de la serie histórica mostró que no existe una variación en los patrones de estacionalidad. En el cantón Latacunga existe un régimen de precipitación bimodal con un pico de precipitación entre los meses de febrero y mayo, meses en donde es más probable que existan eventos de precipitación intensa.	Existen estudios que profundizan sobre la variabilidad estacional en zonas andinas de Ecuador. Vuille et al. (2000) Blackmore, et al. (2021)

4	Aumento en la recurrencia de los periodos de retorno de mayor número de años.	<p>El incremento en la cantidad de precipitación y los eventos extremos sugiere un incremento en la ocurrencia de eventos extremos con periodos de retorno cada vez mayores.</p> <p>La evaluación de periodos de retorno requiere una serie de datos histórica que no solo sea modelada, sino también validada con información en territorio.</p>	<p>Existen estudios relacionados a este comportamiento en zonas andinas tropicales como los Andes Peruanos.</p> <p>Potter, et al. (2023)</p>
5	Escenarios de cambio climático SSP5 8.5, intensidad precipitación (2015-2100)	Se denota un incremento significativo en la tendencia de precipitaciones para el período futuro, lo que sugiere un posible aumento en la cantidad de precipitación y los eventos extremos en la zona del cantón Latacunga.	<p>Existen estudios que profundizan estos hallazgos como:</p> <p>IPCC 2022</p> <p>Potter, et al. (2023)</p>
9	Escenarios de cambio climático SSP5 8.5, frecuencia eventos extremos de precipitación SSP5 8.5 (2015-2100)	La metodología empleada para la generación de series en escenarios de cambio climático no permite la evaluación de eventos extremos ya que presenta series suavizadas por la reducción de escala estadística. Es importante que las proyecciones de cambio climático se realicen con reducción de escala dinámica, ya que	<p>Existen estudios que realzan la importancia de generar simulaciones dinámicas por sobre el uso de métodos estadísticos, estas discusiones se han presentado desde hace varios años y se conoce las grandes ventajas de la reducción de escala dinámica.</p> <p>Jang & Kavvas, (2013)</p>

		<p>permite una mejora de la representatividad de los datos de los forzantes climáticos modificados por la compleja topografía de Ecuador. Esto es particularmente importante en estudios de alta relevancia como las comunicaciones nacionales de cambio climático.</p>	<p>Walton et al. (2020)</p> <p>Hellstrom et al. (2001)</p>
10	<p>Tendencias de temperaturas en los períodos histórico y futuro.</p>	<p>La temperatura es una de las variables que se ha estudiado mejor para efectos de cambio climático, pero sus implicaciones a la salud y la forma de determinar sus impactos en territorios requieren análisis más profundos que favorezcan su interpretación. Por eso es muy importante una evaluación detallada de temperaturas e impactos a la salud y a los ecosistemas.</p> <p>Los últimos años han demostrado los potenciales impactos de las variaciones de temperaturas a nivel global del cambio climático, que es una realidad actual. El año 2023 se presentó como el más caluroso registrado y particularmente en el cantón Latacunga los descensos de temperatura</p>	<p>Latacunga, la ciudad más fría de Ecuador en el 2023</p> <p>El análisis de la NASA confirma que 2023 fue el año más cálido registrado</p> <p>Impactos de los incrementos de temperatura en la salud. Hondula et al. (2015)</p>

		<p>pronunciados como los del 2022 han encendido una señal de alerta para poder entender mejor los impactos de las variaciones de temperatura en la salud y el entorno.</p> <p>Las proyecciones SSP585 sugieren un posible incremento de temperaturas máximas de hasta 3°C hasta el 2100.</p>	
11	<p>Un solo modelo de inundación no es suficiente para caracterizar los impactos biofísicos, debido a que estos dependerán de las características urbanas y ecosistémicas de cada región</p>	<p>Los impactos por desbordamiento del río Cutuchi son muy pocos. La data histórica de impactos por inundación en Latacunga se centra en sectores donde la impermeabilización del suelo y la falta de drenaje es el principal factor de inundaciones. Es necesario el levantamiento de información topográfica y batimétrica del río Cunuyacu e Illuchi para modelar sus efectos. Las inundaciones en los barrios altos de Latacunga responden a inundaciones pluviales y no fluviales</p>	<p>El modelado y la simulación de inundaciones urbanas desempeñan un papel significativo en la mitigación de los peligros de inundaciones. Una amplia gama de modelos existentes, incluidos los modelos convencionales de aguas pluviales, pueden predecir los procesos de inundaciones urbanas. Sin embargo, la selección del modelo adecuado para un propósito específico es uno de los elementos más esenciales en el modelado de inundaciones urbanas. Algunos modelos son mejores para las cuencas urbanas que se ocupan de pequeñas subcuencas, mientras que otros son mejores para las grandes cuencas. Qi et al., 2021.</p>

4.3. MODELOS DE IMPACTO BIOFÍSICO – INUNDACIONES FLUVIALES

Las inundaciones fluviales representan una amenaza significativa para las comunidades, especialmente en el contexto del cambio climático, donde se espera que la frecuencia y severidad de estos eventos aumenten. El uso de modelos hidrológicos e hidráulicos, como HEC-HMS (Hydrologic Modeling System) y HEC-RAS (River Analysis System), es fundamental para comprender y mitigar los impactos de estas inundaciones.

HEC-HMS permite simular los procesos hidrológicos de una cuenca, incluyendo la generación de escorrentía, y HEC-RAS se usa para modelar el flujo de agua en ríos y canales, proporcionando una comprensión detallada de las dinámicas fluviales (US Army Corps of Engineers, 2023). En el contexto del Sexto Informe de Evaluación (AR6) del IPCC, estos modelos son esenciales para proyectar escenarios futuros de inundaciones (IPCC, 2021). El AR6 destaca la necesidad de integrar datos climáticos actualizados y proyecciones de precipitación en los modelos para evaluar adecuadamente los riesgos y planificar medidas de adaptación. Al aplicar HEC-HMS y HEC-RAS en estudios de impacto, los planificadores pueden identificar áreas vulnerables, diseñar infraestructuras de mitigación adecuadas y desarrollar estrategias de gestión del riesgo que consideren los cambios esperados en el régimen hidrológico debido al cambio climático (López et al., 2022). Este enfoque permite una planificación más resiliente y basada en la ciencia, crucial para reducir la vulnerabilidad de las comunidades frente a las inundaciones fluviales.

En América Latina y el Caribe, diversos estudios han utilizado modelos hidrológicos e hidráulicos como HEC-HMS y HEC-RAS para evaluar los impactos de las inundaciones y desarrollar planes nacionales de adaptación al cambio climático. Por ejemplo, en Colombia, el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) ha implementado estos modelos para identificar áreas vulnerables y diseñar infraestructuras de mitigación adecuadas en el marco del Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PNACC) (IDEAM, 2020). Similarmente, en Perú, el Ministerio del Ambiente (MINAM) ha utilizado HEC-HMS y HEC-RAS en el desarrollo de estudios de impacto hidrológico y planificación de medidas de adaptación en cuencas prioritarias, como parte de su Estrategia Nacional ante el Cambio Climático (ENCC) (MINAM, 2021). En el Caribe, Jamaica ha empleado estos modelos para evaluar riesgos de inundación y diseñar estrategias de adaptación en su Plan Nacional de Adaptación, con un enfoque en mejorar la resiliencia de las comunidades costeras (Government of Jamaica, 2019).

Bajo este contexto en el marco de la consultoría “Análisis del riesgo climático de inundaciones para la ciudad de Latacunga” se obtuvieron diversos escenarios de inundación para un registro histórico y futuro como parte del esfuerzo de utilizar herramientas basadas en la ciencia para la planificación adaptativa y la gestión de riesgos climáticos, lo que es crucial para la implementación efectiva de políticas de adaptación y la protección de las poblaciones vulnerables.

4.3.1. Escenarios en el periodo histórico

De acuerdo con lo planteado en la sección 4.2 y explicado con mayor detalle técnico en el informe “Sistematización de las corridas finales del modelo de impacto biofísico para la ciudad de Latacunga (Producto 4)”, los escenarios de inundación se desarrollan en función de periodos de retorno tanto para el registro histórico (1985 -2015) como futuro -Años tipo (SSP5 8.5 2020 - 2050) y Series Largas (SSP5 8.5 2015 – 2100)-.

Se tomaron como premisa las condiciones físicas que pueden causar un tipo de impacto en el cauce principal o alrededores para analizar los impactos de inundación. Del análisis realizado se ha determinado que el cauce principal es menos propenso al desbordamiento con precipitaciones recurrentes ($Tr < 5$ años). En escenarios extremos ($Tr = 50$ y 100 años) se presentan ligeras acumulaciones de agua en zonas bajas (llanuras fluviales) y que tiene poca capacidad de filtración. Para la representación del impacto se generaron 5 categorías (Muy Bajo; Bajo; Medio; Alto; Muy Alto) utilizando una distribución de cuantiles con una cantidad igual de observaciones en cada clase. Esto asegura que cada categoría tenga la misma representación en términos de frecuencia, lo que facilita la interpretación y comparación entre los diferentes escenarios.

Por otro lado, para la interpretación del nivel de impacto por velocidad del flujo del cauce principal se considera como umbral a una velocidad igual o mayor a los 3 m/s que de acuerdo con Bisschop et al., (2011) y Wang et al., (2019) son velocidades que pueden generar procesos de socavamiento en las riberas de los ríos o infraestructura expuesta.

Por lo tanto, acorde con los análisis de impacto biofísico para inundaciones presentados en el Plan Nacional de Adaptación (MAATE, 2022) se hace una categorización manual en cinco niveles según los rangos de la tabla 2.

Tabla 2 Clasificación de las velocidades alcanzadas para determinar el nivel de impacto.

Rango mínimo (m/s)	Rango Máximo (m/s)	Impacto
0	1	Muy Bajo
1	2	Bajo
2	3	Medio
3	4	Alto
4	-	Muy Alto

Bajo este contexto, en la figura 6 se presentan los resultados del nivel de impacto por inundación para los periodos de retorno de 5, 25, 50 y 100 años, donde, el mayor impacto se da en los periodos catalogados como extremos (50 y 100 años) con profundidades de hasta 0.4 m en zonas bajas como los sectores aledaños a la quebrada Inucohuaico, San Lizardo y alrededores de la quinta el Renacer. En la tabla 3 se realiza una tabla comparativa de las áreas afectadas por nivel de impacto. Se puede observar que para el TR 50 y el TR 100 años, las áreas con un nivel de impacto muy alto son 0.31 km² y de 0.38 km² respectivamente. En relación a las áreas con un nivel de impacto alto y muy alto se nota un incremento de entre el 22% y 55 % entre cada escenario.

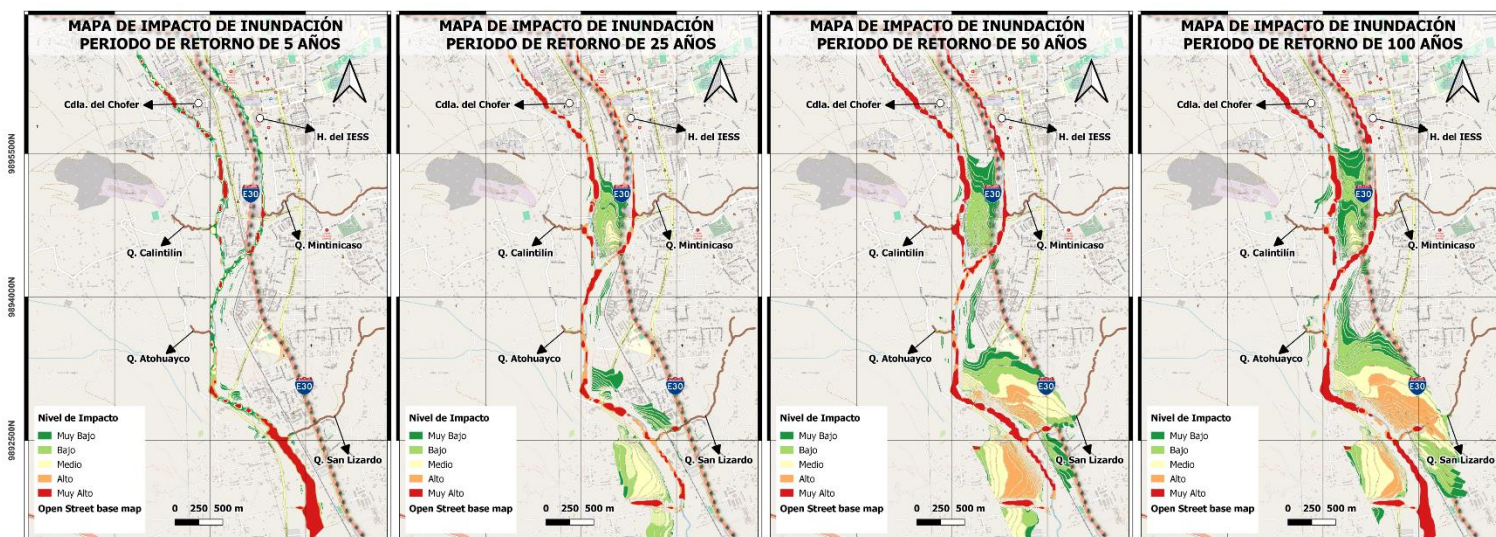


Figura 6 Mapa de impacto por nivel de la lámina de agua en los escenarios Tr = 5, 25, 50 y 100 años en el río Cutuchi y Pumancuchi.

