



*Escuela Técnica Superior de
Ingenieros de Caminos, Canales y
Puertos.*

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Evaluación de los efectos del cambio climático sobre la inundación en Corrales de Buelna

Trabajo realizado por:

Diego Armando Urrea Méndez

Dirigido:

Manuel del Jesus Peñil

Salvador Navas Fernández

Titulación:

**Máster Universitario
en Gestión Integrada
de Sistemas Hídricos**

Santander, octubre de 2020

TRABAJO FINAL DE MASTER

Evaluación de los efectos del cambio climático sobre la inundación en Los Corrales de Buelna

Autor: Diego Armando Urrea Méndez, Directores: Manuel del Jesús Peñil, Salvador Navas Fernández.

Convocatoria: octubre de 2020.

Resumen

El cambio climático trae consigo el incremento en la frecuencia de eventos extremos de inundación (IPCC, 2020), los cuales representan un riesgo que amenaza el sistema social, económico y medio ambiental de una población expuesta. Desde el punto de vista económico generan daños de bienes muebles e inmuebles, desde el punto de vista social pueden ocasionar muertes y proliferación de enfermedades y desde el punto de vista medioambiental pueden afectar hábitats y especies. Por estas razones, nace la necesidad de crear una herramienta para evaluar el efecto e impacto que puede traer consigo el calentamiento global en la inundación fluvial. Dicha herramienta puede ser utilizada para conformar una base a través de la cual, se puedan plantear medidas de protección, mitigación y corrección que puedan proteger a las personas junto con sus bienes, los hábitats y diferentes especies ante la ocurrencia de eventos extremos futuros. Dentro del conjunto de municipios españoles que son susceptibles a eventos extremos de inundación, se encuentra Los Corrales de Buelna. Esta población por su localización geográfica contigua al río Besaya, históricamente ha sufrido daños por efecto de la dinámica fluvial y el desbordamiento de la masa de agua. Daños que tienen efectos notorios en el sistema económico, social y medio ambiental de la zona. Por las razones expuestas, en este informe se plantea una metodología relacionada con la aplicación de técnicas estadísticas avanzadas para la generación estocástica de variables climáticas en diferentes modelos y escenarios de cambio climático, para obtener las variaciones que sufrirán las inundaciones en el municipio por efecto de eventos extremos. Para ello, mediante la aplicación de los modelos de emisión de gases efecto invernadero RCP 4.5 y RCP 8.5, evaluados y analizados por el *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), el uso de técnicas estadísticas avanzadas (downscaling) para la generación estocástica de variables climáticas bajo estos escenarios y la construcción de un modelo hidrológico e hidráulico se pretende cuantificar, valorar y medir los cambios que tendrá la inundación generada por el río Besaya en el área urbana de Los Corrales de Buelna (Cantabria, España).

Palabras clave: LIDAR – Modelo digital de terreno – Simulación sintética – Cambio climático – Inundación fluvial – Análisis de extremos - *Downscaling* estadístico.

1. INTRODUCCIÓN

El presente informe está enmarcado en el estudio de la evolución futura de la inundación fluvial, a partir de la evaluación y análisis de diferentes variables climáticas afectadas por el cambio climático. El enfoque plantea una metodología para evaluar, cuantificar, medir y determinar los efectos tendrá el cambio en la inundación fluvial. Los daños por efecto de la dinámica fluvial y el desbordamiento de las masas de agua son un problema creciente y global que genera problemas económicos, sociales y medioambientales. En los últimos años, en algunas zonas del planeta la inundación fluvial ha ido incrementándose no solo por efecto del clima, sino también por la mala gestión de las cuencas y por el mal manejo de los recursos naturales.

A lo largo del tiempo y como respuesta a la presión que ha experimentado y experimenta actualmente la dinámica fluvial de las masas de agua, se han desarrollado normativas en España que buscan adaptar las diferentes regiones a los efectos de las inundaciones. Para minimizar los problemas derivados de estos eventos es importante contar con herramientas que caractericen con suficiente resolución temporal y espacial la

inundación fluvial y además que incluyan dentro de su desarrollo los efectos causados por el cambio climático. Es por esta razón que en este proyecto se determinará a partir de métodos estadísticos, hidrológicos y de análisis extremal que incluyen la evolución del clima en el futuro, una metodología con la capacidad de tener en cuenta todas las variables descritas y reproducir eventos de inundación, que sirvan como herramienta para plantear medidas de mitigación.

2. OBJETIVOS

- Construcción del modelo digital de terreno (MDT).
- Caracterización de las variables climáticas e hidrológicas en la zona de estudio y generación de datos sintéticos de precipitación históricos y futuros (resolución temporal horaria).
- Caracterización extremal para el régimen histórico y futuro.
- Selección del modelo climático global teniendo en cuenta los resultados que mejor se ajusten a las condiciones de precipitación y temperatura en el período histórico del área de estudio.
- Elaboración y calibración del modelo hidrológico.

- Obtención de los hidrogramas de caudal para régimen extremal histórico y futuro.
- Construcción modelo bidimensional hidráulico y elaboración de las manchas de inundación para el periodo histórico y futuro, mediante HEC-RAS.
- Planteamiento y selección de alternativas de intervención.

3. METODOLOGIA

3.1. Elaboración del MDT

Previo a la elaboración del modelo hidrológico es importante contar con un MDT con paso de malla de por lo menos 25 m y que tenga además suficiente cobertura espacial de la zona de estudio. A partir de dicho modelo se puede realizar la delimitación topográfica de cuencas y subcuencas. Para la construcción del modelo hidráulico, se requiere de un MDT con mayor resolución, preferiblemente que tenga pasos de malla de 2 m o menos, además es importante contar con datos LIDAR de la zona, datos batimétricos de la corriente a modelar o en otro caso con un MDT que detalle la batimetría del cauce.

A partir de los datos LIDAR se puede crear un MDT con alta resolución, realizando previamente un control de calidad y un filtrado de la nube de puntos por atributo, utilizando únicamente los que se requieren en el estudio. Para el caso de inundaciones, se usarán los puntos que tengan datos de terreno natural y edificaciones, obviando los datos de agua. La superficie generada tiene sus limitaciones debido a que en las zonas en donde el láser no consigue llegar al fondo del cauce o la vegetación es muy densa se tendrán elevaciones que no deben tenerse en cuenta en la geometría utilizada para correr el modelo hidráulico. El MDT generado a partir de datos LIDAR, puede ser modificado y se le pueden adherir los puntos de levantamiento batimétrico del cauce mediante un software especializado (AutoCAD Civil 3D).

3.2. Caracterización climática de la zona de estudio

Previo a la elaboración del modelo hidrológico, es importante realizar una caracterización de las variables climáticas que influyen el comportamiento de la cuenca. La variable más relevante en este tipo de estudios está referida a la precipitación, debido a la influencia y a la relación que tiene con la escorrentía que se genera en una cuenca, durante y después de un evento de lluvia. Dada la baja resolución espacio temporal de la precipitación disponible, se deben implementar técnicas estadísticas como el IDW (*Inverse Distance Weighting*) (Bartier & Keller, 1996) que permiten complementar los valores de precipitación. Una vez hecha la complementación de datos, se enfrenta otro problema debido a que los registros pluviométricos tienden a tener mayor resolución temporal diaria y la base para caracterizar un evento extremo depende

mucho de la resolución de los datos de lluvia y de la escala temporal disponible. En el campo de la hidrología es común requerir escalas temporales de una hora o incluso más pequeñas, las cuales tienen aplicaciones en el diseño hidrológico urbano, el diseño de infraestructura, la evaluación de riesgos, etc.

Con el fin de analizar el comportamiento de las lluvias históricas y futuras es necesario recurrir a métodos de desagregación temporal que permitan obtener series de precipitación horaria, con las cuales se pueda calcular el régimen extremal de una forma más precisa. Esta metodología corresponde al ajuste de un modelo de regresión *Random Forest* en el que, a partir de estadísticos de precipitación diarios, se obtienen estadísticos subdiarios para posteriormente mediante una técnica de generación sintética *Neyman-Scoot Rectangular Pulse Model (NSRPM)* generar la serie horaria deseada. (Diez-Sierra & del Jesus, 2019)

3.3. Modelado hidrológico y la caracterización extremal

Para los trabajos particulares relacionados con estos estudios, se utilizó la versión más reciente de este modelo hidrológico elaborado por el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos HEC-HMS 4.5 (U.S. Army E.E.U.U, 2020a).

Para la elaboración del modelo hidrológico es relevante contar con los parámetros geomorfológicos de las subcuencas, los tiempos de concentración, tiempos de retardo, etc. De igual forma, se debe contar con información puntual de las lluvias sobre las cuales se debe hacer una caracterización extremal que incluya la elaboración de las curvas intensidad, duración y frecuencia (IDF), así como los hietogramas generados por eventos de lluvia para diferentes periodos de retorno. Es necesario también, realizar la calibración y validación del modelo hidrológico, mediante el uso de métodos cuantitativos que tengan la capacidad de medir el rendimiento de las simulaciones hechas. En general estos métodos miden la variación entre el hidrograma de salida del modelo y los datos medidos por una estación de aforo.

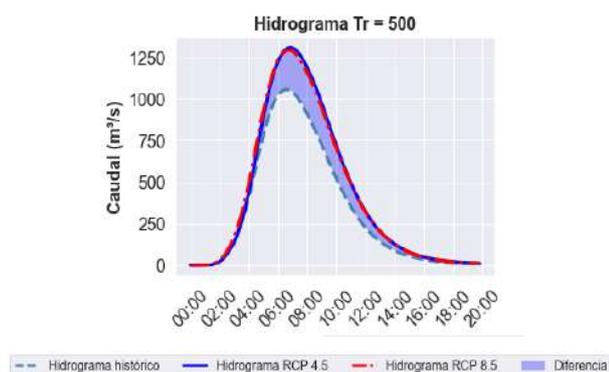
La evaluación del desempeño se fundamenta en el cierre del balance hídrico de una cuenca, la concordancia de la forma general de la serie temporal de descargas junto con los volúmenes totales acumulados y el valor de los índices estadísticos de desempeño los cuales corresponden a las medidas de bondad de ajuste Nash-Sutcliffe (NS) y la desviación volumétrica (PBIAS).

3.4. Análisis de cambio climático

Con el fin de caracterizar los escenarios climáticos futuros, se han utilizado modelos globales denominados GCM (*Global*

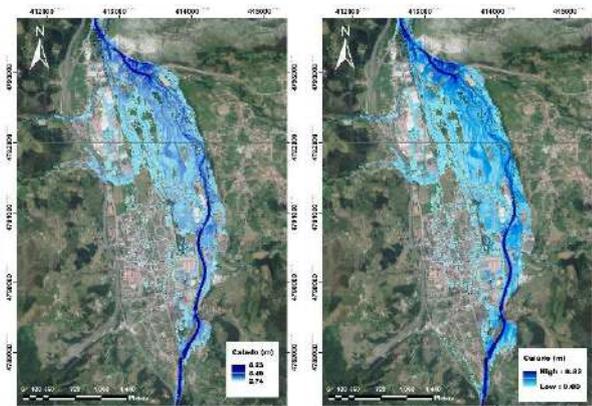
modelo climático, se realiza al igual que con la serie histórica nuevamente una desagregación de los datos diarios de lluvia, teniendo en cuenta los estadísticos previamente construidos a partir de las lluvias del modelo seleccionado. Con los datos de precipitación horaria se realiza la caracterización extremal y finalmente el modelado hidrológico obteniendo los hidrogramas de diseño. (Ilustración 3)

Ilustración 3. Hidrogramas de caudal, para condición histórica y futura (RCP 4.5 – RCP 8.5).



Con los hidrogramas calculados y siguiendo la metodología descrita, se realizó la construcción del modelo hidráulico obteniendo las manchas de inundación para los caudales del periodo histórico y futuro.

Ilustración 4. Manchas de inundación, para condición histórica (izquierda) y futura más crítica (RCP 4.5).



Con la evaluación hidráulica se plantearon dos alternativas de solución, las cuales se evaluaron desde el punto de vista técnico, social y ambiental. La alternativa seleccionada fue la 2 y está referida a la intervención de dos sectores. En el primer sector se ubican las zonas con mucha densidad de tejido urbano, en donde se propone la regularización de la sección del río, en materiales que ambientalmente permiten una recuperación acelerado del medio ambiente. El segundo sector, se ubican áreas rurales en donde se propone una restauración de la sección del río, incluyendo recuperación de bosques de ribera y especies autóctonas de la región.

5. CONCLUSIONES

- La topografía y batimetría de la zona de estudio, componen una de las entradas más importantes del modelo hidráulico, dado que la resolución del MDT en donde se representan, define en gran medida los resultados de la simulación hidráulica de una inundación. Por esta razón, en el presente estudio se realizó un control estricto de los diferentes datos implementados en la construcción del MDT y se revisó minuciosamente la información referente a las batimetrías de los cauces, los datos LIDAR y los modelos digitales de terreno existentes. De esta forma se garantizó la veracidad de la información introducida en el modelo hidráulico, buscando que el MDT representará de forma exacta y precisa el terreno.
- Mediante la aplicación del modelo de cambio climático seleccionado, se determinó una variación notoria en el comportamiento de las variables climáticas estudiadas. Las conclusiones del análisis corresponden a la disminución considerable de la precipitación media anual. Para el caso de la temperatura, se observa un incremento general, es decir, un aumento de la temperatura máxima y mínima, para el corto, mediano y largo plazo.
- Dentro de los procesos más críticos y notorios que traerá el cambio climático, se destaca el incremento en los eventos extremos de precipitación. Esto se ve reflejado en el incremento de las intensidades de lluvia, lo que tiene incidencia en el aumento de los caudales
- Se observó un incremento de la mancha de inundación del 10%, para el modelo hidráulico simulado con el hidrograma de los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5, respecto del simulado con el hidrograma histórico.
- Las medidas de mitigación propuestas, compensan los problemas de inundación que se puedan presentar en el futuro, sin embargo, si no se hace una correcta gestión y ordenación urbana de las poblaciones, se pueden seguir presentando nuevos eventos de inundación
- Es recomendable que una vez se hayan implementado las medidas, se realicen mantenimientos periódicos al río, los cuales son de vital importancia para que se puedan mantener controladas las inundaciones. Cabe anotar que las actuaciones en la cuenca en el corto y mediano plazo, pueden atenuar los picos y las crecidas del río, sin embargo, queda a disposición de los gobiernos locales poner en marcha planes de gestión y recuperación del cauce natural del río, con el fin de generar espacios que no solamente mitiguen las inundaciones, sino que también restauren, protejan y conserven el medio natural y la masa de agua que lo compone.

Assessment of the effects of climate change on the flood in Corrales de Buelna

Author: Diego Armando Urrea Méndez, Directors: Manuel Del Jesús Peñil, Salvador Navas Fernández.

Announcement: October 2020.

Summary

Climate change affects the increase in the frequency of extreme flood events (IPCC, 2020), which represent a risk that threatens the social, economic and environmental system of an exposed population. From the economic point of view, they generate damage to movable and immovable property, from the social point of view, they can cause deaths and proliferation of diseases and from the environmental point of view, and they can affect habitats and species. For these reasons, the need arises to create a tool to evaluate the effect and impact that global warming can bring in river flooding. This tool can be used to form a base through which protection, mitigation and corrective measures can be proposed that can protect people along with their assets, habitats and different species in the event of future extreme events. Within the set of Spanish municipalities that are susceptible to extreme flood events, is Los Corrales de Buelna. This population, due to its geographical location adjacent to the Besaya River, has historically suffered damage due to fluvial dynamics and the overflow of the water body. Damages that have notorious effects on the economic, social and environmental system of the area. For the reasons stated, this report proposes a methodology related to the application of advanced statistical techniques for the stochastic generation of climate variables in different climate change models and scenarios, to obtain the variations that floods will suffer in the municipality as a result of extreme events. To do this, by applying the greenhouse gas emission models RCP 4.5 and RCP 8.5, evaluated and analyzed by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), the use of advanced statistical techniques (downscaling) for the stochastic generation of variables climatic conditions under these scenarios and the construction of a hydrological and hydraulic model is intended to quantify, assess and measure the changes that the flooding generated by the Besaya river will have in the urban area of Los Corrales de Buelna (Cantabria, Spain).

Keywords: LIDAR – Digital elevation model – Synthetic simulation – Climatic Change – River Flood – Extreme analysis - Statistic Downscaling.

1. INTRODUCTION

This report is framed in the study of the future evolution of river flooding, based on the evaluation and analysis of different climatic variables affected by climate change. The approach proposes a methodology to evaluate, quantify, measure and determine the effects will have the change in river flooding. Damage caused by fluvial dynamics and the overflowing of water bodies is a growing and global problem that generates economic, social and environmental problems. In recent years, in some areas of the planet the river flooding has been increasing not only due to the climate, but also due to the poor management of the basins and the poor management of natural resources.

Over time and in response to the pressure that fluvial dynamics of water masses has experienced and is currently experiencing, regulations have been developed in Spain that seek to adapt different regions to the effects of floods. To minimize the problems derived from these events, it is important to have tools that characterize river flooding with sufficient temporal and spatial resolution and include the effects caused by climate change within its development. It is for this reason that in this project, it will be determined from statistical, hydrological and extreme analysis methods that include the evolution of the climate in the future, a methodology with the ability to take into

account all the variables described and reproduce flood events that serve as a tool to propose mitigation measures.

2. OBJETIVES

- Construction of the digital elevation model (DEM).
- Characterization of the climatic and hydrological variables in the study area.
- Generation of historical and future synthetic precipitation data (hourly temporal resolution).
- Extreme characterization for the historical and future regime, through the construction of intensity-duration and frequency curves and the associated hietograms.
- Selection of the global climate model taking into account the results that best adjust to the precipitation and temperature conditions in the historical period 1700-2011 of the study area.
- Construction and calibration of the hydrological model of the study area, using HEC-HMS.
- Obtaining flow hydrographs for extreme historical and future regime.
- Two-dimensional hydraulic model construction and elaboration of the flood patches for the historical and future period, using HEC-RAS.
- Compare and analyze the variations in flood maps for the historical and future condition for the selected climate change model.

3. METODOLOGY

3.1. Development of the DEM

Before preparing the hydrological model, it is important to have a DTM with a mesh pitch of at least 25 m and that it has sufficient spatial coverage of the study area. From this model, the topographic delimitation of basins and sub-basins can be made. For the construction of the hydraulic model, a DTM with higher resolution is required, preferably having mesh steps of 2 m or less, it is also important to have LIDAR data for the area, bathymetric data of the current to be modeled or otherwise a DTM that details the bathymetry of the channel.

From the LIDAR data, a high resolution DEM is built, previously performing a quality control and a filter of the point cloud by attribute, using only those required in the study. In the case of floods, the points that have data on natural terrain and buildings will be used, ignoring the water data. The generated surface has its limitations because in the areas where the laser cannot reach the bottom of the riverbed or lake or where the vegetation is very dense, there will be elevations that should not be taken into account in the geometry used to run the hydraulic model. The DEM generated from LIDAR data can be modified and the bathymetric survey points of the channel can be attached to it using specialized software (AutoCAD Civil 3D).

3.2. Climatic characterization of the study area

Before preparing the hydrological model, it is important to characterize the climatic variables that influence the behavior of the basin. The most relevant variable in this type of study refers to precipitation, due to the influence and relationship it has with the runoff generated in a basin, during and after a rain event. Given the low spatial-temporal resolution of available precipitation, statistical techniques such as the IDW (*Inverse Distance Weighting*) (Bartier & Keller, 1996) that allow complementing the precipitation values. Once the data complementation is done, another problem is faced because rainfall records tend to have higher daily temporal resolution and the basis for characterizing an extreme event depends a lot on the resolution of the rainfall data and the available temporal scale. In the field of hydrology, it is common to require time scales of one hour or even smaller, which have applications in urban hydrological design, infrastructure design, risk assessment, etc.

