



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE INGENIERÍA

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

Efectos Del Cambio Climático En Zonas Urbanas Aledañas A Las Quebradas “San Sebastián” Y “El Rosario” Del Cantón Guano

Trabajo de Titulación para optar al título de Ingeniero Civil

Autor:

Lema Osorio, Ronald Mauricio

Suárez Venlasaga, Dennis Alexander

Tutor:

Ing. María Gabriela Zúñiga

Riobamba, Ecuador 2023

DECLARATORIA DE AUTORÍA

Yo, **Ronald Mauricio Lema Osorio**, con cédula de ciudadanía **0503094872** y **Dennis Alexander Suárez Venlasaga**, con cédula de ciudadanía **0604655092**, autores del trabajo de investigación titulado: **Efectos Del Cambio Climático En Zonas Urbanas Aledañas A Las Quebradas “San Sebastián” Y “El Rosario” Del Cantón Guano**, certifico que la producción, ideas, opiniones, criterios, contenidos y conclusiones expuestas son de mi exclusiva responsabilidad.

Asimismo, cedo a la Universidad Nacional de Chimborazo, en forma no exclusiva, los derechos para uso, comunicación pública, distribución, divulgación y/o reproducción total o parcial, por medio físico o digital; en esta cesión se entiende que el cesionario no podrá obtener beneficios económicos. La posible reclamación de terceros respecto de los derechos de autor (a) de la obra referida, será de mi entera responsabilidad; librando a la Universidad Nacional de Chimborazo de posibles obligaciones.

En Riobamba, 27 de octubre de 2023.



Ronald Mauricio Lema Osorio

C. I. 0503094872



Dennis Alexander Suárez Venlasaga

C. I. 0604655092

DICTAMEN FAVORABLE DEL PROFESOR TUTOR

Quien suscribe, **Ing/Mgs. María Gabriela Zúñiga Rodríguez**, catedrático adscrito a la Facultad de Ingeniería, por medio del presente documento certifico haber asesorado y revisado el desarrollo del trabajo de investigación titulado: **“Efectos Del Cambio Climático En Zonas Aledañas A Las Quebradas “San Sebastián” Y “El Rosario” Del Cantón Guano”**, bajo la autoría de Ronald Mauricio Lema Osorio y Dennis Alexander Suárez Venlasaga; por lo que se autoriza ejecutar los trámites legales para su sustentación.

Es todo cuanto informar en honor a la verdad; en Riobamba, a los 27 días del mes de octubre de 2023.



Ing. María Gabriela Zúñiga Rodríguez

C. I. 0503094872

CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL

Quienes suscribimos, catedráticos designados Miembros del Tribunal de Grado para la Evaluación del trabajo de investigación Efectos Del Cambio Climático En Zonas Aledañas A Las Quebradas “San Sebastián” Y “El Rosario” Del Cantón Guano, presentado por Ronald Mauricio Lema Osorio, cédula de identidad número 0503094872 y Dennis Alexander Suárez Venlasaga, con cédula de identidad número 0604655092, bajo la tutoría de Mgs. María Gabriela Zúñiga Rodríguez; certificamos que remendamos la APROBACIÓN de este con fines de titulación. Previamente se ha evaluado el trabajo de investigación y escuchada la sustentación por parte de sus autores; no teniendo más que observar.

De conformidad a la normativa aplicable firmamos, en Riobamba 12 de diciembre de 2023.

Ing. Nelson Patiño
**PRESIDENTE DEL TRIBUNAL DE
GRADO**



Ing. Jessica Brito
**MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE
GRADO**



Ing. Alfonso Arellano
**MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE
GRADO**





Dirección
Académica
VICERECTORADO ACADÉMICO

en movimiento



UNACH-RGF-01-04-08.1.5
VERSIÓN 01: 06-09-2021

CERTIFICACIÓN

Que, **LEMA OSORIO RONALD MAURICIO** con CC: **0503094872** y **SUÁREZ VENLASAGA DENNIS ALEXANDER** con CC: **0604655092**, estudiantes de la Carrera **INGENIERÍA CIVIL**, Facultad de **INGENIRÍA**; ha trabajado bajo mi tutoría el trabajo de investigación titulado "**Efectos Del Cambio Climático En Zonas Aledañas A Las Quebradas "San Sebastián" Y "El Rosario" Del Cantón Guano**", cumple con el 9 %, de acuerdo al reporte del sistema Anti plagio **URKUND**, porcentaje aceptado de acuerdo a la reglamentación institucional, por consiguiente autorizo continuar con el proceso.

Riobamba, 28 de noviembre de 2023

Ing./Mgs. María Gabriela Zúñiga Rodríguez
TUTOR(A)

DEDICATORIA

A Dios y San Martín, quien me ha brindado fortaleza y guía a lo largo de este arduo viaje académico. A mi amada madre, Bertha, cuyo amor, apoyo y sacrificios han sido la luz que me ha iluminado en cada paso de este camino. A mi padre, Luis, por su apoyo incondicional.

A mis hermanos, Paúl, Danny y mejor amigo Diego quienes siempre han estado a mi lado, brindándome apoyo y ánimo en esta travesía, vuestra presencia constante en mi vida me recordó que no estaba solo. A mi querida Emily, cuyo amor y paciencia han sido mi refugio y motivación en los momentos más desafiantes.

A mis amigos, Fayer, Steven, Héctor, Dennis, Pablo quienes compartieron risas, consejos y aliento a lo largo de este viaje. A todos ustedes, mi gratitud es inmensa por su paciencia, sabiduría y motivación. Gracias por ser mi familia y mi red de apoyo incondicional. Vuestra confianza ha sido mi mayor impulso para alcanzar este logro.”

Ronald Lema

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mi madre, Teresa, quien ha estado en todo momento de manera incondicional siendo mi fortaleza y mi guía. Cuya devoción y constante aliento me han orientado a lo largo de esta etapa de formación profesional.

A mi leal compañera de cuatro patas, Nicky, quien fue mi refugio, mi inspiración y mi ancla emocional durante este viaje, porque tú también eres parte de mi éxito.

A mis amigos y familiares, cuyas risas y consejos han aligerado las cargas y fueron parte esencial de mi experiencia universitaria.

Cada página de este trabajo lleva una parte de su confianza y amistad hacia mí, por ello se los dedico con cariño y agradecimiento.

Dennis Suárez

AGRADECIMIENTO

Expresamos nuestra gratitud a nuestros padres, quienes han sido una fuente inagotable de apoyo, amor y motivación constante en cada paso de este viaje. Así mismo, extender nuestra gratitud a nuestra Alma Mater la Universidad Nacional de Chimborazo que es nuestro segundo hogar, por brindarnos las herramientas necesarias para crecer personal e intelectualmente. Además, queremos expresar nuestro profundo agradecimiento al Ing. Carlos Montalvo, cuya orientación, paciencia y conocimientos fueron cruciales para la realización de este trabajo. Al compromiso inquebrantable de nuestra tutora Ing. María Gabriela Zúñiga y su guía experta. A todos ustedes, queremos expresar nuestra más profunda gratitud por convertir nuestra experiencia universitaria en una etapa inolvidable de desarrollo personal.

¡Gracias!

Ronald y Dennis

ÍNDICE GENERAL

PORTADA	
DECLARATORIA DE AUTORÍA	
DICTAMEN FAVORABLE DEL PROFESOR TUTOR	
CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL	
CERTIFICACIÓN SISTEMA ANTIPLAGIO URKUND	
DEDICATORIA.....	
DEDICATORIA.....	
AGRADECIMIENTO	
ÍNDICE GENERAL	
ÍNDICE DE TABLAS	
ÍNDICE DE FIGURAS	
ÍNDICE DE ANEXOS.....	
RESUMEN	
ABSTRACT.....	
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.....	17
Antecedentes	17
Problema	18
Justificación	20
Objetivos.....	20
Objetivos Específicos	21
Caso de Estudio	21
CAPÍTULO II. MERCADO TEÓRICO.....	24
Agua en la Tierra.....	24
Inundaciones	25

Cambio Climático	25
Modelos Hidrológicos.....	26
Método SCS del Número de la Curva	27
Modelo hidrológico HEC-HMS.....	28
Modelo Hidrodinámico Bidimensional Iber	30
CAPÍTULO III. METODOLOGÍA	33
Construcción de Curvas IDF.....	34
Construcción de Tormentas de Diseño	37
Modelación Hidrológica	38
Modelación Hidráulica	39
CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	47
Curvas IDF.....	47
Tormentas de Diseño.....	49
Modelación Hidrológica	51
Modelación Hidráulica	53
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	66
CAPÍTULO VI. PROPUESTA	68
Propuestas	68
BIBLIOGRAFÍA	69
ANEXOS	73

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Propiedades de la cuenca – Quebrada “San Sebastián”</i>	23
Tabla 2 <i>Propiedades de la cuenca – Quebrada “El Rosario”</i>	23
Tabla 3 Ecuaciones de Intensidad	47
Tabla 4 Valores de intensidades, T=50 años, t=30 minutos, de las curvas IDF con y sin Cambio Climático.....	49
Tabla 5 Resumen de resultados de la modelación hidrológica.	53

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Ubicación de las cuencas hidrográficas de las quebradas San Sebastián y El Rosario.	22
Figura 2 Representación del ciclo hidrológico	24
Figura 3 Metodología de la investigación	33
Figura 4 Distribución espacial del cambio de la precipitación proyectado para el escenario RCP 8.5, respecto al periodo de referencia 1981-2005.	36
Figura 5 Shapefile de la delimitación del área de la cuenca en estudio.....	39
Figura 6 Geometría de la cuenca y condición de entrada.....	41
Figura 7 Condiciones de Salida para el área de estudio.....	42
Figura 8 Condiciones iniciales.	43
Figura 9 Clasificación del área de estudio en función del uso de suelo.....	45
Figura 10 Modelo de Digital del Terreno (MDT) de la zona de estudio.....	46
Figura 11 Curva IDF construida, sin considerar efectos del Cambio Climático.....	48
Figura 12 Curva IDF construida, considerando efectos del Cambio Climático.....	48
Figura 13 Quebrada “San Sebastián” - Comparación de la tormenta de diseño actual vs la futura considerando el escenario de Cambio Climático RCP 8.5.	50
Figura 14 Quebrada “El Rosario” - Comparación de la tormenta de diseño actual vs la futura considerando el escenario de Cambio Climático RCP 8.5.	51
Figura 15 Quebrada “San Sebastián” - Hidrogramas comparando condiciones normales vs condiciones futuras con CC.....	52
Figura 16 Quebrada “El Rosario” - Hidrogramas comparando condiciones normales vs condiciones futuras con CC.....	52
Figura 17 Mapa de tirantes máximos sin CC.....	55

Figura 18 <i>Mapa de tirantes máximos con escenarios RCP 8.5 de CC</i>	56
Figura 19 <i>Diferencia de áreas de inundación</i>	57
Figura 20 <i>Diferencia de tirantes entre la situación actual y futura</i>	59
Figura 21 <i>Mapa de velocidades máximas sin CC</i>	60
Figura 22 <i>Mapa de velocidades máximas con Cambio Climático Escenario RCP 8.5</i>	61
Figura 23 <i>Av. 20 de Diciembre tras el evento del 12 de diciembre de 2021</i>	64
Figura 24 <i>Resultados de la modelación de zonas propensas a inundaciones</i>	65
Figura 25 <i>Daños materiales producidos por el aluvión del 12 de diciembre de 2021, Guano - Ecuador</i>	65

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1 <i>Valor de precipitación máxima por año (sin considerar Cambio Climático)</i>	73
Anexo 2 <i>Factor aplicado por Cambio Climático (RCP8.5)</i>	74
Anexo 3 <i>Análisis de Gumbel por año, sin considerar Cambio Climático</i>	74
Anexo 4 <i>Valor de precipitación máxima por año, considerando Cambio Climático</i>	75
Anexo 5 <i>Análisis de Gumbel por año, considerando Cambio Climático</i>	76
Anexo 6 <i>Hidrogramas de diseño - Quebrada "San Sebastián"</i>	77
Anexo 7 <i>Hidrogramas de diseño - Quebrada "El Rosario"</i>	77

RESUMEN

Las quebradas “San Sebastián” y “El Rosario”, situadas en el cantón Guano, provincia de Chimborazo; registran afectaciones alarmantes en periodos recientes en cuanto al tema de eventos climáticos extremos que generan precipitaciones intensas, aluviones e inundaciones en el cantón. Esta problemática podría agravarse si se considera el efecto del Cambio Climático sobre el régimen de crecida de caudales de las quebradas. La limitada información acerca de los efectos que tendría el Cambio Climático sobre Ecuador, reduce el espectro de investigación a trabajar en base a la disponibilidad de datos meteorológicos registrados por las estaciones hidrometeorológicas del INAHMI y a los posibles escenarios de cambio determinados por el MAATE. El objetivo era identificar las zonas propensas a inundaciones que se verían afectadas ante un posible escenario futuro en el cual se aplique las condiciones de Cambio Climático más desfavorables. Para esto se construyeron curvas IDF en base a los registros anuales de la estación hidrometeorológica M1036 de la ESPOCH. A continuación, se realizó las modelaciones hidrológicas e hidráulicas en los softwares HEC-HMS e IBER, considerando un escenario climático RCP 8.5 en un periodo de retorno de 50 años. Como resultado se generaron mapas que muestran los nuevos valores y zonas afectadas. Los resultados revelan principalmente un incremento en las velocidades de flujo y en el nivel de tirantes de agua, en los cuales se registran acrecentamientos de hasta 1.75 [m/s] y 3.31 [m], respectivamente, sobre los niveles actuales que no consideran el escenario de CC. En cuanto a las zonas susceptibles, se registró un ligero incremento de áreas que se verían afectadas, pero que de igual manera significan un riesgo para vida cotidiana de los moradores del cantón Guano. Por lo tanto, se espera que las autoridades competentes tomen las respectivas medidas en relación con la gestión de riesgos, la planificación urbana y a las medidas de prevención a largo plazo respecto a los desastres naturales por eventos climáticos extremos.

Palabras clave: Cambio Climático, Modelación Hidrológica, Modelación Hidráulica, Inundaciones.

ABSTRACT

The “San Sebastián” and “El Rosario” water ravines, located in the Guano canton, province of Chimborazo, register alarming effects in recent periods regarding the issue of extreme climatic events that generate intense rainfall, mudslides, and floods in the canton. This problem could worsen if the effect of Climate Change on the flow rate of water ravines is considered. The limited information about the impact that Climate Change would have on Ecuador reduces the spectrum of research to work based on the availability of meteorological data recorded by the INAHMI hydrometeorological stations and the possible change scenarios determined by the MAATE. The objective was to identify the flood-prone areas affected by a likely future scenario in which the most unfavorable Climate Change conditions are applied. For this, IDF curves were constructed based on the annual records of the hydrometeorological station M1036 of the ESPOCH. Next, hydrological and hydraulic modeling was carried out in the HEC-HMS and IBER software, considering an RCP 8.5 climate scenario with a return period of 50 years. The results mainly reveal an increase in flow velocities and the level of water depths, in which increases of up to 1.75 [m/s] and 3.31 [m] are recorded over the current levels that do not consider the CC scenario. Regarding susceptible areas, there was a slight increase in the regions that would be affected, which also posed a risk to the daily life of the residents of the Guano canton. Therefore, the competent authorities are expected to take the respective measures about risk management, urban planning, and long-term prevention measures regarding natural disasters due to extreme climate events.

Keywords: Climate change, hydrological modeling, hydraulic modeling, floods.



Reviewed by:

Mgs. Sofia Freire Carrillo

ENGLISH PROFESSOR

C.C. 0604257881

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

Antecedentes

El agua ocupa un lugar central en el desarrollo sostenible, siendo esencial para el progreso socioeconómico, la energía, la producción de alimentos, los ecosistemas y la supervivencia humana. Además, desempeña un papel crucial en la adaptación al Cambio Climático (CC) y en la relación entre la sociedad y el medio ambiente (Organización de las Naciones Unidas (ONU), 2019).

A medida que la población mundial crece, las necesidades de vivienda e infraestructura urbana demandan una inminente expansión, lo cual afecta de manera directa a los ecosistemas, el Ciclo Hidrológico, zonas aledañas a los cuerpos de agua y sus sistemas climáticos. En adición a ello, hay que tener en cuenta que Ecuador posee un perfil productivo dependiente en gran parte del sector agroexportador primario y a las industrias manufactureras ligadas directamente con el uso del recurso hídrico. Es por eso que los efectos derivados del Cambio Climático influenciarán de manera directa la senda de desarrollo del país (Ludeña & Wilk, 2013).

El riesgo de inundaciones en Ecuador está asociado a factores como el régimen de crecida de los cuerpos de agua producto de las precipitaciones durante el periodo invernal, así como al efecto producido por el evento climático mundial denominado “fenómeno del niño”. Aunado a esto, la incidencia que tendría el Cambio Climático sobre estos factores daría como resultado precipitaciones de mayor intensidad y un aumento al riesgo de inundaciones en zonas aledañas a los cuerpos de agua. Puesto que Benito Ferrández et al. (2018) señalan que las proyecciones realizadas por el Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica (MAATE) indican un

incremento del efecto del Cambio Climático, lo cual desencadenaría en un aumento del riesgo a inundaciones en zonas vulnerables.

Por tanto, el desarrollo de medidas preventivas y de mitigación de riesgos ante un eventual impacto directo del Cambio Climático sobre el régimen de crecida de cuerpos de agua, precipitaciones y afectaciones en zonas propensas a inundaciones; es de vital importancia.

Para ello, las herramientas tecnológicas de libre acceso con las que se cuenta en la actualidad colaboran a la toma de decisiones informadas mediante la implementación de softwares capaces de realizar modelaciones que permiten estimar la esorrentía y el flujo del agua dentro de una cuenca en respuesta a un evento de climático, como es el caso del programa HEC-HMS (The Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System) (Pascual & Díaz, 2018); así también se puede realizar la modelación del flujo de agua en ríos, sistemas fluviales, inundaciones y las interacciones entre el agua, el suelo y la vegetación en el modelo matemático bidimensional Iber (Bladé et al., 2014).

Problema

En Ecuador se denota una creciente tendencia en las afectaciones que guardan relación con los fenómenos naturales de gran magnitud que ha presenciado. La inminente exposición a eventos climáticos extremos como el aumento desmesurado en las precipitaciones, inundaciones, desbordamientos de ríos, desbordamiento de quebradas y aluviones producto de los diferentes fenómenos climáticos que acongojan al país año con año, han evidenciado la vulnerabilidad de la población ante estas catástrofes y la evidente falta de planificación e inversión en infraestructura de control y ordenamiento territorial por parte de las entidades gubernamentales (Gómez, 2021).

En base a los datos presentados por Desinventar (2021) los fenómenos hidrometeorológicos, en especial las inundaciones, se consideran como el principal evento de amenaza reportado y ocupa la tercera posición en causas de muerte relacionadas a amenazas en Ecuador. El CC afecta de especial manera al Ecuador, puesto que, la variedad de ecosistemas, formaciones geológicas y pisos climáticos que se pueden encontrar en extensiones reducidas de territorio, dificulta determinar con claridad las tendencias climáticas y sus variaciones. A esto debe sumarse el efecto que tendría el Cambio Climático sobre los sistemas oceanográficos, meteorológicos e hidrológicos que repercuten directamente sobre la cantidad e intensidad de las precipitaciones en las cuencas a ambos lados de la Cordillera de los Andes (Mena et al., 2021).

El cantón Guano, en la provincia de Chimborazo, enfrenta una problemática relacionada con el desbordamiento de las quebradas y la gran probabilidad de ocurrencia de aluviones. Esta área geográfica es especialmente vulnerable debido a su topografía montañosa y su ubicación en la región andina. El desbordamiento de las quebradas a menudo resulta en la erosión del suelo y el arrastre de sedimentos y rocas hacia las zonas bajas del cantón provocando aluviones que destruyen viviendas, infraestructura vial, cultivos y amenazan la vida de las personas. A esto se añaden factores como la urbanización no regulada, la deforestación, la falta de educación pública sobre la gestión de riesgo, la escasez de sistemas de alerta que ayuden a reducir la vulnerabilidad a los desbordamientos de las quebradas y los aluviones (Noroña, 2021).