Tabla 3 Matriz comparativa del Impacto Biofísico del periodo histórico de acuerdo al nivel de impacto por inundación en los TR 5, 25, 50 y 100 años, en superficie.

Nivel de impacto	Área (Km ²) afectada por inundaciones			
	Tr = 5	Tr = 25	Tr = 50	Tr = 100
Muy Bajo	0.12	0.19	0.32	0.39
Bajo	0.04	0.19	0.32	0.38
Medio	0.05	0.19	0.32	0.38
Alto	0.03	0.19	0.31	0.38
Muy Alto	0.20	0.19	0.31	0.38

De acuerdo con lo señalado anteriormente, una de las principales afectaciones en los cauces de las regiones andinas son los procesos de socavamiento-erosión, y uno de sus desencadenantes es la velocidad del flujo de agua. En la figura 7 se presentan las zonas identificadas con un nivel de impacto alto y muy alto, siendo las áreas colindantes a la quebrada San Rafael (borde del río Pumancuchi), Hospital del IESS e Iglesia Nuestra Señora de Loreto, Quebrada Inucohuaico, (borde del río Cutuchi) y Jose Romanzo (Intersección del río Cutuchi y Pumancuchi). En la tabla 4 se presenta la tabla comparativa de la longitud del cauce afectada por nivel de impacto. En relación a los TR 50 y el TR 100 la longitud del cauce varía entre 0.43 Km y 0.57 Km respectivamente. Existe un incremento entre el 16% y 32 % en la longitud del cauce de nivel Muy Alto entre cada escenario.

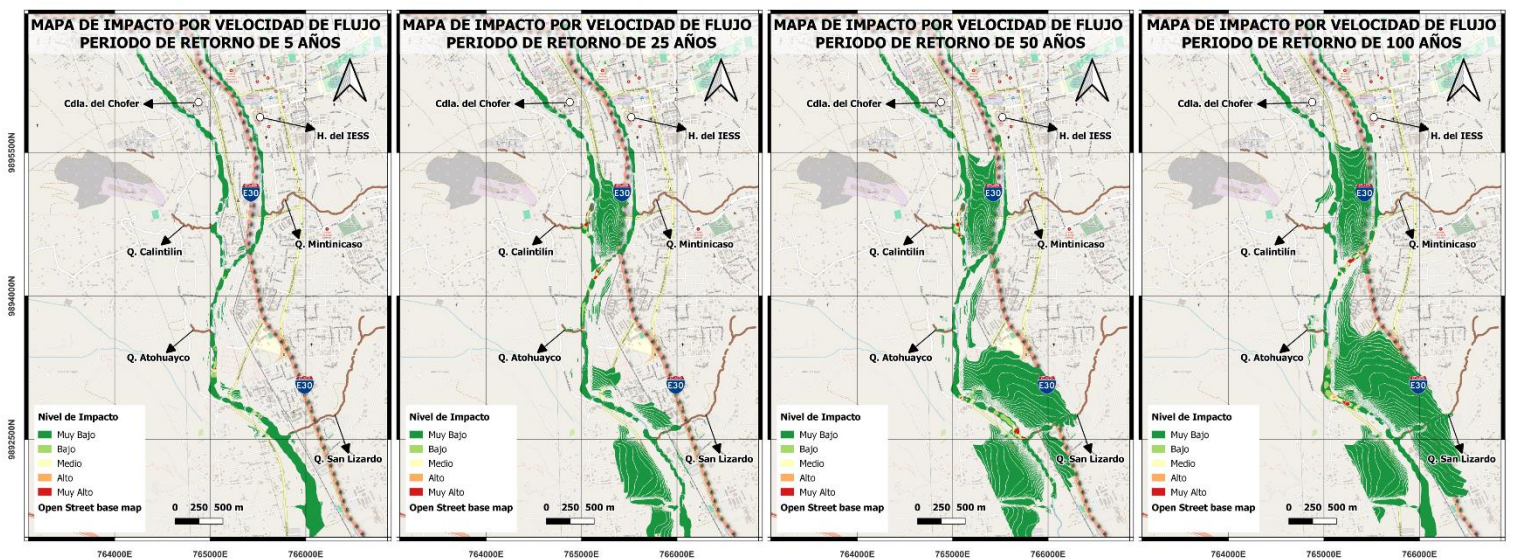


Figura 7 Mapa de impacto por velocidad del flujo de agua en los escenarios Tr = 5, 25, 50 y 100 años en el río Cutuchi y Pumancuchi.

Tabla 4 Matriz comparativa del Impacto Biofísico del periodo histórico de acuerdo al nivel de impacto por velocidad del flujo de agua en los TR 5, 25, 50 y 100 años, en longitud

Nivel de impacto	Longitud (Km) del cauce afectado			
	Tr = 5	Tr = 25	Tr = 50	Tr = 100
Muy Bajo	6.27	5.91	5.59	5.38
Bajo	0.88	0.80	1.00	1.17
Medio	0.46	0.79	0.65	0.67
Alto	0.18	0.20	0.31	0.29
Muy Alto	0.28	0.37	0.43	0.57

4.3.2. Proyecciones futuras: Años Tipo (AT) SSP5 8.5 2020-2050

Para las proyecciones futuras de los años tipo se analizan los cinco AT en relación con su variación porcentual del percentil 95 y las medias de precipitación respecto al registro histórico. Este cambio permite determinar la variación en los periodos de retorno generando escenarios plausibles de eventos climáticos. Para el análisis las variaciones se realizan en los periodos de retorno extremos de 50 y 100 años que de acuerdo con la Norma Ecuatoriana de la Construcción son los periodos de retorno mínimo de diseño.

El análisis señalado se puede ver con mayor detalle en el informe técnico “Sistematización de las corridas finales del modelo de impacto biofísico para la ciudad de Latacunga (Producto 4)”, además se indica que la modelación biofísica para este tipo de proyección futura considera generar escenarios para los AT más representativos, considerando la mayor precipitación acumulada anual y precipitación diaria máxima. Los AT seleccionados son: AT1 (acumulado anual y máximos diarios), AT4 (máximos diarios) y AT5 (acumulado anual).

En la tabla 5 se presenta la variación porcentual de los periodos de retorno para cada AT, mientras que, en la tabla 6 se presenta el incremento de la precipitación para los Tr de 50 y 100 años en función de la variación porcentual señalada. Se puede notar que la precipitación incrementa entre 55 y 59 mm respecto a su periodo histórico base.

Tabla 5 Variación de los años tipo en la estación M0064 de los Años Tipo que presentan mayor variabilidad.

Año Tipo	AT1	AT4	AT5
Cambio Per. 95	1.435	1.429	1.430

Tabla 6 Matriz comparativa del incremento de precipitación para los Tr de 50 y 100 años en función de la variación porcentual señalada.

Estación	Tr (años)	Intensidad Máxima de Precipitación (mm)				
		Precipitación diaria máxima (mm)	Proyección	AT 1	AT 4	AT 5
M0064	50	125.9	Percentil 95	180.04	179.9	180.04
	100	138.0	Percentil 95	197.3	197.2	197.3

En las Figuras 8 y 9 se presentan los mapas que ilustran el nivel de impacto por inundación según la variación porcentual de los Años Tipo (AT) en los periodos de retorno de 50 y 100 años. Los resultados indican ligeros cambios entre los diferentes escenarios de AT, con el AT1 mostrando el mayor impacto en comparación con el AT4 y el AT5. En la Tabla 7 se detallan las variaciones de las áreas según su nivel de impacto. La diferencia en las áreas inundadas entre los periodos de retorno de 50 y 100 años es del 2%, lo que sugiere que, en escenarios extremos, como los generados para los AT con precipitaciones que superan los 55 mm en relación con los valores históricos, no se generan nuevas áreas inundables. Esto es coherente con las características de las zonas de alta montaña, que presentan pocas llanuras de inundación. Por otro lado, la Tabla 8 muestra que la longitud del cauce afectado con un nivel de impacto "Muy Alto" en comparación con los escenarios históricos varía de 1.19 km a 1.64 km. Este hallazgo sugiere que, aunque las precipitaciones extremas no amplían significativamente las áreas inundadas, las velocidades del flujo de agua representan una variable crítica para el monitoreo, debido al potencial incremento de procesos de socavamiento y erosión.

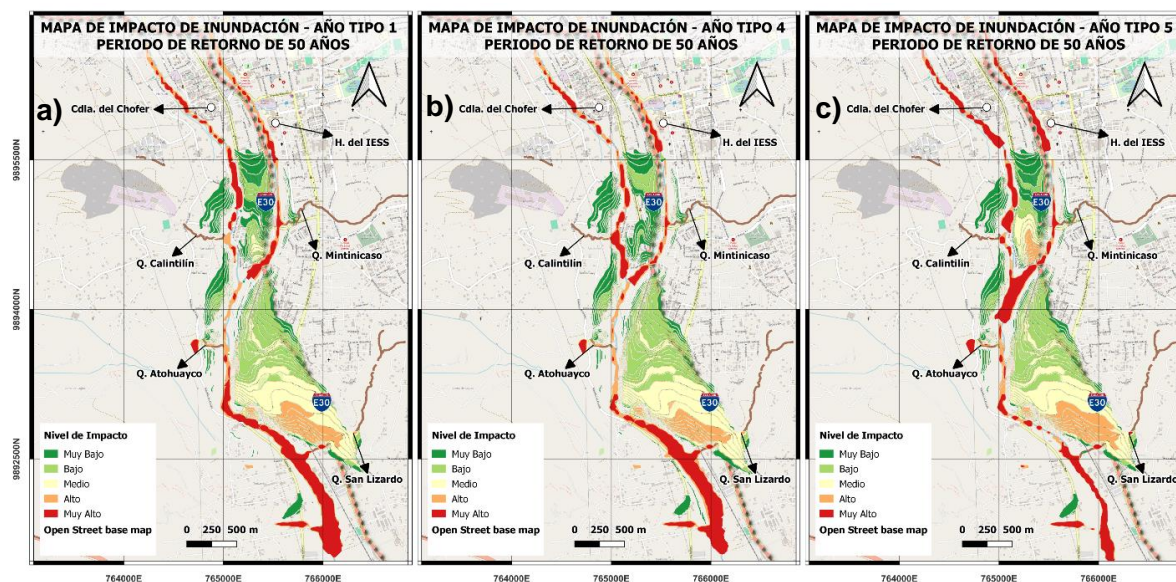


Figura 8 Mapa de impacto por nivel de la lámina de agua en los escenarios Tr = 50 años en el río Cutuchi y Pumancuchi en los diferentes Años Tipo