In order to analyze the behavior of historical and future rains, it is necessary to resort to temporal disaggregation methods that allow obtaining hourly precipitation series, with which the extreme regime can be calculated more precisely. This methodology corresponds to the adjustment of a Random

Forest regression model in which, from daily precipitation statistics, sub-daily statistics are obtained for later using a synthetic Neyman-Scott Rectangular Pulse Model (NSRPM) generation technique to generate the desired hourly series. (Diez-Sierra & del Jesus, 2019)

3.3. Hydrological modeling and extreme characterization

For the particular works related to these studies, the most recent version of this hydrological model developed by the United States Corps of Engineers HEC-HMS 4.5 was used. (U.S. Army E.E.U.U, 2020a).

For the elaboration of the hydrological model, it is relevant to have the geomorphological parameters of the sub-basins, the concentration times, delay times, etc. In the same way, there must be specific information on the rains on which an extreme characterization must be made that includes the elaboration of intensity, duration and frequency curves (IDF), as well as the hietograms generated by rain events for different periods of return. It is also necessary to perform the calibration and validation of the hydrological model, by quantitative methods that have the ability to measure the performance of the simulations made. In general, these methods measure the variation between the output hydrograph of the model and the data measured by a gauging station.

The performance evaluation is based on the closure of the water balance of a basin, the agreement of the general form of the time series of discharges together with the total accumulated volumes and the value of the statistical performance indices, which correspond, to the measures of Nash-Sutcliffe goodness of fit (NS) and volumetric deviation (PBIAS).

3.4. Climate change analysis

In order to characterize future climate scenarios, global models called GCM (Global Climate Model) have been used. These models are a mathematical representation of the different components of the climate system, modeling by means of numerical simulation the complex interactions between the atmosphere, the earth's surface, the oceans and the sea ice. For this study, two emission scenarios corresponding to RCP 4.5 and RCP 8.5 have been defined, which represent different growth rates of carbon emissions until 2040, date from which the appropriate measures will have been established to reduce them. . In order to evaluate the impact that climate change will have on climate variables, the model that has a behavior similar to that observed in the study area during the historical reference period (1959-2005) must be selected.

3.5. Hydraulic model

To observe the hydraulic behavior of the hydrographs obtained from the extreme characterization for the historical period, the RCP 4.5 and 8.5 scenario, it is necessary to build a computational model, in order to obtain the areas susceptible to flooding, prior to use. From the models, characteristics related to the terrain, flow conditions, boundary conditions, roughness coefficients, among other parameters, must be defined. For the purposes of this study, the two-dimensional model HEC-RAS will be used.

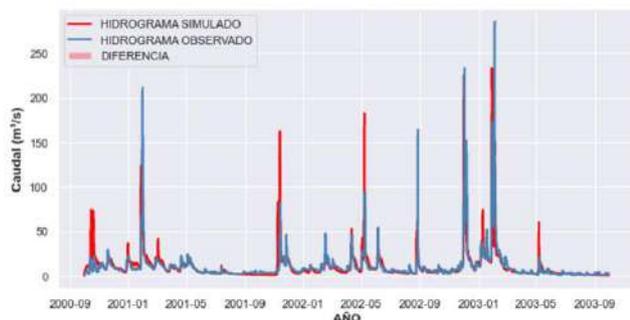
3.6. Approach to intervention measures

The approach and definition of alternatives must be carried out taking into account the existing intervention possibilities for the study area, based on the evaluation of the flood level to which the area is exposed. These alternatives should be evaluated in order to determine from the social and environmental point of view, which is the most viable. Each alternative is assigned a score; the one selected being the one with the highest evaluation.

4. RESULTS

The results of the study correspond to the construction and calibration of the hydrological model. As a conclusion of the calibration process, a satisfactory result was obtained in the Percent BIAS statistic, which obtained a value of 0.5%, which is considered a very good result. Likewise, the value obtained for the Nash-Sutcliffe Efficiency statistic corresponded to a value of 0.65, a value that is also considered good, according to the evaluation criteria described in the Tabla 15. In Ilustración 1, the behavior of the hydrograph observed in the gauging station is presented versus that calculated with the HEC-HMS program.

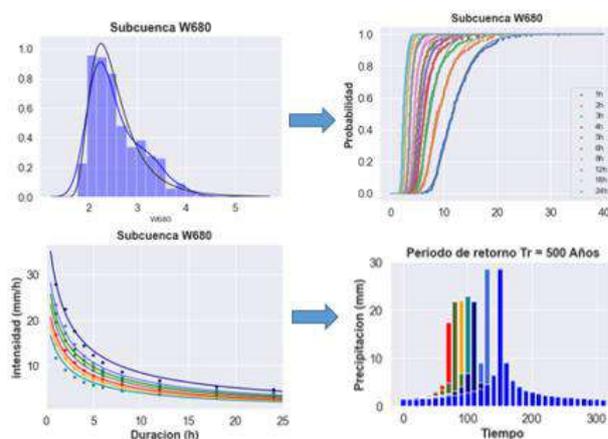
Ilustración 5. Simulated hydrograph versus observed hydrograph for the model validation stage.



A part of the hydrological modeling corresponded to the extreme characterization of the climatic variables of the study area, specifically of the precipitation in the historical period.

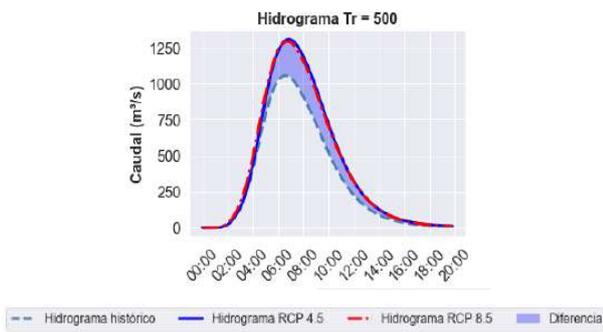
Because of the process, the IDF curves and the design hietograms were obtained and based on the hourly information generated for each of the centroids of the sub-basins, the total precipitation data for intervals of 1, 2, 3, 4, were computed. 5, 6, 8, 12, 18, 24 hours. Subsequently, the series of maximum precipitation values per year were calculated for each time interval, followed by this on the series generated, the statistical adjustment corresponding to the distribution of generalized extreme values (GEV) was made. In Ilustración 2 the described process is presented.

Ilustración 6. Process for obtaining IDF curves and design hietograms for different return periods.



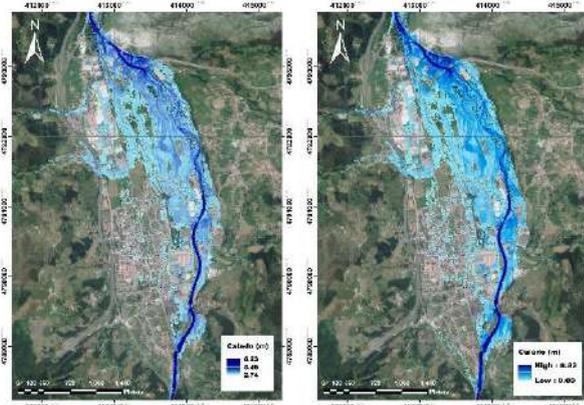
Taking into account the statistics described in Chapter 5.4.2, which were calculated for all the climate change models evaluated, the model with the lowest percentage variation with respect to the statistics calculated for the historical data was selected. With this process, the climate change model that best represented the study area was obtained, which corresponds to HadGEM2-ES_CLMcom-CCLM4-8-17 of the Met Office Hadley Center for Climate Science and Services in the United Kingdom (Met Office Hadley Center for Climate Science and Services, 2020). With the selection of the climate model, a disaggregation of the daily rainfall data is performed again, as with the historical series, taking into account the statistics previously constructed from the rainfall of the selected model. With the hourly precipitation data, the extreme characterization is carried out and finally the hydrological modeling, obtaining the design hydrographs. (Ilustración 3)

Ilustración 7. Flow hydrographs, for historical and future conditions (RCP 4.5 - RCP 8.5).



With the hydrographs calculated and following the methodology described, the construction of the hydraulic model was carried out, obtaining the flood spots for the flows of the historical and future period.

Ilustración 8. Flood stains, for the most critical historical (left) and future condition (RCP 4.5).



With the hydraulic evaluation, two alternative solutions were proposed, which were evaluated from a technical, social and environmental point of view. The selected alternative was two and it refers to the intervention of two sectors. In the first sector are located the areas with a high density of urban fabric, where the regularization of the river section is proposed, in materials that environmentally allow an accelerated recovery of the environment. The second sector is located in rural areas where a restoration of the section of the river is proposed, including the recovery of riverside forests and native species of the region.

5. CONCLUSIONS

➤ The topography and bathymetry of the study area make up one of the most important inputs of the hydraulic model, given that the resolution of the MDT where they are represented, largely defines the results of the hydraulic simulation of a flood. For this reason, in the present study, a strict control of the different data implemented in the construction of the MDT was carried out and the information referring to the bathymetries of the channels,

the LIDAR data and the existing digital terrain models was meticulously reviewed. In this way, the veracity of the information entered in the hydraulic model was guaranteed, seeking that the MDT will accurately and precisely represent the terrain.

- By applying the selected climate change model, a noticeable variation in the behavior of the climate variables studied was determined. The conclusions of the analysis correspond to the considerable decrease in mean annual precipitation. In the case of temperature, a general increase is observed, that is, an increase in the maximum and minimum temperature, for the short, medium and long term.
- Among the most critical and notorious processes that climate change will bring, the increase in extreme precipitation events stands out. This is reflected in the increase in rainfall intensities, which has an impact on the increase in flows.
- An increase in the flood patch of 10% was observed for the hydraulic model simulated with the hydrograph of the RCP 4.5 and RCP 8.5 scenarios, compared to the one simulated with the historical hydrograph.
- The proposed mitigation measures compensate for the flood problems that may arise in the future, however, if proper management and urban planning of the populations is not done, new flood events may continue to occur.
- It is recommended that once the measures have been implemented, periodic maintenance be carried out on the river, which is of vital importance so that floods can be kept under control. It should be noted that the actions in the basin in the short and medium term can attenuate the peaks and floods of the river, however, it is at the disposal of local governments to implement management plans and recovery of the natural channel of the river, with in order to generate spaces that not only mitigate floods, but also restore, protect and conserve the natural environment and the body of water that makes it up.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	I
2. OBJETIVOS	I
3. METODOLOGIA.....	II
3.1. Elaboración del MDT.....	II
3.2. Caracterización climática de la zona de estudio	II
3.3. Modelado hidrológico y la caracterización extremal.....	II
3.4. Análisis de cambio climático	II
3.5. Modelo hidráulico.....	III
3.6. Planteamiento de medidas de intervención.....	III
4. RESULTADOS.....	III
5. CONCLUSIONES	IV
1. INTRODUCTION.....	I
2. OBJECTIVES.....	I
3. METHODOLOGY	II
3.1. Development of the DEM	II
3.2. Climatic characterization of the study area	II
3.3. Hydrological modeling and extreme characterization	II
3.4. Climate change analysis	II
3.5. Hydraulic model.....	III
3.6. Approach to intervention measures.....	III
4. RESULTS.....	III
5. CONCLUSIONS	IV
1. Introducción	1
2. Objetivos	3
2.1. Objetivos generales.....	3
2.2. Objetivos particulares	3
3. Descripción del área de estudio.....	4
3.1. Hidrología.....	5
3.2. Coberturas y usos del suelo.....	6
3.3. Diagnóstico y antecedentes de inundación.....	7
4. Fuentes de información.....	9
4.1. Información cartográfica de la zona de estudio.....	9
4.2. Información meteorológica e hidrológica de la zona de estudio.....	10
4.3. Modelos de cambio climático	11
5. Metodología	13
5.1. Preparación del modelo digital de terreno (MDT).....	15
5.2. Caracterización climática en la zona de estudio	16
5.2.1. Análisis de la precipitación.....	16
5.2.1.1. Desagregación temporal de la precipitación a través de modelos de regresión y modelos puntuales	16
5.2.1.2. Simulación sintética de precipitación	17
5.2.2. Análisis de la temperatura	17
5.3. Metodología para el modelado hidrológico y la caracterización extremal.....	18
5.3.1. Características geomorfológicas de la cuenca	18

Tabla de contenido

5.3.1.1. Área de la cuenca.....	18
5.3.1.2. Longitud del cauce principal.....	18
5.3.1.3. Pendiente media	18
5.3.2. Tiempo de concentración.....	19
5.3.2.1. Ecuación de Kirpich.....	19
5.3.2.2. Ecuación de Témez.....	19
5.3.2.3. Ecuación de Giandotti.....	19
5.3.2.4. Ecuación de V.T. Chow.....	19
5.3.2.5. Ecuación del Cuerpo de Ingenieros	20
5.3.2.6. Ecuación de Williams - Hann	20
5.3.2.7. Ecuación de Johnstone y Cross	20
5.3.2.8. Ecuación de SCS - Ranser	20
5.3.2.9. Ecuación de Ventura - Heras.....	20
5.3.2.10. Ecuación de Hathaway	21
5.3.3. Interpolación de la precipitación por el método de la distancia inversa (IDW)	21
5.3.4. Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF's)	22
5.3.4.1. Análisis de frecuencia de datos mediante distribución de valores extremos generalizados GEV.....	22
5.3.4.2. Correlación lineal múltiple.....	23
5.3.5. Hietogramas puntuales de aguaceros de diseño con curvas Intensidad-Duración-Frecuencia	24
5.3.6. Modelo hidrológico HEC-HMS.....	24
5.3.6.1. Filosofía del Modelo	24
5.3.6.2. Componentes del Modelo.....	24
5.3.6.3. HEC - HMS como modelo continuo (Soil Moisture Accontinue).....	27
5.3.6.4. Calibración del modelo - Función objetivo: optimización determinista.....	29
5.4. Análisis del cambio climático	31
5.4.1. Proyecciones de cambio climático.....	31
5.4.2. Análisis y selección de modelos de cambio climático	32
5.5. Corrección del modelo climático.....	33
5.5.1. Precipitación	33
5.5.2. Temperatura.....	34
5.6. Metodología para la construcción del modelo hidráulico en la zona de proyecto	35
5.6.1. Modelo HEC RAS.....	35
5.6.2. ArcGIS Versión 10.5.1 – HEC-GeoRAS	37
5.6.3. Coeficiente de Rugosidad de Manning	37
6. Análisis de resultados.....	39
6.1. Análisis de resultados caracterización climática de la zona de estudio	39
6.1.1. Análisis y resultados de la precipitación	39
6.1.2. Análisis y resultados de la temperatura.....	41
6.1. Análisis y resultados de la modelación hidrológica en la zona de estudio.....	42
6.1.1. Resultados de las características geomorfológicas de las subcuencas.....	42
6.1.2. Análisis y resultados de los tiempos de concentración.....	43
6.1.3. Análisis y resultados de la interpolación por el método de la distancia inversa.....	44
6.1.4. Análisis y resultados del cálculo de las curvas IDF para el periodo histórico.....	45
6.1.4.1. Ajuste de la serie de datos a la distribución GEV en el periodo histórico	45
6.1.4.2. Estimación de las ecuaciones de las curvas por el método de correlación lineal múltiple	47
6.1.4.3. Curvas Intensidad duración frecuencia para las estaciones en el periodo histórico	47
6.1.5. Análisis y resultados de los hietogramas de aguaceros puntuales para el periodo histórico.....	48
6.1.6. Análisis y resultados iniciales del modelado hidrológico de la cuenca (HEC-HMS)	49
6.1.7. Análisis y resultados del proceso de calibración del modelo.....	50
6.1.7.1. Método de prueba y error.....	50

Tabla de contenido

6.1.7.2. <i>Análisis de sensibilidad del modelo</i>	50
6.1.7.3. <i>Método de optimización automática</i>	52
6.1.8. Análisis y resultados de la modelación hidrológica construida a partir de datos históricos.....	56
6.1.8.1. <i>Crecientes y caudales máximos instantáneos de escorrentía Superficial</i>	56
6.2. Resultados y análisis de cambio climático	57
6.2.1. Análisis de modelos de cambio climático.....	57
6.2.2. Selección de modelos de cambio climático.....	59
6.2.3. Proyecciones de cambio climático: régimen medio.....	60
6.2.3.1. <i>Precipitación</i>	60
6.2.3.2. <i>Temperatura</i>	61
6.2.4. Proyecciones de cambio climático: régimen extremal para la precipitación.....	62
6.2.4.1. <i>Escenario RCP 4.5</i>	62
6.2.4.2. <i>Escenario RCP 8.5</i>	65
6.2.4.3. <i>Caudales</i>	68
6.3. Selección de los hidrogramas del modelo y análisis comparativo de escenarios	71
6.4. Análisis y resultados de la modelación hidráulica	72
6.4.1. Resultados para la definición de la malla de cálculo.....	72
6.4.2. Resultados para la definición del coeficiente de rugosidad de Manning.....	72
6.4.3. Condiciones de flujo y contorno.....	74
6.4.4. Análisis y resultados del modelo hidráulico.....	74
7. Planteamiento y selección de alternativas de intervención	81
7.1. Alternativa 1: construcción de muros y canalización del cauce en concreto	81
7.2. Alternativa 2: Rehabilitación del Besaya desde la parte alta de la cuenca hasta Los Corrales de Buelna	82
7.2.1. Sector de intervención 1.....	82
7.2.2. Sector de intervención 2.....	83
7.3. Justificación de la solución adoptada	84
7.4. Evaluación de alternativa definitiva	85
8. Conclusiones	88
9. Bibliografía	90

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA	Pág.
Tabla 1. Características de las estaciones pluviométricas en la zona de estudio (AEMET, 2020; CHC, 2020).....	10
Tabla 2. Características de las estaciones de aforo en la zona de estudio. (CHC, 2020)	11
Tabla 3. Proyecciones regionales obtenidas con distintos acoplamientos de modelos globales (GCMs, ver Tabla 1), y regionales (RCMs) de la iniciativa EURO-CORDEX con una resolución de 0.11 ° y proyecciones para RCP 4.5 y RCP 8.5.....	12
Tabla 4. Valores de referencia para la evaluación de los modelos hidrológicos. (Moriasi et al>, 2015)	29
Tabla 5. Función objetivo de minimización. (U.S. Army E.E.U.U, 2020a).....	30
Tabla 6. Función objetivo de maximización. (U.S. Army E.E.U.U, 2020a).....	30
Tabla 7. Valores del coeficiente de rugosidad n de Manning (Chow V.T., Maidment D.R., 1998).....	38
Tabla 8. Valores medios de la precipitación total anual a nivel multianual para las estaciones seleccionadas.....	40
Tabla 9. Temperatura media anual a nivel multianual para las estaciones seleccionadas.	42
Tabla 10 Características geomorfológicas de las sub cuencas en la zona de estudio.	42
Tabla 11. Tiempos de concentración de las subcuencas en la zona de estudio.	44
Tabla 12. Coeficientes de la ecuación para el cálculo analítico de las curvas IDF en el periodo histórico.....	47
Tabla 13. Periodo de calibración y de validación del modelo hidrológico.....	50
Tabla 14. Parámetros del modelo obtenidos a partir del método de calibración manual.....	52
Tabla 15. Evaluación de los métodos de optimización determinista del modelo continuo HEC-HMS para la etapa de calibración.....	53
Tabla 16. Método de calibración automática de los parámetros del modelo.	54
Tabla 17 Caudales máximos instantáneos para las subcuencas de estudio.	56
Tabla 18. Coeficientes de la ecuación para el cálculo analítico de las curvas IDF para el modelo de cambio climático seleccionado en el escenario RCP 4.5.	63
Tabla 19. Coeficientes de la ecuación para el cálculo analítico de las curvas IDF para el modelo de cambio climático seleccionado en el escenario RCP 8.5.	66
Tabla 20. Caudales máximos instantáneos para las subcuencas de estudio asociados a diferentes periodos de retorno para el modelo seleccionado en el escenario RCP 4.5.	69
Tabla 21. Caudales máximos instantáneos para las subcuencas de estudio asociados a diferentes periodos de retorno para el modelo seleccionado en el escenario RCP 8.5.	70
Tabla 22. Coeficientes de rugosidad de Manning seleccionados (Chow V.T., Maidment D.R., 1998)	73
Tabla 23. Matriz de valoración y selección de las alternativas propuestas.	84