Justificación

El fenómeno del Cambio Climático (CC) es uno de los principales desafíos que incidirá de manera directa sobre la forma de vida de los seres humanos durante el siglo XXI. Producto de los cambios drásticos de temperatura se puede estimar cambios en la calidad del recurso hídrico (Pérez-Cutillas et al., 2020). Si bien no afecta de la misma manera a todos, es importante considerar las repercusiones ante la variación de disponibilidad hídrica producto del CC, que influirían principalmente a las zonas productivas como la agricultura, pesca e incluso minería de los sectores afectados (Serna & Cañón, 2020), pero también debería analizarse la forma de afectación de estas condiciones sobre las urbes, haciendo especial énfasis en aquellas que se encuentran en zonas aledañas a fuentes o pasos naturales de agua.

Es por ello que, el presente trabajo de investigación pretende aportar información sobre las estimaciones de los efectos del CC sobre las zonas vulnerables a inundaciones del cantón Guano, mediante la implementación de escenarios de CC en modelos hidrológicos e hidráulicos en la zona de estudio; y de esta manera contribuir con información que podría resultar de utilidad para la planificación controlada de las nuevas urbes y planes de contingencia ante desastres naturales relacionados con el recurso hídrico.

Objetivos

Estimar los efectos del Cambio Climático sobre las zonas vulnerables a inundaciones aledañas a las quebradas “San Sebastián” y “El Rosario” del cantón Guano, mediante la modelación hidráulica e hidrológica de escenarios de Cambio Climático.

Objetivos Específicos

- Establecer las Curvas de Intensidad, Duración y Frecuencia (IDF) partiendo de los registros de precipitación máximas históricas de la estación agrometeorológica M1036 de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
- Implementar la variación producida sobre los registros de precipitaciones máximas de la estación M1036, considerando un escenario de Cambio Climático (RCP 8.5).
- Ejecutar el modelo hidrológico de lluvia-escorrentía en el software HEC-HMS para establecer los caudales alcanzados en un periodo de retorno de 50 años; tanto para el escenario que considera el efecto de Cambio Climático RCP 8.5, como para el que se considera condiciones normales.
- Ejecutar el modelo hidráulico en el software Iber, implementando los caudales obtenidos del modelo hidrológico, con la finalidad de identificar las zonas vulnerables a inundaciones tras la aplicación del escenario de Cambio Climático RCP 8.5.
- Identificar los efectos producidos en las zonas aledañas a las quebradas producto de la implementación del escenario de Cambio Climático.

Caso de Estudio

Las quebradas de “San Sebastián” y “El Rosario” se localizan dentro de la zona urbana del cantón Guano perteneciente a la provincia de Chimborazo Figura 1. La cuenca de la quebrada “San Sebastián” se clasifica como muy pequeña cuyo perfil longitudinal muestra cotas entre los 2721 msnm hasta los 2948 msnm; mientras que la cuenca de la quebrada “El Rosario” se clasifica como pequeña, cuyo perfil longitudinal muestra cotas entre los 2716 msnm hasta los 3250 msnm. Ambas se definen como cuencas alargadas e irregulares (Alarcón & Basantes, 2022).

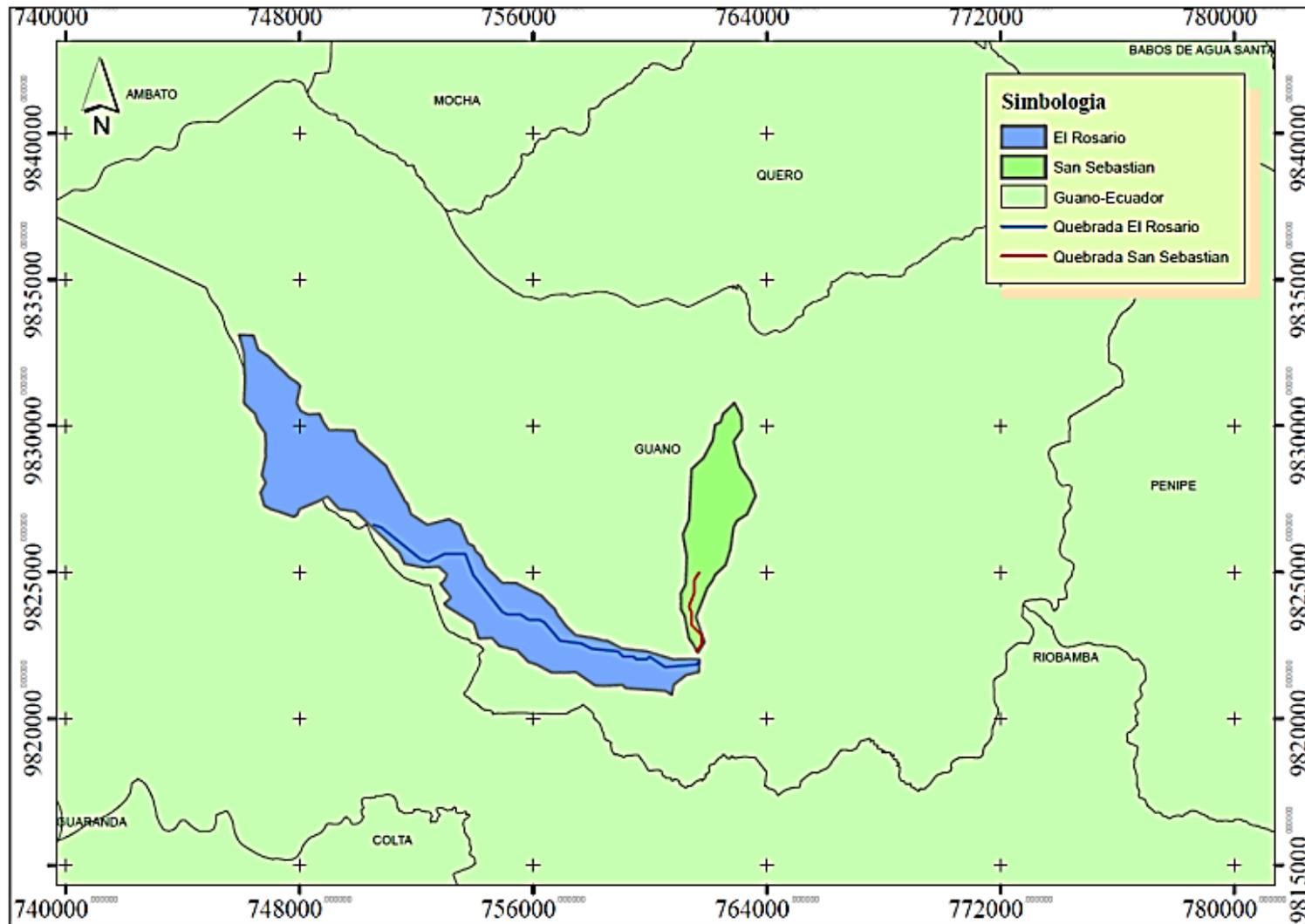


Figura 1 Ubicación de las cuencas hidrográficas de las quebradas San Sebastián y El Rosario.

Fuente: (Alarcón & Basantes, 2022)

Las características de la red de drenaje de las quebradas presentadas por Alarcón & Basantes (2022) indican para “San Sebastián” un valor de escurrimiento superficial de 0.81 Km, pendiente del cauce de 17.37% y un tiempo de concentración de 40.71 minutos. Mientras que para la quebrada “El Rosario” determinan un escurrimiento superficial de 0.65 Km, pendiente del cauce de 8.12% y un tiempo de concentración de 101.82 minutos. En la Tabla 1 se detalla las propiedades de la cuenca para la quebrada “San Sebastián”; mientras que en la Tabla 2 se detalla las propiedades de la cuenca para la quebrada “El Rosario”.

Tabla 1 *Propiedades de la cuenca – Quebrada “San Sebastián”.*

Propiedades de la cuenca - Quebrada "San Sebastián"	
Área de la cuenca (Km ²)	9.81
Longitud de la red de drenaje (Km)	8.59
Número de curva (-)	80.0
Tiempo de Concentración (min)	40.71
Tiempo de retardo (min)	24.42
Pendiente media (m/m)	0.17

Fuente: (Alarcón & Basantes, 2022).

Tabla 2 *Propiedades de la cuenca – Quebrada “El Rosario”.*

Propiedades de la cuenca - Quebrada "El Rosario"	
Área de la cuenca (Km ²)	35.07
Longitud de la red de drenaje (Km)	19.32
Número de curva (-)	75.00
Tiempo de Concentración (min)	101.82
Tiempo de retardo (min)	61.09
Pendiente media (m/m)	0.08

Fuente: (Alarcón & Basantes, 2022).

CAPÍTULO II. MERCADO TEÓRICO

Agua en la Tierra

El agua es el recurso indispensable para la vida y la supervivencia de los ecosistemas.

Aunque es renovable a través del ciclo hidrológico, su disponibilidad es limitada. La gestión sostenible del recurso hídrico es decisiva para abastecer las necesidades de la población, las zonas agrícolas, ganaderas y la industria, preservando este recurso para generaciones futuras.

En la Figura 2 se representa de manera esquemática la complejidad del ciclo hidrológico. El vapor de agua presente en la atmósfera se condensa en nubes y da lugar a las precipitaciones en forma de lluvia, granizo o nieve. Al entrar en contacto con el suelo, una fracción de las precipitaciones se infiltra, aportando con el suministro para las aguas subterráneas que forman parte de la reserva de agua del suelo y mantos acuíferos. La fracción que no se infiltra, fluye por la superficie hacia cuerpos de agua como ríos, lagos, mares y océanos (Montalvo, 2017).

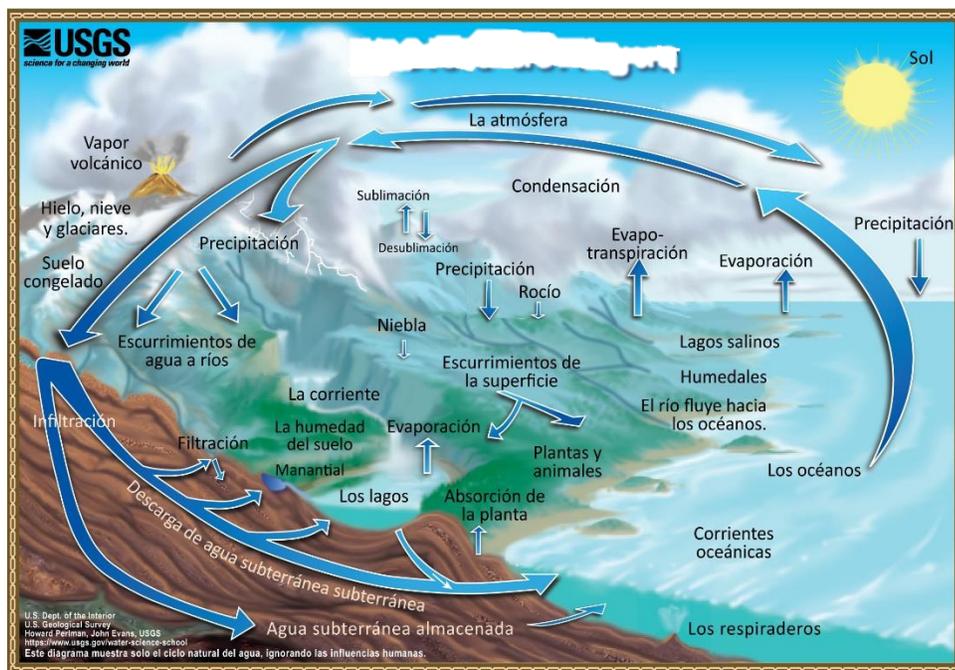


Figura 2 Representación del ciclo hidrológico

Fuente: Water Science School (2019)

Inundaciones

Asimismo, para Jato y González (2019) las inundaciones y sequías son los desastres naturales que han causado el mayor número de pérdidas en años últimos 50 años. Las catástrofes relacionadas con el agua denotan un aumento debido al crecimiento demográfico, la disponibilidad del recurso hídrico en muchos lugares y al CC (Organización Meteorológica Mundial, 2021).

Entre los factores a considerar como contribuyentes a las inundaciones se tiene la planificación deficiente de la expansión urbana, asentamientos informales y obras de infraestructura que modifican las características hidráulicas de las capas de cobertura del suelo. Así también se debe tener en cuenta que los desbordamientos de los sistemas de drenaje, que provocan inundaciones dentro de áreas urbanas, pueden darse tras un evento de precipitaciones intensas que superó con creces la capacidad del sistema de drenaje (Jha et al., 2012).

Cambio Climático

El IPCC (2014) define al Cambio Climático como un fenómeno en el que se observa una variación significativa y permanente de la temperatura en la tierra, producto de las actividades humanas como la emisión de gases de efecto invernadero. Este fenómeno provoca alteraciones en las patrones climáticos, eventos extremos que suceden con mayor frecuencia y amenaza para los ecosistemas del planeta.

El Cambio Climático está asociado al aumento de temperatura observado en las últimas décadas, que a su vez se relaciona con cambios en ciertos componentes y sistemas del ciclo hidrológico como variaciones en los patrones de lluvia, intensidad y periodo de ocurrencia de eventos extremos, derretimiento generalizado de nieve y glaciares, un aumento de la cantidad

de vapor de agua en la atmósfera y variaciones de la humedad del suelo y de la escorrentía (Bates et al., 2008). La principal causa de las inundaciones son los eventos extremos, mismos a los que afecta de manera directa el CC al producirse un incremento en la temperatura generalizado, lo que desencadena en la rápida evaporación del agua, de esta manera estos efectos estarían actuando como un “disparador de eventos extremos” (Vincenti et al., 2016).

En Ecuador se proyectan notables impactos del CC, con estimaciones que indican un aumento significativo en la frecuencia y severidad de eventos climáticos extremos. Se prevé un incremento del 34.36% en la incidencia de sequías, lo que amenaza la disponibilidad del recurso hídrico y la seguridad alimentaria en diversas zonas del país. En adición a ello, se anticipa un aumento del 21.41% en lluvias intensas (Toulkeridis et al., 2020). Por ello es importante considerar estos factores que convierte a las zonas vulnerables a zonas propensas a verse afectadas por inundaciones repentinas, erosión del suelo y daños en infraestructura.

Modelos Hidrológicos

La modelación es una herramienta que simplifica la representación de las condiciones reales, las interrelaciones y respuestas naturales en un área de drenaje. Su principal objetivo es comprender, analizar y cuantificar los procesos físicos que tienen lugar en el entorno, además de predecir posibles situaciones bajo diferentes condiciones propuestas (Fernández et al., 2017).

Un modelo hidrológico puede describirse como una simplificación de un sistema natural que se apoya en principios de conservación de masa y energía. Su objetivo principal es representar la diversidad espacial de suelos, vegetación y datos meteorológicos en los balances de agua y energía dentro de un sistema hidrológico. Esto posibilita la estimación de variables como picos de escorrentía superficial y volúmenes de escorrentía. Estos modelos se pueden

clasificar en dos categorías principales: modelos basados en procesos físicos que se centran en la representación detallada de las interacciones físicas, y modelos conceptuales que simplifican estas relaciones para una mejor comprensión del comportamiento hidrológico en el sistema (Loaiza & Valentijn, 2011).

Por lo general, los modelos hidrológicos se nutren de datos meteorológicos observados, como registros de precipitaciones y temperatura registrados a lo largo del tiempo. Estos datos temporales son esenciales para la construcción de modelos que puedan simular la interacción lluvia-escorrentía dentro de la cuenca (Montalvo, 2017).

En adición a ello, los modelos hidrológicos tienen la capacidad de anticipar los flujos al interior de los sistemas hidrológicos. Esto desempeña un papel crucial en la prevención de inundaciones y eventos extremos asociados al flujo del agua, especialmente en áreas con suelos altamente erosionados por efecto del clima.

Método SCS del Número de la Curva

Este método, utilizado ampliamente para modelar los procesos de lluvia-escorrentía, fue propuesto por el Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos (SCS) y se centra en un parámetro denominado Número de la Curva (CN). Este parámetro se utiliza para cuantificar la capacidad de retener agua de un área particular, antes de que se genere escorrentía. Esta metodología, empírica que basa sus estimaciones en base a datos recopilados por décadas de numerosas cuencas pequeñas experimentales, es fundamental para comprender como las condiciones del suelo y la topografía de una región influye sobre la escorrentía y la erosión del suelo en respuesta a un evento de lluvia

El método del Número de la Curva trata de estimar el potencial de escorrentía superficial utilizando información característica del suelo, como el tipo de suelo, cobertura vegetal y el uso que se le da. Este método realiza una representación gráfica a través de curvas numeradas en una escala que va de 0 a 100. En este contexto, entre más cerca se encuentre al cero un valor, mayor es el volumen de precipitación que se pierde; mientras que, cuando el valor es alto y más se aproxime al cien, sugiere que la precipitación es más propensa a generar flujo superficial. Estos valores se ven influenciados por diversos factores que afectan la producción de escorrentía en la cuenca (Alberca et al., 2022).

El Número de la Curva se determina a través de la consideración de factores como la humedad inicial en el suelo, la clasificación del suelo en función de sus propiedades hidrológicas y el uso del suelo. Estos valores se pueden obtener de tablas de referencia (Montalvo, 2017).

Los análisis llevados a cabo por el SCS permiten establecer una relación entre la retención máxima potencial (S), que representa la capacidad máxima del suelo para retener el agua antes de que comience la escorrentía superficial, con un parámetro de referencia empírico adimensional denominado CN, que se expresa mediante la ecuación (1):

$$S = 254 \left(\frac{100}{CN} - 1 \right) \quad (1)$$

Modelo hidrológico HEC-HMS

Un modelo hidrológico es la representación simplificada de determinados procesos del ciclo hidrológico expresados en términos matemáticos y conectados en una secuencia que sigue la evolución en el espacio y tiempo tal como ocurre en la naturaleza. Por lo general, los modelos hidrológicos son matemáticos, debido a la dificultad de replicar ciertas variables que

se emplean para simular el comportamiento de la cuenca (Alvear & Carpio, 2005). En adición a ello, se puede definir que los modelos hidrológicos se sustentan generalmente de información meteorológica observada como las series temporales de precipitación y temperatura (Parra-Cuadros et al., 2019).

HEC-HMS se trata de un modelo de lluvia escorrentía desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros Hidrológicos del Ejército de los Estados Unidos (USACE) capaz de replicar un hidrograma de escorrentía que se origina en un punto de la red de drenaje como consecuencia de un evento de precipitación. (Guaman, 2020). En adición a ello, HEC-HMS permite planear, diseñar, operar, manejar registros de precipitaciones históricas o de diseño, información característica del suelo y hacer énfasis especial en la habilidad de aprovechar los datos digitales para predecir los impactos de las prácticas del manejo de la tierra en cuencas hidrográficas, con diferentes usos de las tierras durante largos periodos de tiempo (Alvear & Carpio, 2005).

Para determinar el hidrograma de escorrentía HEC-HMS dispone de diversos métodos, como lo es el modelo SCS y el método de Solid Moisture Accounting (Contabilidad de Humedad del Suelo), los cuales posibilitan la modelación de pérdidas y excesos de precipitación, el flujo base y la dirección del flujo (Jácome, 2022). Este software efectúa una simulación de un hietograma en una cuenca con el fin de estimar los hietogramas de salida en la cuenca o varias subcuencas. Esto quiere decir que calcula los caudales máximos y los tiempos pico resultantes de condiciones extremas de tormentas. Además de ello, realiza el cálculo de las pérdidas por infiltración, el flujo base y la conversión a escorrentía directa (Duque-Sarango & Patiño, 2019).

Para estimar el caudal máximo (Q_p), ecuación (2), en función del área efectiva de la cuenca (A) y el tiempo pico (T_p), ecuación (3), que están en función de la duración de la tormenta (T_y) y el tiempo de retardo de la cuenca (T_l), HEC-HMS emplea el método SCS en el punto de salida de la cuenca. Para esto, el modelo calcula T_l , ecuación (4), teniendo la longitud del cauce principal en metros (L), la pendiente del cauce (I) en metros sobre metros y el número de la curva (CN) (López et al., 2012).

$$Q_p = \frac{2.08 A}{T_p} \quad (2)$$

$$T_p = \frac{T_y}{2} + T_l \quad (3)$$

$$T_l = \frac{L^{0.8} * (2540 - 22.86 * CN)^{0.7}}{14104 * CN^{0.7} * I^{0.5}} \quad (4)$$

Modelo Hidrodinámico Bidimensional Iber

La finalidad de un modelo bidimensional del flujo es el de representar la expansión del flujo sobre la superficie, considerando los componente ortogonales del flujo mediante el uso de mallas estructuradas o no estructuradas, con la finalidad de resolver problemas hidráulicos utilizando el método de resolución numérica por elementos finitos para resolver las ecuaciones bidimensionales de aguas de poca profundidad, o también conocidas como ecuaciones bidimensionales de Saint Venant (Peruzzo et al., 2017).