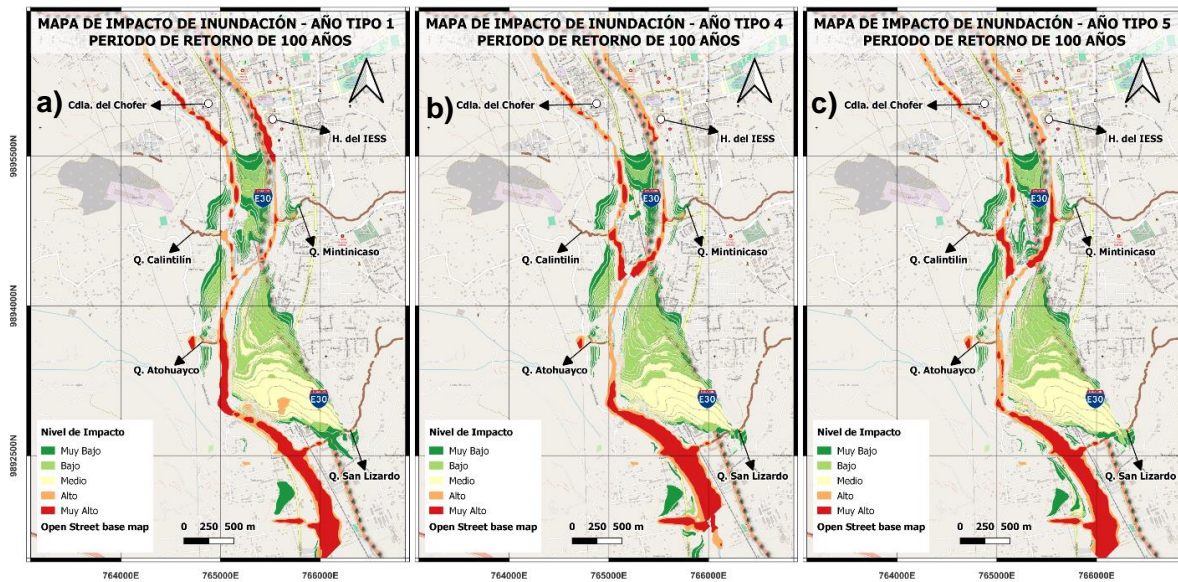


Figura 9 Mapa de impacto por nivel de la lámina de agua en los escenarios $T_r = 100$ años en el río Cutuchi y Pumancuchi en los diferentes Años Tipo.

Tabla 7 Matriz comparativa del Impacto Biofísico del periodo histórico de acuerdo con el nivel de impacto por inundación en los TR 50 y 100 años para el AT1, AT4 y AT5, en superficie.

Nivel de impacto	Tr	Área (Km ²) afectada por inundaciones		
		AT1	AT4	AT5
Muy Bajo	50	0.40	0.39	0.39
	100	0.41	0.4	0.42
Bajo	50	0.39	0.41	0.39
	100	0.40	0.39	0.42
Medio	50	0.4	0.39	0.39
	100	0.4	0.39	0.41
Alto	50	0.39	0.38	0.38
	100	0.4	0.39	0.41
Muy Alto	50	0.39	0.38	0.38
	100	0.4	0.39	0.40

Tabla 8 Matriz comparativa del Impacto Biofísico del periodo histórico de acuerdo con el nivel de impacto por velocidad del flujo en los TR 50 y 100 años para el AT1, AT4 y AT5, en longitud

Nivel de impacto	Tr	Longitud (Km) del cauce afectado		
		AT1	AT4	AT5
Muy Bajo	50	2.5	2.5	2.45
	100	2.3	2.3	2.27
Bajo	50	2.6	2.5	2.49
	100	1.5	1.6	1.59
Medio	50	1.1	1.25	1.23
	100	1.83	1.81	1.80
Alto	50	0.63	0.62	0.63
	100	0.8	0.79	0.79
Muy Alto	50	1.23	1.19	1.27
	100	1.64	1.62	1.62

4.3.3. Proyecciones futuras: “Series Largas” SSP5 8.5 2015-2100

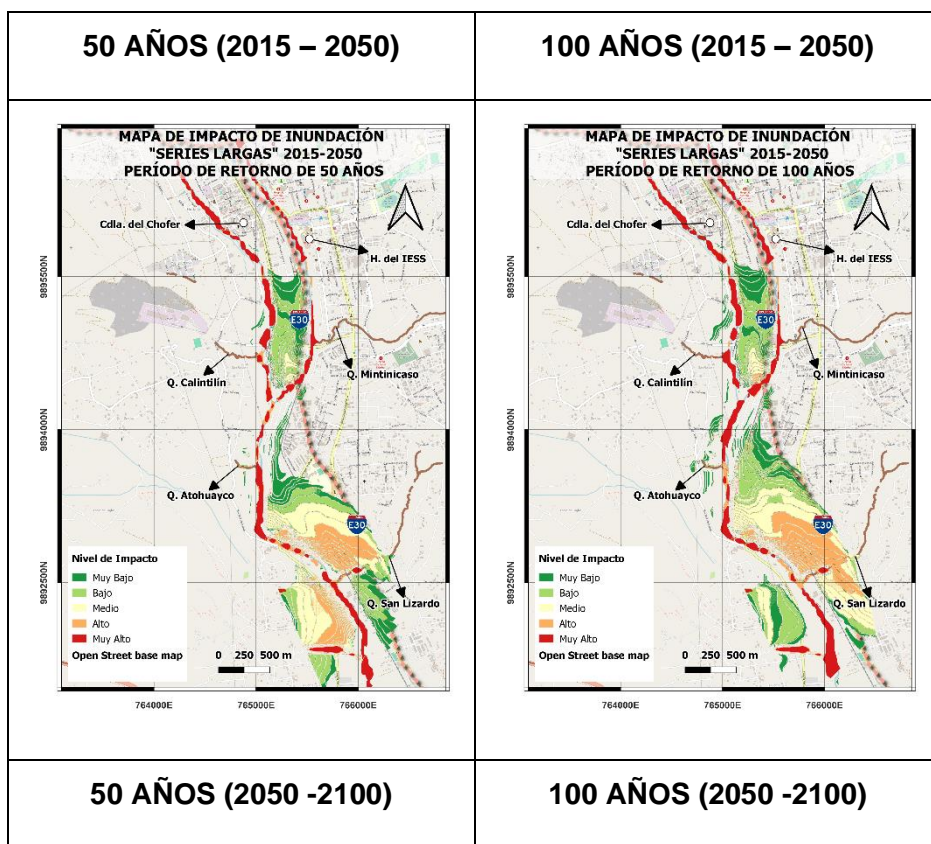
Para el análisis de las proyecciones futuras, se aplica el mismo principio de variación porcentual de los Años Tipo (AT). En este enfoque, se utiliza la tendencia de precipitación en dos periodos de tiempo, sin considerar la magnitud específica de los eventos. Los periodos evaluados son el futuro cercano (2015-2050) y la segunda mitad del siglo (2050-2100). Para calcular el factor de variación en estos dos periodos, se utilizó un factor de cambio de precipitación basado en las anomalías del percentil 95 de los AT correspondientes a cada periodo. Según el análisis realizado, se observa un cambio del 3% en el periodo 2015-2050 y del 6% en el periodo 2050-2100. Estos escenarios se evalúan en función de los periodos de retorno extremos de 50 y 100 años, los cuales, de acuerdo con la Norma Ecuatoriana de la Construcción, representan los periodos de retorno mínimo de diseño. En la Tabla 9 se evidencia que, de acuerdo con la variación porcentual determinada, hay un incremento en los niveles de precipitación en el primer periodo, que oscila entre 3.8 y 4.1 mm, mientras que, en la segunda mitad del siglo, el aumento en la precipitación es de entre 7.6 y 8.3 mm.

Tabla 9 Incremento de la precipitación en los periodos de retorno extremos para los dos periodos de tiempo (2015-2050; 2050-2100) de las proyecciones futuras “series largas”.

Periodo de retorno	Precipitación (mm) (Histórico)	Precipitación (mm) (2015-2050)	Precipitación (mm) (2050-2100)
50	125.9	129.7	133.5
100	138.0	142.1	146.3

En la Figura 10 se presentan los mapas que ilustran el nivel de impacto de inundación para los periodos evaluados: futuro cercano (2015-2050) y la segunda mitad del siglo (2050-2100), considerando periodos de retorno de 50 y 100 años. Los resultados muestran ligeras diferencias en los niveles de impacto entre los dos periodos evaluados, y similares a los escenarios

históricos, sugiriendo que estos escenarios futuros son plausibles para la planificación y gestión del riesgo de inundaciones en el futuro. En la Tabla 10 se detallan las variaciones de las áreas según su nivel de impacto, destacando que las zonas con un nivel de impacto "Muy Alto" abarcan entre 0.39 km² y 0.41 km² en los distintos escenarios. Las áreas más afectadas corresponden a las llanuras de inundación en los alrededores de la Quinta El Renacer y la Quebrada San Lizardo. Además, en la Tabla 11 se presenta la longitud del cauce afectada según el nivel de impacto, mostrando que las longitudes en un nivel "Alto" varían entre 0.29 km y 0.30 km, mientras que en un nivel "Muy Alto" oscilan entre 0.44 km y 0.88 km. Estos datos subrayan la importancia de estas áreas específicas en la planificación y mitigación del riesgo de inundaciones



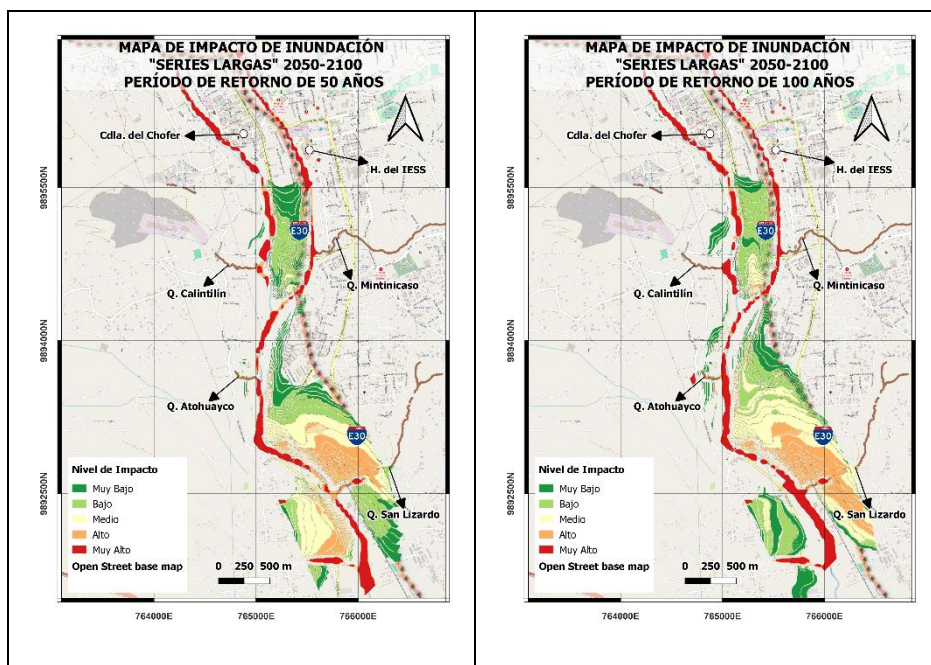


Figura 10 Mapa de impacto por nivel de la lámina de agua en los escenarios de la proyección futura “series largas” SSP5 8.5 2015 -2100 en el río Cutuchi y Pumancuchi.

Tabla 10 Matriz comparativa del Impacto Biofísico del periodo histórico de acuerdo con el nivel de impacto por inundación en los TR 50 y 100 años para las series largas, periodo 2015 - 2020 y 2020 – 2100, en superficie.

Nivel de impacto	Tr	Área (Km ²) afectada por inundaciones	
		2015 - 2050	2050 - 2100
Muy Bajo	50	0.36	0.38
	100	0.41	0.42
Bajo	50	0.35	0.38
	100	0.40	0.42
Medio	50	0.36	0.38
	100	0.40	0.44
Alto	50	0.34	0.37
	100	0.39	0.41
Muy Alto	50	0.34	0.37
	100	0.39	0.41

Tabla 11 Matriz comparativa del Impacto Biofísico del periodo histórico de acuerdo con el nivel de impacto por velocidad del flujo de agua en los TR 50 y 100 años para las series largas, periodo 2015 - 2020 y 2020 – 2100, en longitud.