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA	Pág.
Figura 1. Localización de la zona de Estudio.....	4
Figura 2. Perfil longitudinal del río Besaya. (CHC, 2015).....	6
Figura 3. Distribución Espacial del río Besaya (CHC, 2015).....	6
Figura 4. Mapa de usos del suelo en la cuenca del Saja Besaya (CNIG, 2020).....	7
Figura 5. Geomorfología de Los Corrales de Buelna y registro fotográfico de las inundaciones históricas.....	8
Figura 6. Proceso de verificación del modelo digital de terreno (CNIG, 2020).....	9
Figura 7. Localización de las estaciones pluviométricas y de aforo en la zona de estudio (AEMET, 2020; CHC, 2020).....	11
Figura 8. Dominio de simulación de los RCM enmarcados en EURO-CORDEX.....	12
Figura 9. Esquema general de la metodología y procesos a tener en cuenta para elaborar estudios de inundación con la incorporación de los efectos de cambio climático en una cuenca.....	13
Figura 10. Descripción funcionamiento modelo Neyman-Scott Rectangular Pulse Model. (Diez-Sierra & del Jesus, 2019).....	17
Figura 11. Configuración de la interpolación por el método de la Distancia Inversa.....	21
Figura 12. Distribución de valores extremos generalizados (GEV).....	23
Figura 13. Esquema básico del método Soil Moisture Accounting (SMA). (U.S. Army E.E.U.U, 2020a).....	27
Figura 14. Esquema básico del modelo del Soil Moisture Accounting (SMA). (U.S. Army E.E.U.U, 2020a).....	28
Figura 15. Escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero. (IPCC, 2020).....	32
Figura 16. Lluvias horarias sintéticamente a partir de los datos registrados por las estaciones pluviométricas en la zona de proyecto.....	39
Figura 17. Comparativa entre diversos estadísticos generados entre las series de precipitación registradas en las estaciones de precipitación y las series sintéticas reconstruidas en el periodo de referencia 1700 - 2019 mean -Media; var_1- varianza 1 día; autocorr_1_1 - Autocorrelación con un lag de 1 día; fih_1 – Proporción de días secos; fiww_1 – probabilidad de días húmedos consecutivos; fiDD_1 – probabilidad de días secos consecutivos; Skewness_1 – Asimetría diaria).....	40
Figura 18. Valores medios de la precipitación total anual a nivel multianual para las estaciones seleccionadas.....	41
Figura 19. Comportamiento de la temperatura media diaria en la zona de proyecto.....	41
Figura 20. Temperatura media anual a nivel multianual para las estaciones pluviométricas seleccionadas.....	42
Figura 21. Distribución espacial de las subcuencas en el área de estudio.....	43
Figura 22. Valores interpolados de precipitación horaria en los centroides de las subcuencas para el periodo histórico.....	44
Figura 23. Ajuste de la serie de valores máximos a la distribución GEV para intervalos de tiempo de 24 horas en el periodo histórico.....	45
Figura 24. Función de distribución acumulada en las sub cuencas para valores de intensidad máxima anual en intervalos de tiempo seleccionados para el periodo histórico.....	46
Figura 25. Curvas de Intensidad – Duración – Frecuencia para las subcuencas en el periodo histórico.....	48
Figura 26. Hietogramas de diseño asociados a diferentes eventos con periodo de retorno para las subcuencas en el periodo histórico.....	49
Figura 27. Análisis de sensibilidad de las variables en el modelo hidrológico.....	51
Figura 28. Evaluación de los métodos de maximización del modelo continuo HEC-HMS para la etapa de calibración.....	53
Figura 29. Evaluación de los métodos de minimización del modelo continuo HEC-HMS para la etapa de calibración.....	54
Figura 30. Hidrograma simulado versus hidrograma observado para la etapa de calibración del modelo.....	55
Figura 31. Hidrograma simulado versus hidrograma observado para la etapa de validación del modelo.....	56
Figura 32. Hidrograma de creciente asociados a diferentes eventos con periodo de retorno en las subcuencas.....	57
Figura 33. Tendencia de la precipitación media anual en Los Corrales de Buelna para los RCPs 4.5 y 8.5.....	58
Figura 34. Tendencia de la temperatura máxima en Los Corrales de Buelna para los RCPs 4.5 y 8.5.....	58
Figura 35. Tendencia de la temperatura mínima en Los Corrales de Buelna para los RCPs 4.5 y 8.5.....	59
Figura 36. Comparativa entre diversos estadísticos de los modelos globales de cambio climático y los datos locales reconstruidos en el periodo de referencia 1959-2005 mean -Media; var_1- varianza 1 día; autocorr_1_1 - Autocorrelación con un lag de 1 día; fih_1 – Proporción de días secos; fiww_1 – probabilidad de días húmedos consecutivos; fiDD_1 – probabilidad de días secos consecutivos; Skewness_1 – Asimetría diaria).....	60

Índice de figuras

Figura 37. Análisis de las variables precipitación, temperatura máxima y mínima para escenarios de cambio climático.....	62
Figura 38. Función de distribución acumulada en las sub cuencas para valores de intensidad máxima anual en intervalos de tiempo seleccionados para el modelo de cambio climático seleccionado en el escenario RCP 4.5.....	63
Figura 39. Curvas de Intensidad – Duración – Frecuencia para las subcuencas para el modelo de cambio climático seleccionado en el escenario RCP 4.5.....	64
Figura 40. Hietogramas de diseño asociados a diferentes eventos con periodo de retorno para las subcuencas para el modelo de cambio climático seleccionado en el escenario RCP 4.5.....	65
Figura 41. Función de distribución acumulada en las sub cuencas para valores de intensidad máxima anual en intervalos de tiempo seleccionados para el modelo de cambio climático seleccionado en el escenario RCP 8.5.....	66
Figura 42. Curvas de Intensidad – Duración – Frecuencia para las subcuencas para el modelo de cambio climático seleccionado en el escenario RCP 8.5.....	67
Figura 43. Hietogramas de diseño asociados a diferentes eventos con periodo de retorno para las subcuencas para el modelo de cambio climático seleccionado en el escenario RCP 8.5.....	68
Figura 44. Hidrograma de creciente asociados a diferentes eventos con periodo de retorno en las subcuencas para el modelo seleccionado en el escenario RCP 4.5.....	69
Figura 45. Hidrograma de creciente asociados a diferentes eventos con periodo de retorno en las subcuencas para el modelo seleccionado en el escenario RCP 4.5.....	70
Figura 46. Análisis comparativo entre los hidrogramas del rio Besaya en la zona de estudio, para el periodo histórico, el RCP 4.5 y el RCP8.5.....	71
Figura 47. Definición de la malla de cálculo para la elaboración del modelo hidráulico HEC-RAS en la zona de estudio.....	72
Figura 48. Mapa de los coeficientes de rugosidad de Manning seleccionados.....	73
Figura 49. Mancha de inundación generada por un evento con 500 años de periodo de retorno para la caracterización extremal realizada con datos de precipitación histórica.....	75
Figura 50. Mapa de velocidades generado por un evento con 500 años de periodo de retorno para la caracterización extremal realizada con datos de precipitación histórica.....	76
Figura 51. Mancha de inundación generada por un evento con 500 años de periodo de retorno para la caracterización extremal realizada con datos de precipitación futura en el escenario RCP 4.5.....	77
Figura 52. Mapa de velocidades generado por un evento con 500 años de periodo de retorno para la caracterización extremal realizada con datos de precipitación para el escenario RCP 4.5.....	78
Figura 53. Mancha de inundación generada por un evento con 500 años de periodo de retorno para la caracterización extremal realizada con datos de precipitación para el escenario RCP 8.5.....	79
Figura 54. Mapa de velocidades generado por un evento con 500 años de periodo de retorno para la caracterización extremal realizada con datos de precipitación para el escenario RCP 8.5.....	80
Figura 55. Localización en planta de los diques y la canalización de los cauces propuestos.....	81
Figura 56. Propuesta de adecuación hidráulica del rio para las áreas identificadas como sector 2.....	83
Figura 57. Mancha de inundación aplicando las medidas de mitigación para un evento con $Tr = 500$ años – RCP 4.5.....	86
Figura 58. Mapa de velocidades aplicando las medidas de mitigación para un evento con $Tr = 500$ años – RCP 4.5.....	87

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO	No.
Modelo hidrológico HEC-HMS (En archivo magnético)	1
Modelo hidráulico HEC-RAS (En archivo magnético)	2

1. Introducción

El cambio climático trae consigo el incremento en la frecuencia de eventos extremos de inundación (IPCC, 2020), los cuales representan un riesgo que amenaza el sistema social, económico y medio ambiental de una población expuesta. Desde el punto de vista económico generan daños de bienes muebles e inmuebles, desde el punto de vista social pueden ocasionar muertes y proliferación de enfermedades y desde el punto de vista medioambiental pueden afectar hábitats y especies. Por estas razones, nace la necesidad de crear una herramienta para evaluar el efecto e impacto que puede traer consigo el calentamiento global en la inundación fluvial. Dichas herramientas pueden ser utilizadas para conformar una base a través de la cual, se puedan plantear medidas de protección, mitigación y corrección que puedan proteger a las personas junto con sus bienes, los hábitats y diferentes especies ante la ocurrencia de eventos extremos futuros.

Dentro del conjunto de municipios españoles que son susceptibles a eventos extremos de inundación, se encuentra Los Corrales de Buelna. Esta población por su localización geográfica contigua al río Besaya, históricamente ha sufrido daños por efecto de la dinámica fluvial y el desbordamiento de la masa de agua. Daños que tienen efectos notorios en el sistema económico, social y medio ambiental de la zona. Es por esta razón que en este informe se plantea una metodología relacionada con la aplicación de técnicas estadísticas avanzadas para la generación estocástica de variables climáticas en diferentes modelos y escenarios de cambio climático, planteadas para obtener las variaciones que tendrán las inundaciones en el municipio por efecto de eventos extremos.

Se debe tener en cuenta que para medir y cuantificar los impactos que traerá consigo el cambio climático en la inundación fluvial, se debe evaluar y estudiar el comportamiento de las variables climáticas de la zona de estudio, específicamente la precipitación y la temperatura tanto para el régimen histórico como para el futuro. De igual manera es relevante desarrollar un estudio hidrológico de la zona, a partir de la elaboración de un modelo que integre las características geomorfológicas de la cuenca, las coberturas del suelo, así como el régimen de infiltración de la cuenca, el régimen de evaporación, etc. A partir del tratamiento de la información climática e hidrológica de una cuenca se pueden obtener los hidrogramas para la condición histórica y futura que pueden ser transportados por un cuerpo de agua determinado.

Por la razones expuestas, para el desarrollo del presente estudio se tuvo en cuenta los registros históricos climáticos de las estaciones meteorológicas locales, así como las previsiones de cambio climático consultadas en los informes del *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC, 2020), en donde se compilan y analizan los resultados obtenidos de la modelación del clima futuro partir de 21 modelos de cambio climático construidos en diferentes regiones del mundo, para diferentes escenarios de emisión de gases efecto invernadero en la atmósfera denominados como *Representative Concentration Pathways* (RCPs).

Los modelos climáticos consultados tienen en cuenta la evolución del clima desde el año 2006 hasta el año 2100, los cuales fueron calibrados a partir de datos meteorológicos globales disponibles entre el año 1950 al 2005, lapso de tiempo que para efectos de este estudio será denominado como periodo de referencia o retrospectivo. La predicción de los modelos utilizados corresponde a los escenarios de

emisiones de gases efecto invernadero RCP 4.5 y RCP 8.5. El primer escenario prevé un crecimiento de emisiones hasta el año 2040, tiempo en el cual se predice el establecimiento de medidas de reducción y mitigación. El segundo escenario RCP 8.5 prevé que las emisiones continúen aumentando durante todo el siglo XXI.

El presente estudio tiene como finalidad encontrar la variación y el cambio que tendrá la inundación generada por el río Besaya en un área determinada en donde se localiza el municipio de Los Corrales de Buelna (Cantabria, España). La búsqueda de dicha variación se determinará a partir de métodos estadísticos, hidrológicos y de análisis extremal que incluyen la evolución del clima en el futuro, los cuales se fundamentan en la aplicación de técnicas de *downscaling* estadístico sobre los diferentes modelos globales de cambio climático en los intervalos de tiempo 2020-2040, 2041-2070 y 2071-2100, los cuales corresponden a escenarios de cambio en el corto, medio y largo plazos en horizontes 2040, 2070 y 2100. A continuación, se presenta la estructura con la que se desarrollará el informe.

En el Capítulo 2 se presenta el objetivo general, el cual esta complementado a su vez por unos objetivos específicos que definen el alcance del estudio.

En el Capítulo 3 se realiza una descripción del área de estudio, en donde se incluye un esquema de la ubicación, datos de población y un diagnóstico y formulación de antecedentes relacionados con la inundación.

En el Capítulo 4 se presentan las fuentes de información consultadas para la elaboración del estudio, las cuales corresponden a las instituciones encargadas de suministrar información climática, cartográfica e hidrológica de la zona de estudio.

El Capítulo 5 se hace una descripción general de la metodología implementada en el desarrollo del estudio.

En el Capítulo 6 se aplica la metodología descrita en Capítulo 5 y se realiza la evaluación, análisis y presentación de los resultados.

En el Capítulo 7 se proponen las alternativas de mitigación contra las inundaciones, y se elige la medida más viable, teniendo en cuenta los efectos hidráulicos, sociales y ambientales que se generan.

En el Capítulo 8 se plantean las conclusiones del estudio y finalmente, en Capítulo 9 se presentan las referencias bibliográficas citadas durante el desarrollo del informe.

2. Objetivos

Para la elaboración del presente estudio, se ha determinado un objetivo general, el cual esta complementado a su vez por unos objetivos específicos con el fin de abarcar y definir de manera concreta el alcance del estudio. A continuación, se exponen los objetivos descritos.

2.1. Objetivos generales

A partir de la aplicación de los modelos de cambio climático evaluados y analizados por el *Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)* y mediante el uso de técnicas estadísticas avanzadas (*downscaling*) para la generación estocástica de variables climáticas bajo los escenarios de emisión de gases efecto invernadero RCP 4.5 y RCP 8.5, es objeto del estudio realizar la construcción de un modelo hidrológico e hidráulico que funcionen como base para cuantificar, valorar y medir los cambios que tendrá la inundación generada por el río Besaya en un área determinada en donde se localiza el municipio de Los Corrales de Buelna (Cantabria, España), como consecuencia de los efectos que traerá consigo el cambio del clima. También se plantearán y evaluarán medidas de mitigación eligiendo la más viable, considerando aspectos hidráulicos, sociales y ambientales.

2.2. Objetivos particulares

- Construcción del modelo digital de terreno de alta resolución espacial (MDT) a partir del análisis y el procesamiento de los datos cartográficos existentes.
- Recopilar, analizar y realizar el tratamiento estadístico de la información hidrológica y meteorológica disponible en la zona de estudio, en donde se incluyen datos de precipitación, temperatura y caudal con resolución temporal a nivel diario.
- Mediante el uso de métodos estadísticos de desagregación, generar series de datos sintéticos de precipitación y temperatura históricos y futuros, con resolución temporal horaria.
- A partir series de precipitación sintéticas generadas, construir las curvas de intensidad – duración y frecuencia y los hietogramas asociados con el fin de hacer la caracterización extremal para el régimen histórico y futuro.
- Elaborar y calibrar el modelo hidrológico de la zona de estudio.
- Obtención de los hidrogramas de caudal para régimen extremal histórico y futuro, a partir del modelado hidrológico.
- Selección del modelo climático global teniendo en cuenta los resultados que mejor se ajusten a las condiciones de precipitación y temperatura en el período histórico 1700-2011 del área de estudio.
- Construcción modelo bidimensional hidráulico y elaboración de las manchas de inundación para el periodo histórico y futuro, mediante HEC-RAS.
- Cuantificar, evaluar y medir las variaciones en las manchas de inundación generadas a partir del hidrograma de caudal histórico y futuro bajo los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 en el modelo de cambio climático seleccionado y a partir de las variaciones, plantear medidas de mitigación.

3. Descripción del área de estudio

Los Corrales de Buelna es un municipio español localizado en la Comunidad Autónoma de Cantabria, limita con los municipios de San Felices de Buelna, Arenas de Iguña, Anievas, Cartes, Mazcuerras, y con el Valle de Cieza, se ubica a 12 km de la ciudad de Torrelavega y a 42 km de Santander, la capital Cantábrica. Según el Instituto Nacional de Estadística de España, en el censo realizado en el año 2019 el municipio contaba con 10.841 habitantes (Instituto Nacional de Estadística, 2020), con una diferencia del -0.63% respecto al año anterior.

En cuanto a la actividad económica según la última actualización del Directorio Central de Empresas, el municipio contaba con 561 empresas activas en 2019, lo que implica una reducción del -3,61% respecto al año 2018, observándose un decrecimiento que viene acentuándose desde los últimos 12 años. Para la economía local son importantes las industrias metalúrgica y química, la avicultura, la ganadería y agricultura.

Sobre la zona Este del municipio discurre el río Besaya, el cual nace en el Cueto Roperero en Aradillos (Campoo de Enmedio) a 1200 m.s.n.m. y desemboca junto con el río Saja tras unirse en Torrelavega en el Mar Cantábrico. La cuenca de los ríos Saja y Besaya tiene un área aproximada de 1.013 km² y hace parte de la Demarcación Hidrográfica del Cantábrico Occidental. Los límites occidental y oriental del sistema están definidos por las divisorias con las cuencas de los Ríos Nansa y Pas-Miera, por el sur el límite lo marca la divisoria con la cuenca del Río Ebro y por el norte limita con un conjunto de pequeñas cuencas que vierten sus aguas directamente al mar Cantábrico y con el propio mar Cantábrico.

Históricamente se han producido muchos problemas relacionados con la inundación, debido a que gran parte de las zonas de vega del río Besaya están ocupadas por tejido urbano que al mismo tiempo constituyen las áreas más susceptibles a inundación. En la Figura 1 se presenta la localización de la zona de estudio.

Figura 1. Localización de la zona de Estudio



3.1. Hidrología

El Río Besaya es un cuerpo de agua que nace en el Cueto Roperero en Aradillos, en la Provincia de Cantabria y desemboca en el Mar Cantábrico, en la Ría de San Martín de La Arena. En su recorrido el Río Besaya atraviesa los municipios correspondientes a Campoo de Enmedio, Santiurde de Reinosa, Pesquera, Bárcena de Pie de Concha, Molledo, Arenas de Iguña, Cieza, Corrales de Buelna, San Felices de Buelna, Cartes y Torrelavega, y una vez unido al Saja, Suances y Miengo, cruzando por localidades como Santiurde de Reinosa, Cobejo, Valle de Iguña, Los Corrales de Buelna y Torrelavega. El Río Besaya nace aproximadamente a 5.0 km del municipio de Reinosa, en Cañeda. En sus primeros 15 km se presentan pendientes intermedias y llanuras de inundación un poco estrechas que se amplían ligeramente al llegar a la localidad de Lantueno.

Los taludes localizados en las márgenes del Río vuelven a estrecharse al pasar por la localidad de Santiurde de Reinosa y al cruzar la Sierra Bárcena, donde se forma un valle en V que se abre en la localidad de Bárcena de Pie de Concha. Nuevamente en la localidad de las Fraguas, el cauce sufre un estrechamiento, el cual se mantiene 7.0 km hasta llegar al municipio de Corrales de Buelna. En este estrechamiento, se localiza el Embalse de Corrales de Buelna, recibiendo al Río de los llares entre la localidad de las Fraguas y el municipio de Corrales.