Iber es una herramienta valiosa para comprender y gestionar mejor los fenómenos relacionados con el flujo de agua en sistemas fluviales y estuarios. Este modelo matemático permite representar el flujo en la superficie libre en ríos naturales, realizar evaluaciones de áreas propensas a inundaciones, calcular las zonas donde se da el flujo preferencial, realizar cálculos relacionados con la canalización, entre otras (Bladé et al., 2014).

Iber, en su modelado hidrodinámico, utiliza ecuaciones derivadas de dos leyes físicas fundamentales. La primera, la ley de conservación de la masa y la segunda, la ley de conservación de la cantidad de movimiento. Estas leyes se expresan matemáticamente como las ecuaciones de Saint Venant en dos dimensiones, las cuales se derivan de las ecuaciones de Navier-Stokes en 2 etapas.

La primera fase implica obtener un promedio temporal para eliminar las fluctuaciones turbulentas, lo que da lugar a las ecuaciones de Reynolds. Mientras que en la segunda etapa se calcula un promedio de profundidad, lo que permite pasar de las ecuaciones tridimensionales a ecuaciones bidimensionales (Alcocer y Montes, 2023). La descomposición de Reynolds separa la velocidad instantánea u , en la suma de velocidad media u_m y fluctuaciones turbulentas u' .

$$u = u_m + u' \quad (5)$$

De manera que la velocidad media u_m se define como la velocidad instantánea promediada en un intervalo de tiempo específico.

$$u_m = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} u dt \quad (6)$$

Tras esto, las ecuaciones de Saint Venant en dos dimensiones pueden expresarse de esta manera:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial q_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q_x^2}{h} + g \frac{h^2}{2} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q_x q_y}{h} \right) = -gh \frac{\partial z_b}{\partial x} - \frac{\tau_{bx}}{\rho} - \frac{\partial}{\partial x} (h \overline{u_x' u_x'}) - \frac{\partial}{\partial y} (h \overline{u_x' u_y'}) \quad (8)$$

$$\frac{\partial q_y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q_x q_y}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q_y^2}{h} + g \frac{h^2}{2} \right) = -gh \frac{\partial z_b}{\partial y} - \frac{\tau_{by}}{\rho} - \frac{\partial}{\partial x} (h \overline{u_x' u_y'}) - \frac{\partial}{\partial y} (h \overline{u_y' u_y'}) \quad (9)$$

Donde,

h	Profundidad o el calado de la lámina de agua
q _x	Caudal específico en x
q _y	Caudal específico en y
z _b	Cota de fondo
g	Gravedad
τ _{bx}	Componente en X de la tensión tangencial que ejerce el fondo
τ _{by}	Componente en Y de la tensión tangencial que ejerce el fondo
ρ	Densidad

De esta manera, la ecuación (9) representa la conservación de la masa, mientras que las ecuaciones (8) y la (9) representan la conservación de la cantidad de movimiento en cada uno de sus componentes, X y Y respectivamente. Además, las ecuaciones (8) y (9) indican cómo cambian los caudales en respuesta a las fuerzas que están en juego. Las fuerzas anteriormente mencionadas son: fuerza de inercia, fuerza de presión, fuerzas de gravedad (en función de la pendiente en el fondo) y las fuerzas de rozamiento con los contornos.

El software Iber proporciona resultados que se ajustan de manera más fiel, puesto que, para el modelo, es necesario importar un Modelo de Elevación Digital (DEM) que contiene la estructura hidráulica. A esto se debe añadir que Iber resulta ser adecuado para situaciones de aguas poco profundas o flujos de superficie libre en condiciones de aguas someras, donde predominan los procesos bidimensionales. Con esto, se tiene que los resultados obtenidos en el software Iber brindan una representación precisa de los fenómenos anteriormente descritos (Ochoa et al., 2016).

CAPÍTULO III. METODOLOGÍA

Este trabajo de investigación es de carácter cuantitativo por el hecho de que se efectúan cálculos para evaluar las variables estudiadas, como la precipitación con relación al tiempo de duración del evento. Esto se debe a que estos cálculos se fundamentan en ecuaciones que simplifican la interpretación de los resultados, tanto del evento de precipitación, como de los efectos producidos por el CC para un periodo de retorno de 50 años. Puesto que se debe realizar una recolección de datos y un procesamiento de estos, previo a la modelación en los softwares Hec-hms e Iber, el presente trabajo de investigación exhibe un alcance exploratorio que permite formular alternativas en base a los resultados obtenidos.

Para llevar a cabo los objetivos planteados, la Figura 3 muestra el diagrama de flujo de las actividades a desarrollarse en el presente trabajo de investigación.

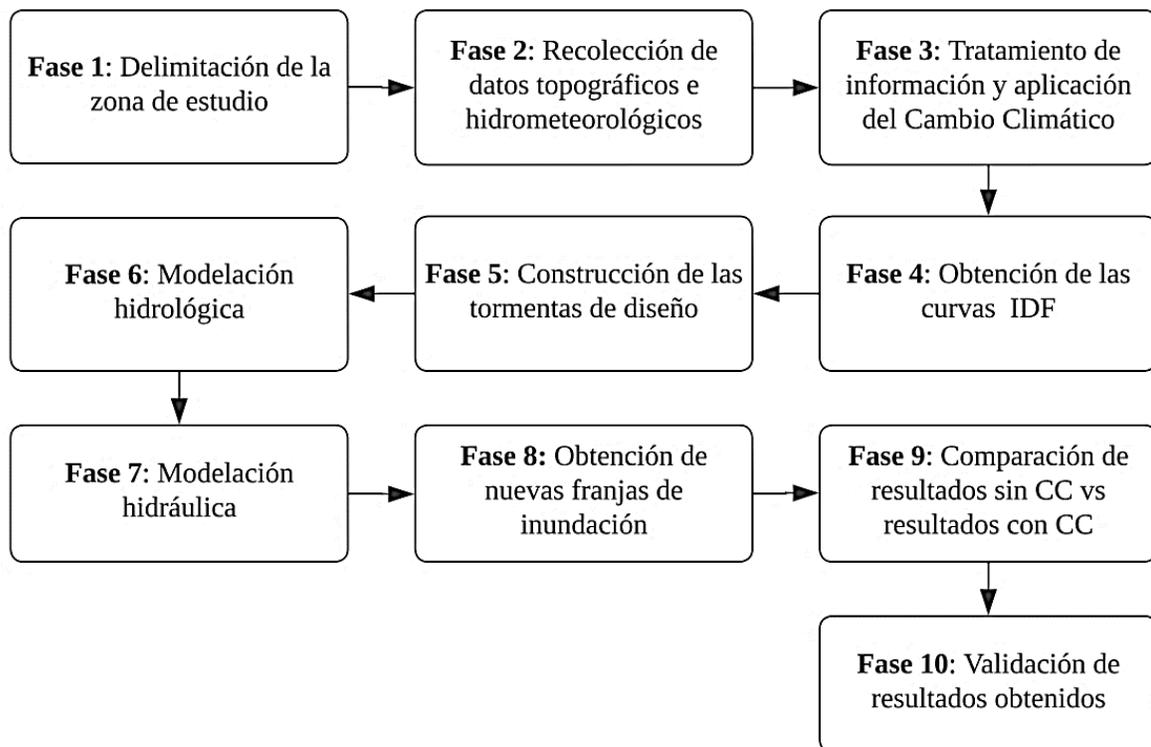


Figura 3 Metodología de la investigación

La recolección de datos se centrará tanto en la información espacial y temporal de las quebradas “San Sebastián” y “El Rosario”, así como en el registro histórico de las variables correspondientes a precipitaciones y áreas susceptibles en las zonas aledañas a los cuerpos de agua, para de esta manera determinar la influencia del CC sobre las mismas. Cabe recalcar que el presente trabajo de investigación se realizará partiendo de la tesis de Alarcón y Basantes (2022).

A continuación, se especifica a detalle la información a recopilarse, su respectivo procesamiento, resultados a obtenerse y la validación de los mismos.

Construcción de Curvas IDF

Una curva de Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) es una representación gráfica o en forma de ecuación que describe la variación de intensidad de lluvia, generalmente expresada en [mm/h], en relación con la duración de ésta, generalmente expresada en [h]; y a su vez con la probabilidad de ocurrencia que tiene, generalmente conocido como periodo de retorno y expresada en [h].

Para su construcción se parte de los registros de los anuarios meteorológicos del INAMHI de la estación hidrometeorológica más cercana, específicamente de la estación M1036, la cual dispone de registros desde septiembre del año 1978 hasta junio del 2015, centrándonos en las precipitaciones máximas en un periodo de 24 horas. Las intensidades y duraciones correspondientes al periodo de años señalados anteriormente son calculados para posteriormente realizar un análisis estadístico. Este análisis nos permitió generar curvas IDF mediante ajustes a las funciones de Gumbel y Regresión Logarítmica, que se ha demostrado son los modelos más apropiados según investigaciones previas.

La expresión siguiente define la función de Gumbel

$$F(x) = e^{-e^{\frac{x-\mu}{\alpha}}} \quad (10)$$

Donde: α , μ y x son parámetros estadísticos que representan la desviación y la media de los datos.

Para realizar la implementación del CC sobre la variable de precipitaciones, se realizó un análisis en condiciones normales y otro en el que se aplica las condiciones de CC regionalizado RCP 8.5, condición que es la más desfavorable y proyecta un aumento de temperatura y cantidad de evapotranspiración; de manera que se obtiene 2 ecuaciones que describen las condiciones para ambos escenarios.

En la Figura 4 se muestran los porcentajes proyectados de precipitación para Ecuador para el escenario RCP 8.5 desglosado en trimestres. Una vez que la precipitación se ajusta mediante la función de Gumbel, se obtienen líneas que se trazan en puntos de referencia conocidos. Estos puntos se representan en el gráfico de las curvas IDF, con la duración expresada en una escala logarítmica, lo que permite definir la pendiente de la curva como “b” y la intersección con las abscisa de 1 minuto de duración como “K”.

$$\text{Log}(i) = \log(K) + b * \log(t) \quad ; \quad K = a * T^c \quad (11)$$

Por lo tanto, la intensidad se formularía de esta manera:

$$i = \frac{a * T^c}{t^b} \quad (12)$$

Donde a, b y c varía dependiendo de la región para la que se calcule.

Distribución espacial del cambio de la precipitación proyectada para el escenario RCP 8.5 por trimestres

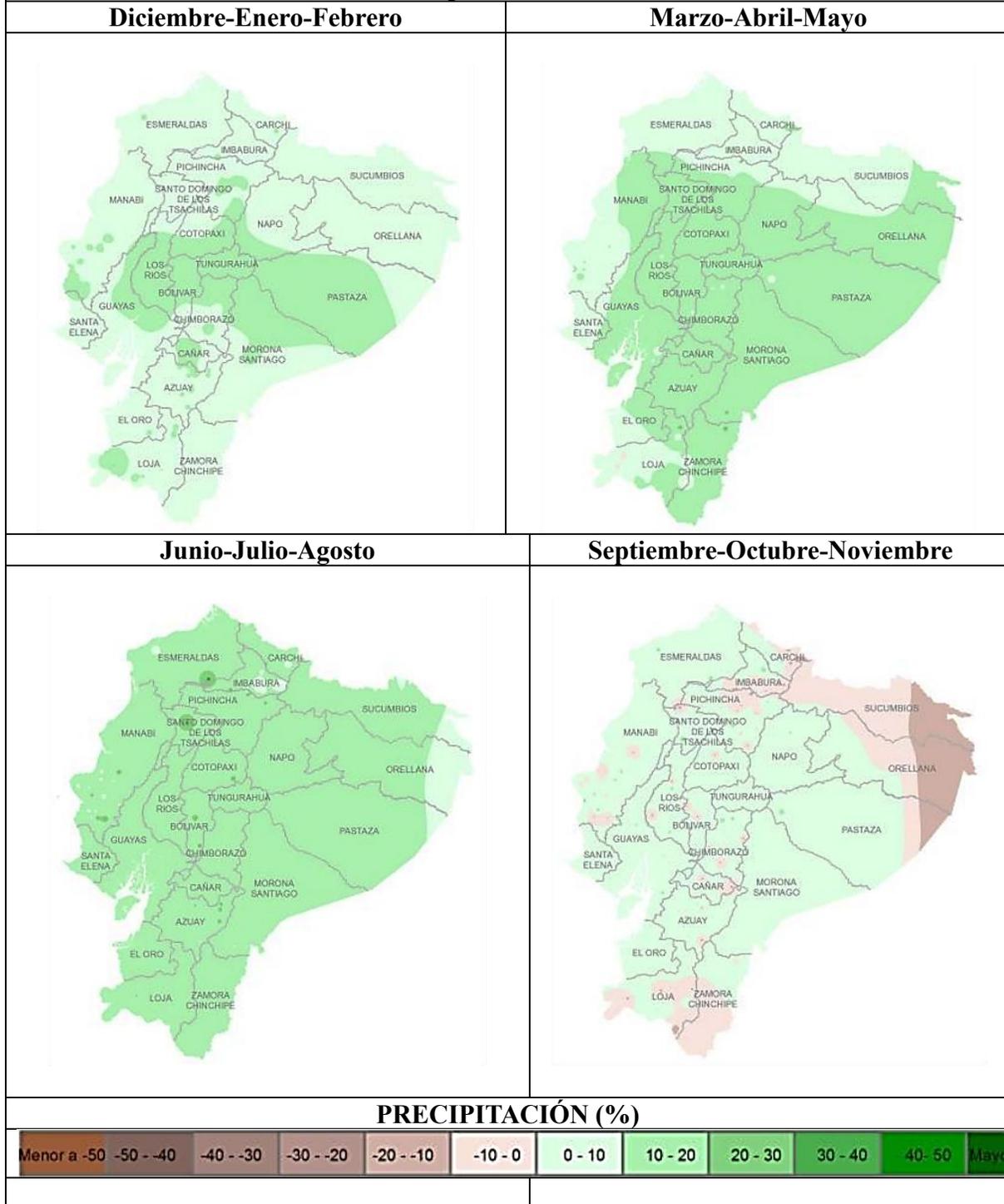


Figura 4 Distribución espacial del cambio de la precipitación proyectado para el escenario RCP 8.5, respecto al periodo de referencia 1981-2005.

Fuente: Armenta et al. (2016).

Construcción de Tormentas de Diseño

Las tormentas de diseño construidas para cada una de las quebradas en cuestión sirvieron como dato de entrada, que mediante el uso de procedimientos de lluvia-escorrentía y tránsito de caudales, dan como resultado los caudales que recorren las quebradas (Chow et al., 1994). Para el caso de este trabajo de investigación, las tormentas de diseño se basan en la información histórica del registro de precipitaciones proporcionadas por el INAMHI en la estación más cercana a la zona de estudio, específicamente de la estación hidrometeorológica M1036.

El método de bloques alternos es la una forma simple de desarrollar los hietogramas de diseño, basándose en las curvas de intensidad-duración-frecuencia (IDF). Mediante esta metodología se define la cantidad de precipitación que ocurre en un número n de intervalos de tiempo de manera sucesiva (Granados Chahín, 2017).

El hietograma producido se ordena colocando el bloque de mayor valor en el centro de la gráfica, después se alterna de lado para colocar los bloques restantes, de manera que quede ordenado en forma decreciente hacia los lados, como se expresa en la ecuación siguiente:

$$b_k = k * i_T(k * \Delta t) - \sum_{j=1}^{k-1} b_j \quad (13)$$

Donde:

i_T Volumen de precipitaciones en base al periodo de retorno

Δt Intensidad obtenida de la curva IDF

b_j Intensidad media del conjunto de bloques

Tanto para la quebrada “San Sebastián”, como para “El Rosario”; las tormentas de diseño consideran un periodo de retorno de 50 años y una duración de 02:30 horas y 06:00 horas, respectivamente. Dando como resultado un hietograma de diseño a partir de los datos de la curva IDF con los datos históricos que no se ven afectados por el efecto del CC y un segundo hietograma con base a los datos de la curva IDF donde se empleó el efecto del CC para recrear el escenario.

Modelación Hidrológica

Los modelos hidrológicos se realizaron empleando el software HEC-HMS. Se efectuaron modelos individuales para cada quebrada, una para “San Sebastián” y otras para “El Rosario”, de manera que se pueda colocar como datos de entrada la información detallada en la Tabla 1 y Tabla 2, respectivamente; personalizando los tiempos de concentración según amerite las condiciones resultantes de la tormenta diseñada para cada quebrada.

Haciendo uso del método SCS (Servicio de Conservación de Suelos de los Estado Unidos), se llevó a cabo cuatro simulaciones hidrológicas basadas en los datos históricos de precipitaciones de la estación hidrometeorológica M1036 de la ESPOCH y dos tormentas de diseño con un mismo periodo de retorno de 50 años para ambas. La primera, para la quebrada “San Sebastián”, bajo condiciones normales que no consideran los efectos del CC y otra que tomó en cuenta los datos influenciados por los efectos del CC. De la misma manera se realizó un procedimiento idéntico para la quebrada “El Rosario”. De esta manera se generaron los hidrogramas para ambas quebradas, considerando un escenario en condiciones normales y otro bajo la influencia del CC.

Modelación Hidráulica

Para la simulación en el software bidimensional Iber, previamente se realizó una delimitación del área de estudio en el software ArcGIS, tomando en cuenta el total del área afectada por las inundaciones. En la capa creada se procede a diferenciar entre edificaciones y calles, de manera que se obtenga un shapefile cuya área esté conformada únicamente por las calles que permitan el flujo de agua. Para el presente trabajo, el parque central de Guano se tomará en cuenta dentro del área de recorrido de agua durante los eventos de precipitación, puesto que su infraestructura de baja altura y sus múltiples accesos, no representarían un obstáculo en el flujo de la escorrentía proveniente de las calles.

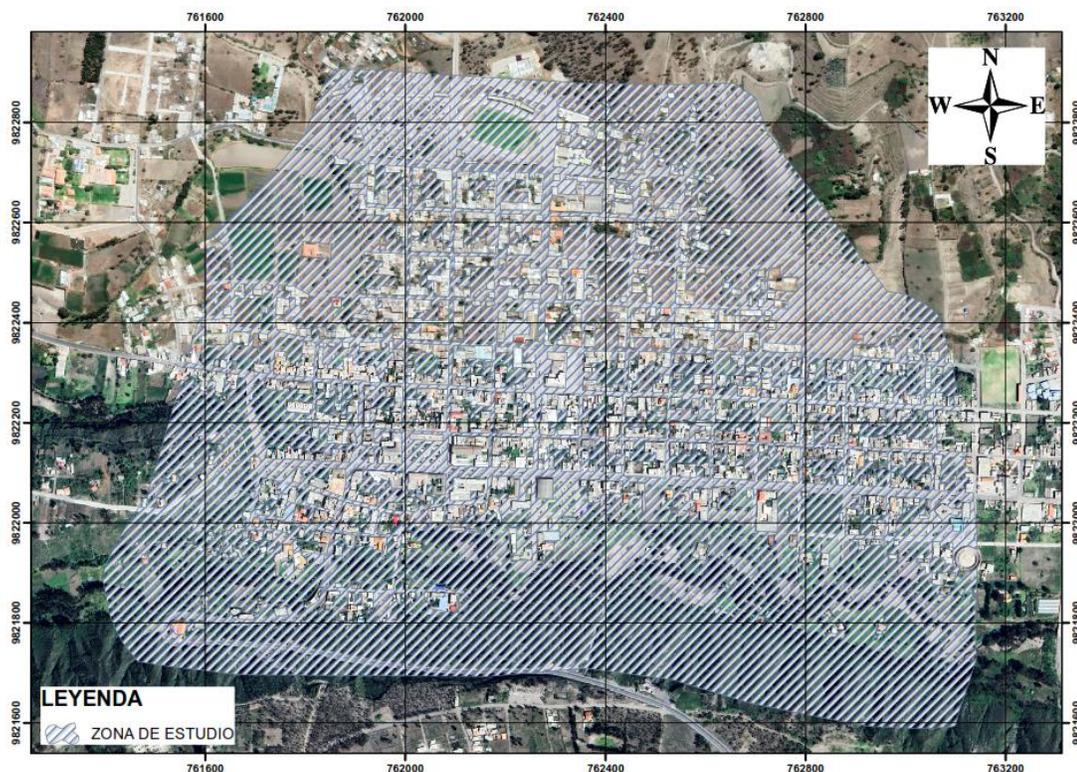


Figura 5 Shapefile de la delimitación del área de la cuenca en estudio.