Nivel de impacto	Tr	Longitud (Km) del cauce afectado	
		2015 - 2050	2050 - 2100
Muy Bajo	50	5.61	5.62
	100	5.39	5.38
Bajo	50	0.94	0.94
	100	0.79	0.82
Medio	50	0.67	0.68
	100	0.69	0.69
Alto	50	0.29	0.29
	100	0.29	0.30
Muy Alto	50	0.43	0.54
	100	0.44	0.88




4.3.4. Caracterización de zonas impactadas.

Para la identificación y priorización de medidas de adaptación se realiza una matriz integral (Tabla 12) que describe aquellos sectores en los que de acuerdo con la modelación de impacto biofísico se ha identificado niveles de impacto alto y muy alto para los periodos de retorno extremos considerados indicadores de diseño (50 y 100 años). Esta matriz permite evaluar el nivel de impacto por sector urbano y realizar una comparativa detallada de los efectos causados tanto por la inundación como por la velocidad del flujo de agua.

Se ha identificado que los alrededores de sectores como la Quebrada San Lizardo, Quebrada San Rafael, el Hospital del IESS, y la Quinta El Renacer presentan zonas bajas propensas a inundaciones, lo que resulta en un nivel de impacto alto y muy alto en estas áreas. En particular, las riberas del río Pumancuchi, cerca de la Quebrada San Rafael, y las riberas del río Cutuchi, donde se encuentran el Hospital del IESS y la intersección de ambos ríos en la vía José Rumazo, exhiben niveles de impacto muy altos debido a la velocidad del flujo de agua. Dada la morfología de estos sectores, se recomienda la estabilización de taludes y la arborización de las quebradas como medidas efectivas para mitigar los procesos de socavamiento causados por las altas velocidades del flujo. Además, la arborización y revegetación de las quebradas, mediante la creación de corredores urbanos, contribuirá a disminuir la velocidad del flujo de agua. Las zonas identificadas como inundables, pero que no presentan impacto significativo por la velocidad del flujo, como San Lizardo y El Renacer, pueden ser aprovechadas como áreas de retención de escorrentía a través de la implementación de parques fluviales. Es crucial destacar que, al momento de priorizar intervenciones, se debe considerar la presencia de infraestructura crítica de la ciudad, como hospitales, unidades educativas y vías de primer orden, ya que estas áreas requieren una atención especial debido a su importancia para el bienestar de la comunidad.

Tabla 12 Matriz comparativa de impactos biofísicos por inundaciones y velocidad del flujo de agua para los periodos de retorno extremos (50 y 100 años) en los sectores con un nivel de impacto alto y muy alto.

Zona	Escenarios	Nivel de Impacto por inundación		Nivel de Impacto por velocidad de flujo		Caracterización de la zona	Opciones para reducción del riesgo	Fotografía del sector (Fuente: Google Street view)
		Tr = 50	Tr = 100	Tr = 50	Tr = 100			
Quebrada San Lizardo	AT1	5	5	2	2	Zona periurbana dedicada a la agricultura, que interseca con la vía E30, caracterizada por una baja densidad poblacional y la ausencia de infraestructura crítica.	Implementación de cuencas de retención de escorrentía (Parques fluviales) y corredores forestales urbanos.	
	AT4	5	5	2	2			
	AT5	5	5	2	2			
	2015 -2050	5	5	1	1			
	2050 -2100	5	5	1	1			
Quebrada San Rafael	AT1	4	4	4	-	Zona urbana, con baja densidad poblacional, presencia de llanuras de inundación y ausencia de infraestructura crítica	Arborización e implementación de corredores forestales	
	AT4	4	4	5	-			
	AT5	5	5	-	-			
	2015 -2050	5	5	-	-			
	2050 -2100	5	5	4	-			
Hospital del IESS – Iglesia Nuestra Señora de Loreto (R. Cutuchi)	AT1	5*	5*	5	5	Zona urbana paralela a la Av. Eloy Alfaro, con una Alta densidad poblacional y presencia de infraestructura crítica (Hospitales y	Arborización, revegetación y estabilización de taludes. Implementación de corredores forestales.	
	AT4	5*	5*	-	-			
	AT5	5*	5*	4	-			
	2015 -2050	5*	5*	-	4			
	2050 -2100	5*	5*	5	4			

						Unidades Educativas)		
Sector de La Quinta El Renacer	AT1	5	5	1	1	Zona periurbana, cercana a la quinta El Renacer, presencia de llanuras de inundación, baja densidad poblacional y ausencia de infraestructura crítica.	Implementación de cuencas de retención de escorrentía (Parques fluviales)	
	AT4	5	5	1	1			
	AT5	5	5	1	1			
	2015 -2050	5	5	3	1			
	2050 -2100	5	5	4	1			
Quebrada Inucohuaico (Cda. Patria)	AT1	4	4	5	5	Zona de mediana densidad poblacional y ausencia de infraestructura crítica.	Arborización, revegetación y estabilización de taludes. Implementación de corredores forestales.	
	AT4	3	3	-	-			
	AT5	4	3	5	-			
	2015 -2050	4	4	-	5			
	2050 -2100	4	4	4	-			
Jose Rumanzo (unión R. Pumancuchi y Cutuchi)	AT1	3	2	1	5	Zona de encauzamiento, con una densidad poblacional media-alta. Presencia del puente vía de la Av. Eloy Alfaro	Arborización, revegetación y estabilización de taludes. Implementación de corredores forestales.	
	AT4	3	-	1	4			
	AT5	4	2	1	5			
	2015 -2050	3	4	5	1			
	2050 -2100	3	3	5	5			




Nota:



(*) Zonas con un nivel de impacto muy alto debido al aumento significativo de la lámina de agua dentro del cauce principal, sin que se haya producido desbordamiento

Es importante destacar que, aunque la priorización de los sectores se ha realizado principalmente a través del modelo de impacto biofísico, también se han considerado en este proceso aquellos sectores de la ciudad que no necesariamente son afectados por desbordamientos de ríos, sino por la escorrentía generada dentro de la propia ciudad y la capacidad insuficiente del sistema de drenaje urbano. Estos sectores, identificados mediante información local y señalados en el mapa de susceptibilidad urbana con niveles de riesgo “Altos” y “Muy Altos”, fueron además inspeccionados en colaboración con el Cuerpo de Bomberos de Latacunga para comprender mejor el contexto urbano y determinar las medidas de adaptación más adecuadas.

Los sectores identificados son:

Tabla 13 Sitios identificados como inundables en la ciudad de Latacunga.

Sector	Descripción	Fotografía
Parque Náutico	Zona densamente poblada, atravesada por los ríos Illuchi y Cunuyacu. Cuenta con un parterre en la Avenida Rumiñahui, que podría ser adaptado para jardines de lluvia, así como el parque náutico, que podría transformarse en un parque fluvial destinado a la retención de escorrentía	 <p data-bbox="1029 972 1195 999">Fuente: Propia</p>
Ispingo 1 e Ispingo 2	Zona periurbana de densidad poblacional media, caracterizada por elevaciones que favorecen la escorrentía superficial hacia una llanura de inundación. La zona presenta canales naturales que han sido tapados o redirigidos, lo que agrava el riesgo de inundaciones. Las viviendas ubicadas en las partes bajas están directamente en la trayectoria de la escorrentía, aumentando su exposición.	 <p data-bbox="1029 1350 1195 1377">Fuente: Propia</p>
San Felipe	Zona densamente poblada y urbanizada, caracterizada por pendientes pronunciadas que canalizan la escorrentía superficial a través de las vías. En las zonas altas, se desprende material pétreo, lo que provoca la acumulación de piedras y troncos en las vías, aumentando el riesgo	 <p data-bbox="1029 1820 1312 1848">Fuente: Cotopaxi Noticias</p>

	de bloqueos y daños en la infraestructura urbana.	
San Carlos	Zona densamente poblada y de baja elevación, que recibe la escorrentía superficial proveniente de las áreas altas. Se pueden considerar medidas de adaptación como la mejora del sistema de drenaje, la creación de jardines de lluvia, o la implementación de medidas no estructurales como un Sistema de Alerta Temprana (SAT).	 <p>Fuente: CDL Noticias</p>
Av. Simón Rodríguez	Zona densamente poblada y urbanizada, con pendientes pronunciadas que facilitan el tránsito de la escorrentía superficial. Existe potencial para implementar parques lineales pluviales, jardines de lluvia o utilizar asfalto de permeable para mejorar la gestión del agua en la zona	 <p>Fuente: Propia</p>
Av. Iberoamericana	Zona densamente poblada, donde la escorrentía superficial proveniente de las áreas altas transita a lo largo de la Av. Iberoamericana, caracterizada por una baja capacidad de filtración.	 <p>Fuente: Propia</p>

5. PROPUESTA DE MEDIDAS DE ADAPTACIÓN

“Las ciudades son tanto impulsoras como víctimas del cambio climático, y por lo tanto, catalizadoras de la adaptación climática y la reducción del riesgo de desastres” (IBC on Environment and Climate Change, 2021)

El Ecuador a través del MAATE ha publicado el Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PLANACC, 2022) Las medidas descritas en esta sección se desarrollan en el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible al 2030, las acciones de adaptación al cambio climático en el Acuerdo de París (2015) y las prioridades del Marco de Acción de Sendai (2015-2030) para reducir riesgos de desastres. A nivel nacional el marco normativo ecuatoriano reconoce a la naturaleza y sus servicios ecosistémicos en diferentes instrumentos de política pública, iniciando

con la Constitución de la República del Ecuador del 2008, y estableciendo las competencias de los Gobiernos Autónomos Descentralizados (GAD) para la gestión del riesgo, la protección del patrimonio natural, y las acciones para la adaptación y mitigación al cambio climático. En la Tabla 14, se citan algunos de los instrumentos normativos que los GAD deberán implementar en sus territorios.

Tabla 14 Instrumentos de política pública ecuatoriana que se relacionan con las acciones de adaptación al cambio climático y la reducción de riesgos de desastres.

<p>Constitución de la República del Ecuador, 2008</p>	<p>Artículo 86. - El Estado protegerá el derecho de la población a vivir en un medio ambiente sano y ecológicamente equilibrado, que garantice un desarrollo sustentable. Velará por que este derecho no sea afectado y garantizará la preservación de la naturaleza.</p>
<p>Código de Organización Territorial, Autonomía y Descentralización - COOTAD, 2010.</p>	<p>Art. 140 manifiesta: “La gestión de riesgos que incluye las acciones de prevención, reacción, mitigación, reconstrucción y transferencia, para enfrentar todas las amenazas de origen natural o antrópico que afecten al territorio se gestionarán de manera concurrente y de forma articulada por todos los niveles.... Los gobiernos autónomos descentralizados municipales adoptarán obligatoriamente normas técnicas para la prevención y gestión de riesgos en sus territorios con el propósito de proteger las personas, colectividades y la naturaleza, en sus procesos de ordenamiento territorial.</p>
<p>Código Orgánico Ambiental, 2019 y su Reglamento (COA- R), 2019.</p>	<p>c) Armonizar la conservación, protección y restauración del patrimonio natural con su uso y aprovechamiento sostenible;</p> <p>f) Considerar los elementos del patrimonio natural en la planificación y gestión de los asentamientos humanos, con especial atención en la presión que ejercen las áreas de expansión urbana;</p> <p>h) Incorporar medidas de mitigación y adaptación al cambio climático en los modelos de gestión del territorio;</p> <p>i) Considerar la gestión integral de riesgos en el territorio, con especial atención a aquellos derivados de los efectos del cambio climático;</p> <p>j) Incorporar las funciones y servicios ambientales que presta el patrimonio natural, valorándose sus aportes a la economía local;</p>
<p>Ley Orgánica de Gestión Integral de Riesgos de desastres, 2024.</p>	<p>Art. 8.-Complementariedad entre la gestión del riesgo de desastres, la gestión ambiental, la mitigación y adaptación al cambio climático. -La planificación nacional, sectorial y territorial (Gobiernos Autónomos Descentralizados y de los Regímenes Especiales) contemplará la complementariedad de</p>

	<p>las inversiones e iniciativas públicas y privadas para la gestión del riesgo de desastres, la gestión ambiental, la mitigación y la adaptación al cambio climático.</p>
<p>Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PLANAC), 2022</p>	<p>Objetivo General. - Contribuir a la integración de la adaptación al cambio climático en la planificación del desarrollo nacional, local y sectorial; así como a la identificación y reducción del riesgo climático actual y futuro de los sistemas sociales, económicos y ambientales vulnerables ante los efectos del cambio climático.</p> <p>Objetivos Específicos. - Promover el acceso y uso de la información climática y oceánica histórica y futura.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Facilitar y fomentar la identificación de impactos actuales y futuros del cambio climático mediante análisis de riesgo climático que consideren la utilización de modelos de impacto biofísico. • Orientar la implementación de medidas de adaptación que reduzcan el riesgo climático, fomentando el enfoque de género. <p>Guiar la incorporación de la adaptación al cambio climático en la planificación del desarrollo y en los presupuestos institucionales a nivel sectorial y local</p>

El análisis biofísico de riesgos climáticos presentados en esta consultoría contribuye a las acciones del Gobierno Autónomo Municipal del Cantón Latacunga y la WWF al cumplimiento de los compromisos del Gobierno del Ecuador en convenios internacionales, y la normativa nacional donde se establecen los roles y responsabilidad de los GAD en la gestión del riesgo, la adaptación al cambio climático en el contexto del desarrollo sostenible.