El municipio de Corrales de Buelna, se localiza en una llanura de inundación del Río Besaya. La Vega del río se termina se encuentra la localidad de Caldas de Besaya, un manantial de aguas termales en cuyo entorno se construyó un balneario y el Santuario de Nuestra Señora de Las Caldas. Salimos de esta estructura geológica en la localidad de Riocorvo para llegar a Torrelavega donde confluye el Río Saja y el río Besaya, para después entregar sus aguas al Mar Cantábrico a través de la Ría de San Martín de la Arena, junto a Suances, dividiendo la Ensenada de La Concha en las playas de La Concha y de Marzán. Uno de los afluentes del curso alto del Besaya es el Torina, cuyas aguas se encuentran embalsadas en San Miguel de Aguayo al pie del Pico Jano por una presa de gravedad construida en el año 1920 y recrecida en 1981. En este mismo año se crea la balsa de Mediajo, con una presa de materiales sueltos y tela asfáltica, que sirve como enlace con el cercano Embalse del Ebro.

La función de este sistema es el abastecimiento de aguas para la zona y su aprovechamiento hidroeléctrico, encuadrándose en los albores de esta energía en España.¹ A continuación, en la Figura 2 y Figura 3 se presenta el perfil longitudinal y la distribución del Río Besaya en donde se destacan los principales afluentes, los cuales corresponden los ríos Torina (6,9 Km), Erecia (11,5 Km), Los Llares (11,9 Km) y Cieza (8,4 Km).

El régimen de flujo del río Besaya se debe principalmente a los aportes pluviales que recibe. Sin embargo, el caudal también está influenciado por otros factores hidrológicos determinados por el régimen de infiltración, de evapotranspiración de la cuenca. Las crecientes también están influenciadas en gran parte a la afectación antrópica que ha sufrido la zona, observándose alteraciones en las coberturas de la cuenca, como consecuencia de las actividades industriales y agrícolas. El régimen de caudal tiene variación estacional, registrando máximos finalizando invierno y mínimos en verano.

¹ <https://www.chcantabrico.es/las-cuencas-cantabricas/marco-fisico/hidrologia/rios/besaya>

Figura 2. Perfil longitudinal del río Besaya. (CHC, 2015)

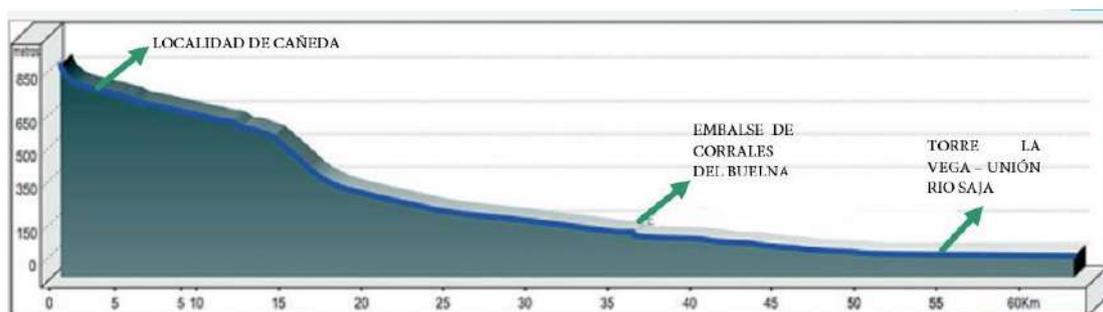
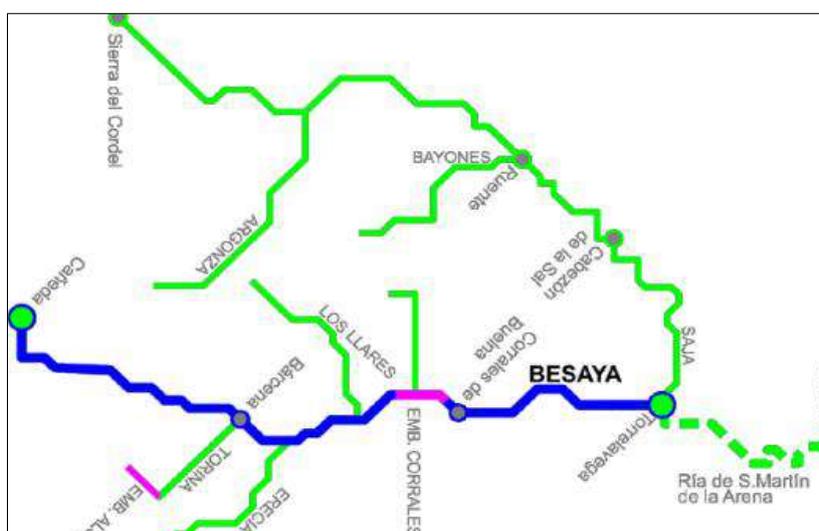


Figura 3. Distribución Espacial del río Besaya (CHC, 2015)



3.2. Coberturas y usos del suelo

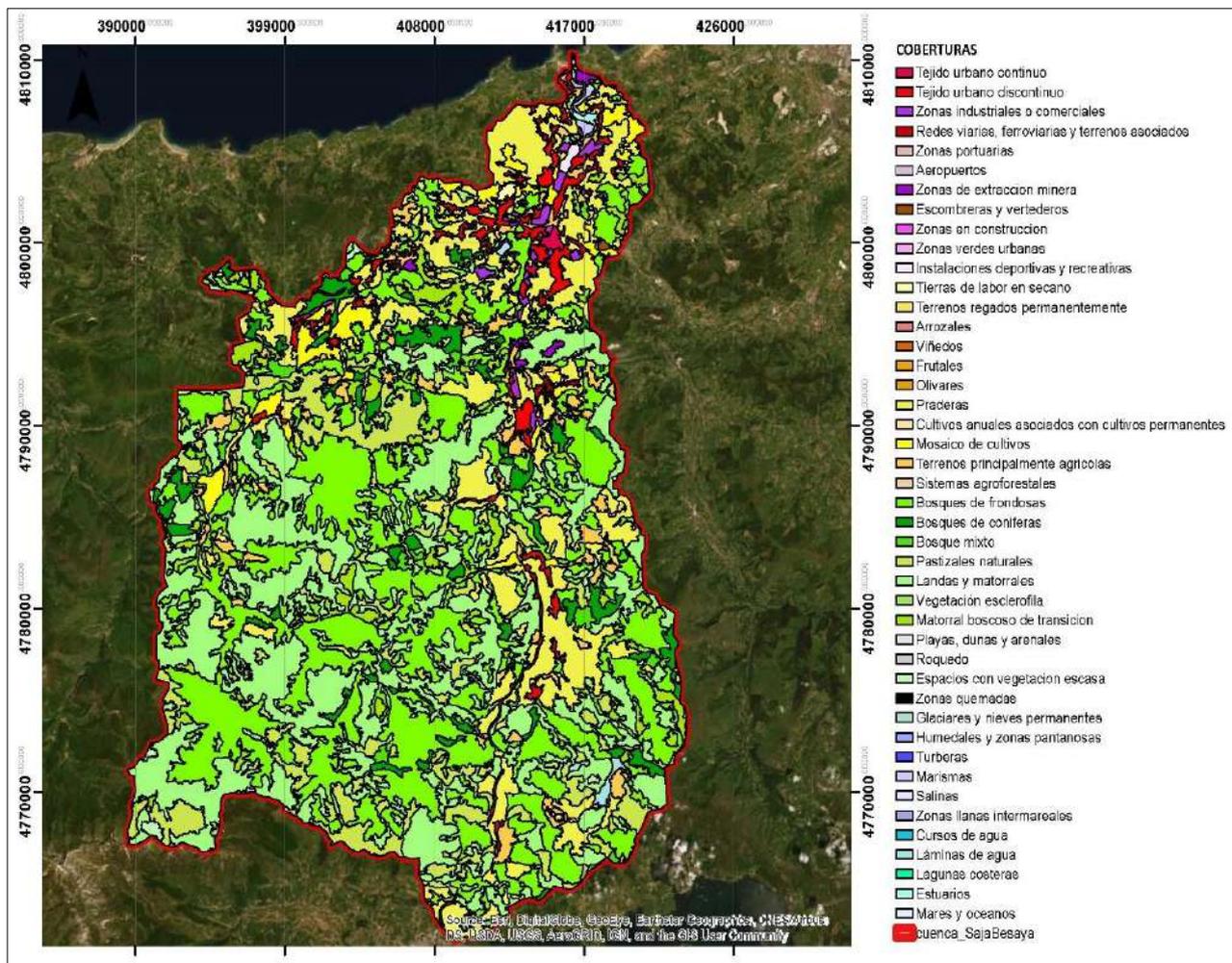
La cobertura del suelo en una cuenca define en gran medida la relación que existe entre el volumen de agua escurrido superficialmente y el volumen de agua infiltrado, después de que sucede un evento de precipitación. En el caso de la cuenca del río Besaya, según la información suministrada por el Instituto Geográfico Nacional de España se tienen coberturas distribuidas como se presentan en la Figura 4.

De acuerdo a la información consultada en la cuenca se tienen coberturas predominantes de Bosques de frondosas, bosques de coníferas, praderas, landas y matorrales. Igualmente, se evidencia que la mayor parte de la población, está asentada sobre las áreas cercanas a los ríos, incrementándose hacia aguas abajo de los cuerpos de agua, sobresaliendo en la zona cercana a la confluencia entre el Río Saja y el Río Besaya, identificándose zonas de tejido urbano continuo y discontinuo, zonas industriales y comerciales.

Concluyendo, la cuenca en la parte alta tiene áreas vegetadas y boscosas, las cuales tienen coeficientes de escorrentía bajos, lo que genera unas buenas condiciones para aumentar el tiempo de retención del agua precipitada, contando así con una buena capacidad para mitigar los eventos de precipitación extremos, disminuyendo en un gran porcentaje los caudales que pueden escurrir en estas zonas. Sin embargo, en las áreas bajas de la cuenca específicamente donde se ubica la zona de estudio se incrementan las áreas duras, lo que disminuye el tiempo de retención del agua precipitada,

aumentándose así el coeficiente de escorrentía y el volumen de agua escurrido, trayendo como consecuencia la pérdida de capacidad de respuesta de la cuenca ante eventos de precipitación.

Figura 4. Mapa de usos del suelo en la cuenca del Saja Besaya (CNIG, 2020)



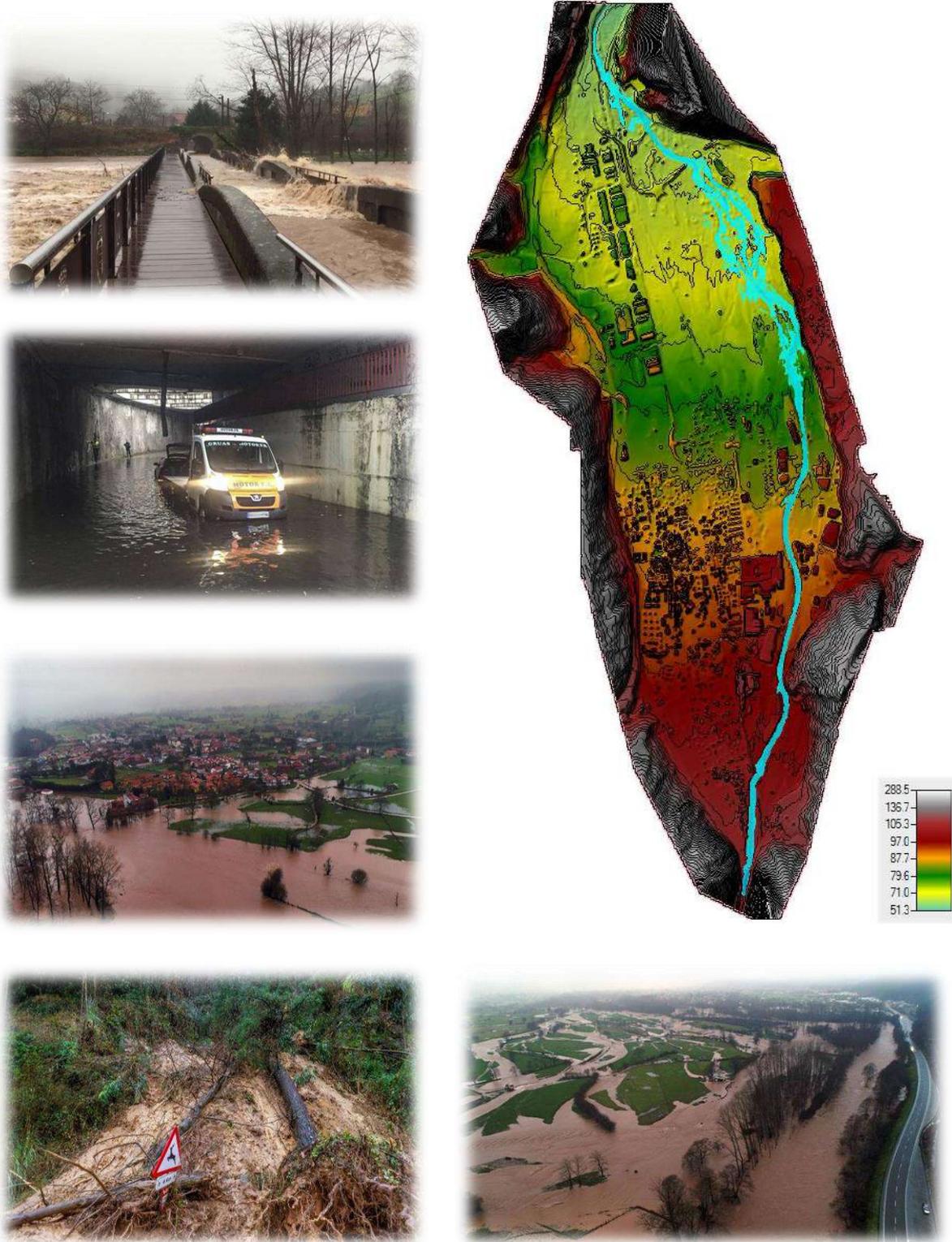
3.3. Diagnóstico y antecedentes de inundación

Los Corrales de Buelna por su localización y su distribución geomorfológica se ubica en una zona susceptible a inundaciones fluviales, las cuales son causadas por el río Besaya. Al analizar la geomorfología correspondiente al área urbanística del municipio, la cual se presenta en la Figura 5 se observa que toda la población urbana está asentadas a lo largo y ancho de las orillas de la masa de agua, en donde se identifican terrazas y áreas de inundación en relieves planos. Las tierras en estas partes del municipio, además de estar habitadas tienen usos agrícolas, de ganadería e industriales, lo que genera una acentuación del problema. Los eventos de inundación en los últimos años han traído consecuencias nefastas para el sistema económico, social y medioambiental del municipio, causando destrucción de propiedades e infraestructuras, contaminación del recurso hídrico, despoblación, pérdida de actividad empresarial y medios de vida, fallo de los sistemas de drenaje, incremento de enfermedades transmitidas a través del agua y relacionadas con el agua, etc.

El asentamiento de la población urbana en las zonas de vega del río históricamente ha producido cambios en los usos del suelo, estrechamientos del cauce por efecto de la construcción de

infraestructuras (Puentes, pontones, azudes, obras hidráulicas en general). Igualmente, la variación de las coberturas del suelo ha generado un aumento considerable en las escorrentías. Todo esto trae como consecuencia una importante disminución de la capacidad hidráulica y de laminación del río.

Figura 5. Geomorfología de Los Corrales de Buelna y registro fotográfico de las inundaciones históricas.



4. Fuentes de información

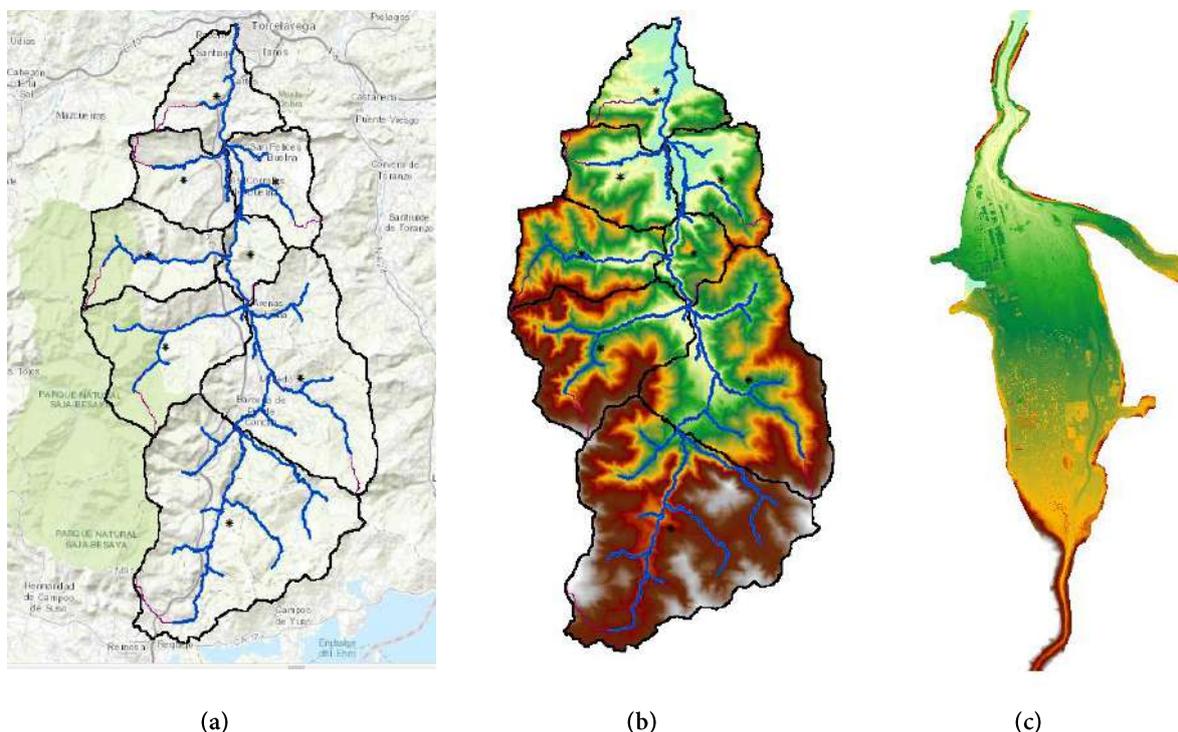
Para la elaboración del presente estudio, se consultaron las principales instituciones españolas dedicadas a el manejo, tratamiento y suministro de información de datos meteorológicos, cartográficos e hidrológicos, las cuales se consideran fuentes lo suficientemente fiables. A continuación, se realizará una breve descripción de los datos utilizados, incluyendo una descripción de la información cartográfica, meteorológica, hidrológica y relacionada con los modelos de cambio climático utilizados.

4.1. Información cartográfica de la zona de estudio

La información cartográfica se consultó en la página web del Instituto Geográfico Nacional de Información Geográfica de España (CNIG, 2020), y corresponde al modelo de elevación digital de la zona de estudio, el cual fue generado a partir de la combinación de las siguientes fuentes:

- Base Topográfica Nacional 1:25.000, consultada en la página web del Instituto Geográfico Nacional (a).²
- Modelo digital del terreno 2ª Cobertura (2015-Actualidad) con paso de malla de 2 m (b).³
- Modelo Digital del Terreno (MDT) de las ARPSIs elaborado a partir de datos LIDAR PNOA del Instituto Geográfico Nacional (c).⁴

Figura 6. Proceso de verificación del modelo digital de terreno (CNIG, 2020)



² <https://www.ign.es/web/ign/portal/cbg-area-cartografia>

³ <http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/index.jsp>

⁴ <https://www.miteco.gob.es/es/cartografia-y-sig/ide/descargas/agua/MDT-arpsis.aspx>

4.2. Información meteorológica e hidrológica de la zona de estudio

La información meteorológica e hidrológica de la zona de estudio fue consultada en la Confederación Hidrográfica del Cantábrico (CHC, 2020) y de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET, 2020) y corresponde a los valores precipitación con resolución temporal horaria y diaria, para estaciones operadas por estas entidades. Adicionalmente, fueron consultados los datos de temperatura, así como los datos de caudal registrados por una estación de aforo ubicada en el río Besaya instalada en una zona cercana a la zona de estudio.