Tras obtener el shapefile y contando con el Modelo de Elevación del Terreno (MDT), se importa los datos al software Iber. Posteriormente, se genera la representación geométrica

haciendo uso del MDT con un tamaño de malla 4x4, aplicando la metodología RTIN. Esta metodología comprende la subdivisión de la superficie del terreno en estudio en triángulos rectángulos de tamaños diversos, que representan la topografía del lugar. Como resultado de este proceso, se obtiene la geometría como se muestra en la Figura 6.

Como lo menciona Bladé et al. (2014) en su investigación, Iber diferencia entre contornos cerrados (tipo pared) y contornos abiertos por donde entra y sale el agua del entorno de cálculo. Por tanto, en las zonas determinadas como entradas, se establece un caudal de agua constante, mientras que en las áreas de salida se controla el nivel de agua en situaciones en la que pasa a un flujo subcrítico. De esta manera, el área de entrada de caudal del modelo usado en esta investigación comprende 2 entradas simultáneas, como lo muestra la Figura 6. La primera, correspondiente al caudal de la quebrada “San Sebastián” que parte desde el contorno de la parte superior, al noroeste; y la segunda que parte desde el contorno de la parte inferior suroeste del modelo, correspondiente al caudal de la quebrada “El Rosario”.

Las consideraciones de las condiciones de entrada para ambas quebradas son las mismas. Ambas partirán de los hietogramas obtenidos con las tormentas de diseño; uno para el posible escenario futuro que considera el efecto del CC y otro para el actual en condiciones normales, como se muestra en el Anexo 6 y en el Anexo 7. En adición a ello, es importante resaltar que se colocará el valor de cero al calado, como condición inicial para la totalidad de la cuenca y para ambos escenarios. Así como se muestra en la Figura 8.

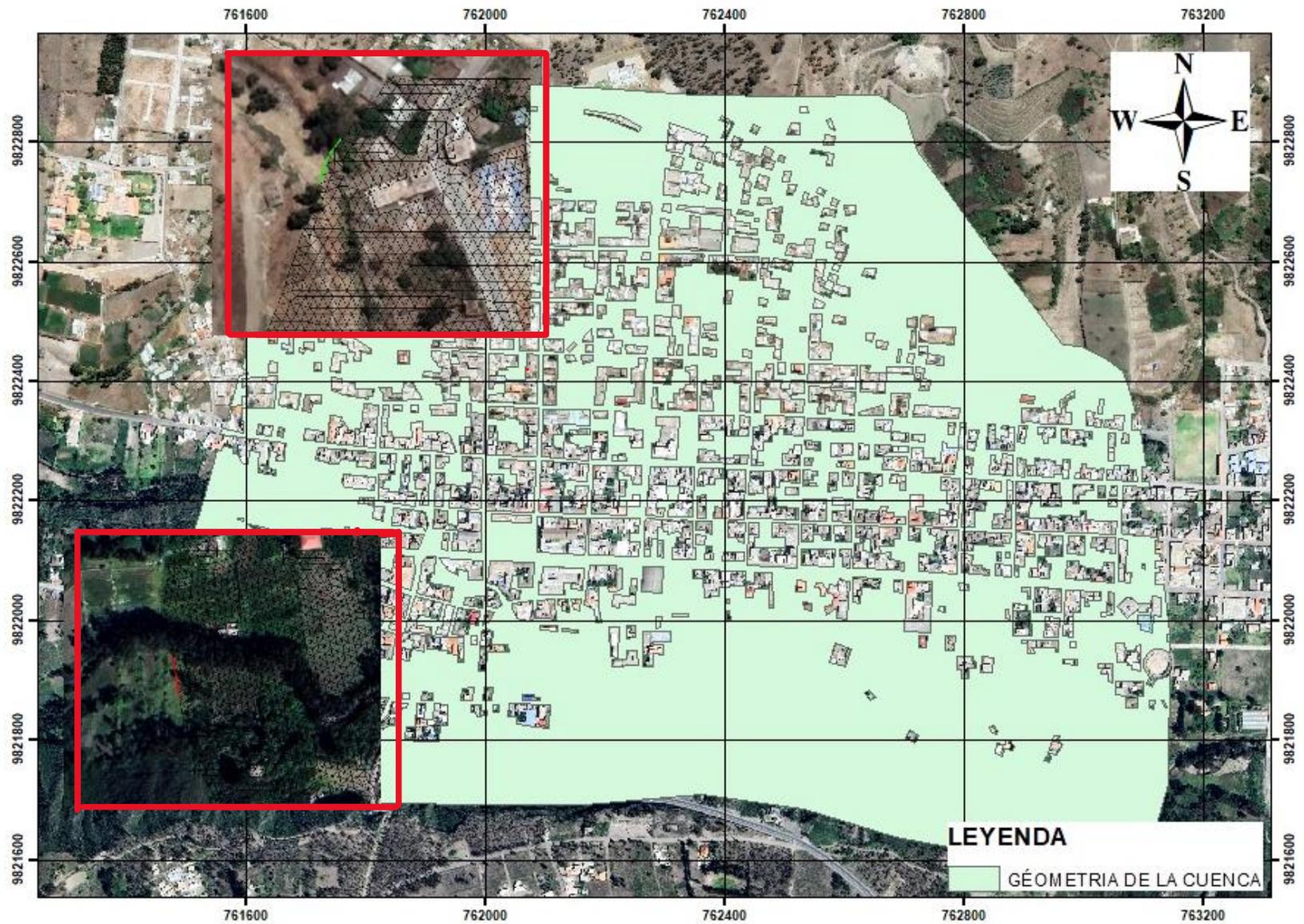


Figura 6 Geometría de la cuenca y condición de entrada.

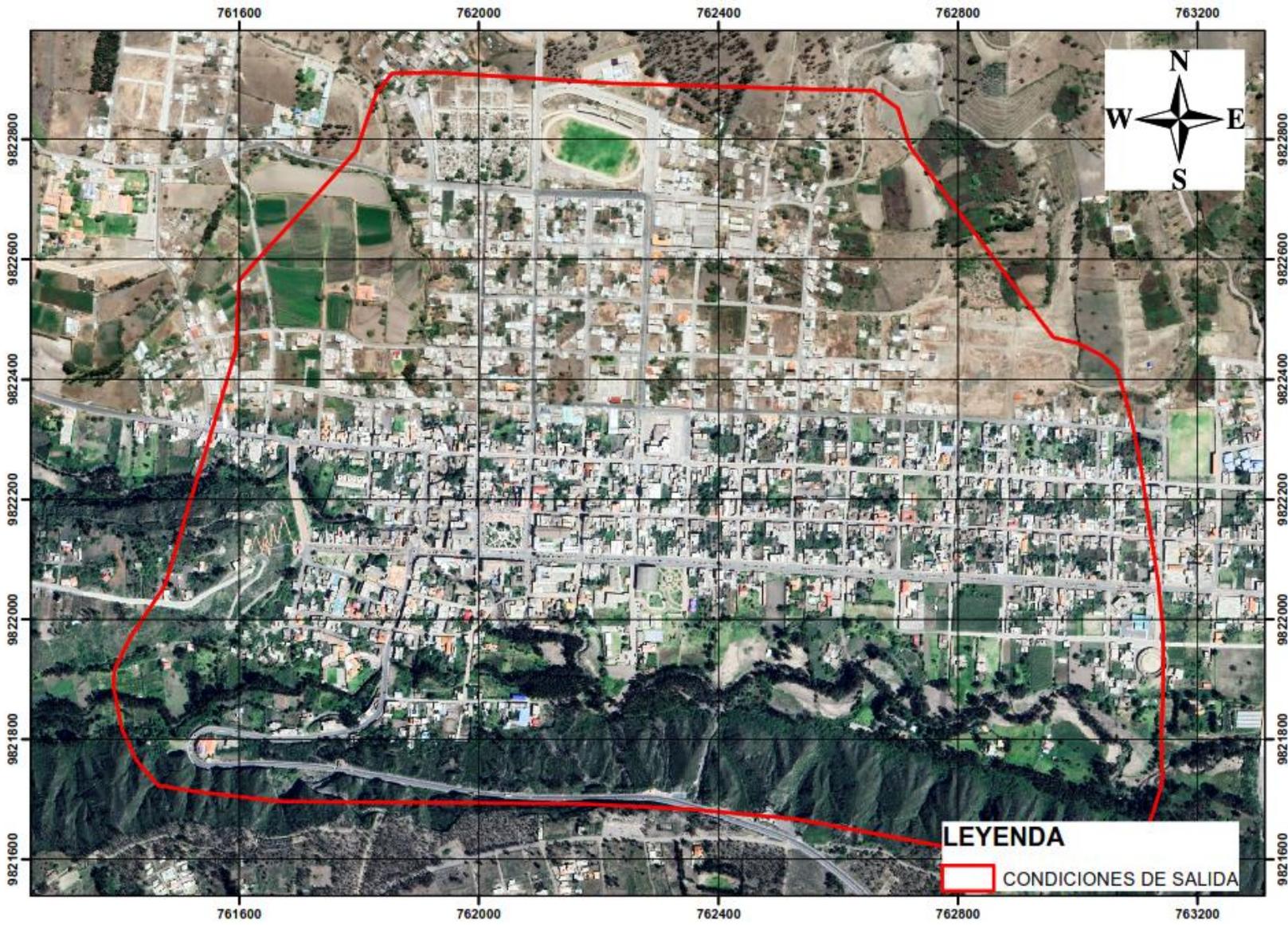


Figura 7 Condiciones de Salida para el área de estudio

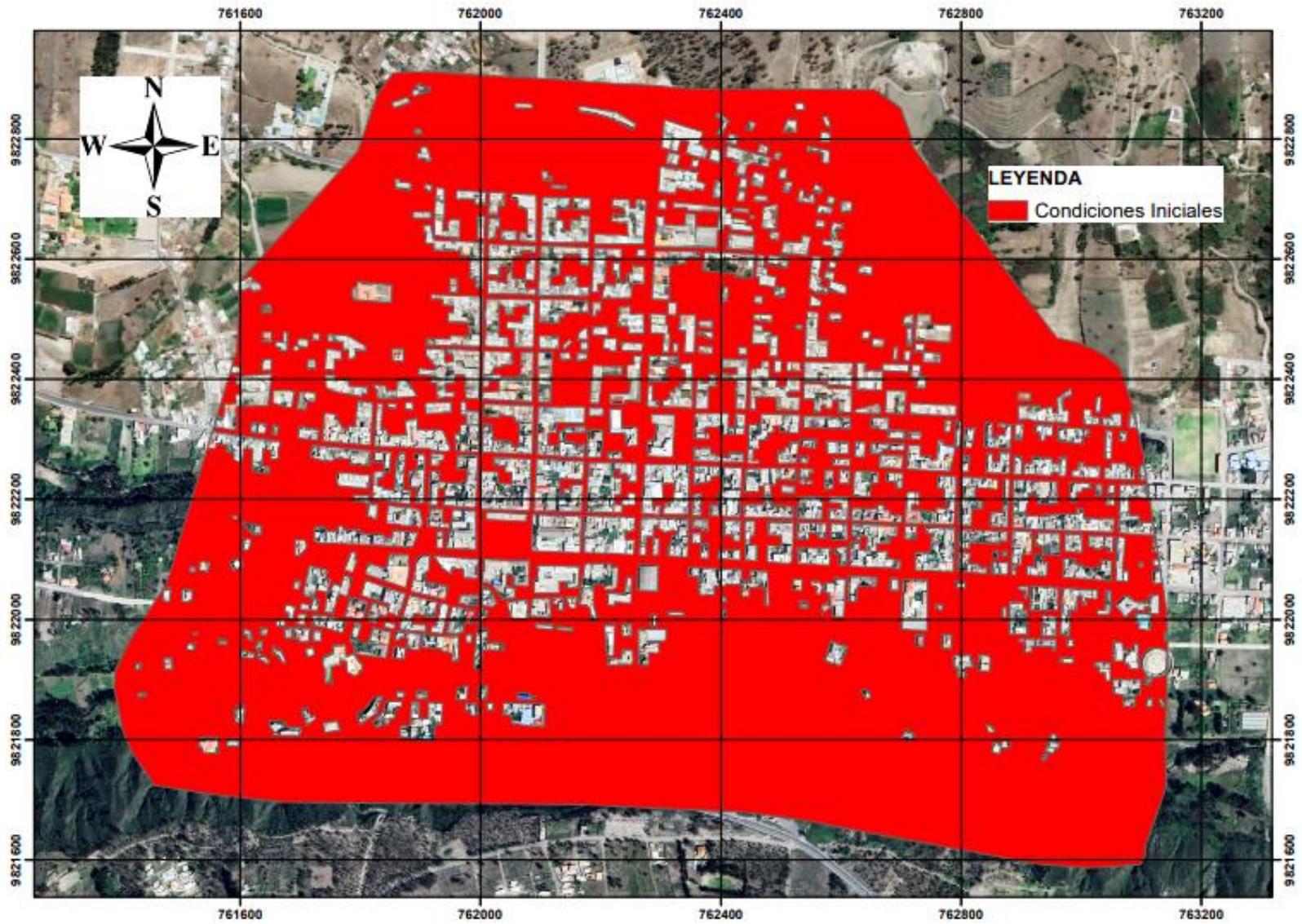


Figura 8 *Condiciones iniciales.*

La clasificación del uso de suelo es un parámetro fundamental por definir, para esto se empleó el coeficiente de Manning. Esto se vuelve esencial para considerar el parámetro de la fricción de la superficie con el flujo de agua, puesto que el mismo, es utilizado dentro de las ecuaciones hidrodinámicas. En este cálculo bidimensional se usará los valores de n presentados en la Tabla 3, en función de la clasificación del uso de suelo asignado, como se muestra en la Figura 9.

Tabla 3 *Valores de Coeficiente de Manning (n) usados para cada tipo de suelo.*

Coeficiente de Manning (n) usados para cada tipo de suelo		
0	Vegetación dispersa	0.080
1	Residencial	0.150
2	Cultivos con patrones complejos	0.045
3	Arenales o roquedos	0.025
4	Infraestructuras de transporte y uso industrial	0.010
5	Tierra labrada	0.040
6	Pradera	0.035
7	Zonas agroforestales	0.060
8	Pradera	0.035

Fuente: (Iber, 2021).

Después de completar esta etapa, es necesario asignar elevaciones a través de un archivo en formato ASCII. De manera que se garantice que cada punto cuente con coordenadas específicas. Esto permitirá la representación precisa de las profundidades de todos los puntos dentro del área de estudio comprendida, tal como se muestra en la Figura 10.

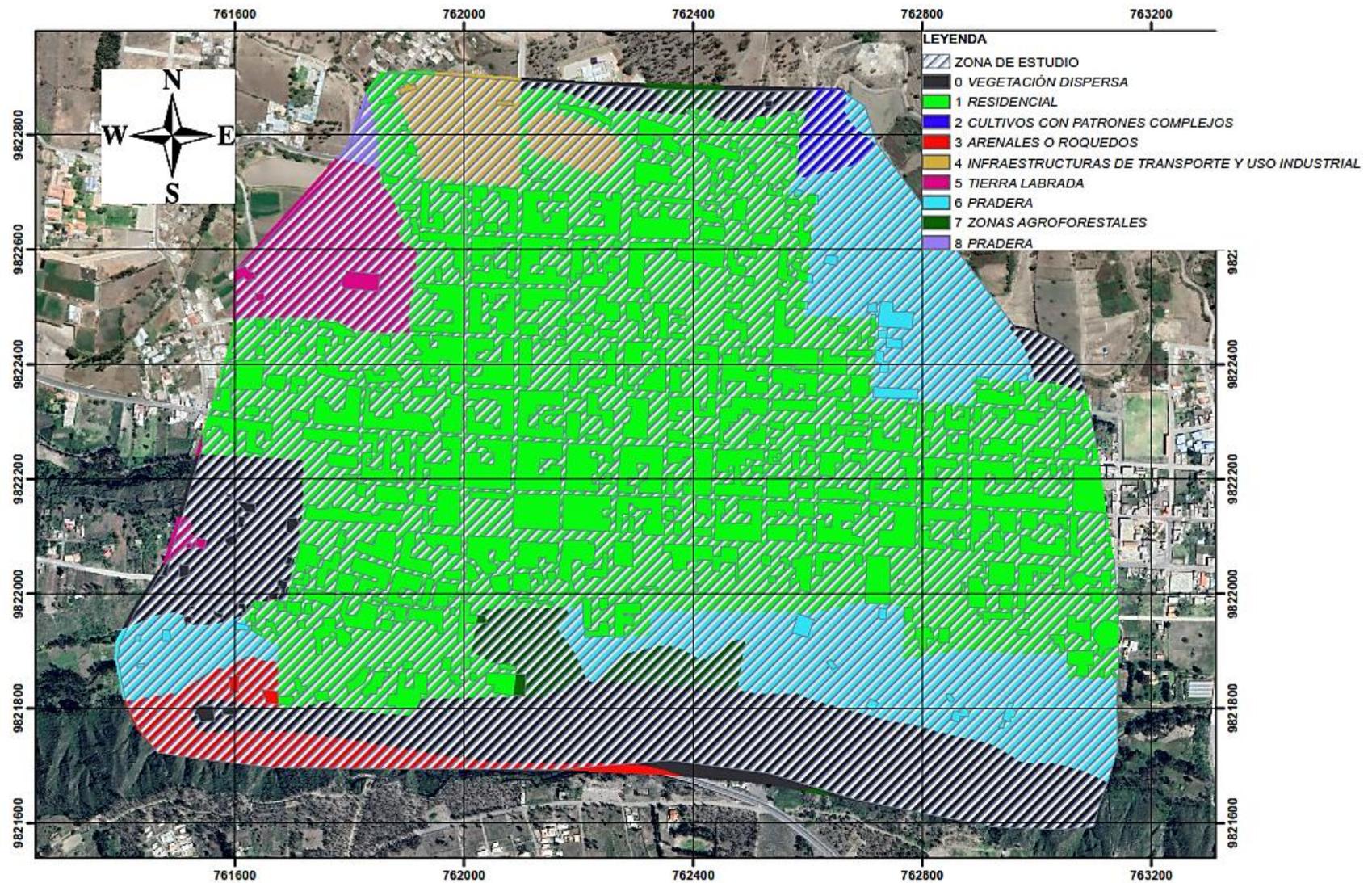


Figura 9 Clasificación del área de estudio en función del uso de suelo.