Una estrategia/medida en la que se integra la adaptación al cambio climático como la reducción de riesgos de desastres son las **Soluciones Basadas en la Naturaleza (SbN)**. Las SbN son acciones/medidas que protegen, gestionan de forma sostenible o restauran un ecosistema para abordar los desafíos sociales, como el riesgo de desastres, el cambio climático, la seguridad alimentaria, la seguridad del agua o la salud humana (IFRC, 2021). Las SbN incluyen la protección y restauración de bosques, la protección de manglares, bosques nativos, bosques urbanos, la conservación y restauración de humedales y la creación de espacios verdes urbanos en un ordenamiento sostenible del territorio y el paisaje.



Figura 11 Las soluciones basadas en la naturaleza (SbN) consideran los servicios ecosistémicos para reducir los riesgos de desastres, contribuye a la adaptación y mitigación al cambio climático (Fuente: De las palabras a la acción, UNDRR 2021).

Según los resultados de la sección 4.2.4, donde se identificaron los sectores de la ciudad con niveles de impacto Muy Alto, el jueves 18 de julio de 2024, se realizó un taller para identificar y priorizar medidas de adaptación estructurales y no estructurales en el corto, mediano y largo plazo, para reducir los niveles de riesgo climático ante inundaciones. Durante la ejecución de dicho taller se priorizó la inclusión de SbN haciendo uso de la caja de herramientas de la UNDRR y UNUEHS de febrero de 2024 para la implementación de SbN como estrategia para la gestión del riesgo climático y de desastres.

Durante la ejecución del taller se levantó una matriz de medidas de adaptación de acuerdo con las siguientes asunciones:

- **¿Qué acciones se deben tomar para prevenir las inundaciones?**
 - Identificación de intervenciones específicas, tanto estructurales (como la construcción de infraestructuras de drenaje) como no estructurales (como la reforestación y la restauración de humedales).
- **¿Quién debe llevar a cabo estas acciones?**
 - Asignación de responsabilidades a las diferentes entidades, como la Dirección de Ambiente, la Dirección de Obras Públicas, la Dirección de Planificación del Desarrollo y del Ordenamiento Territorial del GAD Municipal de Latacunga, y el Cuerpo de Bomberos.

- **¿Con quién se deben coordinar estas acciones?**
 - Identificación de socios y colaboradores clave, incluyendo organizaciones comunitarias, ONGs, instituciones académicas, y organismos internacionales que pueden apoyar en la implementación y financiación de las medidas.

- **¿Dónde se deben diseñar e implementar estas medidas?**
 - Especificación de las ubicaciones prioritarias basadas en los niveles de impacto Muy Alto identificados, enfocándose en áreas vulnerables que requieren intervención inmediata y aquellas que pueden beneficiarse de medidas a mediano y largo plazo.

Estas asunciones permitieron una discusión estructurada y orientada a la acción, facilitando la identificación y priorización de medidas adaptativas que son tanto prácticas como sostenibles. El enfoque en soluciones basadas en la naturaleza asegura que las medidas no solo mitiguen el riesgo de inundaciones, sino que también promuevan la resiliencia ambiental y social en la comunidad.

Nota: La sistematización de las matrices desarrolladas en el taller del 18 de julio de 2024 y la presentación de SbN se encuentran en el Anexo 1.

Con la información recabada en los talleres, se discutió con el equipo técnico consultor sobre el resultado de las acciones propuestas con un enfoque integral en base a las cuatro prioridades establecidas en el Marco de Sendai para la gestión del riesgo de desastre, el mismo que establece los ejes prioritarios sobre los cuales trabajar para reducir el riesgo climático: 1) Comprender el riesgo, 2) Fortalecer la gobernanza, 3) Invertir en la resiliencia y 4) Reconstruir mejor.

A partir de este análisis en la tabla 15 se han clasificado las medidas de adaptación en estructurales y no estructurales. Estas medidas son propuestas generales que fueron presentadas en el taller del 18 de julio. Una vez planteadas las medidas y sectorizadas se procede a realizar un proceso de priorización por parte de los actores participantes. Es importante señalar que, durante el taller, surgieron recomendaciones de incluir zonas que no estaban consideradas en la sección 4.2.4 y pueden ser destinadas para la implementación de medidas de adaptación.

Tabla 15 Medidas de adaptación que pueden ser implementadas por el GAD Municipal de Latacunga.

Categoría	Eje de Sendai	Objetivos Estratégicos	Acciones	Actores Involucrados	Lugar de Intervención	Plazo de implementación
Estructurales	4	Incorporar principios de diseño sostenible en el desarrollo urbano que promuevan la resiliencia de ecosistemas y ciudades frente a los riesgos climáticos	Diseño e implementación de jardines de lluvia	GAD Municipal Academia ONGs (WWF, GIZ, etc.)	Mario Mogollon Plaza Canada Av. 10 de agosto y Simón Rodríguez	Mediano Plazo (3-10 años)
	4	Incorporar principios de diseño sostenible en el desarrollo urbano que promuevan la resiliencia de ecosistemas y ciudades frente a los riesgos climáticos	Diseño e implementación de un parque de retención fluvial	GAD Municipal Academia ONGs (WWF, etc.)	Parque náutico	Largo Plazo (>10 años)
	3	Incorporar principios de diseño sostenible en el desarrollo urbano que promuevan la resiliencia de ecosistemas y ciudades frente a los riesgos climáticos	Mantenimiento Integral de Quebradas: Limpieza, Revegetación, arborización y Estabilización	GAD Municipal Academia ONGs (WWF, etc.)	Valle Hermoso Loma Grande San Carlos - Santa Ana Nitiniacazo	Corto Plazo (1 – 3 años)
	3	Incorporar principios de diseño sostenible en el desarrollo urbano que promuevan la resiliencia de ecosistemas y ciudades frente a los riesgos climáticos	Restauración de Drenaje Natural y Revegetación de Cimas de Cerros (con o sin cultivo/s)	GAD Municipal GAD Parroquial GAD Provincial Academia ONGs (WWF, etc.)	Isimbo 1 Isimbo 2 El Ejido	Mediano Plazo (3 – 10 años)

No estructurales	1,2,3	Fortalecer la gobernanza institucional y la participación comunitaria para la resiliencia ante riesgos climático. Promover tecnologías y prácticas innovadoras para mejorar la resiliencia urbana a través de la investigación y el intercambio de información.	Diseño e Implementación Sistemas de Alerta Temprana ⁵	GAD Municipal Academia ONGs (WWF, etc.) SGR INAMHI	A nivel cantonal, con énfasis en Isimbo 1, 2, San Felipe – San Carlos- Sigsicalle- La Cocha	Corto Plazo (1-3 años)
	2	Fortalecer la gobernanza institucional y la participación comunitaria para la resiliencia ante riesgos climático.	Creación de un comité técnico-científico cantonal	GAD Municipal Academia MAATE SGR ONGs (WWF, etc.) Institutos de investigación y monitoreo nacional	A nivel cantonal	Corto Plazo (1-3 años)
	2	Fortalecer la gobernanza institucional y la participación comunitaria para la resiliencia ante riesgos climático.	Fomentar Ordenanzas para el Diseño e Implementación de Soluciones Basadas en la Naturaleza para proteger elementos esenciales de la Ciudad, Manejo de Quebradas, etc.	GAD Municipal Academia	A nivel cantonal	Corto Plazo (1-3 años)

⁵ Los SAT son ejes transversales e integrales que fortalecen la resiliencia comunitaria e institucional, ya que involucran activamente a la comunidad en la prevención y respuesta ante eventos extremos. A través de sus cuatro componentes fundamentales, conocimiento del riesgo, monitoreo, comunicación, planificación y respuesta, los SAT comunitarios permiten una detección temprana de riesgos, la difusión rápida de información crítica, la preparación adecuada de la población y la coordinación eficiente entre las instituciones, lo que resulta en una mitigación más efectiva del impacto de los desastres.

5.1. PRIORIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN

Durante el taller del 18 de julio, los participantes priorizaron las medidas expuestas en la tabla 16 en función de su viabilidad, e impacto potencial (a través de un proceso de votación). La priorización fue efectuada por representantes del Cuerpo de Bomberos de Latacunga, Dirección de Ambiente, Dirección de Seguridad Ciudadana y Gestión de Riesgos; Dirección de Planificación del Desarrollo y del Ordenamiento Territorial, Dirección de Obras Públicas.

Tabla 16 Matriz de priorización de las acciones/medidas para inundaciones en la ciudad de Latacunga

Acción/Medidas	Lugar de intervención	Priorización (Votos)
Diseño e Implementación Sistemas de Alerta Temprana	A nivel Cantonal, con énfasis en Isimbo 1, 2, San Felipe – San Carlos- Sigsicalle-La Cocha	8
Diseño e implementación de jardines de lluvia	Mario Mogollón Plaza Canadá Av. 10 de Agosto y Simón Rodríguez Parque Náutico Parque de las Réplicas	12
Mantenimiento Integral de Quebradas: Limpieza, Revegetación y Estabilización	Valle Hermoso Loma Grande San Carlos - Santa Ana Nitiniacazo	10
Restauración de Drenaje Natural y Revegetación de Cimas de Cerros (con o sin cultivo/s)	Isimbo 1, 2 El Ejido	3
Fomentar Ordenanzas para el Diseño e Implementación de Soluciones Basadas en la Naturaleza para proteger elementos esenciales de la Ciudad, Manejo de quebradas, etc.	A nivel Cantonal	9

A continuación, se presenta una breve descripción de las medidas priorizadas:

Diseño e implementación de jardines de lluvia

El diseño e implementación de jardines de lluvia representan estrategias integrales para mejorar la sostenibilidad y resiliencia de las áreas urbanas, son áreas ajardinadas diseñadas para capturar, filtrar y almacenar el agua de lluvia, reduciendo la escorrentía superficial y mejorando la calidad del agua. Para su diseño e implementación, es crucial seleccionar localizaciones estratégicas que maximicen la conectividad ecológica y utilicen plantas nativas adaptadas al clima local. Además, se debe planificar un mantenimiento regular para asegurar su funcionalidad y sostenibilidad a largo plazo.