Con respecto a la información consultada, en primera instancia se seleccionaron 3 estaciones pluviométricas pertenecientes a la red de la Confederación, las cuales cuentan con un periodo de registro mayor a 12 años y con una resolución temporal de 5 minutos. En segunda instancia se seleccionaron 4 estaciones de la red de AEMET, las cuales cuentan con un periodo de registro mayor a 15 años y una resolución temporal diaria. Todas las estaciones consultadas en las dos entidades cuentan con registros de temperatura con escala temporal diaria.

En la Tabla 1 se presentan el nombre, el código, las características de ubicación y las fechas de instalación y suspensión de las estaciones seleccionadas, mientras que en la Figura 7 se presenta la ubicación geográfica de las estaciones seleccionadas en la zona de estudio.

Tabla 1. Características de las estaciones pluviométricas en la zona de estudio (AEMET, 2020; CHC, 2020)

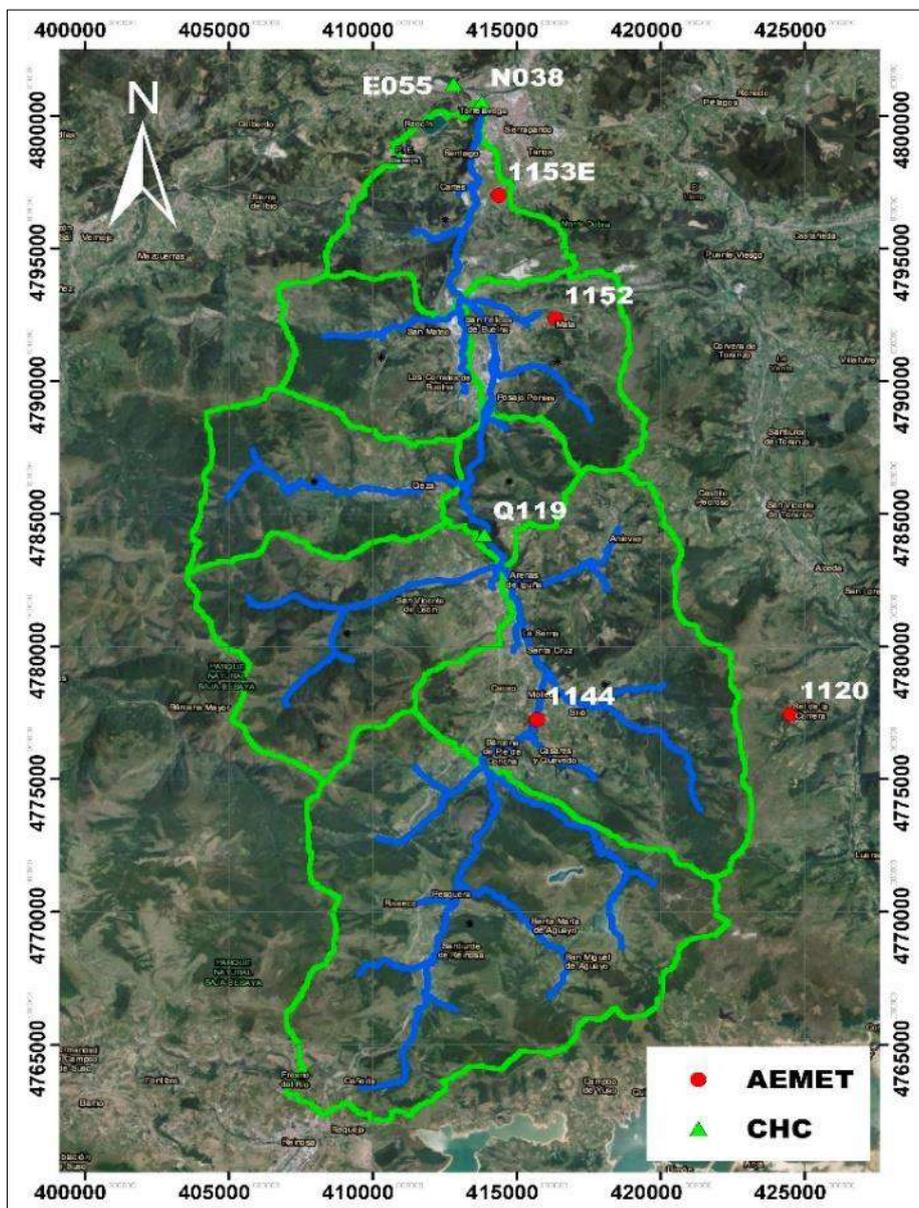
RED ESTACIONES	NOMBRE DE ESTACIÓN	UBICACIÓN	COORDENADAS GEOGRÁFICAS		FECHA	
			Longitud	Latitud	Instalación	Suspensión
CHC	E055	Azud del Puente San Miguel	4.248	43.357	21/10/2011	31/05/2019
CHC	Q119	Arenas de Iguña	4.060	43.208	20/03/2009	31/05/2019
CHC	A708	Río Pisueña en La Penilla	4.061	43.249	9/04/2012	31/05/2019
AEMET	1144	Molledo de Portolin	4.037	43.143	1/01/1959	31/12/1979
AEMET	1152	Besaya	4.031	43.279	1/01/1966	31/12/1982
AEMET	1153E	Besaya	4.056	43.321	1/01/1978	31/05/2007
AEMET	1120	Besaya	3.928	43.146	1/02/1933	30/11/1999

Para realizar la calibración del modelo, es importante conocer el comportamiento hidrológico de la zona de estudio, es por esa razón que se han consultado los datos recopilados por la Confederación Hidrográfica del Cantábrico (CHC, 2020), entidad que cuenta con una estación de aforo localizada en río Besaya sobre el Puente de Torres, la cual cuenta con datos históricos de caudal con resolución temporal diaria. Los datos de localización de la estación Puente Torres, sus coordenadas, así como el periodo de registro de la estación se presenta en la Tabla 2, mientras que su ubicación geográfica se puede ver en la Figura 7.

Tabla 2. Características de las estaciones de aforo en la zona de estudio. (CHC, 2020)

RED ESTACIONES	NOMBRE DE ESTACIÓN	UBICACIÓN	COORDENADAS GEOGRÁFICAS		FECHA	
			Longitud	Latitud	INSTALACIÓN	SUSPENSIÓN
CHC	N038	Puente de Torres	4.06	43.35	01/10/1970	31/12/2008

Figura 7. Localización de las estaciones pluviométricas y de aforo en la zona de estudio (AEMET, 2020; CHC, 2020)



4.3. Modelos de cambio climático

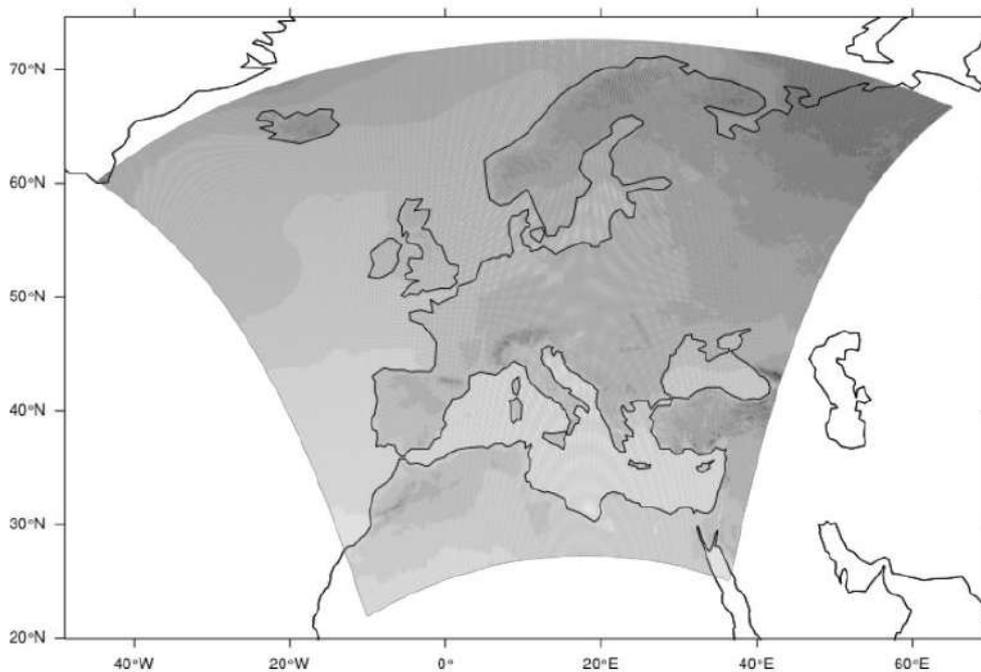
Las proyecciones regionales de cambio climático fueron tomadas de EURO - CORDEX (*Coordinated Regional Downscaling Experiment*), que proporciona en la actualidad proyecciones con distintos modelos climáticos regionales (RCMs), anidados a distintos modelos climáticos globales del CMIP5 para el escenario histórico (historical) y los escenarios de emisiones RCP4.5 y RCP8.5, de acuerdo con lo presentado en la Tabla 2.

Tabla 3. Proyecciones regionales obtenidas con distintos acoplamientos de modelos globales (GCMs, ver Tabla 1), y regionales (RCMs) de la iniciativa EURO-CORDEX con una resolución de 0.11 ° y proyecciones para RCP 4.5 y RCP 8.5.

No.	GCM	RCM	Institución
1	CNRM-CM5_r1i1p1	CCLM4-8-17_v1	CLMcom
2	CNRM-CM5_r1i1p1	ALADIN53_v1	CNRM
3	CNRM-CM5_r1i1p1	RCA4_v1	SMHI
4	EC-EARTH_r12i1p1	CCLM4-8-17_v1	CLMcom
5	EC-EARTH_r12i1p1	RCA4_v1	SMHI
6	EC-EARTH_r1i1p1	RACMO22E_v1	KNMI
7	EC-EARTH_r3i1p1	HIRHAM5_v1	DMI
8	CM5A-MR_r1i1p1	WRF331F_v1	IPSL-INERIS
9	CM5A-MR_r1i1p1	RCA4_v1	SMHI
10	HadGEM2-ES_r1i1p1	CCLM4-8-17_v1	CLMcom
11	HadGEM2-ES_r1i1p1	RACMO22E_v1	KNMI
12	HadGEM2-ES_r1i1p1	RCA4_v1	SMHI
13	MPI-ESM-LR_r1i1p1	CCLM4-8-17_v1	CLMcom
14	MPI-ESM-LR_r1i1p1	RCA4_v1	SMHI
15	MPI-ESM-LR_r1i1p1	REMO2009	MPI
16	NorESM1-M	HIRHAM5_v1	DMI

Igualmente, el dominio enmarcado para la simulación de los RCM enmarcados en la EURO-CORDEX, se presenta en la Figura 8.

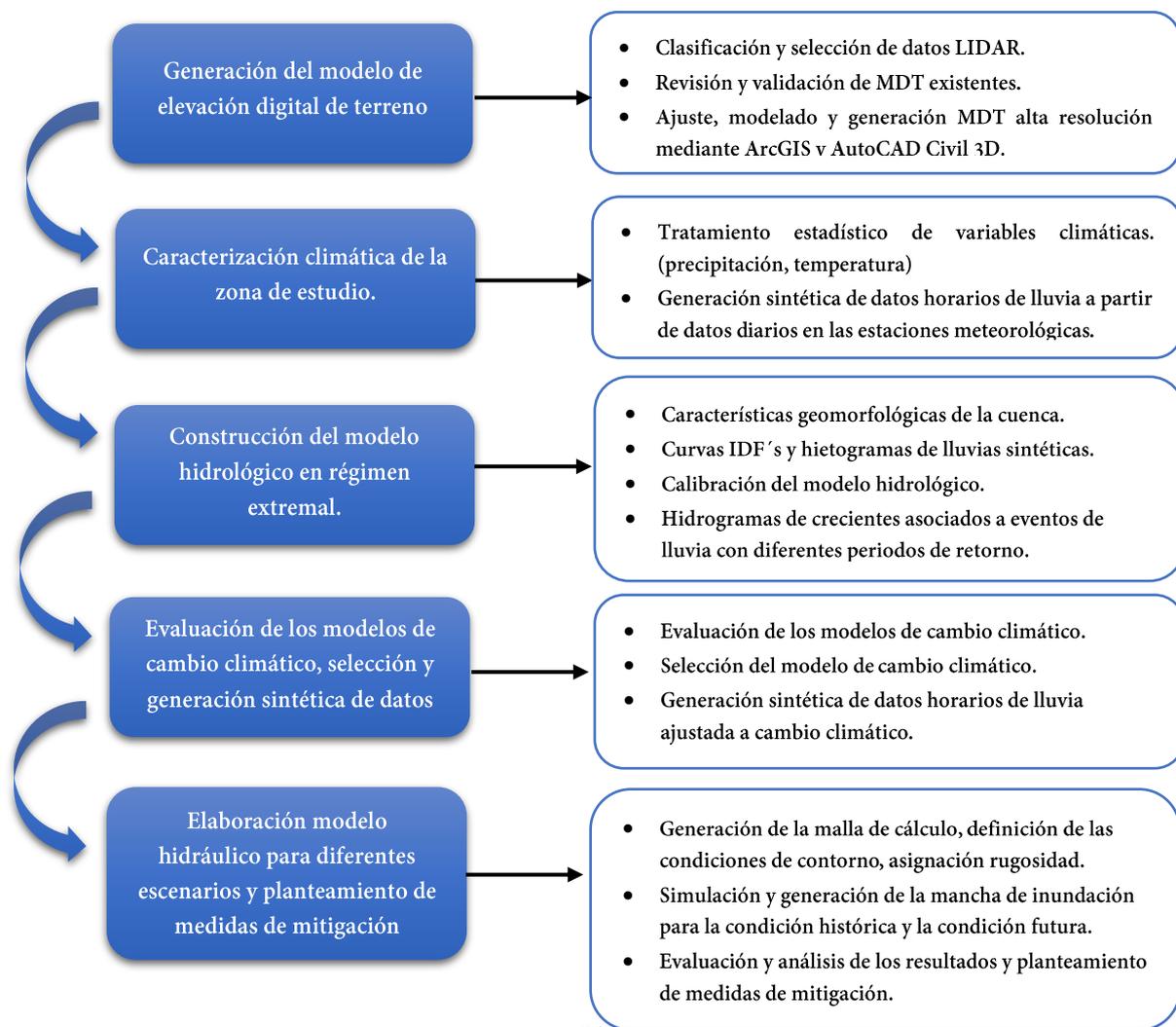
Figura 8. Dominio de simulación de los RCM enmarcados en EURO-CORDEX.



5. Metodología

La modelización de inundación fluvial está basada principalmente modelos hidrológicos e hidráulicos que simulan el comportamiento de una cuenca en un área específica, teniendo en cuenta diversas dinámicas climáticas y su interacción con otras variables como las propiedades del suelo, la topografía del terreno, las coberturas del área en estudio, etc. Por tanto, para poder realizar un análisis de inundación es necesario disponer de un modelo de elevación digital de terreno, información de las características del suelo, así como sus usos y de variables climáticas como precipitación y temperatura con alta resolución temporal y espacial en periodos de tiempo que permitan realizar un análisis y una caracterización climática de la zona de estudio. Si además se quiere realizar un análisis del efecto del Cambio Climático sobre la inundación fluvial, la metodología a emplear requiere de una regionalización (*downscaling*) de las variables ambientales involucradas, que permita cuantificar y reducir la incertidumbre asociada a los posibles cambios regionales y fluviales debidos al fenómeno global de calentamiento que se asocia con el cambio climático. La metodología para realizar el cálculo y análisis de inundación fluvial en un área determinada, a partir de las proyecciones climáticas continentales históricas y futuras se presenta en la Figura 9.

Figura 9. Esquema general de la metodología y procesos a tener en cuenta para elaborar estudios de inundación con la incorporación de los efectos de cambio climático en una cuenca.



En primera instancia, se debe preparar un modelo digital de terreno (MDT), el cual se puede generar a partir de datos LIDAR, modelos digitales existentes o bases topográficas armonizadas. Con la información recopilada, se puede realizar una comparación gráfica de cada modelo en un entorno 3D, con el fin de encontrar diferencias y generar el modelo que mejor represente las condiciones batimétricas y altimétricas deseadas para llevar a cabo la modelación hidráulica.

En segunda instancia, es importante realizar una caracterización climática de la zona de estudio, lo cual es muy relevante, porque a partir de dicha caracterización se define el comportamiento hidrológico de una cuenca. La variable climática más relevante en el estudio, corresponde a la precipitación, la cual se puede obtener de su medición directa en campo, por medio de estaciones meteorológicas, pluviográficas, pluviométricas, etc. Un problema que se presenta comúnmente con las mediciones, es la baja resolución espacial y temporal de la información, debido al costo y a la dificultad de obtener registros suficientemente largos y consistentes. Por la razón expuesta, en la mayoría de los casos se debe recurrir a modelos matemáticos y técnicas estadísticas que tienen como objetivo mejorar la resolución espacial y temporal de los datos. Es por eso que, mediante la aplicación de métodos de desagregación temporal, se debe aumentar la resolución de los datos de lluvia históricos a escalas horarias, a partir de la información diaria registrada en las estaciones pluviométricas aferentes al lugar de estudio.

En tercera instancia, se debe elaborar un modelo hidrológico para régimen extremal, el cual tiene como base las lluvias sintéticas horarias, con las que se deben construir las curvas de Intensidad, duración y frecuencia y los hietogramas asociados a diferentes eventos con periodos de retorno, las coberturas del suelo, las características hidromorfológicas de la cuenca y un modelo de infiltración. A partir de estos datos se estiman los hidrogramas de diseño asociados a diferentes periodos de retorno. Un punto muy importante que debe ser tenido en cuenta cuando se construye un modelo hidrológico, corresponde a la calibración del mismo, este proceso se realiza a partir de los datos de caudal medidos en una estación de aforo, preferiblemente ubicada en una zona cercana al punto en donde se quieren obtener los hidrogramas de diseño, dicha estación debe contar con un registro de caudal que tenga resolución temporal suficiente.

Posteriormente, se deben definir los modelos y posibles escenarios con la que se quiere analizar la evolución climática futura. Este proceso es muy importante, debido a que lo que se busca evaluar son los cambios e impactos generados por una inundación derivada de la evolución y desarrollo socio-económico global, determinada por la emisión futura de gases de efecto invernadero. Definidos los escenarios climáticos a futuro, cuya descripción, obtención y tratamiento estadístico de datos se describirá en un capítulo posterior, la metodología para evaluar la influencia e impacto que tendrá el cambio climático en el comportamiento de las variables climáticas, corresponde a la selección del modelo que se comporte de forma similar en el periodo histórico (1959-2011). Para esto se seleccionan el modelo con los estadísticos que mejor se correlacionen con las series históricas de las estaciones meteorológicas seleccionadas.

Una vez se seleccionado el modelo de cambio climático, se deben generar las lluvias horarias asociadas a dicho modelo, para esto nuevamente se usa la metodología implementada en el periodo histórico, con la diferencia que esta vez reproducen los datos a partir de estadísticos de cambio climático generados previamente (Sierra, 2019). Con estas nuevas lluvias, se realiza el modelado hidrológico

descrito anteriormente, sin embargo, para este caso, se obtienen los hidrogramas para los escenarios futuros, los cuales servirán como entrada del modelo hidráulico.

Finalmente, teniendo en cuenta los hidrogramas obtenidos para la condición histórica y la condición futura obtenidos mediante el modelo hidrológico, los datos del modelo de elevación digital de terreno y la información relacionada con los usos del suelo, se debe construir el modelo hidráulico, a partir del cual se debe realizar la evaluación y análisis de los resultados obtenidos.