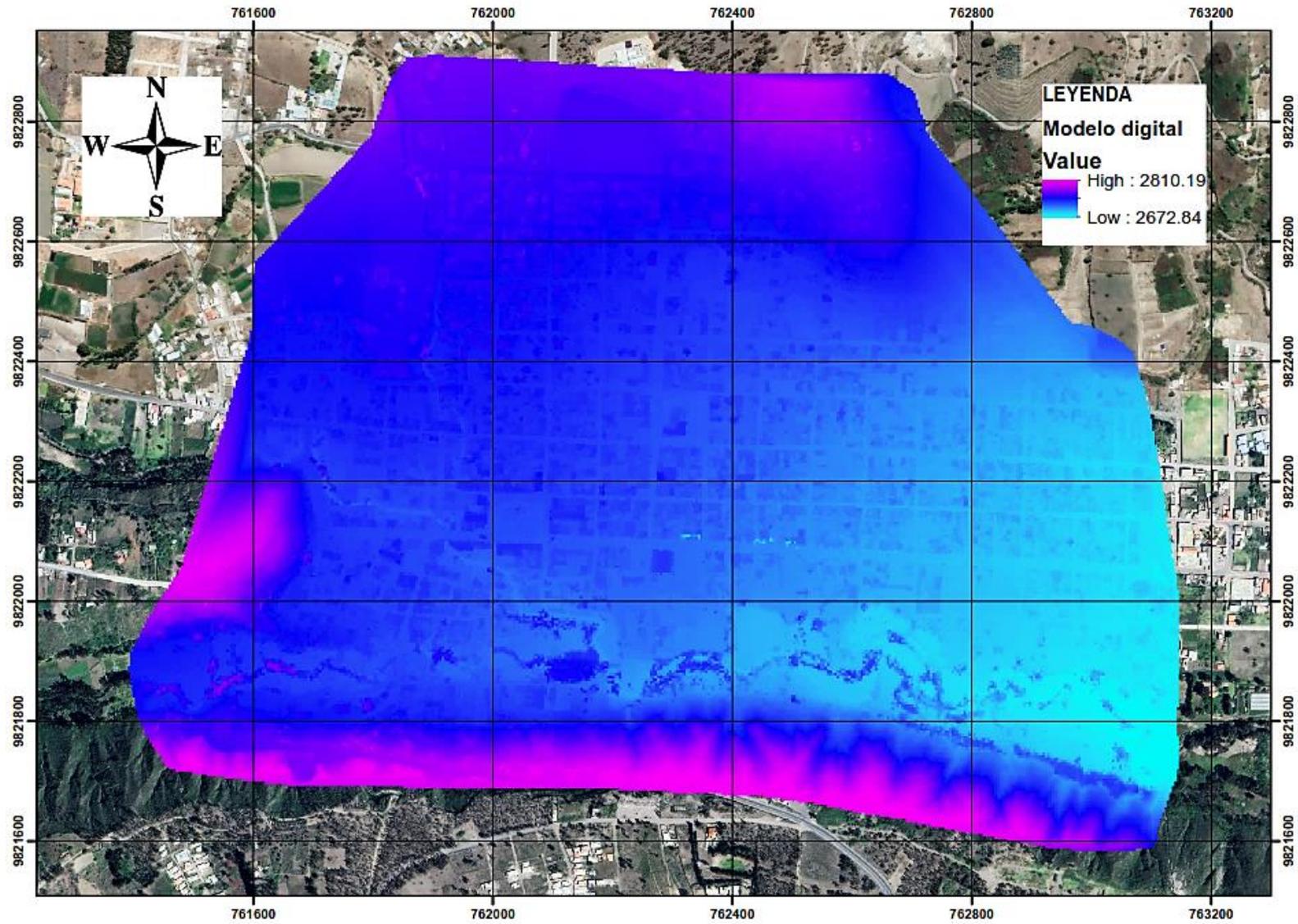


Figura 10 *Modelo de Digital del Terreno (MDT) de la zona de estudio.*

CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Curvas IDF

En un principio, se realizó el análisis de los valores de precipitación máxima anual que no consideran el escenario de CC (Anexo 1) resultantes del análisis de Gumbel por año que se muestra en el Anexo 3. De la misma manera, una vez aplicado los factores que influyen en las precipitaciones máximas mensuales y que están relacionados al escenario de Cambio Climático (RCP 8.5) que se presentan en el Anexo 2, se realiza el análisis de Gumbel por año (Anexo 5), obteniendo los nuevos valores de precipitación máxima anual que se muestran en el Anexo 4, los cuales están influenciados por el efecto del escenario de Cambio Climático (RCP 8.5). Tras esto, se procede a realizar la regresión lineal para obtener los coeficientes numéricos de las ecuaciones con las que se construyen las curvas IDF en función de un periodo de retorno y una duración.

Las curvas IDF se pueden representar en función de la intensidad, como muestra la Tabla 4. Además, visualmente podemos observar las curvas IDF construidas para diferentes periodos de retorno, donde la Figura 11 corresponde a las curvas IDF en donde no se considera el escenario de CC; mientras que la Figura 12 muestra las curvas IDF donde se ha considerado el efecto producido para un escenario de CC RCP 8.5.

Tabla 4 *Ecuaciones de Intensidad*

Condición	Ecuación
Sin CC	$i = \frac{8.638717 * T^{0.207142}}{t^{0.6163}} \quad (14)$
Con CC	$i = \frac{9.591433 * T^{0.212958}}{t^{0.6163}} \quad (15)$

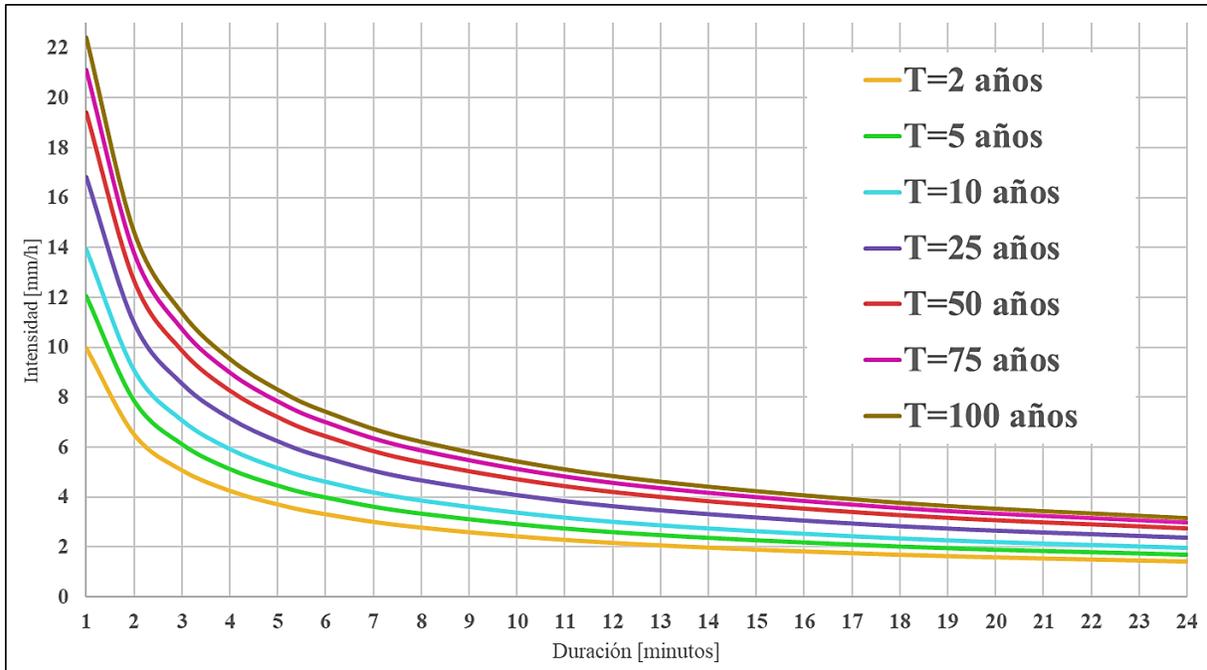


Figura 11 Curva IDF construida, sin considerar efectos del Cambio Climático.

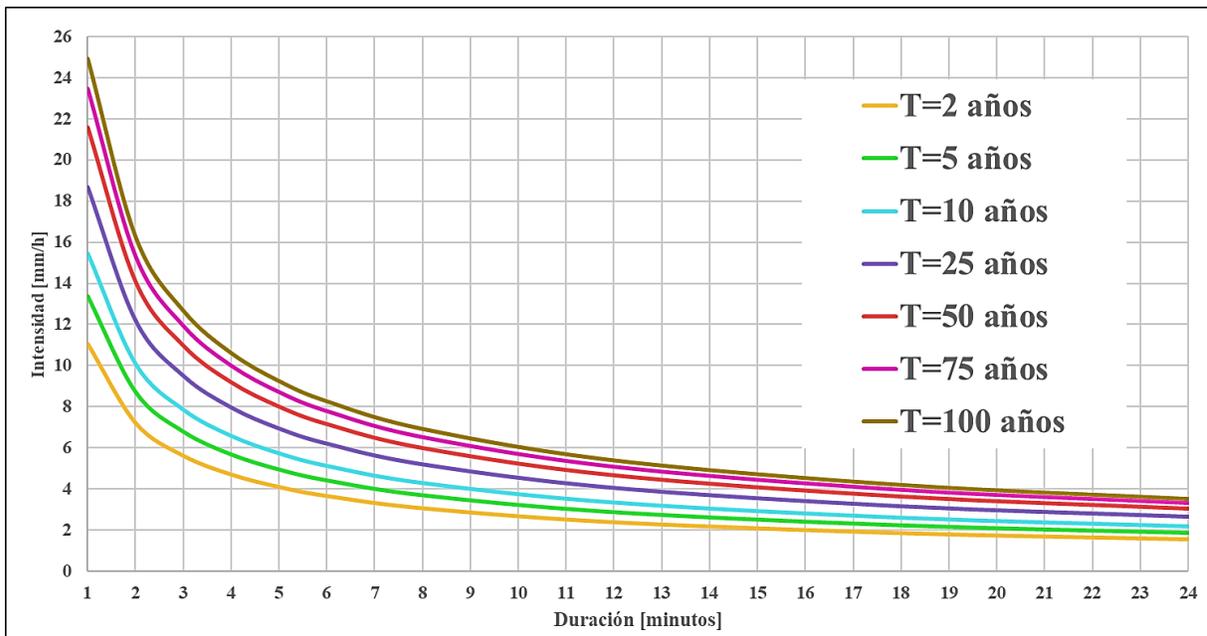


Figura 12 Curva IDF construida, considerando efectos del Cambio Climático.

Puesto que resulta complejo realizar una distinción visual de las diferencias entre los valores correspondientes a las curvas IDF con CC y sin CC, a forma de ejemplificación, se determinará las intensidades correspondientes a una duración de 30 minutos y un periodo de retorno de 50 años.

Tabla 5 *Valores de intensidades, T=50 años, t=30 minutos, de las curvas IDF con y sin Cambio Climático*

Condición	Intensidad [mm/h]
Sin CC	2.38796228
Con CC	2.71233246

En la Tabla 5 se muestra los valores resultantes del ejercicio de ejemplo. El valor de intensidad para el escenario donde se plantea la ocurrencia de los efectos del CC es mayor al que no considera dicho efecto, probando la hipótesis de que existiría un incremento en el volumen de precipitaciones en el sector, producto de la influencia del CC.

Tormentas de Diseño

Las proyecciones relacionadas al clima y precipitaciones extremas señalan un aumento en eventos de gran magnitud. Se prevé que, en determinadas regiones del mundo, la frecuencia y la fuerza de eventos extremos de precipitaciones intensas aumenten. Por lo tanto, la forma de incorporar esta condición de CC en las tormentas de diseño consiste en utilizar hietogramas que representen escenarios futuros y reflejen su influencia (Olivares-Cerpa et al., 2022).

Esta investigación trabaja con 2 tormentas de diseño que consideran las condiciones específicas para cada quebrada. Se obtuvieron 2 gráficas en las que se comparan los valores de precipitación actuales y futuros; cuyo incremento se relaciona de manera directa con el efecto del escenario de CC (RCP 8.5).

Para la quebrada de “San Sebastián”, considerando el tiempo de concentración de la Tabla 1 que es de 40.71 [minutos], al aplicar la ecuación (14) se tiene una intensidad de precipitación de 24.67 [mm/h] para el escenario actual en donde no se considera el efecto del CC; mientras

que en el escenario, aplicando la ecuación (15) que si lo incluye, se evidencia un aumento en el valor de la intensidad de precipitación a 28.02 [mm/h].

Para la quebrada de “El Rosario”, considerando el tiempo de concentración de la Tabla 2 que es de 101.82 [minutos], al aplicar la ecuación (14) se tiene una intensidad de precipitación de 14.02 [mm/h] para el escenario actual en donde no se considera el efecto del CC; mientras que en el escenario, aplicando la ecuación (15) que si lo incluye, se evidencia un aumento en el valor de la intensidad de precipitación a 15.93 [mm/h].

En el caso de la quebrada “San Sebastián”, en la Figura 13 se obtuvo que para un periodo de retorno de 50 años se tiene una intensidad pico de 7.49 [mm/h] bajo condiciones normales; mientras que la intensidad pico llega a 8.50 [mm/h] bajo condiciones del CC. Lo cual resulta en un aumento de 1.01 [mm/h], indicando que el CC afecta de manera moderada la intensidad de precipitaciones en la cuenca.

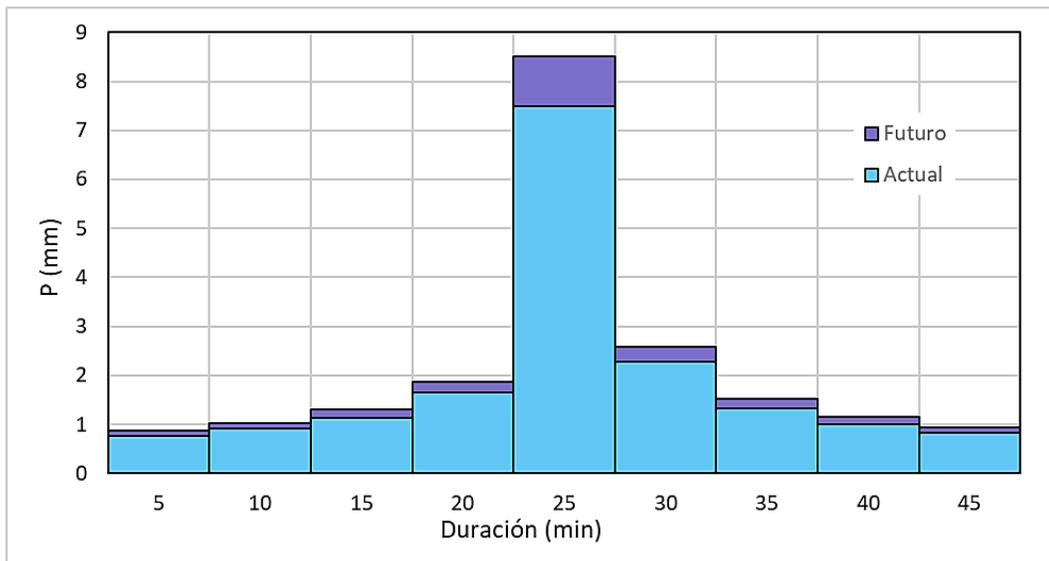


Figura 13 Quebrada “San Sebastián” - Comparación de la tormenta de diseño actual vs la futura considerando el escenario de Cambio Climático RCP 8.5.

Para el caso de la quebrada “El Rosario”, en la Figura 14 se obtuvo que, para un periodo de retorno de 50 años se tiene una intensidad pico de 7.49 [mm/h] bajo condiciones normales;

mientras que la intensidad pico llega a 8.31 [mm/h] bajo condiciones del CC. Lo cual resulta en un aumento de 0.82 [mm/h], indicando que el CC afecta de manera moderada la intensidad de precipitaciones en la cuenca.

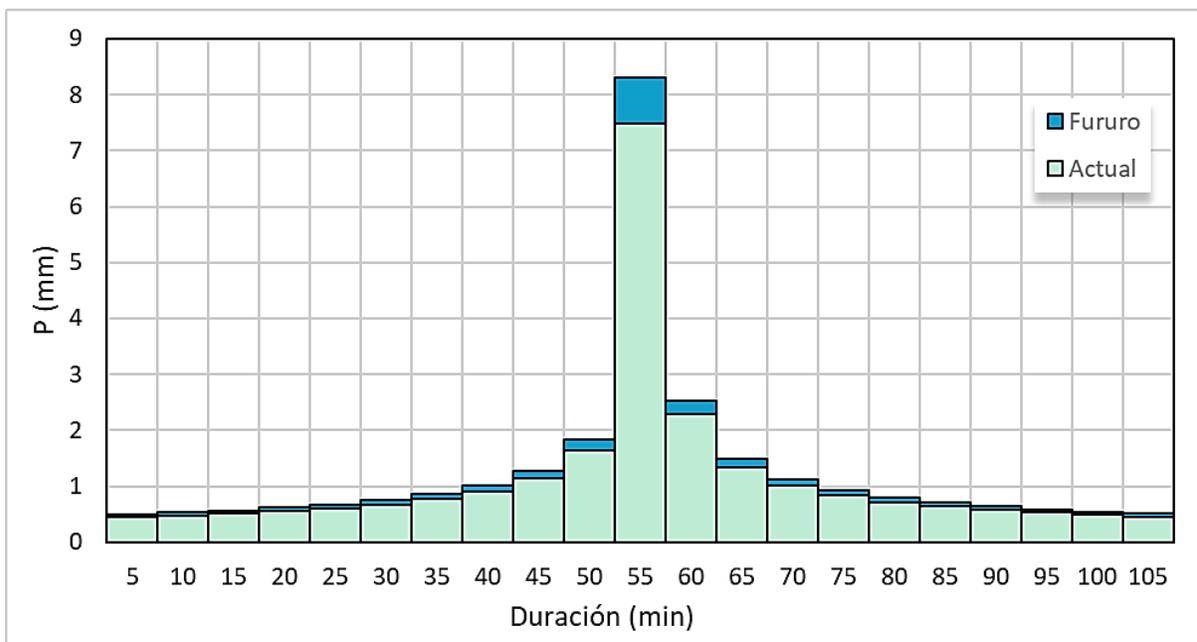


Figura 14 Quebrada “El Rosario” - Comparación de la tormenta de diseño actual vs la futura considerando el escenario de Cambio Climático RCP 8.5.

Modelación Hidrológica

A partir de los histogramas del apartado anterior, se construyeron los hidrogramas para cada quebrada. Es así como se observa en la Figura 15 que para la quebrada “San Sebastián” se tiene una escorrentía superficial de duración de 2:10 [horas] y caudales máximos de 4.24 [m³/s] para el escenario actual bajo condiciones normales, y de 6.14 [m³/s] para el escenario futuro influenciado por las condiciones de CC.

Mientras que, en la Figura 16 se observa que para la quebrada “El Rosario” se tiene una escorrentía superficial de duración de 5:35 [horas] y caudales máximos de 9.54 [m³/s] para el escenario actual bajo condiciones normales, y de 12.90 [m³/s] para el escenario futuro influenciado por las condiciones de CC.

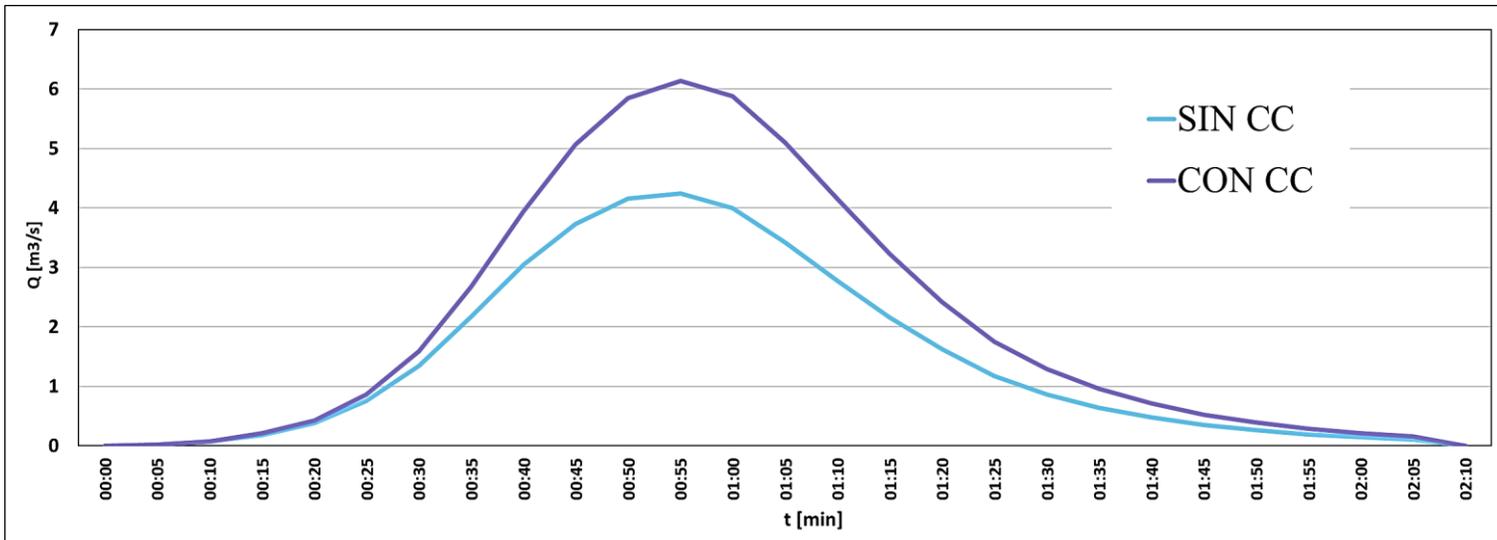


Figura 15 Quebrada "San Sebastián" - Hidrogramas comparando condiciones normales vs condiciones futuras con CC.