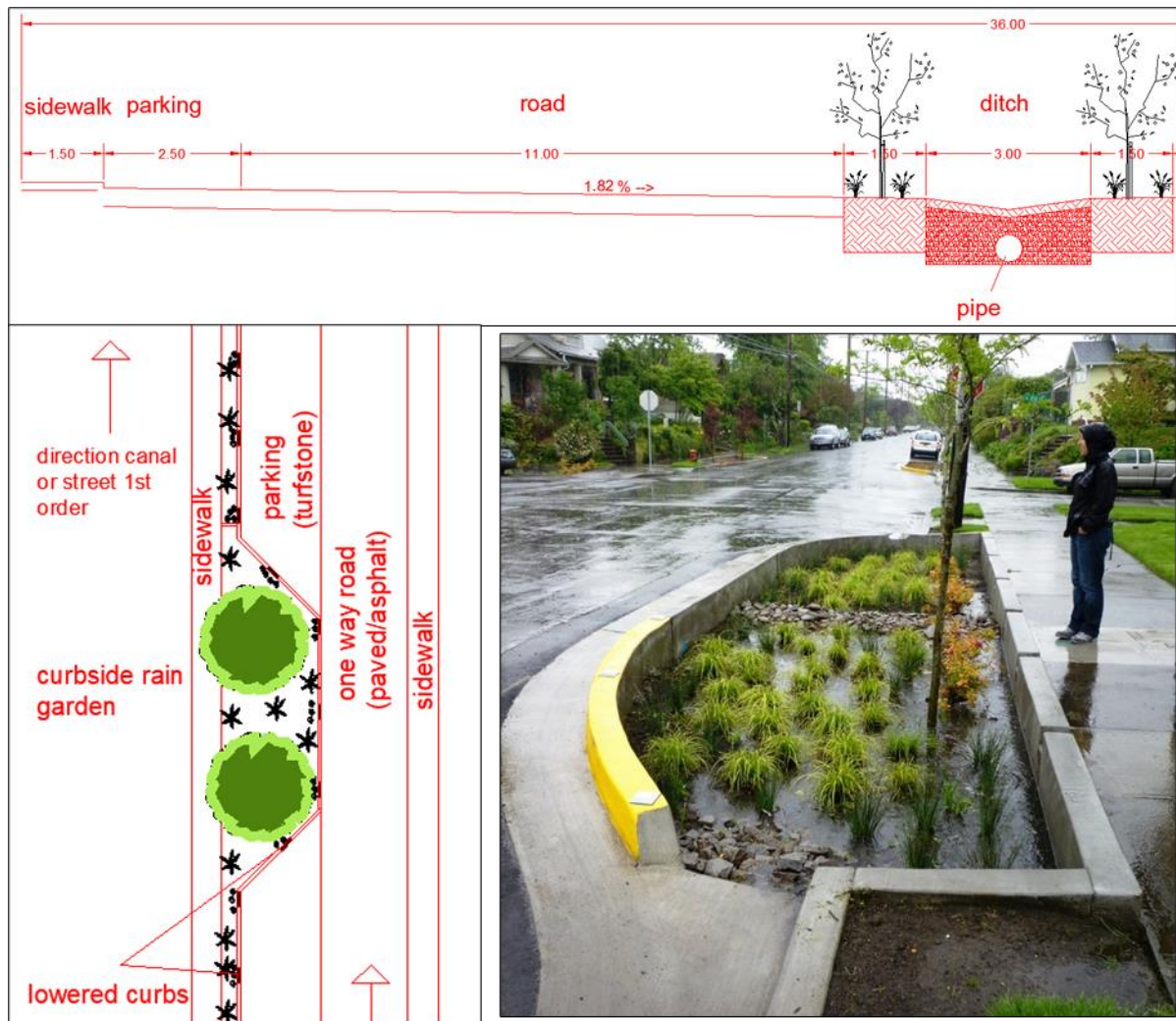


Figura 12 Esquema de un Jardín de lluvia diseñado para el Cantón Durán en el marco del proyecto RESCLIMA, ESPOL 2020

Diseño e implementación de Sistemas de Alerta Temprana (SAT) Multiamenaza

Los sistemas de alerta temprana son esenciales para la gestión de riesgos de desastres y la adaptación frente a los impactos del cambio climático como las inundaciones, heladas y deslizamientos. Estos sistemas utilizan protocolos de actuación en conjunto con tecnologías avanzadas para detectar amenazas inminentes y emitir alertas oportunas a las comunidades más expuestas a riesgos. Para ser eficaz, el diseño y operación de los SAT deben incluir activamente a las comunidades en riesgo, facilitar la educación del público, diseminar eficazmente los mensajes y alertas entre los actores claves del sistema, y garantizar la preparación constante, el cumplimiento oportuno y adecuado de los protocolos acordados, y asegurar la sostenibilidad y mejora del conjunto de componentes (figura 13). Los componentes clave de un SAT son:

Conocimiento del riesgo: Este componente implica identificar y evaluar los riesgos y las vulnerabilidades de la comunidad frente a eventos o amenazas climáticas. Se enfoca en relacionar los niveles del evento (como la precipitación) con su impacto en la comunidad, validando la vulnerabilidad en términos de su exposición, sensibilidad y capacidad adaptativa o de afrontamiento para hacer frente a la amenaza.

Monitoreo y alarma: Consiste en establecer sistemas y procesos para el monitoreo continuo de las amenazas (precipitación). Se desarrollan mecanismos de alerta temprana que permiten detectar signos de peligro de manera anticipada y activar las alarmas para que la comunidad pueda tomar medidas preventivas, además, se debe considerar a la comunidad no solo como un actor de respuesta, sino que pueden ser parte de la red de monitoreo meteorológico e hidrológico.

Difusión y comunicación: En esta componente se garantiza protocolos de comunicación comunitarios e institucionales garantizando una comunicación rápida y efectiva en todos los niveles. Esto incluye el uso de diferentes medios de comunicación (radios, sirenas, mensajes de texto, aplicación, etc.) y la capacitación de la población para reconocer y actuar ante cada una de las alertas.

Preparación y respuesta: Este componente se enfoca en la elaboración y aplicación de protocolos de respuesta ante emergencias. Incluye la planificación de respuestas específicas a inundaciones tanto a nivel municipal como comunitario, así como, los recursos y capacidades disponibles para hacerles frente. Tener planes de respuesta bien definidos y practicados asegura que las comunidades puedan actuar rápidamente y de manera coordinada cuando se active una alerta temprana.

Componentes para el diseño de un Sistema de Alerta Temprana



Figura 13 Componentes de un Sistema de Alerta Temprana. Fuente: ESPOL, 2022

Nota: La participación de la comunidad no solo mejora la relevancia y efectividad de las medidas de alerta temprana, sino que también fortalece la resiliencia comunitaria. Al involucrar a los residentes locales en cada etapa del proceso para el diseño del SAT, se fomenta una cultura de prevención y se asegura que las medidas de alerta temprana sean relevantes, efectivas, culturalmente apropiadas y sostenibles a largo plazo.

Los SAT no solo permitirán proteger a las personas frente a desastres, sino que también, permitirán recolectar información para mejorar los modelos de impacto, permitiendo mejorar la toma de decisiones para la reducción de riesgos, adaptación al cambio climático y desarrollo sostenible de la ciudad de Latacunga.

Mantenimiento Integral de Quebradas y cuerpos de agua: Limpieza, Revegetación, Reingeniería y Estabilización

El mantenimiento integral de quebradas, ríos y humedales andinos que incluye la limpieza, revegetación, reingeniería y estabilización, es una medida crucial para la gestión sostenible del agua y la prevención de desastres naturales. La limpieza de quebradas u otros cuerpos de agua implica la remoción de escombros y basura que pueden obstruir el flujo de agua y aumentar el riesgo de inundaciones. La revegetación consiste en plantar vegetación nativa en las riberas para estabilizar el suelo y mejorar la capacidad de infiltración de agua. La reingeniería y estabilización utiliza técnicas de bioingeniería para prevenir la erosión y los deslizamientos. Para implementar estas medidas de manera efectiva, se deben evaluar las áreas prioritarias, involucrar a la comunidad y a las autoridades locales en el proceso, y establecer un sistema de monitoreo para asegurar su efectividad a largo plazo.

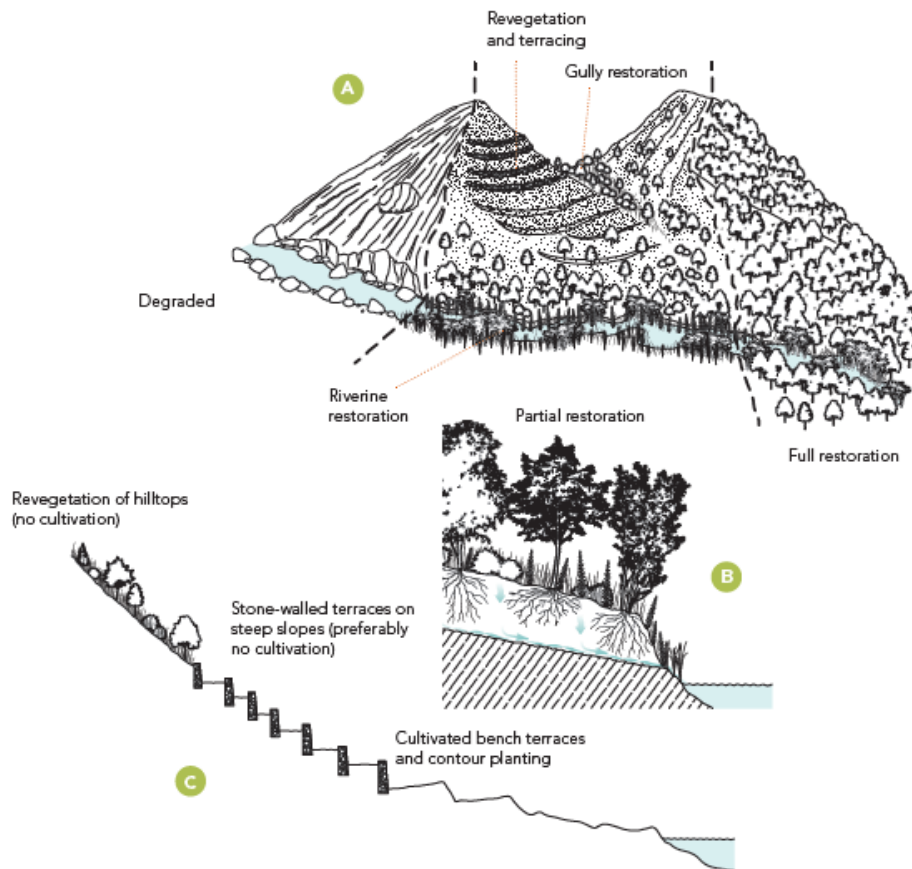


Figura 14 Ejemplos de revegetación y estabilización de taludes en quebradas y/o cerros. Fuente: UNDRR, 2024

Fomentar Ordenanzas para el Diseño e Implementación de Soluciones Basadas en la Naturaleza para proteger elementos esenciales de la Ciudad, Manejo de quebradas.

Promover la inclusión de ordenanzas municipales que incluyan los conceptos que permitan la implementación de soluciones basadas en la naturaleza como una estrategia fundamental para proteger elementos esenciales de la ciudad, como son las quebradas, páramos y humedales andinos. Para asegurar su pertinencia y eficacia, estas normativas deben desarrollarse colaborando con diversos actores, incluyendo autoridades locales, expertos en medio ambiente y la comunidad. Es crucial educar a la comunidad sobre los beneficios de las soluciones basadas en la naturaleza, como la mejora de la resiliencia urbana y la sostenibilidad ambiental. Además, es necesario establecer mecanismos de cumplimiento efectivo para garantizar que las ordenanzas sean respetadas, incluyendo inspecciones regulares y sanciones para los incumplimientos.



Figura 15 Ejemplo de recuperación de canales y quebradas.

Definición de otras medidas que no fueron priorizadas

Parques Fluviales

Los parques fluviales representan una SbN efectiva para la gestión del riesgo de inundaciones y la mejora de la calidad ambiental en zonas urbanas. Un parque fluvial es un espacio natural o semi-natural adyacente a un río o cuerpo de agua que se ha diseñado o restaurado para cumplir con múltiples funciones ecológicas y sociales. Estas áreas sirven como zonas de amortiguamiento que absorben y retienen la escorrentía superficial, reduciendo el riesgo de inundaciones en las áreas circundantes. Además, los parques fluviales mejoran la biodiversidad, estabilizan las riberas de los ríos, y proporcionan espacios recreativos para la comunidad. La creación de parques fluviales no solo ayuda a mitigar los impactos de eventos extremos, sino que también contribuye a la adaptación al cambio climático al fortalecer los ecosistemas naturales que protegen contra las inundaciones y otros riesgos hidrometeorológicos (Raymond et al., 2017).