5.1. Preparación del modelo digital de terreno (MDT).

La preparación del modelo digital de terreno (MDT) se debe realizar a partir de la delimitación del área de estudio, desde el punto de vista hidrológico se deben definir los límites a partir de las cuencas y subcuencas identificadas. Los datos de partida corresponden a la información cartográfica descrita en el Capítulo 4.1, la cual corresponde a los datos LIDAR, la base topográfica nacional y los MDT construidos por el centro geográfico Nacional de España. La construcción del modelo digital de terreno final, se desarrolló haciendo uso de las extensiones para el manejo de datos espaciales del software ArcMap 10.5 y AutoCAD Civil 3D 2021. La metodología para la implementación y obtención final del modelo de alta resolución se describe a continuación:

- a) Los datos LIDAR deben ser exportados mediante la herramienta ReCAP al formato RCS, el cual es el formato por defecto utilizado por AutoCAD Civil 3D para leer nubes de puntos con coordenadas espaciales (X, Y, Z).
- b) Una vez exportados los datos se debe hacer control de calidad (Instituto Geográfico Nacional, 2016) y posteriormente un filtrado de la nube de puntos por atributo, utilizando únicamente los que se requieren en el estudio, para el caso de inundaciones, se usaran los que tengan datos de terreno natural y edificaciones, obviando los datos de vegetación y de agua.
- c) A partir de los datos filtrados se crea una superficie en AutoCAD Civil 3D, la cual contiene los datos del terreno. La superficie generada, no es más que el MDT de la zona de estudio. La superficie generada tiene sus limitaciones debido a que en las zonas en donde el láser no consigue llegar al fondo del cauce o lago o la vegetación es muy densa se tendrán elevaciones que no deben tenerse en cuenta en la geometría utilizada para correr el modelo hidráulico.
- d) Debido a las limitaciones del MDT generado, se debe contar con los datos batimétricos de la corriente a modelar o en otro caso con un MDT que detalle los fondos del cauce. A partir de los datos batimétricos o del MDT descrito, se realiza un nuevo modelo de elevación digital, el cual deberá adherirse al MDT generado inicialmente. Para llevar a cabo este paso, el programa AutoCAD Civil 3D cuenta con una herramienta para pegar superficies, la cual elimina las sobreelevaciones de la lámina de agua, vegetación y puentes, dejando solamente la información de interés.
- e) Finalmente, la superficie debe exportarse a un formato .tiff o. ascii (*American Standard Code for Information Interchange*), para luego validar el modelo visualmente con las herramientas de ArcGIS para la visualización de modelos 3D. En caso de encontrar incongruencias, las mismas pueden ser corregidas con el módulo para edición de superficies en AutoCAD Civil 3D, este es un proceso manual e iterativo que requiere de criterio y experiencia, el cual se debe repetir hasta obtener el MDT deseado.

5.2. Caracterización climática en la zona de estudio

Previo a la elaboración del modelo hidrológico, es importante realizar una caracterización de las variables climáticas que influyen en el comportamiento de la cuenca, la variable más relevante está referida a la precipitación debido a la influencia y a la relación que tiene con la escorrentía que se genera en una cuenca, durante y después de un evento de lluvia. Dada la baja resolución espacio temporal disponible en la cuenca, son usadas técnicas estadísticas que permiten predecir los valores de precipitación.

5.2.1. Análisis de la precipitación

La base para caracterizar un evento extremo, depende mucho de la resolución de los datos de lluvia y de la escala temporal disponible, en el campo de la hidrología es común requerir escalas temporales de una hora, o incluso más pequeñas, las cuales tienen aplicaciones en el diseño hidrológico urbano, el diseño de infraestructura, la evaluación de riesgos, etc. Sin embargo, los registros pluviométricos tienden a tener mayor resolución temporal y espacial debido a los costos inherentes a la recolección de los datos y a las limitaciones técnicas.

En la actualidad, la información relacionada con las variables climatológicas de una región, incluida la precipitación, no solamente se obtiene de las estaciones climatológicas instaladas en áreas puntuales, debido a que existen otras fuentes de información, derivada de radares, datos satélites o modelos numéricos, que también proporcionan datos de lluvia con buenas escalas temporales que superan la resolución diaria. Sin embargo, la información captada por estas fuentes, tienden a tener grandes sesgos, y los datos no deben interpretarse directamente como registros puntuales.

Debido a esta limitación existen múltiples métodos de desagregación de los datos basados en supuestos estadísticos. Dentro de los métodos principales se encuentran los modelos clúster, los modelos de cascada aleatorios y los modelos de muestreo no paramétricos. Los enfoques de regresión que utilizan datos atmosféricos y estadísticas de lluvia diaria como predictores se evalúan para reducir las estadísticas de lluvia diarias a lluvias horarias. Los métodos estadísticos que aplican a este tipo de análisis están basados en regresiones estadísticas, las cuales con base en predictores atmosféricos pueden generar datos de precipitación sintética. Uno de los modelos más comunes corresponde al método de Beuchat, el cual es la base del método con el que se produjeron los datos sintéticos en el presente trabajo.

Para la generación sintética de los datos se parte del estudio elaborado por el Instituto de Hidráulica de la Universidad de Cantabria, (Diez-Sierra & del Jesus, 2019). En él se realiza la discriminación de dos métodos referidos a la desagregación temporal de la precipitación en España para el clima presente y en un contexto de cambio climático. Mediante la implementación de estas metodologías no solamente se obtienen los valores horarios, sino que también se genera un periodo de precipitación con suficientes años para realizar el estudio.

5.2.1.1. *Desagregación temporal de la precipitación a través de modelos de regresión y modelos puntuales*

Con el fin de analizar el comportamiento de las lluvias históricas y futuras es necesario recurrir a métodos de desagregación temporal que permitan obtener series de precipitación horaria, con las cuales se pueda calcular el régimen extremal de una forma más precisa. Esta metodología corresponde

al ajuste de un modelo de regresión *Random Forest* en el que, a partir de estadísticos de precipitación diarios y de la variable temperatura, se obtienen estadísticos subdiarios para posteriormente mediante una técnica de generación sintética *Neyman-Scott Rectangular Pulse Model (NSRPM)* generar la serie horaria deseada. Los estadísticos analizados son:

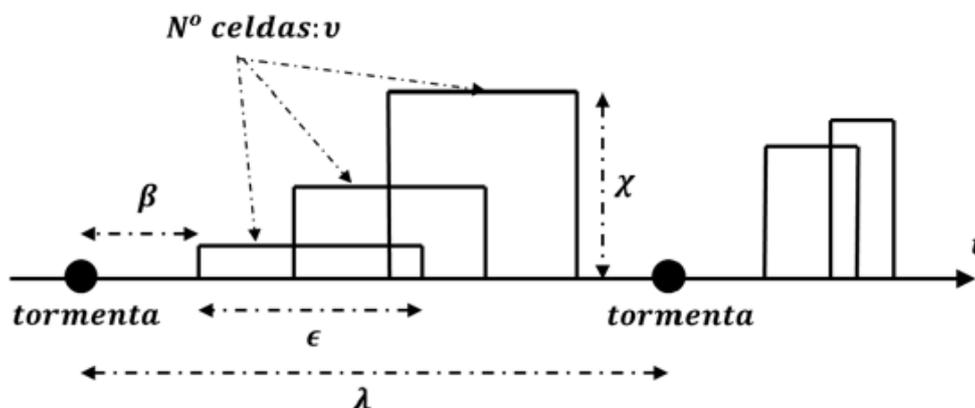
- Precipitación media diaria (μ_{24})
- Varianza diaria (σ_{24})
- Proporción de días secos (ϕ_{24})
- Asimetría diaria (γ_{24})
- Coeficiente de autocorrelación diaria lag-1 (ρ_{24}^1)
- Probabilidad de dos días húmedos consecutivos (ϕ_{WW})
- Probabilidad de dos días secos consecutivos (ϕ_{DD})

5.2.1.2. Simulación sintética de precipitación

El modelo para la creación de series de datos correspondientes a lluvias sintéticas se deriva del modelo *Neyman-Scott Rectangular Pulse Model (NSRPM)*, el cual permite realizar la superposición de múltiples procesos puntuales independientes. La descripción metodológica del modelo se enuncia a continuación:

El origen de las tormentas sigue un proceso de *Poisson* con parámetro λ . A cada tormenta se le asigna un número aleatorio de celdas de lluvia (v) los cuales presentan un retardo respecto al origen de la tormenta distribuyéndose acorde a la función de distribución exponencial con parámetro β . La intensidad y duración de cada celda de lluvia sigue también una distribución exponencial con parámetros de escala ϵ y χ . Cada celda de lluvia se considera constante durante el tiempo que permanece activa. La intensidad de lluvia en cualquier instante se compone de la suma de las intensidades de las celdas activas en ese mismo instante de tiempo. La intensidad, duración y tiempo de espera entre una tormenta y cada celda de lluvia se asume independiente (Cowpertwait, 1991). En la Figura 10, se presenta la descripción del funcionamiento del modelo.

Figura 10. Descripción funcionamiento modelo *Neyman-Scott Rectangular Pulse Model*. (Diez-Sierra & del Jesus, 2019)



5.2.2. Análisis de la temperatura

Para esta variable climática, es suficiente contar con una base de datos compuesta por series diarias en donde se incluyan datos de temperaturas máximas y mínimas. En este caso no es relevante contar con

datos horarios como sucedía con la precipitación, sin embargo, para estudiar la variabilidad climática es importante contar con series históricas y con series adaptadas a los diferentes escenarios de cambio climático. Generalmente, los registros de temperatura de las estaciones climatológicas son suficientes para caracterizar esta variable en el periodo histórico, en el caso del periodo futuro se pueden utilizar los datos de múltiples plataformas, tema que será tratado en un capítulo posterior.

5.3. Metodología para el modelado hidrológico y la caracterización extremal

Para la elaboración del modelo hidrológico de la zona de estudio, es importante determinar las características físicas del sistema, dentro del cual se deben calcular las características geomorfológicas de las subcuencas, así como los tiempos de concentración, tiempos de retardo, entre otras características. De igual forma, se debe contar con información puntual de las lluvias sobre cada subcuenca, sobre las cuales se debe hacer una caracterización extremal que incluya la elaboración de las curvas intensidad, duración y frecuencia (IDF), así como los hietogramas generados por eventos de lluvia para diferentes periodos de retorno. En este capítulo se realiza la descripción metodológica para calcular cada uno de los parámetros que componen un modelo hidrológico, así como las metodologías usadas para su calibración.

5.3.1. Características geomorfológicas de la cuenca

Con el fin de establecer los caudales en una cuenca hidrográfica, se deben determinar las principales características geomorfológicas de la misma. Dentro de los parámetros más relevantes se encuentran el área de drenaje, la longitud y pendiente media ponderada del cauce principal. Los parámetros se definen como:

5.3.1.1. *Área de la cuenca*

Este parámetro es obtenido a través de la proyección vertical de la divisoria de aguas sobre el plano horizontal. Conocida el área y la precipitación, se puede definir el volumen de agua recibido por la cuenca durante un evento. El área de la cuenca se expresa en unidades de área como hectáreas (ha) o kilómetros cuadrados (km²) y puede ser obtenida por planimetrage de mapas o haciendo uso de mapas digitalizados utilizando herramientas que manejen Sistemas de Información Geográfica.

5.3.1.2. *Longitud del cauce principal*

Este parámetro corresponde a la longitud más larga que recorre una gota de agua desde que ingresa en una cuenca, se mide desde el punto distante de la cuenca hasta la sección de control.

5.3.1.3. *Pendiente media*

Este parámetro corresponde a la pendiente media del tramo descrito previamente. Algunos autores, definen su cálculo como la diferencia de alturas desde el punto más alto hasta la sección de control, dividido en la longitud del cauce principal, sin embargo, cuando se tienen cuencas grandes, se deben utilizar métodos que tiendan más hacia un valor medio de la pendiente, ya que esto tiene una connotación importante en el cálculo de caudales.

5.3.2. Tiempo de concentración

El tiempo de concentración, se define como el lapso de tiempo en que tarda una partícula de agua en recorrer el cauce principal de una cuenca desde el punto más alejado de la misma a la sección de control. El caudal máximo ocasionado por una determinada intensidad del aguacero de diseño sobre un área de drenaje específica, es producido por el referido aguacero, el cual se prolonga durante un período de tiempo igual al tiempo de concentración del flujo en el punto bajo consideración. De acuerdo con la referencia (Chow V.T., Maidment D.R., 1998) para el tiempo de concentración, T_c , se han analizado y usado las siguientes fórmulas:

5.3.2.1. Ecuación de Kirpich

$$T_c = 0.0078L^{0.77}S^{-0.385}$$

Dónde:

- T_c: tiempo de concentración, en minutos.
- L: longitud del cauce principal, en pies.
- S: pendiente del cauce principal, en pie/pie.

5.3.2.2. Ecuación de Témez

$$T_c = 0.3 \left(\frac{L}{S^{0.25}} \right)^{0.75}$$

Dónde:

- T_c: tiempo de concentración en horas.
- L: longitud del cauce principal en km.
- S: pendiente del cauce principal en %.

5.3.2.3. Ecuación de Giandotti

$$T_c = \frac{4\sqrt{A} + 1.5L}{25.3\sqrt{LS}}$$

Dónde:

- T_c: tiempo de concentración en horas.
- A: área de la cuenca en km².
- L: longitud del cauce principal en km.
- S: pendiente del cauce principal en m/m.

5.3.2.4. Ecuación de V.T. Chow

$$T_c = 0.273 \left(\frac{L}{S^{0.5}} \right)^{0.64}$$

Dónde:

- T_c: tiempo de concentración, en horas.
- L: longitud del cauce principal, en kilómetros.
- S: pendiente del cauce principal, en m/m.

5.3.2.5. *Ecuación del Cuerpo de Ingenieros*

$$Tc = 0.28 \left(\frac{L}{S^{0.25}} \right)^{0.76}$$

Dónde:

- Tc: tiempo de concentración, en horas.
 L: longitud del cauce principal, en kilómetros.
 S: pendiente del cauce principal, en m/m.

5.3.2.6. *Ecuación de Williams - Hann*

$$Tc = 4.63A^{0.422} / S^{0.46} (L/W)^{0.133}$$

Dónde:

- Tc: tiempo de concentración en horas.
 A: área de la cuenca en millas cuadradas.
 L/W: relación entre la longitud y el ancho de la cuenca.
 S: diferencia de cotas en pies dividida por la longitud del cauce principal en millas.

5.3.2.7. *Ecuación de Johnstone y Cross*

$$Tc = 5(L/S^{0.5})^{0.5}$$

Dónde:

- Tc: tiempo de concentración en horas.
 L: longitud del cauce principal en millas.
 S: pendiente del cauce principal en pie/milla.

5.3.2.8. *Ecuación de SCS - Ranser*

$$Tc = 0.947 \left(\frac{L^3}{H} \right)^{0.385}$$

Dónde:

- Tc: tiempo de concentración, en horas.
 L: longitud del cauce principal, en kilómetros.
 H: diferencia de altura entre el punto más alto de la hoya y el punto de salida, en metros.

5.3.2.9. *Ecuación de Ventura - Heras*

$$Tc = 0.3 \left(\frac{L}{S^{0.25}} \right)^{0.75}$$

Dónde:

- Tc: tiempo de concentración, en horas.
 L: longitud del cauce principal, en kilómetros.
 S: pendiente del cauce principal en %.

5.3.2.10. *Ecuación de Hathaway*

$$T_c = \left(\frac{36.36(L * n)^{0.467}}{S^{0.234}} \right)$$

Dónde:

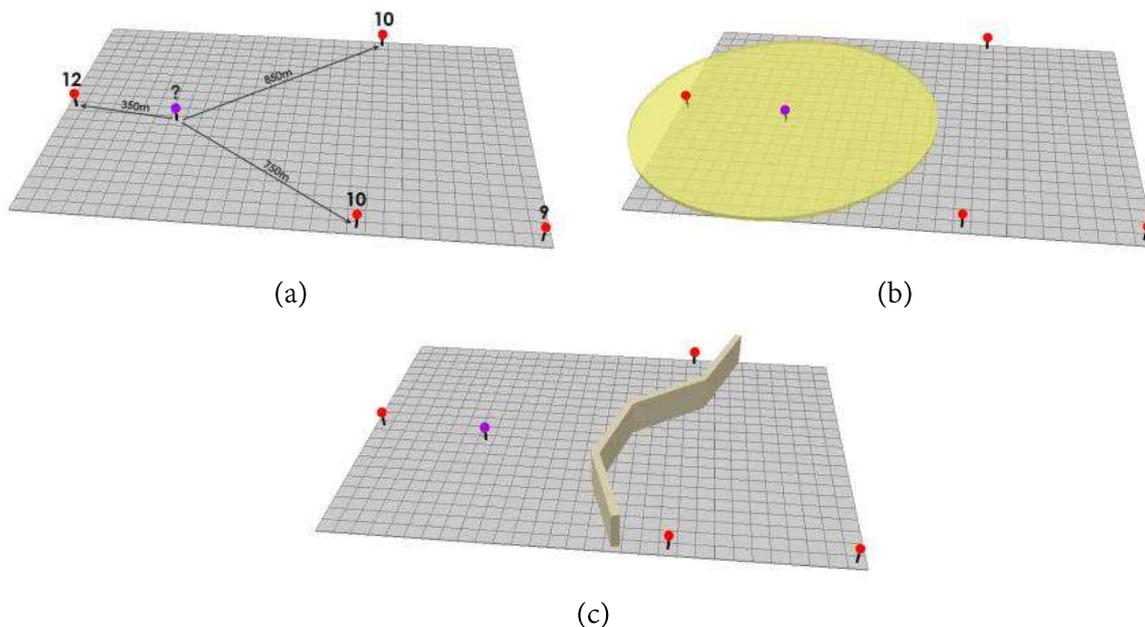
- Tc: tiempo de Concentración, en minutos.
- L: longitud del cauce principal, en kilómetros.
- S: pendiente del cauce principal en %.
- n: factor promedio de rugosidad, sin dimensiones.

5.3.3. Interpolación de la precipitación por el método de la distancia inversa (IDW)

Uno de los inconvenientes que se presentan en los estudios relacionados con el manejo de variables climáticas, como por ejemplo la precipitación, corresponde a la predicción de dicha variable en las zonas en donde no se cuenta con registros, es aquí donde el método de interpolación de la distancia inversa es utilizado para obtener los datos de lluvia distribuidos a partir de los registros de las estaciones climáticas.

Existen varias formas de configurar el método, debido a que tiene flexibilidad para realizar la búsqueda y la interpolación de los datos. En la Figura 11 se pueden apreciar tres configuraciones diferentes el método, el primer caso (a) busca encontrar los valores del punto morado (valores desconocidos), a partir de los puntos rojos (valores conocidos), configurando la interpolación para que utilice un número fijo o variable de puntos. En el segundo caso (b) se especifica un radio de búsqueda, a partir del cual, solo se usará el número de puntos conocidos dentro del radio para interpolar los valores. El tercer y último caso (c) es uno de los más utilizados en el campo de la hidrología debido a que establece barreras, es decir, si hay elevaciones o barreras en un perfil de elevación que se utilizan como límites para encontrar la información de los puntos con valores conocidos.

Figura 11. Configuración de la interpolación por el método de la Distancia Inversa.



Una vez establecida la configuración del método, se procede a interpolar los datos, los cuales se estiman en base a la distancia de los valores conocidos de la celda, es decir, que los puntos que se encuentran más cerca de los valores conocidos, tendrán mayor influencia que los puntos que están más lejos. De esta manera, los puntos más próximos al lugar en donde se quiere hacer la predicción intervienen de manera más importante en la construcción del valor definitivo de la propiedad para ese punto. De igual forma, las distancias se pueden afectar por un exponente de ponderación, el cual entre más valor tome, aportará una contribución mayor. La fórmula del método de la distancia inversa viene dada por la siguiente ecuación:

$$Z_p = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{Z_i}{d_i^\beta} \right)}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{d_i^\beta} \right)}$$

Dónde:

- Z_p: es el punto en donde se quiere realizar la interpolación.
- Z_i: es un punto o los puntos del entorno.
- d_i: es la distancia entre los puntos.
- β: es el exponente de ponderación.