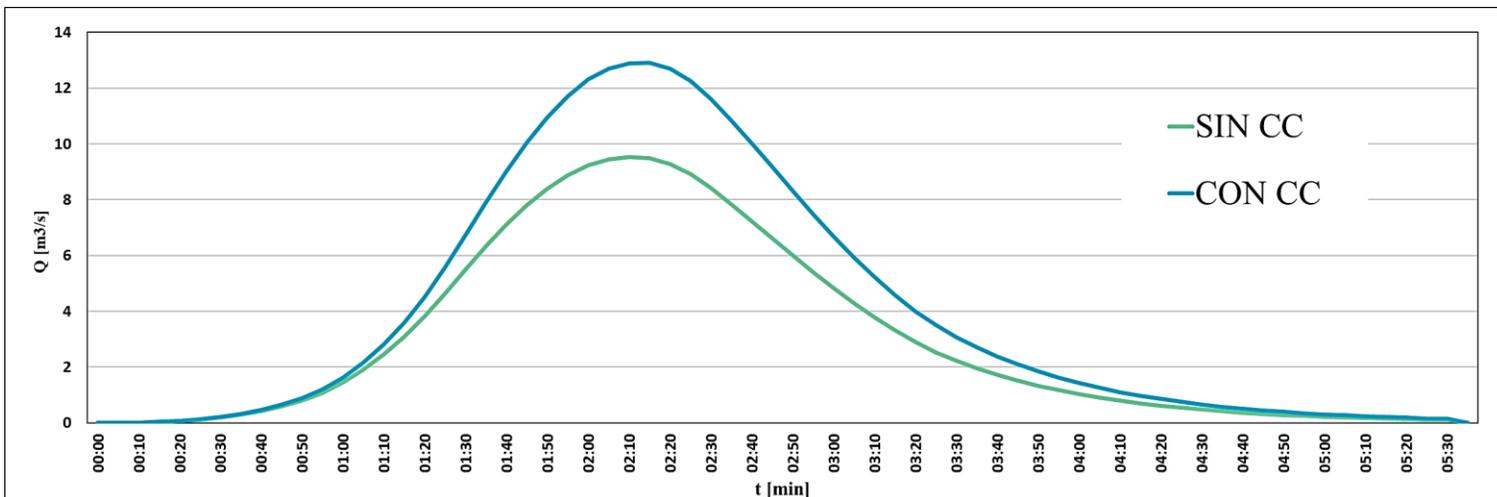


Figura 16 Quebrada "El Rosario" - Hidrogramas comparando condiciones normales vs condiciones futuras con CC.

Tras examinar los datos presentados en los hidrogramas de la Figura 14 y de la Figura 15, así como los hietogramas de la Figura 13 y de la Figura 14 generados con ayuda del software HEC-HMS, se puede observar una marcada disparidad entre los caudales máximos y los volúmenes de precipitación, cuyos valores se encuentran resumidos en la Tabla 6. Esto es especialmente notable al analizar los valores, significativamente superiores, obtenidos cuando se aplica los efectos adversos del escenario de CC RCP 8.5. Por consecuencia, esto sugiere que existe la posibilidad de que se produzcan eventos extremos de precipitaciones que afecten a la zona de estudio.

Tabla 6 *Resumen de resultados de la modelación hidrológica.*

Quebrada	Volumen de precipitación [mm]		Caudal [m ³ /s]	
	Sin CC	Con CC	Sin CC	Con CC
San Sebastián	24.67	28.02	4.24	6.14
El Rosario	14.02	15.93	9.54	12.90

Modelación Hidráulica

La modelación en el software Iber nos arrojó los datos correspondientes al tirante y la velocidad de flujo, como se visualiza en la Figura 17, donde se muestra el área de estudio conjuntamente con los valores de calado máximo antes de considerar el CC. En estos resultados se puede observar que el nivel máximo de inundación se sitúa entre 0 y 4.99 metros según la escala de colores. En contraste, el nivel máximo de la tormenta analizada en la investigación de Alarcón y Basantes (2022) varía entre 0 y 7.71 metros, lo cual supera los valores obtenidos en nuestra modelación, más aún así, se constata que las zonas con mayor

calado se encuentran en las quebradas “San Sebastián” y “El Rosario”, que resultan ser las mismas zonas afectadas en la investigación de Alarcón y Basantes (2022). En adición a ello, en la modelación realizada para la presente investigación, la zona urbana que muestra mayor afectación se presenta a lo largo de la Av. 20 de Diciembre, donde se registran niveles de agua de hasta 1.19 metros. Tras la comparativa realizada entre los datos presentados en la investigación de Alarcón & Basantes (2022) con los datos obtenidos en el presente trabajo, se hallan diferencias en los calados y las áreas afectadas.

Al considerarse un escenario de CC se prevé que el caudal de agua se vea modificado en gran escala. Es así como para un periodo de retorno de 50 años bajo las condiciones del escenario de Cambio Climático RCP 8.5 el nivel del tirante alcanza valores entre 0 y 5.42 metros, como se muestra en la Figura 18, este rango tiene una variación de 8.61% mayor al rango de valores mostrados en la Figura 17 que representa la situación actual sin considerar el Escenario de CC.

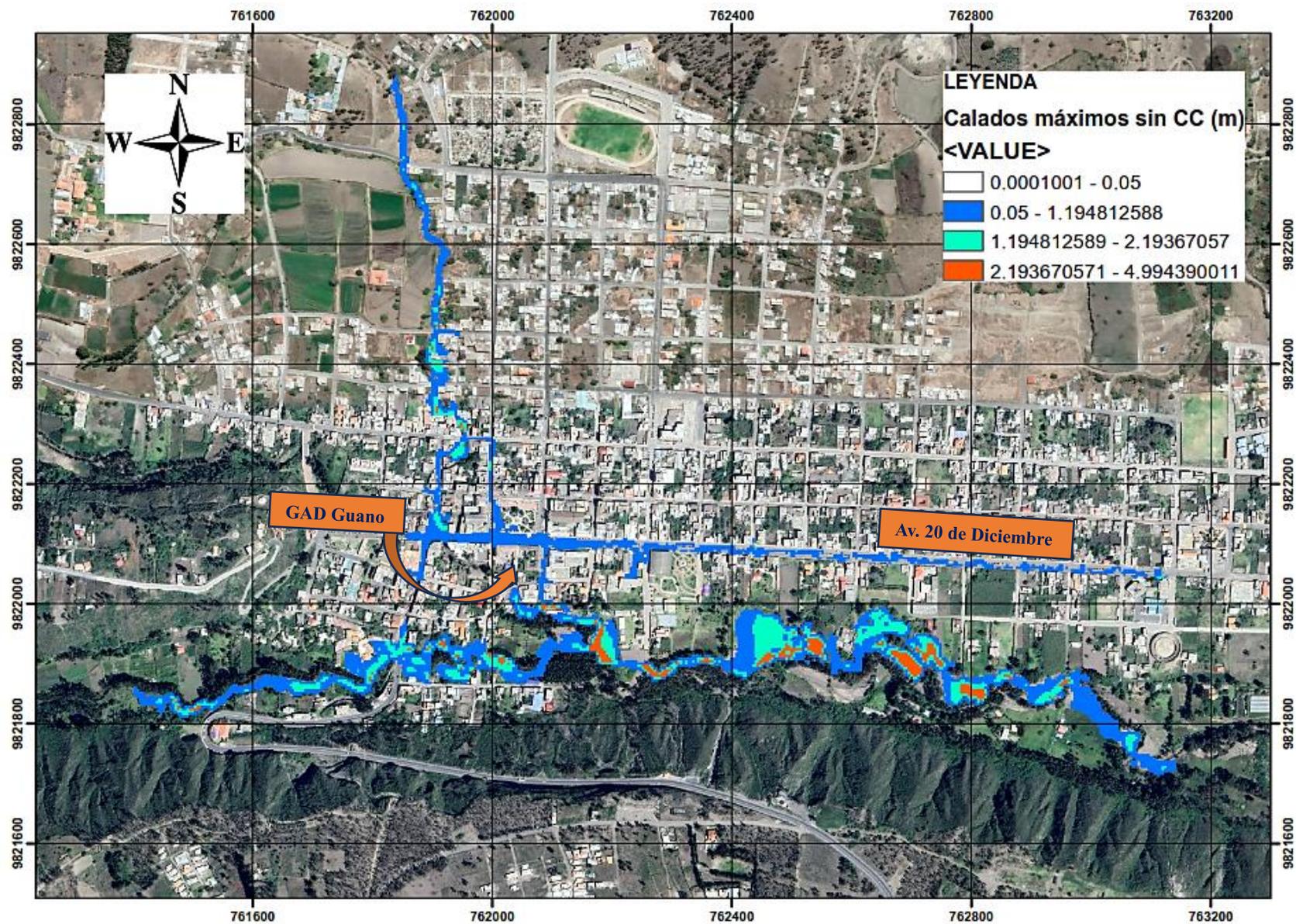


Figura 17 Mapa de tirantes máximos sin CC.

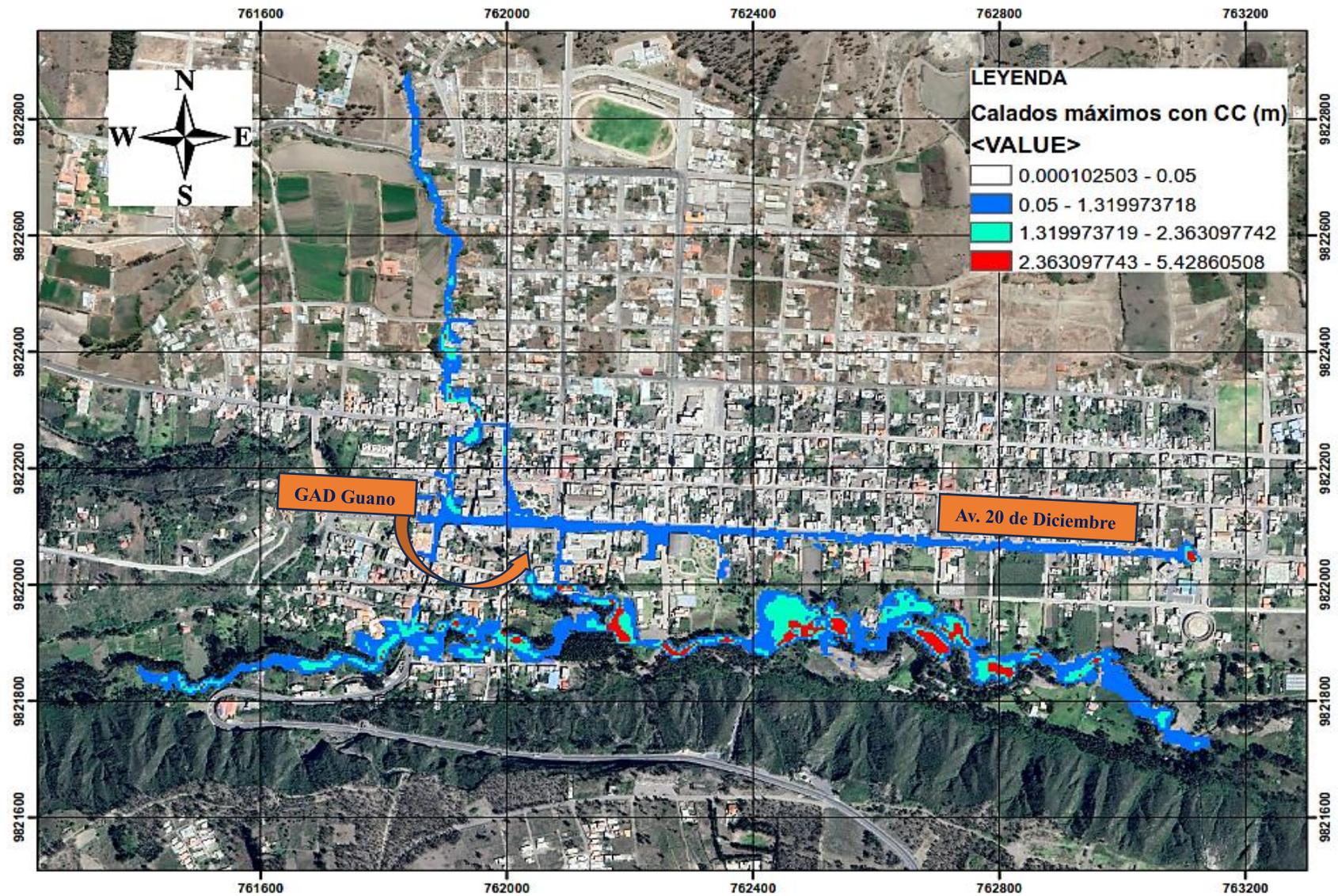


Figura 18 Mapa de tirantes máximos con escenarios RCP 8.5 de CC.

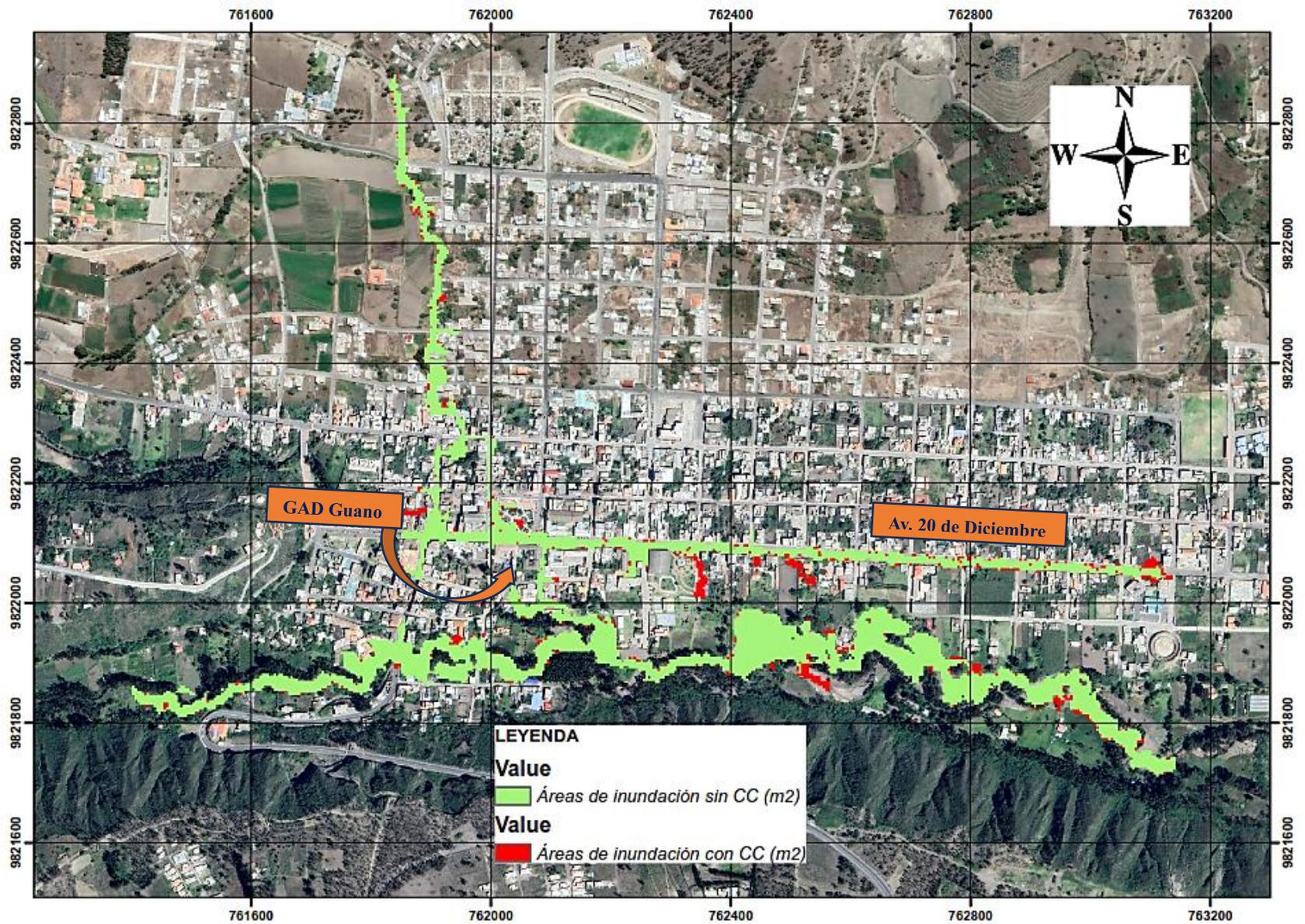


Figura 19 Diferencia de áreas de inundación.

En la Figura 19 se puede observar los calados del área de inundación presente y futura, donde se visualiza un aumento en los niveles de calados de inundación que se expande hacia áreas previamente no afectadas a consecuencia del escenario de CC. En la Figura 20 se identifica la mayor diferencia de calado de 3.31 metros dentro del cauce natural de la quebrada “El Rosario”; mientras que en gran parte de la zona de estudio se puede visualizar que existe una diferencia de calados entre 0.13 y 0.33 metros, afectando en su gran mayoría la Av. 20 de Diciembre y la Calle León Hidalgo.

La velocidad en la zona de estudio, que no considera el efecto del escenario de CC oscila entre 0.0027 y 11.06 metros por segundo, como se muestra en la Figura 21; con puntos particulares que destacan extensas longitudes en donde la velocidad en las quebradas “San Sebastián”, “El Rosario”, y algunos puntos aislados la Av. 20 de Diciembre, es la máxima.

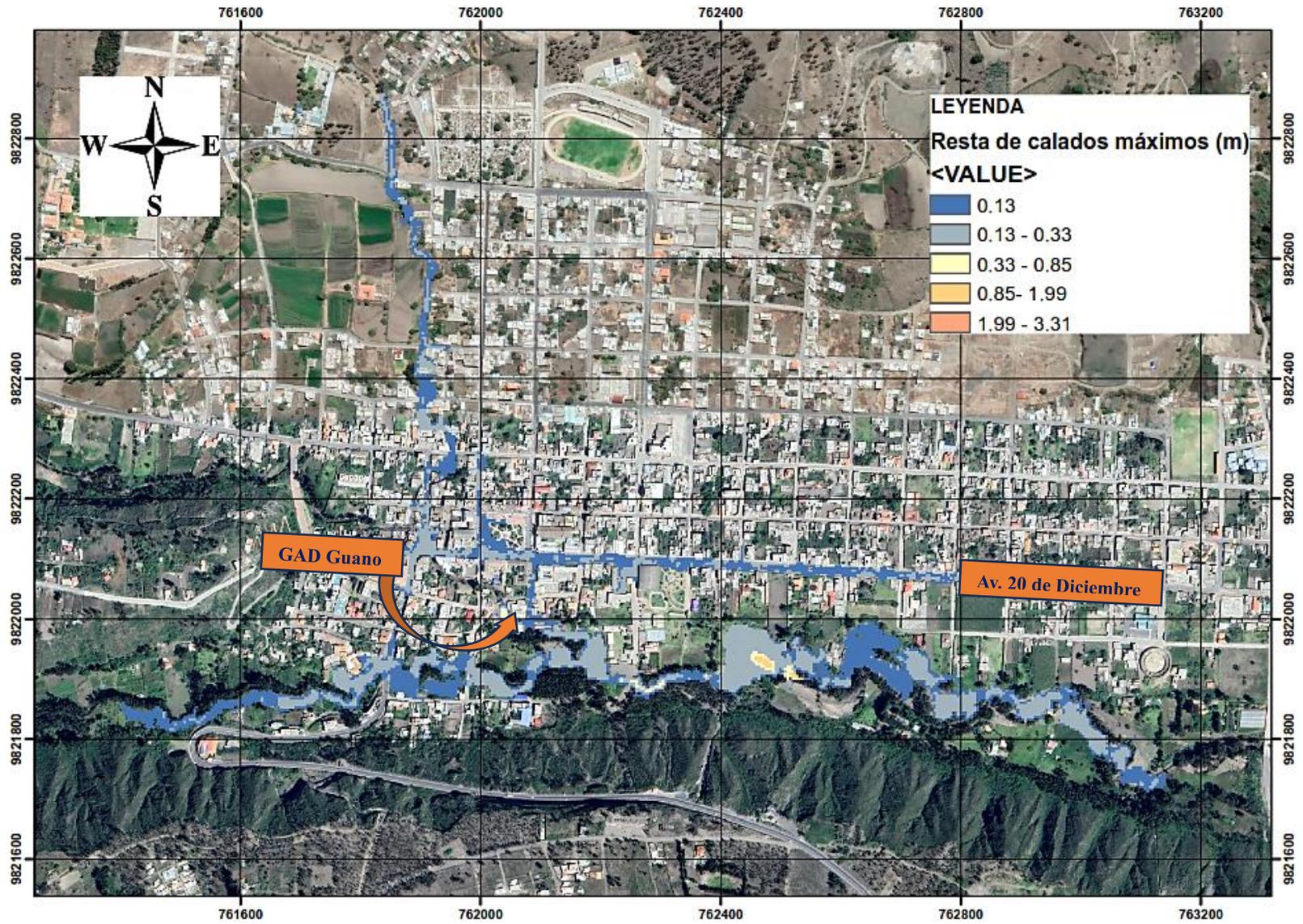


Figura 20 Diferencia de tirantes entre la situación actual y futura.