Comité Técnico-Científico para la Adaptación al Cambio Climático y la Reducción del Riesgo de Desastres

El Comité Técnico-Científico para la Adaptación al Cambio Climático y la Reducción del Riesgo de Desastres es un organismo interdisciplinario fundamental a nivel cantonal, que tiene como objetivo asesorar y guiar a las autoridades locales en la implementación de estrategias efectivas para enfrentar los desafíos del cambio climático. Este comité debe estar compuesto por representantes de la academia, centros de investigación, organizaciones civiles, institutos de monitoreo, y ONGs, quienes aportan un conocimiento técnico y científico integral. La colaboración entre estos actores permite desarrollar políticas y acciones basadas en evidencia, que no solo mitiguen los riesgos asociados a eventos climáticos extremos, sino que también promuevan una planificación territorial adaptativa y resiliente, alineada con las realidades y necesidades del cantón

6. SIGUIENTES PASOS: INTEGRACION DE LA GESTION DE RIESGOS Y ADAPTACION EN LA PLANIFICACION DEL TERRITORIO.

El gobierno autónomo de Latacunga está desarrollando una visión integrada del ordenamiento de su territorio articulado al enfoque de la gestión de riesgos de desastres y la adaptación al cambio climático, en el cumplimiento de las políticas nacionales del COOTAD, el COA, la LOGR y el PLANACC. En este trabajo se han presentado algunas evidencias sobre el cambio y la variabilidad climática, y sus efectos en el aumento en la intensidad y en los periodos de retorno de precipitación y caudales en la cuenca del Rio Cutuchi. Estos cambios y tendencias tienen importantes implicaciones en los impactos provocados por inundaciones urbanas y los impactos en la infraestructura esencial para el normal funcionamiento de la ciudad de Latacunga y sus actividades productivas.

Las principales conclusiones obtenidas en este estudio están relacionadas con los riesgos biofísicos y la infraestructura esencial, así como la población potencialmente afectada. Las acciones que el GAD de Latacunga puede desarrollar a partir de los hallazgos se plantean a continuación:

- **Generación de datos e información sobre tendencias Climáticas y sus implicaciones en la planificación del territorio**

El análisis de las proyecciones de escenarios de cambio climático sugiere que existe una tendencia positiva en la cantidad de precipitación y un incremento en la magnitud de los eventos extremos a futuro, así como una tendencia positiva de la temperatura máxima y mínima. Los resultados presentados, son un buen indicador de que se requiere generar soluciones para la prevención del riesgo, así como para la adaptación y mitigación de los eventos extremos (Tr=50 y 100 años) asociados a la componente hidro-climática.

Acciones propuestas: Desarrollar e implementar redes de monitoreo local, como estaciones meteorológicas (corto plazo), que sean parte de un sistema integral que incluya otras amenazas climáticas (inundaciones, deslizamientos, heladas, déficit hídrico) e incluso no climáticas

(emisiones de cenizas, calidad del aire, entre otros). EL objetivo será en el mediano plazo tener una plataforma de datos multiamenazas, generando datos de alta resolución (topografía, cambio de uso de suelo, precipitación, temperatura, calidad del aire etc., en todo el cantón. La información generada servirá para el análisis del territorio en los Planes de Ordenamiento Territorial y en los Planes de Gestión de Riesgos desarrollados en sinergias con Planes de Acciones Climáticas (adaptación & mitigación) a nivel cantonal, alineándose a las políticas del MAATE-PNA y a la LOGR.

- **Conocimiento del Riesgo Climático a partir de Modelos de impacto biofísico y del monitoreo de eventos.**

La metodología propuesta de integración de modelos hidrológicos e hidráulicos como HEC-HMS y HEC-RAS contribuyen al conocimiento del riesgo en ciudades altoandinas como Latacunga, a identificar los disparadores de inundaciones rápidas pluviales, como suelos de rápida saturación, drenajes insuficientes, y posibles usos de suelo que favorecen escorrentías rápidas y procesos erosivos, especialmente en escenarios climáticos de eventos extremos y de mayor periodo de retorno (50 y 100 años). Este tipo de modelación tiene dos beneficios importantes: además de que identifica las zonas biofísicas de alta exposición y susceptibilidad (alta vulnerabilidad), determina los umbrales de velocidades erosivas (>3m/s) y escorrentías (>0.18m) que pueden servir para alertas tempranas y reducir pérdidas y daños en infraestructuras vulnerables, poblaciones expuestas o ecosistemas degradados. Validar los modelos se vuelve un componente fundamental para la reducción del riesgo y el aumento de la resiliencia, para lo cual es necesario monitorear los eventos adversos (durante y después) que sirven para evaluar el modelo y las acciones de respuesta y recuperación.

Acciones propuestas: Articular acciones entre los departamentos del GAD municipal e instituciones ligadas a la gestión del riesgo para generar un reporte sistematizado estándar de eventos adversos en el cantón que permita posteriormente la validación o ajuste de futuros modelos, identificando zonas de intervención específica. La base de datos de eventos adversos debería incluir los disparadores climáticos, los estresores antrópicos (degradación del suelo, mal manejo de residuos sólidos, cierre de quebradas, etc.) así como las pérdidas y daños provocados por dichos eventos a la infraestructura, actividad productiva y población.

Esta información servirá para ajustar el modelo y establecer umbrales que sirvan para desarrollar Sistemas de Alertas Tempranas a inundaciones rápidas por escorrentías en el contexto específico de la ciudad.

- **Prevención del riesgo de desastres orientado a evitar el riesgo de desastres.**

Los Sistemas de Alerta Temprana (SAT) son una herramienta esencial en la gestión comunitaria del riesgo de desastres, reducen en un 30% el impacto de los eventos extremos. Su implementación requiere una infraestructura tecnológica avanzada combinada con un enfoque participativo de diferentes actores institucionales y la activa participación de las comunidades locales. Estos sistemas deben diseñarse para detectar y comunicar amenazas inminentes (multiamenazas) y también para capacitar a la población en la prevención bajo el principio de autoprotección. Además, un enfoque comunitario en la implementación de SAT asegura que las alertas sean comprendidas y que las respuestas sean coordinadas, maximizando así la efectividad de las medidas de emergencia. La educación y sensibilización de la comunidad sobre

los riesgos y las respuestas adecuadas son componentes críticos que garantizan que los SAT no solo sean técnicamente efectivos, sino también socialmente integrados.

Acciones propuestas: Se identificó la necesidad de desarrollar un SAT multiamenaza en las cuencas urbanas del Cunuyacu e Illuchi, aplicando la modelación de riesgos biofísicos (con modelos hidrológicos e hidráulicos) que permiten identificar zonas susceptibles a inundaciones y que complementa al SAT de Cotopaxi para monitoreo de volcanes. El Sistema de Alerta Temprana Multiamenaza para Latacunga, requiere algunas condiciones además del conocimiento de los riesgos de la ciudad, como: a) una infraestructura robusta de telecomunicaciones para la transmisión rápida y fiable de alertas. Esto incluye la cobertura de telefonía móvil, internet de alta velocidad y sistemas de radiocomunicación, b) sensores y equipos de monitoreo: la instalación de sensores y estaciones de monitoreo para detectar amenazas naturales (como sismos, volcanes, inundaciones, deslizamientos, etc.) y c) un sistema de gestión de datos; que pueden incluir plataformas y software para la recopilación, procesamiento y análisis de datos en tiempo real, permitiendo una respuesta rápida y eficaz. Invertir en un SAT es invertir para la resiliencia y reducir el impacto, y por tanto las pérdidas y daños. El desarrollo del SAT requiere coordinación intersectorial y de diferentes actores urbanos, con protocolos establecidos y determinación de roles.

- **Prevención del Riesgo y reconstruir mejor: Medidas de Adaptación Basadas en la Naturaleza**

Las Soluciones Basadas en la Naturaleza (SbN) proporcionan métodos eficientes y sostenibles para la adaptación al cambio climático y la reducción de riesgos de desastres. Al utilizar procesos naturales, estas soluciones suelen requerir menos recursos y mantenimiento a largo plazo en comparación con las infraestructuras tradicionales. La robustez de estos modelos es crucial para diseñar soluciones basadas en la naturaleza (SbN), que no solo abordan las causas subyacentes de los riesgos ambientales, sino que también mejoran la resiliencia de los ecosistemas y las comunidades locales. Las SbN, como la restauración de humedales, la creación de corredores biológicos y la implementación de jardines de lluvia, son estrategias sostenibles que ofrecen beneficios múltiples, incluyendo la reducción de la escorrentía, la mejora de la calidad del agua y el aumento de la biodiversidad urbana.

La integración de SbN en la planificación urbana y gestión de cuencas urbanas permite abordar múltiples desafíos simultáneamente, incluyendo la mitigación de inundaciones, la mejora de la calidad del agua, la protección de la biodiversidad y la creación de espacios recreativos para la comunidad. Las SbN aumentan la resiliencia tanto ecológica como comunitaria. Al fortalecer los ecosistemas naturales, estas soluciones mejoran su capacidad para absorber y recuperarse de eventos extremos, mientras que las comunidades locales se benefician de un entorno más seguro y saludable.

Las medidas de adaptación a las inundaciones deben integrarse en las estrategias de inundaciones urbanas. En general, cuando se diseñan las soluciones basadas en la naturaleza, su modo de operación es estático, mientras que la infraestructura gris (Ej. estaciones de bombeo y sistemas de drenaje), es dinámico (RTC, Real time control por sus siglas en inglés). Por lo que, la selección de los modelos de inundación es esencial para que se pueden adoptar estas dos operaciones de control de acuerdo con las necesidades locales y características ecosistémicas del territorio. Basado en las áreas críticas identificadas, desarrollar propuestas de SBN que puedan mitigar las inundaciones. Algunas posibles soluciones incluyen:

- Restauración de Humedales (Parques fluviales): Restaurar o crear humedales para actuar como zonas de retención de agua y reducir el flujo hacia las áreas urbanas.
- Reforestación y Plantación de Vegetación Ribereña (Manejo de quebradas): Implementar la reforestación en cuencas altas y la plantación de vegetación ribereña para estabilizar suelos y reducir la escorrentía.
- Techos Verdes y Espacios Verdes Urbanos: Promover techos verdes, jardines de lluvia, y espacios verdes que puedan absorber la precipitación en áreas urbanas.
- Reconexión de Ríos con Llanuras de Inundación: Modificar la infraestructura existente para permitir que los ríos se desborden naturalmente en llanuras de inundación designadas, reduciendo la presión sobre los sistemas de drenaje urbanos transporte y la movilidad.

7. RECOMENDACIONES

- De acuerdo con los resultados obtenidos, el riesgo que enfrenta el cantón Latacunga, sus personas y activos debido a los peligros asociados con el cambio climático ha aumentado. Los procesos de urbanización han generado un aumento de la vulnerabilidad y exposición, que se combinan con los peligros del cambio climático para impulsar el riesgo e impactos urbanos limitando su capacidad de adaptación. No obstante, entender la interconexión de estos procesos no fue objetivo de esta consultoría por lo cual se recomienda realizar un análisis exhaustivo del riesgo frente amenazas climáticas en el cantón en el cual se pueda incluir la evaluación de las variables de vulnerabilidad, exposición y capacidad adaptativa que permitan acentuar la importancia de los hallazgos de este trabajo y las medidas de adaptación propuestas.
- Coordinar acciones entre los departamentos del GAD municipal e instituciones relacionadas con la gestión del riesgo es crucial para generar un reporte sistematizado y estandarizado de eventos adversos en el cantón. Esta articulación facilitará la validación y ajuste de futuros modelos, así como la identificación de zonas específicas de intervención.
- Fortalecer la política pública mediante la incorporación de resultados técnico-científicos obtenidos del análisis del riesgo climático a través de la modelación de impactos biofísicos. Esto contribuirá significativamente a la elaboración de planes de adaptación y reducción del riesgo climático y de desastres más robustos y efectivos.
- Promover la inclusión de ordenanzas municipales que favorezcan el diseño e implementación de Soluciones Basadas en la Naturaleza es vital para proteger los elementos esenciales de la ciudad. Estas ordenanzas deben considerar el contexto específico de la ciudad para maximizar su efectividad y sostenibilidad.
- Realizar un análisis exhaustivo de la vulnerabilidad de la infraestructura crítica y el sistema socioeconómico de la ciudad es necesario para identificar puntos débiles y priorizar acciones de mitigación. Este análisis permitirá fortalecer la resiliencia urbana frente a diversos riesgos.
- Analizar los extremos de temperatura es crucial para identificar posibles afectaciones e impactos de otras amenazas climáticas en distintos sectores productivos y estratégicos de la ciudad. Esta evaluación ayudará a desarrollar estrategias de adaptación específicas para proteger los intereses económicos y sociales de la comunidad.
- Actualizar la información topográfica, batimétrica e hidrológica del cantón con el objetivo de poder desarrollar estudios a detalle dentro de las demás cuencas urbanas como son las del río Cunuyacu, el Río Machangara e Illuchi, así como también en los barrios como San Felipe que se identificó zonas propensas a inundaciones, donde se pueden

implementar modelos hidrológicos e hidráulicos para el diseño de medidas de adaptación. En la actualidad los sistemas satelitales de observación de la tierra pueden ser medidas costo efectivas para el levantamiento de esta información.