5.3.4. Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF's)

Es importante caracterizar los eventos máximos de lluvia, que pueden ocurrir en una cuenca determinada, pues la inundación estará inevitablemente relacionada con los caudales generados por estos eventos. El método más común para analizar las precipitaciones máximas, se basa en una tormenta de diseño que involucre una relación entre la intensidad de la lluvia, la duración y los periodos de retorno apropiados para este tipo de proyectos.

Las curvas IDF's, se pueden construir de varias formas, en general pueden elaborarse con base en registros de estaciones pluviográficas utilizando precipitaciones de duraciones entre 5 minutos, o menos, y 360 minutos como máximo. La metodología parte de sumar la precipitación total en intervalos de 1 h, 2h, 4h, 8 h, 16 h y 24 horas, posteriormente se calculan los máximos por año para cada intervalo de tiempo, para finalmente realizar un ajuste de los valores obtenidos a una distribución de máximos, por ejemplo, una distribución de valores extremos generalizados (GEV). El procedimiento para realizar el cálculo, se puede adoptar con la siguiente metodología, teniendo claro que esta es una de muchas formas que existen para calcular curvas IDF's.

5.3.4.1. Análisis de frecuencia de datos mediante distribución de valores extremos generalizados GEV

En primera instancia y una vez calculada la serie de máximos anuales, se realiza el ajuste de a una GEV. A partir de la distribución ajustada, se puede estimar la precipitación y su intensidad para cualquier período de retorno. Cuando se aplica a valores exclusivamente positivos como la precipitación, la distribución de GEV viene dada por la siguiente ecuación:

$$F(s, \xi) = e^{-(1+\xi s)^{-1/\xi}} \quad \forall \xi > 0$$

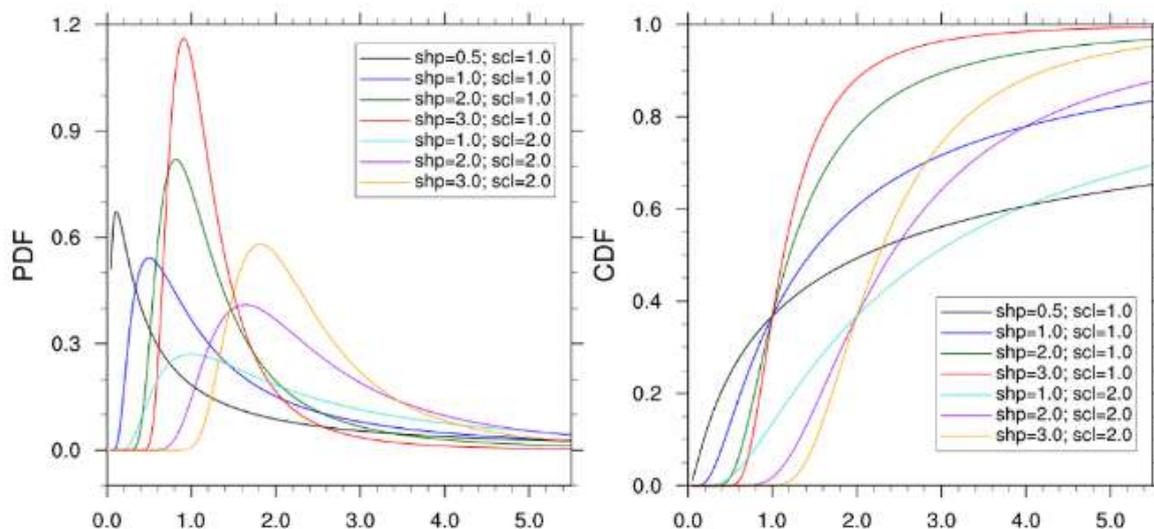
$$s = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad \sigma > 0$$

Dónde:

- S: variable de estudio estandarizada.
- μ : parámetro de ubicación.
- σ : parámetro de escala.
- ξ : parámetro de forma.

A continuación, en la Figura 12 se presentan de forma gráfica las diferentes curvas que componen a la GEV.

Figura 12. Distribución de valores extremos generalizados (GEV)



5.3.4.2. Correlación lineal múltiple

Haciendo uso del algoritmo para el cálculo de los términos de una correlación lineal múltiple a partir del inverso de la matriz de los coeficientes de correlación simple o total, se pueden encontrar los coeficientes de la ecuación de la curva IDF, la cual tiene la siguiente forma:

$$I_{Tr,d} = \frac{KTr^m}{d^n}$$

Donde:

- Tr: periodo de retorno seleccionado.
- d: duración del evento de precipitación seleccionado.
- K, m, n: coeficientes de la correlación.

Los coeficientes de la ecuación se pueden estimar haciendo uso de la siguiente ecuación:

$$\ln I = \ln K + m * \ln(Tr) - n * \ln(d)$$

$$X_1 = a_0 + a_2x_2 + a_3X_3$$

5.3.5. Hietogramas puntuales de aguaceros de diseño con curvas Intensidad-Duración-Frecuencia

Para realizar este cálculo y de acuerdo con la referencia (Chow V.T., Maidment D.R., 1998), se puede seguir el siguiente procedimiento:

- a) Con base en las curvas intensidad – duración – frecuencias correspondientes a las estaciones pluviométricas de la zona se pueden calcular las curvas de masas de los aguaceros puntuales para duraciones entre 0 a 300 min y periodos de retorno entre 2 y 500 años. La duración de las lluvias debe ser verificado teniendo en cuenta el tiempo de concentración de cada cuenca, garantizando que por lo menos llegue a este valor.
- b) Posteriormente, con base en las curvas de masas calculadas, se podrán obtener los hietogramas de aguaceros puntuales respectivos.
- c) Con el fin de darle una secuencia más crítica del aguacero, como generalmente se hace en este tipo de casos, mediante el método del Bloque Alterno (Chow V.T., Maidment D.R., 1998), los incrementos de lluvia de los hietogramas se pueden arreglar, dándoles la siguiente configuración: el valor más bajo se debe colocar en el primer lugar, el segundo valor en orden creciente se colocará en último lugar, el tercer valor en tal orden se ubicará en segundo lugar, el cuarto valor en el penúltimo lugar, y así sucesivamente.

El resultado obtenido corresponderá al hietograma de lluvia puntual de las lluvias de diseño.

5.3.6. Modelo hidrológico HEC-HMS

Para los trabajos particulares relacionados con estos estudios, se utilizó la versión más reciente de este modelo hidrológico elaborado por el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos HEC-HMS 4.5 (U.S. Army E.E.U.U, 2020a).

5.3.6.1. *Filosofía del Modelo*

El modelo computacional HEC-HMS ha sido diseñado para simular la escorrentía superficial en una corriente de agua en respuesta a un evento de precipitación como un sistema interconectado de componentes hidrológicas e hidráulicas. Cada componente se modela como un aspecto del proceso precipitación - escorrentía dentro de una porción de la hoya hidrográfica, comúnmente referida como una sub-hoya. Una componente puede representar una entidad de escorrentía superficial, un canal de una corriente o un embalse.

La representación de una componente requiere de un conjunto de parámetros que especifican las características particulares de tal componente y las relaciones matemáticas que describen los procesos físicos que ocurren y la involucran. El resultado del proceso de modelación es la determinación de los hidrogramas de creciente en puntos determinados de la hoya hidrográfica.

5.3.6.2. *Componentes del Modelo*

Red de canales

La hoya hidrográfica se subdivide en un sistema interconectado de canales utilizando mapas topográficos y cualquier otra información geográfica que describa las características existentes o proyectadas de la red de drenaje. En primer término, se delimita la hoya hidrográfica, la cual se subdivide posteriormente en un número determinado de subhoyas de acuerdo con sus propias

características, determinando el ejercicio anterior el número y tipos de componentes de canales que se usan en el modelo y su interrelación entre ellas.

Componente de escorrentía superficial del terreno

La componente de escorrentía superficial del terreno de las subhoyas se utiliza para representar el movimiento del agua sobre la superficie del terreno y en los canales de las respectivas subhoyas. El dato de entrada a esta componente es el hietograma de precipitación total. La precipitación efectiva que produce escorrentía superficial se calcula substrayendo al valor de la precipitación total la infiltración y las pérdidas por detención en el terreno con base en una función de la tasa de infiltración del agua en el suelo.

Para los estimativos anteriores, se supone que la precipitación y la infiltración son uniformes sobre cada una de las sub hoyas establecidas. Estas pérdidas debidas a la intercepción superficial del terreno, almacenamientos en depresiones e infiltración son denominadas en el modelo computacional HEC-HMS como las pérdidas de la precipitación, las cuales pueden ser estimadas a través de las siguientes metodologías: pérdida inicial y tasa de pérdida uniforme; tasa de pérdida exponencial; método de la curva número CN del *Soil Conservation Service (SCS)*; tasa de pérdida de Holtan; función de infiltración de Green y Ampt.

Los excesos de lluvia efectiva son posteriormente transitados a través de las técnicas del hidrograma unitario o de la onda cinemática a la salida de la subhoya, estimándose el hidrograma de escorrentía respectivo. La técnica del hidrograma unitario produce un hidrograma de escorrentía en el punto más aguas abajo de la sub hoyo respectiva. Si la ubicación para el cálculo de escorrentía no es apropiada, puede ser necesario subdividir aún más la sub hoyo o utilizar el método de la onda cinemática para distribuir entradas de caudal localizadas en puntos específicos.

El modelo computacional HEC-HMS tiene en cuenta las siguientes metodologías de hidrogramas unitarios: *Clark, Snyder* y adimensional del SCS. La transformación de la lluvia efectiva en escorrentía a través el método de la onda cinemática permite una distribución uniforme de la escorrentía superficial sobre el terreno a lo largo de la longitud del canal principal. Esta distribución uniforme de entradas de caudal localizadas es particularmente importante en hoyas hidrográficas en donde muchos canales laterales contribuyen al caudal a lo largo de la longitud del canal principal.

La distribución uniforme de escorrentía desde una subhoya se puede obtener utilizando combinaciones de tres elementos conceptuales: áreas de flujo sobre el terreno, canales colectores y un canal principal. La técnica de tránsito de la onda cinemática puede ser utilizada para transitar la lluvia efectiva sobre las áreas de flujo sobre el terreno.

Por otro lado, tanto las técnicas de la onda cinemática como la de Muskingum - Cunge pueden ser usadas para transitar crecientes laterales entrantes a un canal colector y aguas arriba de éste, y caudales laterales entrantes a través del canal principal. Sin embargo, las teorías de la onda cinemática y de Muskingum - Cunge para el análisis en los diferentes elementos de los canales no pueden ser entremezcladas.

En esta teoría, el elemento de flujo sobre el terreno es un canal rectangular ancho de base unitaria, en el cual el valor de la rugosidad de Manning ha sido reemplazado por un factor de rugosidad de flujo sobre el terreno. Cuando se aplica la teoría de la onda cinemática a un elemento de flujo sobre el

terreno, el caudal lateral entrante es la precipitación efectiva, y la salida es un caudal por unidad de ancho. Un elemento de flujo sobre el terreno se describe por medio de cuatro parámetros: su longitud típica de flujo sobre el terreno, su pendiente y factor de rugosidad, y el porcentaje del área de la subhoya representados por estos elementos previos.

Un área de flujo sobre el terreno es utilizada para modelar la escorrentía proveniente de usos de tierra permeables y otra área es utilizada para modelar superficies impermeables. La creciente desde los elementos de flujo sobre el terreno viaja hasta la salida de la subhoya a través de uno o dos elementos de canales sucesivos. Un canal se define por su longitud, pendiente, rugosidad, forma, ancho o diámetro, y talud de la sección transversal. El último canal en una subhoya es llamado el canal principal, y cualquier canal intermedio entre los elementos de flujo sobre el terreno y el canal principal es llamado canal colector.

Componente de tránsito en canales

Se utiliza una componente de tránsito del hidrograma de escorrentía en los canales para representar la transformación de la onda de creciente a lo largo de ellos. El dato de entrada a esta componente es un hidrograma de creciente en el punto más aguas arriba, resultante de contribuciones individuales o combinadas de escorrentía de las subhoyas y de su tránsito en canales o embalses. Si se utiliza el método de la onda cinemática, la escorrentía distribuida de los elementos de subhoyas localizadas dentro de la propia subhoya en consideración es también un dato de entrada, el cual se combina con el hidrograma de creciente más aguas arriba mencionado previamente, para ser transitados hasta el final del tramo de canal. El hidrograma es transitado hasta punto más aguas abajo del canal en estudio con base en las características geométricas y de rugosidad de éste.

El tránsito de crecientes es utilizado para simular el movimiento de la onda de creciente a través de tramos de canales y embalses. La mayoría de los métodos de tránsito de crecientes disponibles en el modelo computacional HEC-HMS están basados en la ecuación de continuidad y alguna otra relación entre el caudal y el almacenamiento o el nivel de agua. Los métodos que utiliza este modelo son: Muskingum, Muskingum - Cunge, onda cinemática, Puls modificado, de trabajo R y D, y tránsito de embalse nivel - almacenamiento. En todos estos métodos, el tránsito procede sobre la base de un tramo de canal independiente desde aguas arriba hacia aguas abajo; no se consideran efectos de remanso ni discontinuidades en la superficie del agua tales como resaltos hidráulicos u ondas de creciente de flujo rápidamente variado.

Los métodos de tránsito en embalses del modelo HEC-HMS son los que requieren datos que definen las características del almacenamiento de un tramo de tránsito o embalse. Estos métodos son: Puls modificado, de trabajo R y D, y tránsito de embalse de nivel - almacenamiento. También existen dos métodos de tránsito en HEC-HMS que están basados sobre las ordenadas del hidrograma de creciente desfasadas. Estos últimos métodos no tienen como punto de partida las características de almacenamiento del embalse, pero han sido utilizados en numerosos ríos con buenos resultados.

Uso combinado de las componentes de tránsito en canales y escorrentía superficial de las subhoyas

Se puede representar cualquier tipo de conexión de procesos de precipitación - escorrentía en las subhoyas y el tránsito en canales en la hoya hidrográfica en estudio a través de una combinación adecuada de las componentes de escorrentía superficial en las subhoyas y de tránsito en canales. La

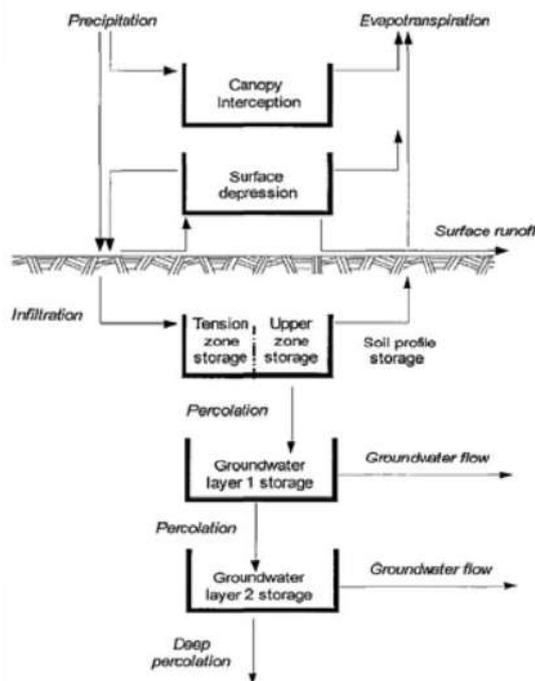
conexión de las componentes de la red de canales está implicada por el orden en el cual las componentes de los datos están arregladas. La simulación debe siempre comenzar en la parte más aguas arriba de la subhoya considerada en un ramal de la red de canales. La simulación procede hacia aguas abajo hasta que se alcanza la confluencia respectiva. Antes de simular los procesos aguas abajo de una confluencia, todas las crecientes hasta tal confluencia deben ser calculadas y transitadas hasta ese punto.

5.3.6.3. *HEC - HMS como modelo continuo (Soil Moisture Accounting)*

El modelo HEC-HMS SMA está basado en el modelo *Leavesley's Precipitation-Runoff Modeling System* (1983), representa la cuenca con una serie de capas de almacenamiento. Simula el comportamiento de la cuenca tanto en periodos húmedos como en periodos secos. Dada la precipitación y la ET el modelo estima la escorrentía superficial, la escorrentía subterránea, las perdidas por ET y la percolación profunda de toda la cuenca.

El método del *Soil Moisture Accounting (SMA)* considera cinco niveles distintos en los que la precipitación puede ser retenida o almacenada los cuales son 2 niveles para representar procesos de interceptación y captura (vegetación y superficie) y 3 niveles para representar el movimiento del agua en el suelo (infiltración y evapotranspiración).

Figura 13. Esquema básico del método *Soil Moisture Accounting (SMA)*. (U.S. Army E.E.U.U, 2020a)



Nivel 1 - Canopy interception: El nivel 1 denominado como *Canopy interception* (interceptación de la cobertura vegetal) representa la parte de la precipitación que no alcanza el suelo por ser retenida por la vegetación. La entrada en este módulo es la precipitación, mientras que la salida es la evapotranspiración potencial. Si el volumen de agua precipitada supera el agua evapotranspirada el agua pasa al nivel 2.

Nivel 2 - Surface depression storage: El nivel 2 representa el almacenamiento en depresiones superficiales, es decir, el volumen de agua retenido en las irregularidades del terreno (charcos). En este

caso la entrada es la parte de la precipitación que no es interceptada por la vegetación, mientras que la salida corresponde a la infiltración y la evapotranspiración potencial. Si el volumen de agua precipitada supera el agua evapotranspirada y a la infiltrada el agua pasa a ser escorrentía superficial.

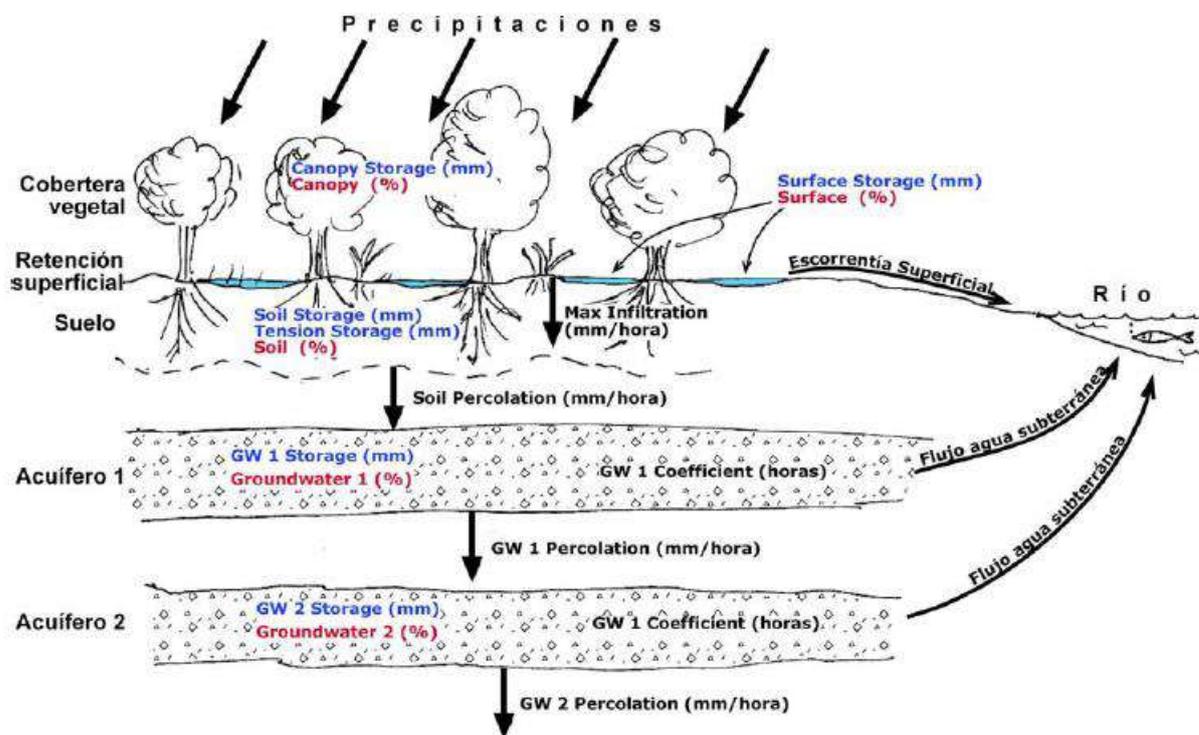
Nivel 3 - Soil profile storage: El nivel 3 representa el almacenamiento en el suelo, aquí las entradas están determinadas por la cantidad de agua infiltrada, y las salidas se representan por la percolación hacia el acuífero más superficial.