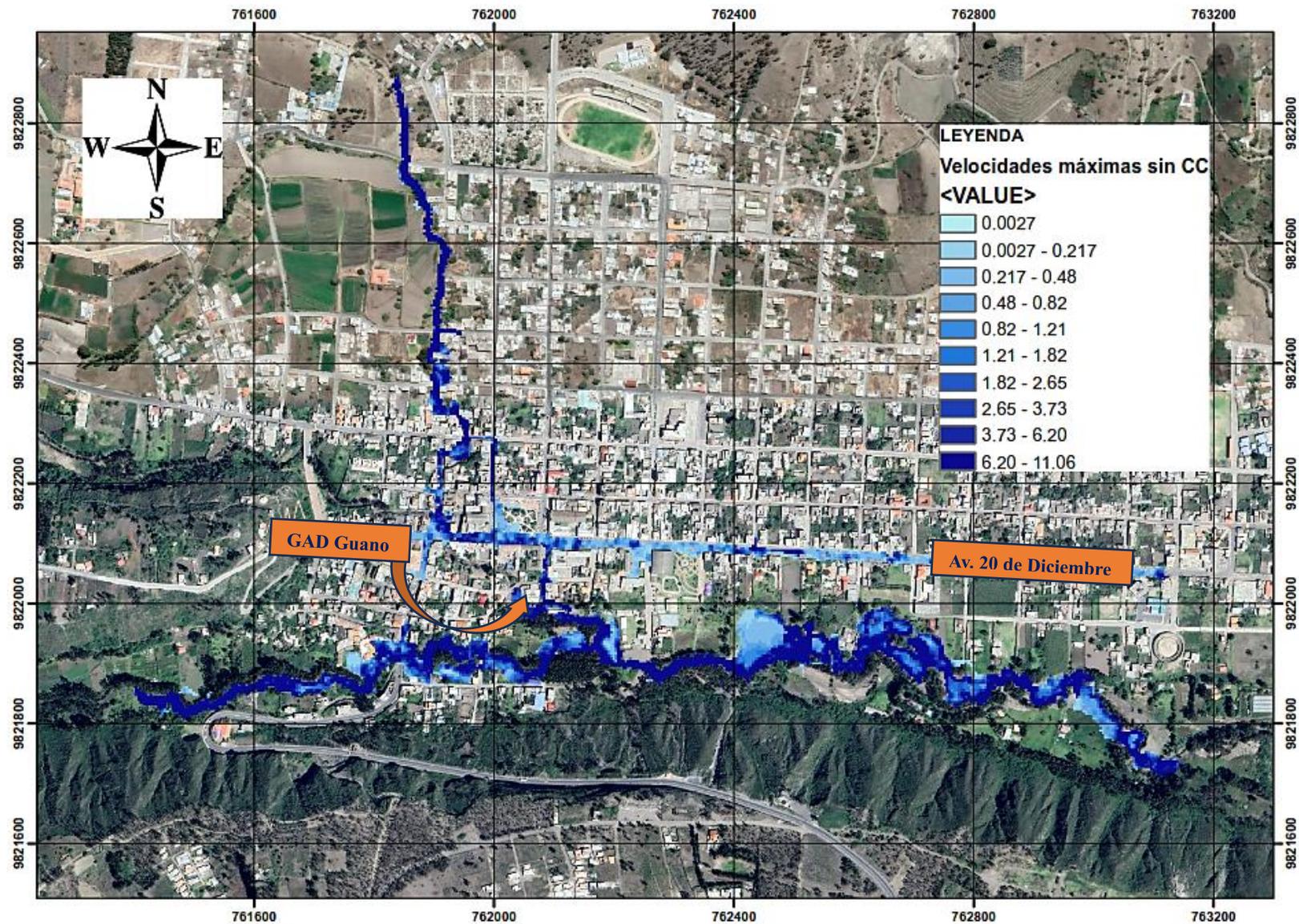


Figura 21 Mapa de velocidades máximas sin CC.

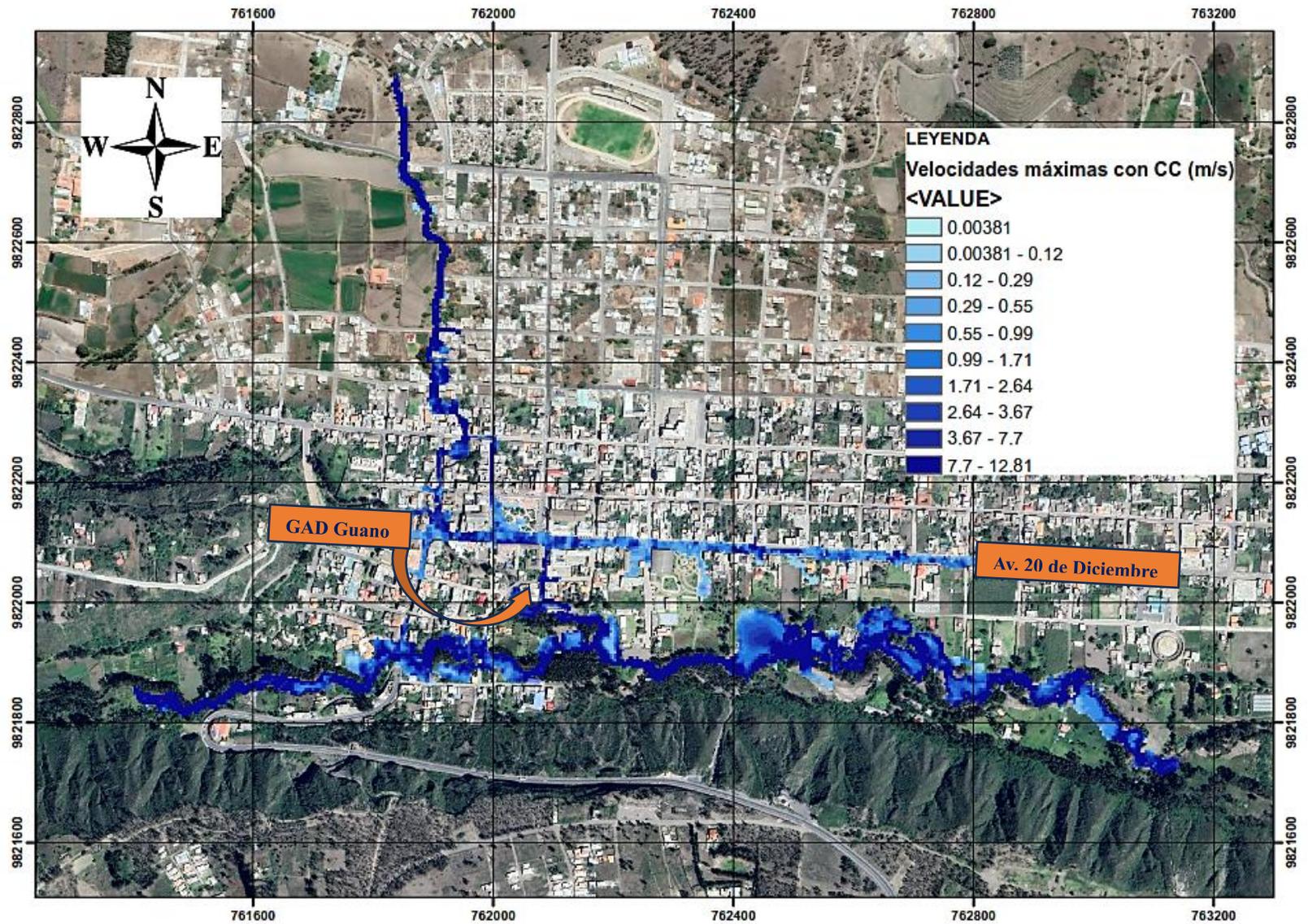


Figura 22 Mapa de velocidades máximas con Cambio Climático Escenario RCP 8.5.

La velocidad bajo el escenario del CC (RCP 8.5) varía entre 0.00381 y 12.81 metros por segundo, como se observa en la Figura 22, esto representa un aumento de 0.00111 metros por segundo en velocidades iniciales y de 1.75 metros por segundo en las velocidades máximas detectadas en la quebrada “El Rosario”, “San Sebastián” y a lo largo de la Av. 20 de Diciembre.

A partir de los resultados obtenidos en el simulador Iber se puede observar que los datos obtenidos guardan similitud con la tormenta simulada por Alarcón & Basantes (2022) el 2 de marzo del 2021. La diferencia temporal entre ambas situaciones es aproximadamente 2 años, en este lapso los valores han experimentado variaciones de 1.01 metros en los tirantes y de 3.94 metros por segundo en las velocidades. Tomando en cuenta los datos para el escenario de CC, específicamente el RCP 8.5 para un periodo de retorno de 50 años, se puede visualizar que no se producen altas diferencias a comparación de la situación actual sin CC tanto en los tirantes y las velocidades. Es importante destacar la procedencia de las curvas IDF, ya que influye en la comparativa de los resultados de Alarcón y Basantes (2022) con el trabajo de investigación actual. Esto se debe a que estos autores emplearon las curvas IDF propuestas por el INAHMI; mientras que en la investigación actual se construyeron las curvas IDF a partir de los análisis de datos históricos de la estación hidrometeorológica M1036.

Al analizar los mapas correspondientes al tirante y la velocidad entre la situación actual (sin CC) y la posible situación futura (con CC), se observa que las zonas propensas a inundaciones no experimentan grandes cambios. En otras palabras, las zonas afectadas por las inundaciones, sin considerar el escenario de CC, serán las mismas afectadas para la posible situación futura. Sin embargo, es importante destacar que la zona de la Av. 20 de Diciembre, sector el redondel, muestra un aumento en el tirante de hasta 0.33 metros y velocidades de aproximadamente de

3.67 a 7.7 metros por segundo. Estos valores son importantes para considerar el sector como una zona alta en riesgo a inundaciones debido a las precipitaciones.

Comparación de resultados obtenidos con hechos recientes

Durante el desarrollo del presente trabajo de investigación, se profundizó los conocimientos en cuanto a los temas relacionados a eventos climáticos extremos, específicamente respecto a precipitaciones e inundaciones, que han afectado la seguridad de los habitantes e integridad estructural de las edificaciones del cantón Guano. Por lo tanto, con base a los resultados obtenidos en las modelaciones realizadas, hemos optado por realizar una validación de resultados contrastando estos, con los registros de eventos extremos de inundaciones y aluviones que han ocurrido en los últimos años en el cantón Guano.

El hecho reciente que ha tenido mayor notoriedad y repercusiones es el aluvión que data del 12 de diciembre de 2021. Los bienes afectados incluyeron viviendas, calles, locales comerciales, red de agua potable, alcantarillado y saneamiento, planta de tratamiento de aguas servidas, parque acuático, red eléctrica, dos puentes y bienes privados. Producto de los eventos de precipitaciones extremos registrados por más de 4 horas en la parte alta del cantón, se generó un aluvión que ingresó en sentido norte-sur por medio del cauce natural de las quebradas que atraviesan la cabecera cantonal, provocando su desbordamiento (Secretaría de Gestión de Riesgos, 2021). Los sectores afectados fueron: La Merced, La Dolorosa del Cementerio, La Magdalena, Santa Anita, San Pedro, La Inmaculada, La Dolorosa (Centro), Santa Teresita (Balneario Los Elenes), entre otros (Noruña, 2021).

Al realizar un análisis más detallado se puede notar que la Av. 20 de diciembre, durante gran parte de su longitud, fue la vía que se vio mayormente afectada por el aluvión, puesto que gran parte del caudal se descargó por esta ruta, como se evidencia en la Figura 23.



Figura 23 *Av. 20 de Diciembre tras el evento del 12 de diciembre de 2021.*

Fuente: *El Universo (2021).*

Al realizar la comparativa con los resultados obtenidos en el presente trabajo de investigación, en la Figura 24 podemos denotar una alarmante tendencia a que la Av. 20 de Diciembre, una de las arterias principales del cantón, se vea afectada por las inundaciones producto de eventos inusuales de precipitaciones extremas. A lo largo de la calle Asunción, sus intersecciones con las calles Agustín Dávalos, calle García Moreno y Av. 20 de Diciembre, son focos críticos, debido a la cantidad de edificaciones, locales comerciales, bienes públicos y automotores que transitan por el sector que pueden verse afectados al reiterarse un evento extremo de similares características al del 12 de diciembre de 2021.

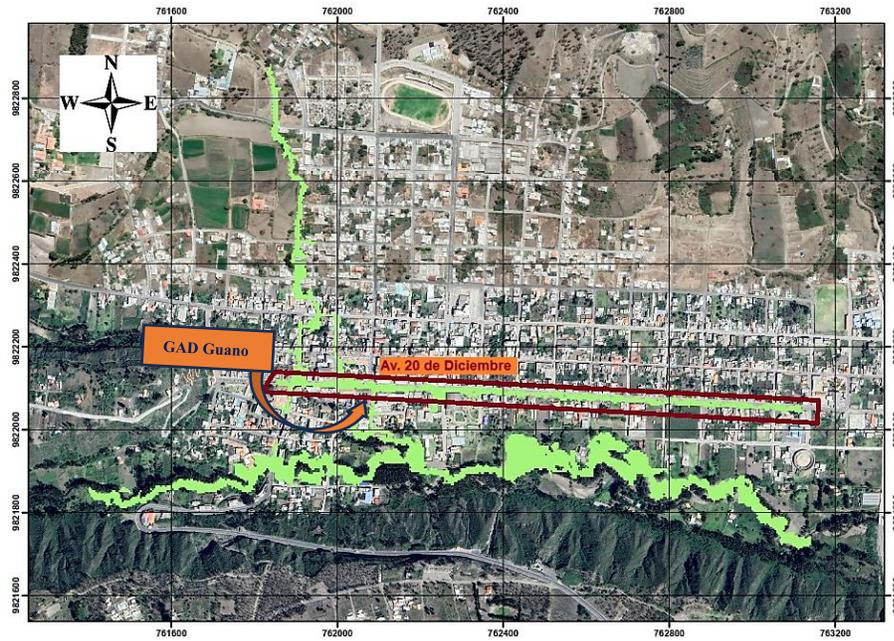


Figura 24 Resultados de la modelación de zonas propensas a inundaciones.

Es evidente que las inundaciones son, y serán a futuro, un tema de especial interés para este cantón. Se debería precautelar la seguridad de la ciudadanía, los bienes privados y públicos, mediante el constante mantenimiento y limpieza de las quebradas aledañas a la urbe, el mejoramiento de la red de alcantarillado, control de desarrollo urbano y la implementación de un plan de gestión de riesgos que considere eventualidades climáticas extremas, en especial los eventos extremos de precipitaciones, como la presentada en la Figura 25.



Figura 25 Daños materiales producidos por el aluvión del 12 de diciembre de 2021, Guano - Ecuador.

Fuente: ECU 911 Riobamba (2021).

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Para el presente trabajo de investigación se estimaron los efectos que produciría el Cambio Climático sobre las zonas vulnerables a inundaciones que son aledañas a las quebradas “San Sebastián” y “El Rosario” del cantón Guano, mediante la elaboración de modelos hidráulicos e hidrológicos influenciados por el escenario de Cambio Climático.

No se implementaron las curvas de Intensidad, Duración y Frecuencia (IDF) proporcionadas por el INAHMI, puesto que consideramos que existe una sobrestimación de valores. Por ello se establecieron nuevas curvas IDF mediante una regresión lineal de los datos obtenidos del registro de precipitaciones máximas anuales de la estación hidrometeorológica M1036 de la ESPOCH.

Los factores usados para el escenario futuro influenciado por el efecto del CC pertenecen al escenario RCP 8.5, los cuales suponen el peor escenario posible. Al aplicar dichos factores, el valor de las precipitaciones máximas anuales incrementa y esto repercute de manera directa sobre el régimen de caudales de las quebradas denotando un aumento de 1.90 [m³/s] para “San Sebastián” y un aumento de 3.36 [m³/s] para el caudal de “El Rosario”.

Se ejecutaron los modelos hidrológicos de lluvia-escorrentía en el software HEC-HMS. Estos modelos proyectan, para ambas quebradas, un incremento respecto a la intensidad de precipitación en el modelo que implementa el escenario futuro que considera el efecto de CC. En cuanto a la quebrada “San Sebastián”, el incremento es moderado ya que pasa de 24.67 [mm/h] a 28.02 [mm/h]; mientras que para la quebrada “El Rosario” se denota un incremento poco considerable ya que pasa de 14.02 [mm/h] a 15.93 [mm/h].

Mediante la modelación hidrodinámica realizada en el software Iber se identificaron las nuevas áreas de inundación que, si bien éstas no comprenden una gran extensión, se relacionan de manera directa con el alarmante aumento en el nivel de calados máximos de hasta 3.31 [m] en puntos específicos del mapa de zonas inundadas. En cuanto a la velocidad máxima del flujo en estas áreas, se registra un aumento que va de 11.06 [m/s] a 12.81 [m/s] que, si bien la velocidad máxima en condiciones normales ya era preocupante, este posible aumento causa especial preocupación por las consecuencias que tendría el arrastre de escombros en la corriente con esta velocidad de flujo sobre las estructuras.

Finalmente se concluye que, los resultados presentados en este trabajo de investigación, derivados de las simulaciones de los modelos hidrológicos e hidráulicos, plantean un estado de alarma e inquietud. Debido a que existen incrementos en los valores de tirantes de agua, velocidades máximas de flujo y áreas de inundación que, en caso de producirse un evento extremo de precipitación como el que fue planteado para esta investigación, desencadenarían el desbordamiento de las quebradas aledañas a la urbe, inundaciones y aluviones que arrastrarían con todo a su paso; ocasionando repercusiones directas sobre las condiciones de vida de los habitantes del cantón Guano.

CAPÍTULO VI. PROPUESTA

Propuestas

Ante la constante amenaza de inundaciones originadas por eventos climáticos extremos, es esencial que las autoridades gubernamentales pertinentes tomen medidas cruciales en relación a la gestión de riesgos y a la planificación urbana en el cantón Guano. Como punto de inicio, se debe promover una estrategia de concienciación pública que informe sobre los peligros y fomente la importancia de la preparación ante desastres naturales de gran magnitud. Al mismo tiempo, se deberían establecer sistemas de monitoreo y alerta temprana, que cercioren que las condiciones y funcionalidad de los sistemas de drenaje y barreras de contención estén en buen estado y sean capaces de mitigar los daños.

Además, es fundamental revisar y actualizar las directrices relacionadas al ámbito de la construcción y zonificación para evitar la urbanización en áreas de alto riesgo de inundación. La colaboración y constante comunicación entre el gobierno local y estatal es esencial para coordinar respuestas rápidas y eficaces en caso de ocurrencia de desastres ambientales. Así también, consideramos que la gestión de riesgos, la planificación urbana y las medidas de prevención deben ser enfoques integrales a largo plazo.