- Basados en las modelaciones de inundaciones realizadas en este proyecto, se ve necesaria la elaboración por parte del MAATE de un manual para la evaluación y selección de modelos de impacto biofísicos por inundaciones. Esto debido a que las características y métodos de modelamiento dependerán en gran medida de las configuraciones territoriales, de la estructura de los asentamientos humanos y el ecosistema circundante. Como es el caso de Latacunga donde las principales inundaciones no se deben al desbordamiento de ríos sino por efecto de la escorrentía superficial en zonas impermeables o de topografía adecuada para la acumulación de agua.
- La elección de los modelos, por ejemplo, hidrodinámicos, estadísticos y basados en física, deberá ser un componente crucial en el modelado de sus impactos. Aunque los modelos estadísticos usan enfoques estadísticos para evaluar el riesgo de inundaciones según datos históricos, los hidrodinámicos simulan el movimiento del agua en un río o llanura de inundación, por lo que, dependiendo de las características del terreno, ambos modelos se pueden combinar para mejores predicciones.
- La elección del resultado del modelo, como son, los pronósticos de inundación, altura de la cota de agua y la velocidad de las inundaciones, es otro elemento crucial a considerar para el modelado de inundaciones. Estos resultados pueden utilizarse para guiar las decisiones de gestión del riesgo de inundaciones, como la creación de planes de evacuación, el diseño de sistemas de protección contra inundaciones y la puesta en práctica de zonas de inundación y regulaciones de uso del suelo.
- Algunos modelos de inundaciones urbanas que se recomiendan utilizar para diseñar estrategias de adaptación específicas y se puedan realizar en RTC, son PCWMM, INFOWORKS y MOUSE. Para optimizar la operación de las medidas de control de inundaciones y reducir la probabilidad de errores, es necesario desarrollar tecnologías inteligentes y de RTC combinadas con modelos de inundaciones urbanas.

8. BIBLIOGRAFÍA

- Alexander, L. V., Fowler, H. J., Bador, M., Behrangi, A., Donat, M. G., Dunn, R., Funk, C., Goldie, J., Lewis, E., Rogé, M., Seneviratne, S. I., & Venugopal, V. (2019). On the use of indices to study extreme precipitation on sub-daily and daily timescales. *Environmental Research Letters*, 14(12). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab51b6>
- Alfieri, L., et al. (2022). High-resolution global-scale modeling of flood hazard and risk under climate change. *Nature Climate Change*, 12(5), 456-462.
- Buytaert, W., Celleri, R., Willems, P., De Bièvre, B., & Wyseure, G. (2006). Spatial and temporal rainfall variability in mountainous areas: A case study from the south Ecuadorian Andes. *Journal Of Hydrology*, 329(3-4), 413-421. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.02.031>
- Campozano, L., Céleri, R., Trachte, K., Bendix, J., & Samaniego, E. (2016). Rainfall and Cloud Dynamics in the Andes: A Southern Ecuador Case Study. *Advances In Meteorology*, 2016, 1-15. <https://doi.org/10.1155/2016/3192765>
- Dodman, D., B. Hayward, M. Pelling, V. Castan Broto, W. Chow, E. Chu, R. Dawson, L. Khirfan, T. McPhearson, A. Prakash, Y. Zheng, and G. Ziervogel, 2022: Cities, Settlements and Key Infrastructure. In: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 907–1040, doi:10.1017/9781009325844.008
- Dharmarathne, G., Waduge, A., Bogahawaththa, M., Rathnayake, U., & Meddage, D. (2024). Adapting Cities to the Surge: A Comprehensive Review of Climate-Induced Urban Flooding. *Results In Engineering*, 22, 102123. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102123>
- El Universo. (2023, octubre 11). Latacunga, la ciudad más fría de Ecuador en el 2023. <https://www.eluniverso.com/noticias/ecuador/latacunga-la-ciudad-mas-fria-de-ecuador-en-el-2023-nota/>
- García-Rivero, A. E., Olivera, J., Salinas, E., Yuli, R. A., & Bulege, W. (2017). Use of hydrogeomorphic indexes in SAGA-GIS for the characterization of flooded areas in Madre de Dios, Peru. *International Journal of Applied Engineering Research*, 12(19), 9078–9086
- Government of Jamaica. (2019). National Adaptation Plan (NAP) 2019-2030. Ministry of Economic Growth and Job Creation.
- Headey, D., & Ruel, M. (2023). Food inflation and child undernutrition in low and middle income countries. *Nature Communications*, 14(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-023-41543-9>
- Hondula, D.M., Balling, R.C., Vanos, J.K. et al. Rising Temperatures, Human Health, and the Role of Adaptation. *Curr Clim Change Rep*1, 144–154 (2015). <https://doi.org/10.1007/s40641-015-0016-4>
- IDEAM. (2020). Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PNACC). Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.

- Jang, S., & Kavvas, M. L. (2015). Downscaling Global Climate Simulations to Regional Scales: Statistical Downscaling versus Dynamical Downscaling. *Journal Of Hydrologic Engineering*, 20(1). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)he.1943-5584.0000939](https://doi.org/10.1061/(asce)he.1943-5584.0000939)
- Kundzewicz, Z. W., et al. (2022). *Flood risk in a changing climate: global perspectives and regional insights*. *Water*, 14(9), 1345
- INAMHI. (2019). Determinación de ecuaciones para el cálculo de intensidades máximas.
- IPCC, (2019). Bindoff, N.L., W.W.L. Cheung, J.G. Kairo, J. Arístegui, V.A. Guinder, R. Hallberg, N. Hilmi, N. Jiao, M.S. Karim, L. Levin, S. O'Donoghue, S.R. Purca Cuicapusa, B. Rinkevich, T. Suga, A. Tagliabue, and P. Williamson, 2019: Changing Ocean, Marine Ecosystems, and Dependent Communities. In: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 447–587. <https://doi.org/10.1017/9781009157964.007>.
- IPCC, (2021). Annex VI: Climatic Impact-driver and Extreme Indices [Gutiérrez J.M., R. Ranasinghe, A.C. Ruane, R. Vautard (eds.)]. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 2205–2214, doi:10.1017/9781009157896.020.
- IPCC, (2022a). Castellanos, E., M.F. Lemos, L. Astigarraga, N. Chacon, N. Cuvi, C. Huggel, L. Miranda, M. Moncassim Vale, J.P. Ometto, P.L. Peri, J.C. Postigo, L. Ramajo, L. Roco, and M. Rusticucci, 2022: Central and South America. In: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [H.-O. Portner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegria, M. Craig, S. Langsdorf, S. Loschke, V. Moller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 1689–1816, doi:10.1017/9781009325844.014.
- IPCC, (2022b). Collins M., M. Sutherland, L. Bouwer, S.-M. Cheong, T. Frölicher, H. Jacot Des Combes, M. Koll Roxy, I. Losada, K. McInnes, B. Ratter, E. Rivera-Arriaga, R.D. Susanto, D. Swingedouw, and L. Tibig, 2019: Extremes, Abrupt Changes and Managing Risk. In: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 589–655. <https://doi.org/10.1017/9781009157964.008>.
- Llambí L.D. & Garcés A. 2021. Adaptation to climate change in the Andes: Gaps in understanding and opportunities for knowledge management. Quito: CONDESAN..
- Lopez, J., Martínez, A., & Gómez, P. (2022). Aplicación de Modelos Hidrológicos e Hidráulicos en la Evaluación de Riesgos por Inundaciones. *Journal of Hydrological Sciences*, 67(3), 345-362.
- MAATE-PLANACC (2021). Generación de insumos técnicos clave para la realización de análisis de riesgo climático en los sectores productivos y estratégicos. Reportes Sectoriales Subsector Hidrocarburos e Infraestructura Vial. Ministerio de Ambiente, Agua y Transición Ecológica (MAATE) y el Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PLANACC).

MAATE-PLANACC (2023). Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático del Ecuador (2023-2027). Ministerio de Ambiente, Agua y Transición Ecológica (MAATE) y el Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PLANACC). Quito-Ecuador. https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2023/02/PNA_Plan-Nacional-de-Adaptacion_2023_2027.pdf.

MIDUVI. (2023). Norma Ecuatoriana de la Construcción. <https://www.habitatyvivienda.gob.ec/documentos-normativos-nec-norma-ecuatoriana-de-la-construccion/>

MINAM. (2021). Estrategia Nacional ante el Cambio Climático (ENCC). Ministerio del Ambiente de Perú

Pabón-Caicedo José Daniel , Arias Paola A. , Carril Andrea F. , Espinoza Jhan Carlo , Borrel Lluís Fita , Goubanova Katerina , Lavado-Casimiro Waldo , Masiokas Mariano , Solman Silvina , Villalba Ricardo.(2020) Observed and Projected Hydroclimate Changes in the Andes. *Frontiers in Earth Science*, VOL 8.,<https://www.frontiersin.org/journals/earth-science/articles/10.3389/feart.2020.00061>.

Potter, E.R., Fyffe, C.L., Orr, A. et al (2023). A future of extreme precipitation and droughts in the Peruvian Andes. *npj Clim Atmos Sci* 6, 96. <https://doi.org/10.1038/s41612-023-00409-z>

Qi, W., Ma, C., Xu, H., Chen, Z., Zhao, K., & Han, H. (2021). A review on applications of urban flood models in flood mitigation strategies. *Natural Hazards*, 108(1), 31-62. <https://doi.org/10.1007/s11069-021-04715-8>

SGR. (2023). Base de eventos 2010 - 2024.

Silverman, B. W. (1986). DENSITY ESTIMATION FOR STATISTICS AND DATA ANALYSIS. <https://ned.ipac.caltech.edu/level5/March02/Silverman/paper.pdf>

US Army Corps of Engineers (2023). HEC-RAS River Analysis System User's Manual. Hydrologic Engineering Center. <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation/>

UNDRR 2021. De las Palabras a la Accion, Soluciones Basadas en la Naturaleza para la Reduccion de Riesgos de Desastres. Ginebra, Suiza.

Vervoort, R. W., et al. (2023). *Hydrological extremes in the Andes: Assessing impacts of climate change on flood and drought risk*. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 44, 101231

Vuille, M., Bradley, R. S., & Keimig, F. (2000). "Interannual climate variability in the Central Andes and its relation to tropical Pacific and Atlantic forcing." *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 105(D10), 12447-12460.

9. ANEXO

Anexo 1: Archivos del taller dirigido al equipo de trabajo del GADM de Latacunga en torno al procesamiento del modelo de impactos biofísicos de inundaciones y los resultados logrados con esta consultoría

Link 1: [Memoria Técnicas Medidas de Adaptación](#)

Link 2: [Memoria Técnica taller de vulnerabilidad](#)

Link 3: [Presentación final de la consultoría](#)

Anexo 2: Producto 4: Sistematización de las corridas finales del modelo de impacto biofísico para la ciudad de Latacunga.

Link: [Sistematización de las corridas finales.pdf](#)

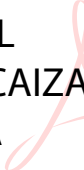
Anexo 3: Material GIS utilizado para realizar los mapas de Impacto

Link1: [Material GIS](#)

Link 2: [Mapas en .png y .pdf](#)

Firma de responsabilidad del producto 5:

ROMMEL
JAVIER CAIZA
QUINGA



Firmado digitalmente
por ROMMEL JAVIER
CAIZA QUINGA
Fecha: 2024.08.26
15:08:21 -05'00'

Rommel Javier Caiza Quinga
Investigador Principal

Proyecto “Análisis de riesgo climático de inundaciones para la ciudad de Latacunga”



Financiado por
la Unión Europea



GLOBAL COVENANT
of MAYORS for
CLIMATE & ENERGY
LATIN AMERICA



Financiado por
la Unión Europea



GLOBAL COVENANT
of MAYORS for
CLIMATE & ENERGY
LATIN AMERICA



WWF