BIBLIOGRAFÍA

- Alarcón, S., & Basantes, K. (2022). *Determinación de zonas urbanas vulnerables a inundaciones causadas por las principales quebradas de Guano empleando distintos modelos hidrológicos e hidráulicos*. [Universidad Nacional de Chimborazo]. [http://dspace.unach.edu.ec/bitstream/51000/10021/1/Alarcón %2C Sebastián_Basantes %2C Katherine%282022%29_Determinación de zonas urbanas vulnerables a inundaciones causadas por las principales quebradas de Guano.pdf](http://dspace.unach.edu.ec/bitstream/51000/10021/1/Alarcón%20Sebastián_Basantes%20Katherine%282022%29_Determinación%20de%20zonas%20urbanas%20vulnerables%20a%20inundaciones%20causadas%20por%20las%20principales%20quebradas%20de%20Guano.pdf)
- Alberca, J., Mejía, J., & Guevara-Pérez, E. (2022). Calibration of the curve number of the SCS model for the region of the north coast of Peru. *Revista Ingeniería UC*, 29(2), 12. <https://doi.org/https://doi.org/10.54139/revinguc.v29i2.287>
- Alcocer, K., & Montes, T. (2023). *Influencia Del Cambio Climático Sobre El Régimen De Crecidas En La Quebrada De Cunduana* [Universidad Nacional de Chimborazo]. <http://dspace.unach.edu.ec/handle/51000/10563>
- Alvear, C. M., & Carpio, J. C. (2005). *Modelación hidrológica para el pronóstico de caudales mediante la aplicación del paquete HEC-HMS en la cuenca del río Paute* [Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE]. <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/2090>
- Armenta, G., Villa, J., & Jácome, P. (2016). *Proyecciones climáticas de precipitación y temperatura para Ecuador, bajo distintos escenarios de cambio climático*. (pp. 99–102). <https://info.undp.org/docs/pdc/Documents/ECU/14> Proyecciones de Clima Futuro para Ecuador en base a IPCC-AR5.pdf
- Bates, B., Kundzewicz, Z., Palutikof, J., & Wu, S. (2008). El Cambio Climático y el agua. In Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio climático (Ed.), *Library*. <http://216.92.126.55/publicaciones/climate-change-water-sp.pdf>
- Benito Ferrández, G., Gomes Machado, M. J., Garijo Sarría, C., Martín Anta, D., Salgado Cámara, A., & Tourné Whyte, M. (2018). Estudios y experiencias a nivel europeo en el primer ciclo de la Directiva de Inundaciones. *Publicaciones Del Ministerio Para La Transición Ecológicaterio Para La Transición Ecológica*, 105. <http://publicacionesoficiales.boe.es/>
- Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vázquez-Cendón, E., Dolz, J., & Coll, A. (2014). Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. *Revista Internacional de Metodos Numericos Para Calculo y Diseno En Ingenieria*, 30(1), 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.rimni.2012.07.004>
- Chow, V. Te, Maidment, D., & Mays, L. (1994). Hidrología Aplicada. In Ma. E. Suárez (Ed.), *Hidrologia Aplicada* (Issue (13°; McGrawHill, Ed.). Santafé de Bogotá.). McGraw-HILL.
- Desinventar. (2021). *Ecuador disaster database*. Disaster Database. <https://www.desinventar.net/DesInventar/profiletab.jsp?countrycode=ecu&continue=y>
- Duque-Sarango, P., & Patiño, D. M. (2019). Evaluación del Sistema de Modelamiento Hidrológico HEC- HMS para la Simulación Hidrológica de una Microcuenca Andina Tropical Evaluation of the Hydrological Modeling System HEC-HMS for the

- Hydrological Simulation of a Tropical Andean Micro-basin. *Información Tecnológica*, 30(6), 351–362. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642019000600351>
- ECU 911 Riobamba. (2021). *Llamadas al 9-1-1 informan la inundaciones en el barrio La Merced, cantón Guano*. [@ecu911Riobamba], [Tweet]. <https://twitter.com/ecu911Riobamba/status/1469778302852288515>
- El Universo. (2021). *Emergencia en Guano para atender daños por aluvión, que afectó a barrios, viviendas, negocios y carros*. <https://www.eluniverso.com/noticias/ecuador/emergencia-en-guano-para-atender-danos-por-aluvion-que-afecto-a-barrios-viviendas-negocios-y-carros-nota/>
- Fernández, D., Martínez, M., Ríos, J., Rubio, E., & Sánchez, M. (2017). Modelo hidrológico de la cuenca del río Sordo, Oaxaca, México, con SWAT. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, VIII(5), 141–156. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2017-05-10>
- Gómez, J. (2021). Modelación de un Sistema para el Control de Inundaciones, en la Planicie Aluvial del Río Lodana, Manabí-Ecuador. *Polo Conocimiento*, 6(8), 386–404. <https://doi.org/10.23857/pc.v6i8>
- Granados Chahín, R. E. (2017). Comparación De Los Métodos: Bloques Alternos E Hietograma Histórico Para La Selección De Tormentas De Diseño, Cuenca Del Río Chiquito, Tegucigalpa, Honduras. *Agua, Saneamiento & Ambiente*, 12(1), 34–42. <https://doi.org/10.36829/08asa.v12i1.1427>
- Guaman, E. (2020). *Modelación hidrológica con HEC-HMS y RS-MINERVE de la cuenca del río Casacay - El Oro* [Universidad Técnica de Machala]. <http://repositorio.utmachala.edu.ec/handle/48000/16103>
- Iber. (2021). *Coeficiente de rugosidad de Manning (V3.1.0)*. <https://iberaula.es/space/54/downloads>
- Jácome, M. (2022). *Determinación de zonas urbanas vulnerables a inundaciones de la quebrada Cundwana mediante el uso de modelos hidrológicos e hidráulico* [Universidad Nacional de Chimborazo]. <http://dspace.unach.edu.ec/handle/51000/9069>
- Jato, D., & González, I. (2019). *Sequías e inundaciones: con el agua al cuello*. 1–3.
- Jha, A., Bloch, R., & Lamond, J. (2012). Flood Forecasts for Urban Basin with Integrated Hydro-Meteorological Model. In *Journal of Hydrologic Engineering* (Vol. 8, Issue 1). The World Bank. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1084-0699\(2003\)8:1\(1\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1084-0699(2003)8:1(1))
- Loaiza, J. C., & Valentijn, R. N. (2011). Desarrollo de modelos hidrológicos y modelación de procesos superficiales. *Gestión y Ambiente*, 14(3), 23–32. <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/40695/29732-106807-1-PB.pdf?sequence=2&isAllowed=y>
- López, J. J., González, M., Scaini, A., Goñi, M., Valdenebro, J. V., & Gimena, F. N. (2012). Caracterización del modelo HEC-HMS en la cuenca de río Arga en Pamplona y su aplicación a cinco avenidas significativas Introducción. *Obras y Proyectos*, 12(1), 15–30. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-28132012000200002>

- Ludeña, C., & Wilk, D. (2013). ECUADOR : Mitigación y Adaptación al Cambio Climático. Marco de preparación de la Estrategia 2012 - 2017 del BID en Ecuador. *Banco Interamericano de Desarrollo*, 1–29. <https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/Ecuador-Mitigación-y-adaptación-al-cambio-climático.pdf>
- Mena, M., Scheffczyk, K., Urrutia, M., Huerta, B., & Walz, Y. (2021). Evaluación del Riesgo de Inundación en Ecuador. *Unu*, 41. https://collections.unu.edu/eserv/UNU:8434/VALE_Flood_Risk_Assesment_Report_Ecuador_SPA_FINAL_META.pdf
- Montalvo, C. I. (2017). Estimación de pérdidas de cauce, modelación de transporte de sedimentos y cambio climático de una cuenca mediterránea (Rambla de la Viuda) [Universidad politécnica de Valencia]. In *Universidad de Cantabria*. <https://riunet.upv.es/handle/10251/86269>
- Noroña, K. (2021, December 12). Estos son los daños que causó el aluvión en Guano, declarado en emergencia. *GK City*, 1. <https://gk.city/2021/12/12/danos-aluvion-canton-guano/>
- Ochoa, S., Reyna, T., Reyna, S., García, M., Labaque, M., & Díaz, M. (2016). Modelación hidrodinámica del tramo medio del río Ctalamochita, Provincia de Córdoba. *Revista Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 3(2), 95–101. <https://revistas.unc.edu.ar/index.php/FCEFyN/article/download/11847/15212>
- Olivares-Cerpa, G., Russo, B., Martínez-Puentes, M., Bladé, E., & Sanz-Ramos, M. (2022). “SUDS-lineales” para reducir el riesgo de inundación considerando escenarios de Cambio Climático. *Ingeniería Del Agua*, 26(2), 77–90. <https://doi.org/10.4995/ia.2022.17058>
- Organización de las Naciones Unidas (ONU). (2019). UNWater PolicyBrief Water Climate-Change (ES). In *Onu-Water and Climate Change* (Vol. 1, Issue 1). https://www.unwater.org/sites/default/files/app/uploads/2019/12/UN-Water_PolicyBrief_Water_Climate-Change_ES.pdf
- Organización Meteorológica Mundial. (2021). *Sequías, tormentas e inundaciones: el agua y el cambio climático dominan la lista de desastres*. Los Fenómenos Peligrosos Relacionados Con El Agua Son Los Grandes Causantes de Los Desastres de Los Últimos 50 Años. <https://public.wmo.int/es/media/comunicados-de-prensa/los-fenomenos-peligrosos-relacionados-con-el-agua-son-los-grandes>
- Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). (2014). Cambio climático 2014: Informe de Síntesis. In *Contribución de los Grupos de trabajo I,II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*.
- Parra-Cuadros, M., Villegas-Jiménez, N. E., Hernández-Atilano, E., Aguirre-Ramírez, N. J., & Vélez-Macías, F. de J. (2019). Aplicación del modelo CE QUAL-W2 : una aproximación a la estructura térmica en el embalse Miguel Martínez Isaza, Concordia, Antioquia, Colombia. *TecnoLógicas*, 22(46), 99–113. <https://doi.org/10.22430/22565337.1222>

- Pascual, J., & Díaz, M. (2018). Guía Práctica sobre la modelización hidrológica y el Modelo HEC-HMS. In *Información tecnológica* (Vol. 29, Issue 4).
https://www.agua.imdea.org/sites/default/files/pdf/news/20161215/Cuadernos de Geomática 4_b.pdf
- Peruzzo, F., Riccardi, G., Basile, P., & García, M. (2017). Evaluación de un modelo hidrodinámico bidimensional en un tramo del cauce principal del río Paraná. *Simposio Regional Sobre Hidráulica, VIII*(1), 1–2. <http://hdl.handle.net/11336/86025>
- Secretaría de Gestión de Riesgos. (2021, December). *Informes de Situación – Aluvión Chimborazo – Ciudad de Guano, desde el 11 de diciembre de 2021*. Informe de Situación No. 01. <https://www.gestionderiesgos.gob.ec/informes-de-situacion-aluvion-chimborazo-ciudad-de-guano-desde-el-11-de-diciembre-de-2021/>
- Toulkeridis, T., Tamayo, E., Simón-baile, D., Yunga, D. F. R., Viera-torres, M., & Heredia, M. (2020). *Climate Change According to Ecuadorian Academics - Perceptions*. 31(1), 21–46.
https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/18635/1/Lgr_n31_Toulkeridis_Tamayo_Simon-Baile_Merizalde-Mora_Reyes-Yunga_Viera-Torres_Heredia.pdf
- Vincenti, S. S., Puetate, A. R., & Acevedo, R. L. (2016). Análisis de inundaciones costeras por precipitaciones intensas , cambio climático y fenómeno de El Niño . Caso de estudio : por precipitaciones intensas , cambio. *La Granja: Revista de Ciencia de La Vida*, 24(2), 26.
<https://www.redalyc.org/journal/4760/476051632004/476051632004.pdf>
- Water Science School. (2019). *El Ciclo Natural del Agua - The Natural Water Cycle, Spanish*.
<https://www.usgs.gov/media/images/el-ciclo-natural-del-agua-natural-water-cycle-spanish>

ANEXOS

Anexo 1 *Valor de precipitación máxima por año (sin considerar Cambio Climático).*

Año	Precipitación máx. por año [mm]
1978	18.4
1979	22.4
1982	28.6
1983	29.5
1984	48.0
1985	29.0
1986	21.4
1987	52.4
1991	27.9
1992	39.0
2006	23.6
2007	31.2
2008	27.3
2009	16.6
2010	26.6
2011	28.2
2012	42.1
2013	19.2
2014	37.5
2015	7.0

Anexo 2 Factor aplicado por Cambio Climático (RCP8.5).

	Mes	Factor por Cambio Climático (RCP 8.5)
1	Enero	1.15
2	Febrero	1.15
3	Marzo	1.15
4	Abril	1.15
5	Mayo	1.15
6	Junio	1.15
7	Julio	1.15
8	Agosto	1.05
9	Septiembre	1.05
10	Octubre	1.05
11	Noviembre	1.05
12	Diciembre	1.15

Anexo 3 Análisis de Gumbel por año, sin considerar Cambio Climático.

	Kp	0.3	0.39	0.46	0.52	0.57	0.61	0.68	0.8	0.91	
Precipitación máxima (P_{máx}) [mm]											
Nº	Año	24 [h]	1 [h]	2[h]	3 [h]	4 [h]	5 [h]	6 [h]	8 [h]	12 [h]	18 [h]
1	1978	18.40	5.52	7.18	8.46	9.57	10.49	11.22	12.51	14.72	16.74
2	1979	22.40	6.72	8.74	10.30	11.65	12.77	13.66	15.23	17.92	20.38
3	1982	29.50	8.85	11.51	13.57	15.34	16.82	18.00	20.06	23.60	26.85
4	1983	28.60	8.58	11.15	13.16	14.87	16.30	17.45	19.45	22.88	26.03
5	1984	48.00	14.40	18.72	22.08	24.96	27.36	29.28	32.64	38.40	43.68
6	1985	29.00	8.70	11.31	13.34	15.08	16.53	17.69	19.72	23.20	26.39
7	1986	21.40	6.42	8.35	9.84	11.13	12.20	13.05	14.55	17.12	19.47

8	1987	52.40	15.72	20.44	24.10	27.25	29.87	31.96	35.63	41.92	47.68
9	1991	27.90	8.37	10.88	12.83	14.51	15.90	17.02	18.97	22.32	25.39
10	1992	39.00	11.70	15.21	17.94	20.28	22.23	23.79	26.52	31.20	35.49
11	2006	23.60	7.08	9.20	10.86	12.27	13.45	14.40	16.05	18.88	21.48
12	2007	31.20	9.36	12.17	14.35	16.22	17.78	19.03	21.22	24.96	28.39
13	2008	27.30	8.19	10.65	12.56	14.20	15.56	16.65	18.56	21.84	24.84
14	2009	16.60	4.98	6.47	7.64	8.63	9.46	10.13	11.29	13.28	15.11
15	2010	26.60	7.98	10.37	12.24	13.83	15.16	16.23	18.09	21.28	24.21
16	2011	28.20	8.46	11.00	12.97	14.66	16.07	17.20	19.18	22.56	25.66
17	2012	42.10	12.63	16.42	19.37	21.89	24.00	25.68	28.63	33.68	38.31
18	2013	19.20	5.76	7.49	8.83	9.98	10.94	11.71	13.06	15.36	17.47
19	2014	37.50	11.25	14.63	17.25	19.50	21.38	22.88	25.50	30.00	34.13
20	2015	7.00	2.10	2.73	3.22	3.64	3.99	4.27	4.76	5.60	6.37

Anexo 4 *Valor de precipitación máxima por año, considerando Cambio Climático.*

Año	Precipitación máx. por año [mm]
1978	19.3
1979	23.6
1982	33.9
1983	32.9
1984	55.2
1985	33.4
1986	22.5
1987	60.3
1991	29.3
1992	44.9
2006	26.6
2007	35.9

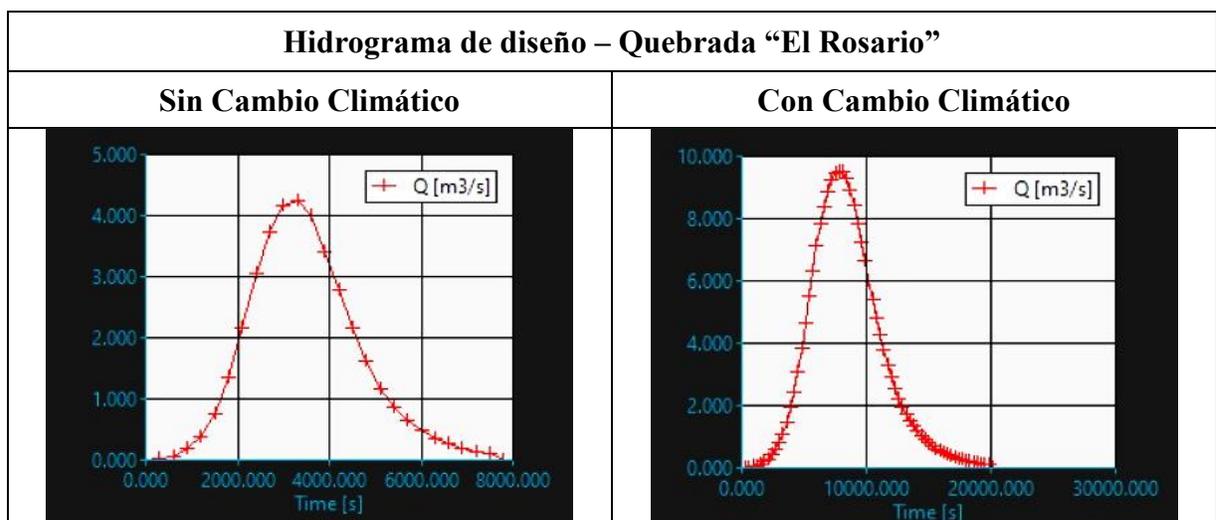
2008	31.4
2009	17.4
2010	30.6
2011	32.4
2012	44.2
2013	20.2
2014	39.4
2015	8.05

Anexo 5 *Análisis de Gumbel por año, considerando Cambio Climático.*

		Kp	0.3	0.39	0.46	0.52	0.57	0.61	0.68	0.8	0.91
		Precipitación máxima (Pmáx) [mm]									
Nº	Año	24 [h]	1 [h]	2[h]	3 [h]	4 [h]	5 [h]	6 [h]	8 [h]	12 [h]	18 [h]
1	1978	19.32	5.80	7.53	8.89	10.05	11.01	11.79	13.14	15.46	17.58
2	1979	23.58	7.07	9.19	10.84	12.26	13.44	14.38	16.03	18.86	21.45
3	1982	33.93	10.18	13.23	15.61	17.64	19.34	20.69	23.07	27.14	30.87
4	1983	32.89	9.87	12.83	15.13	17.10	18.75	20.06	22.37	26.31	29.93
5	1984	55.20	16.56	21.53	25.39	28.70	31.46	33.67	37.54	44.16	50.23
6	1985	33.35	10.01	13.01	15.34	17.34	19.01	20.34	22.68	26.68	30.35
7	1986	22.47	6.74	8.76	10.34	11.68	12.81	13.71	15.28	17.98	20.45
8	1987	60.26	18.08	23.50	27.72	31.34	34.35	36.76	40.98	48.21	54.84
9	1991	29.30	8.79	11.43	13.48	15.23	16.70	17.87	19.92	23.44	26.66
10	1992	44.85	13.46	17.49	20.63	23.32	25.56	27.36	30.50	35.88	40.81
11	2006	26.57	7.97	10.36	12.22	13.81	15.14	16.20	18.06	21.25	24.17
12	2007	35.88	10.76	13.99	16.50	18.66	20.45	21.89	24.40	28.70	32.65
13	2008	31.40	9.42	12.24	14.44	16.33	17.90	19.15	21.35	25.12	28.57
14	2009	17.43	5.23	6.80	8.02	9.06	9.94	10.63	11.85	13.94	15.86
15	2010	30.59	9.18	11.93	14.07	15.91	17.44	18.66	20.80	24.47	27.84
16	2011	32.43	9.73	12.65	14.92	16.86	18.49	19.78	22.05	25.94	29.51

17	2012	44.21	13.26	17.24	20.33	22.99	25.20	26.97	30.06	35.36	40.23
18	2013	20.16	6.05	7.86	9.27	10.48	11.49	12.30	13.71	16.13	18.35
19	2014	39.38	11.81	15.36	18.11	20.48	22.44	24.02	26.78	31.50	35.83
20	2015	8.05	2.42	3.14	3.70	4.19	4.59	4.91	5.47	6.44	7.33

Anexo 6 Hidrogramas de diseño - Quebrada "San Sebastián".



Anexo 7 Hidrogramas de diseño - Quebrada "El Rosario".