Dentro de este módulo se identifican dos zonas, la primera denominada *upper zone* es la parte del suelo que puede perder agua por ET o por percolación y corresponde al agua gravífica (por encima de la capacidad de campo), que ocupa los poros del suelo y es susceptible de ser atrapada por las raíces de las plantas o de ser arrastrada hacia abajo por gravedad. La segunda zona denominada como *tension zone*, representa la parte del agua contenida en el suelo que se pierde solo por ET, es decir, el agua adherida a las partículas del suelo, teniendo en cuenta que las raíces de las plantas pueden utilizarla, pero no moverla. Dentro de los procesos descritos, existe una condición en donde la ET primero toma agua de la *upper zone* y después de la *tension zone*.

Nivel 4 - Groundwater layer 1: Esta caracterizado por ser el acuífero más superficial, sus entradas están determinadas por la percolación del agua gravífica que no ha sido atrapada por la ET y que ha excedido la capacidad de almacenamiento delo suelo. Sus salidas son la escorrentía subterránea o percolación hacia el acuífero más profundo.

Nivel 5 - Groundwater layer 2: Esta caracterizado por ser el acuífero más subterráneo, sus entradas están determinadas por la percolación del acuífero más superficial y sus salidas son la escorrentía subterránea o percolación más profundamente que sale del sistema.

Figura 14. Esquema básico del modelo del Soil Moisture Accounting (SMA). (U.S. Army E.E.U.U, 2020a)



5.3.6.4. *Calibración del modelo - Función objetivo: optimización determinista*

Para realizar la calibración y validación de un modelo hidrológico, se requiere de métodos cuantitativos que tienen la capacidad de medir el rendimiento de las simulaciones hechas. En general estos métodos miden la variación entre los datos de salida del modelo, los cuales corresponden al hidrograma simulado y los datos medidos por una estación de aforo, que corresponden al hidrograma observado. La evaluación del desempeño está fundamentada en el cierre del balance hídrico de una cuenca, la concordancia de la forma general de la serie temporal de descargas junto con los volúmenes totales acumulados y el valor de los índices estadísticos de desempeño los cuales corresponden al error cuadrático medio, coeficientes de determinación, la desviación estándar de los datos medidos, el porcentaje de sesgo entre otros. Las medidas de bondad de ajuste típicas en la hidrológica corresponden a la eficiencia del Nash-Sutcliffe (NS) y desviación volumétrica (PBIAS), los cuales se pueden calcular mediante el uso de las siguientes ecuaciones:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - Q_{si})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - Q_{sm})^2}$$

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - Q_{si})}{\sum_{i=1}^n (Q_{oi})} * 100$$

Dónde:

- Qo: caudal observado.
- Qs: caudal simulado.
- Qom: caudal medio observado.
- n: número total de observaciones.

La valoración de ajuste de modelo, respecto a los valores NSE y PBIAS obtenidos se puede realizar a partir de los valores de referencia descritos en la Tabla 4.

Tabla 4. Valores de referencia para la evaluación de los modelos hidrológicos. (Moriasi et al, 2015)

MUY BUENO	PBIAS<±10	0.75<NASH≤1.00
BUENO	±10≤PBIAS<±15	0.65< NASH ≤0.75
SATISFACTORIO	±15≤PBIAS<±25	0.50< NASH ≤0.65
INSATISFACTORIO	PBIAS≥±25	NASH ≤0.50

El programa HEC-HMS cuenta con un módulo de optimización determinista. Este módulo mide la bondad de ajuste entre el flujo de salida simulado y el flujo observado. Dentro de este módulo se encuentra el objetivo de minimización, la cual se asocia a catorce funciones diferentes de bondad de ajuste que disminuyen a medida que aumenta la concordancia entre lo simulado y lo observado.

Por otro lado, encontramos el objetivo de maximización el cual se puede usar de dos maneras diferentes: para maximizar la propiedad de un elemento, como el volumen de flujo o la descarga máxima, la etapa del depósito, etc., o para maximizar una estadística de bondad de ajuste que aumenta su valor como bondad de ajuste aumenta. A continuación, en la Tabla 5 y Tabla 6 se presentan las funciones objetivo de minimización y en las funciones objetivo de maximización.

Tabla 5. Función objetivo de minimización. (U.S. Army E.E.U.U, 2020a)

Función objetivo de minimización	Descripción
First Lag Autocorrelation	Minimiza el sesgo sistemático en los residuos.
Maximum of Absolute Residuals	Minimiza la distancia individual más grande entre lo observado y lo simulado
Maximum of Squared Residuals	Minimiza la distancia individual más grande entre lo observado y lo simulado
Mean of Absolute Residuals	Minimiza la distancia promedio entre lo observado y lo simulado
Mean of Squared Residuals	Minimiza la distancia promedio entre lo observado y lo simulado, con mayor peso a errores más grandes
Peak-Weighted RMSE	Minimiza la distancia promedio entre lo observado y lo simulado, con un peso mayor para flujos mayores que la media
Percent Error in Discharge Volume	Minimiza la diferencia entre el volumen observado y el simulado.
Percent Error in Peak Discharge	Minimiza la diferencia entre el valor de descarga pico observado y simulado
Root Mean Square Error	Minimiza la distancia promedio entre lo observado y lo simulado, con mayor peso a errores más grandes; una elección clásica
Sum of Absolute Residuals	Minimiza la distancia promedio entre lo observado y lo simulado
Sum of Squared Residuals	Minimiza la distancia promedio entre lo observado y lo simulado, con mayor peso a errores más grandes
Time-Weighted RMSE	Minimiza la distancia promedio entre lo observado y lo simulado, con un mayor peso para los flujos cerca del final de la ventana de tiempo
Variance of Absolute Residuals	Minimizar la variación en los valores residuales.
Variance of Squared Residuals	Minimiza la variación en los valores residuales, con mayor peso a valores residuales más grandes.

Tabla 6. Función objetivo de maximización. (U.S. Army E.E.U.U, 2020a)

Función objetivo	Descripción
Coefficient of Determination	Maximiza la varianza explicada en los datos observados. También se llama R^2 .
Discharge Volume	Maximiza el volumen total descargado en la ventana de tiempo de la función objetivo.
Index of Agreement	Maximiza la estadística adimensional del índice de acuerdo.
Nash Sutcliffe	Maximiza la estadística adimensional de eficiencia <i>Nash-Sutcliffe</i> .
Peak Discharge	Maximiza la descarga máxima única sobre la ventana de tiempo de función objetivo.
Peak Elevation	Solo elemento de depósito. Maximiza la elevación máxima individual del yacimiento sobre la ventana de tiempo de la función objetivo.
Relative Index of Agreement	Maximiza la estadística adimensional del índice de acuerdo con menos peso para valores grandes
Relative Nash Sutcliffe	Maximiza la estadística de eficiencia <i>Nash Sutcliffe</i> sin dimensiones con menos peso a valores grandes

La maximización de una estadística de series temporales de elementos, como el volumen de flujo, la descarga máxima o, especialmente, la elevación de la piscina del reservorio máximo, tiene aplicaciones en los estudios de seguridad de presas. Sin embargo, también estas funciones son comúnmente utilizadas para realizar la calibración de modelos hidrológicos y son la base para validar el modelo en el caso de estudio.

5.4. Análisis del cambio climático

5.4.1. Proyecciones de cambio climático

Con el fin de caracterizar los escenarios climáticos futuros, se han utilizado modelos globales denominados GCMs (*Global Climate Models*). Estos modelos son una representación matemática de los diferentes componentes del sistema climático, modelando mediante simulación numérica las complejas interacciones entre la atmósfera, la superficie terrestre, los océanos y el hielo marino. Por las razones expuestas, este tipo de modelos se usan para analizar las dinámicas del sistema meteorológico y climático con la finalidad de tener proyecciones del comportamiento del clima en el futuro.

Existen otras variables complejas de simular debido a que dependen de la evolución socioeconómica global, una de ellas corresponde a la concentración de dióxido de carbono (CO₂) en la atmósfera. Para realizar una predicción de esta variable, se han establecido escenarios de concentraciones de CO₂, a partir de las rutas de concentración representativas (*Representative Concentration Pathways o RCP*). Estas rutas buscan representar diferentes escenarios de emisión de gases, dándole un peso importante a las que provienen del desarrollo industrial y también del desarrollo agrícola (usos del suelo).

Debido a la incertidumbre que tienden a tener las variables utilizadas por los modelos climáticos globales, se han materializado las mismas mediante un espectro de opciones de modelado. Las representaciones de esta incertidumbre desde el punto de vista cuantitativo, tienden a propagarse en modelos de impacto, un claro ejemplo de esto corresponde a los modelos relacionados con la gestión de sistemas hídricos, de cultivos y económicos, los cuales son frecuentemente usados para crear planes y estrategias en la toma de decisiones.

Con la resolución de los modelos climáticos globales (GCMs) (~200 km) no es posible simular procesos locales inducidos, debido a que la misma no deja resolver las heterogeneidades regionales determinantes y, por lo tanto, no es adecuada para analizar los impactos del cambio climático a escala regional o local en diversos sectores socioeconómicos (ambiental, hidrológico, energético, costas, etc.). Es por eso que sobre los GCMs se deben realizar proyecciones regionales mediante la aplicación de técnicas estadísticas (*downscaling*) que permiten pasar de una escala global a una escala regional. Con los escenarios regionalizados de cambio climático, se obtienen proyecciones del clima futuro en un área geográfica determinada, las cuales cuentan con suficiente resolución espacial y heterogeneidad climática de la región de interés.

A nivel Europa, los procesos *downscaling* y la proyección de los GCM, está amparada bajo la iniciativa CORDEX (*Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment*), fundamentada en los modelos globales y escenarios del último informe AR5 del IPCC. Dichas proyecciones de cambio climático se han elaborado y actualizado en diversos proyectos europeos de investigación: PRUDENCE (2001-

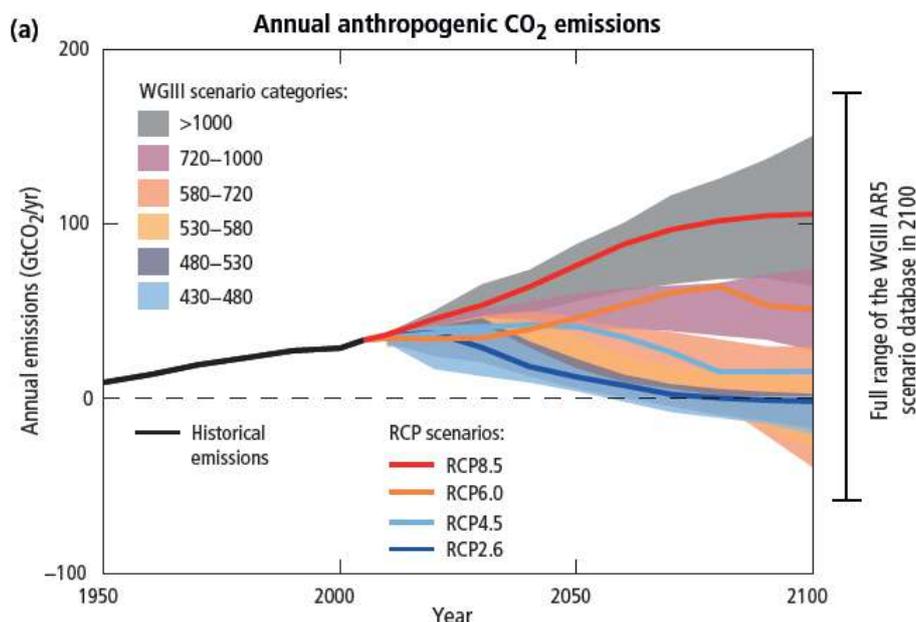
2004; 50km), ENSEMBLES (2004-2009; 25km), y actualmente EURO-CORDEX (Jacob y otros, 2014), ofreciendo modelaciones para un rango que cubre Europa a 10 km de resolución. (CORDEX, 2020)

Para este estudio, se han definido dos escenarios de emisión correspondientes al RCP 4.5 y RCP 8.5 los cuales representan diferentes tasas de crecimiento de las emisiones de carbono hasta el año 2040, fecha a partir de la cual se habrá establecido las medidas adecuadas para reducirlas. En la Figura 15 se presentan de manera gráfica los diferentes escenarios de emisiones de gases efecto invernadero descritas por el *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC, 2020), en donde a parte de los escenarios de estudio, se pueden ver otros intermedios de emisiones como el RCP 2.6 y el RCP 6.0.

Dentro de cada previsión climáticas están incluidos datos de temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación con resolución temporal a nivel diario, para los periodos comprendidos entre el año 1950 hasta el año 2005 y de 2012 a 2099:

- Histórica: contiene datos desde 1950 hasta 2005(retrospectiva).
- RCP 85: contiene datos desde 2006 a 2099 (ejecución prospectiva) considerando el escenario RCP 8.5.
- RCP 45: contiene datos desde 2006 a 2099 (ejecución prospectiva) considerando el escenario RCP 4.5.

Figura 15. Escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero. (IPCC, 2020)



5.4.2. Análisis y selección de modelos de cambio climático

La metodología para evaluar la influencia e impacto que tendrá el cambio climático en el comportamiento de la temperatura máxima, la temperatura mínima y la precipitación, corresponde a la selección del modelo que se comporte de forma similar en el periodo histórico (1959-2011). Para esto se seleccionan el modelo con los estadísticos que más mejor se correlacionen con las series históricas de la estación o estaciones meteorológicas seleccionadas. Los estadísticos que se analizan para seleccionar el modelo corresponden a:

- Precipitación media diaria (μ_{24})
- Varianza diaria (σ_{24})
- Proporción de días secos (ϕ_{24})
- Asimetría diaria (γ_{24})
- Coeficiente de auto correlación diaria lag-1 (ρ_{24}^1)
- Probabilidad de dos días húmedos consecutivos (ϕ_{WW})
- Probabilidad de dos días secos consecutivos (ϕ_{DD})

Después de la selección del modelo se localiza el nodo más cercano a la estación o estaciones seleccionadas en el estudio y se extrae la información temperatura máxima, temperatura mínima y de precipitación.

5.5. Corrección del modelo climático

Las variables obtenidas de los modelos climáticos globales, pueden presentar errores sistemáticos como consecuencia de su resolución espacial, la simplificación de los procesos físicos, mala definición de los contornos, etc. En general, estos modelos presentan sesgos importantes, los cuales deben ser corregidos utilizando estaciones de referencia (Cannon et al., 2015) para poderlos utilizar directamente en el campo de la hidrología. Para el campo de la hidrología la corrección de sesgo puede ser aplicada a las variables es estudio las cuales para este caso corresponden a la precipitación y la temperatura.

5.5.1. Precipitación

Para realizar el ajuste de sesgo y además poder realizar un régimen extremal adecuado entre los datos de precipitación observados y la simulación para el periodo historio de los GCM, es importante contar con una serie horaria para los escenarios de cambio climático. Por esta razón la metodología usada permite hacer el ajuste por sesgo existente y obtener una serie horaria.

Para la implementación de esta metodología, se deben tomar los estadísticos calculados a partir de las series observadas de precipitación para el periodo de referencia y para los diferentes RCMs, durante el siglo XXI. Dichos valores se deben combinar con el fin de contar con una serie de estadísticas para cada estación climática, es decir, verano, otoño, invierno y primavera del calendario (A Burton *et al*., 2010). El enfoque en el que está basada la corrección de sesgo implementada para actualizar los estadísticos de precipitación para clima futuro se fundamenta en los factores de cambio o enfoque delta (Prudhomme et al., 2002). Esta metodología se fundamenta en la hipótesis que los cambios en los estadísticos calculados a partir de las series observadas para el clima futuro son equivalentes a los cambios en los estadísticos de precipitación simulados por los RCMs.

Posteriormente, los factores de cambios, $\alpha_{s,m}^{RCM}$, deben calcularse para cada uno de los estadísticos descritos en el apartado anterior, s, y también para el modelo RCM que se selecciones, entre el período de control (Con) y los periodos futuros evaluados (Fut), teniendo en cuenta que el procedimiento se debe replicar para cada estación del año, m.

Seguido de esto se debe elegir la serie temporal del modelo RCM seleccionado, haciendo correspondencia con la celda de la malla NEXT GDDP más cercana a la localización de la estación pluviométrica seleccionada. Se debe definir un periodo de control, (Con) el cual para este estudio está

referido al comprendido entre el año 1959-2011, mientras que el periodo futuro (Fut) se debe dividir en tres plazos, los cuales corresponden a los períodos 2012-2040 (para el corto plazo), 2041-2070 (para el mediano plazo) y 2071-2100 (para el largo plazo). Para cada estadístico y cada estación del año se obtendrá un vector de factor de cambio, definido como:

$$\alpha_{s,m}^{RCM} = \frac{S_{Fut,m}^{RCM}}{S_{Con,m}^{RCM}}$$

Previo al cálculo de los factores de cambio de los estadísticos ϕ , ϕ_{WW} y ϕ_{DD} los mismos deben ser transformados mediante la ecuación de transformación invertible referida en (A. Burton *et al*), 2010), dado que solo pueden tomar valores en un rango de 0 a 1 el cual se considera limitado. Y y X representan el valor original y el transformado para los estadísticos ϕ , ϕ_{WW} y ϕ_{DD} , respectivamente.

$$Y = \frac{X}{1 - X}$$

Mediante el uso de la metodología descrita en el Capítulo 5.2.1 se pueden generar bases de datos de estadísticos de precipitación para los diferentes escenarios de cambio climático evaluados. Por medio del método RFB, el cual fue ajustado en el periodo historio a partir de la información disponible instrumental horaria, se pueden predecir los estadísticos a nivel sub diario de la precipitación para cada los escenarios de cambio climático en estudio.

Por lo expuesto, previamente deben ser actualizados los predictores estadísticos diarios de precipitación y temperatura a partir del método delta para el modelo de cambio climático seleccionado, en cada uno de los escenarios de estudio (RCP 4.5y 8.5) en los periodos (2006-2040, 2041-2070 y 2071-2100). Finalmente, haciendo uso del de la metodología de desagregación temporal y a partir del modelo NSRP se reconstruye la serie horaria de precipitación del modelo de cambio climático seleccionada en cada uno de los escenarios para los periodos descritos.

5.5.2. Temperatura

Como se mencionó previamente, para el caso de la temperatura no es necesario disminuir la resolución temporal de los datos, es decir, con los datos de temperatura diaria, es posible utilizar directamente un método que permite directamente corregir el sesgo. Este método corresponde al mapeo de cuantiles (*q-q mapping*), el cual permite corregir los resultados de las series NEX-GDDP de temperatura y consiste en calibrar la función de distribución acumulada de las series modeladas por los modelos de cambio climático, a partir de la función de distribución acumulada de las series observadas. La metodología se rige por la siguiente ecuación:

$$q_m^* = F_o^{-1}(F_m(q_m))$$

Donde:

q_m y q_m^* : cuantiles simulados y corregidos del modelo climático global

F_m y F_o : CDFs empíricas simuladas y observadas.

Es necesario realizar una extrapolación lineal, dada la escasez de valores para cuantiles elevados los cuales se encuentran por encima del cuantil 0.9. Para esta extrapolación, se realiza un ajuste lineal entre el cuantil 0.9 y el 0.99 a los cuantiles de temperatura observada, que es utilizada para hacer la

transformación del valor del modelo en el equivalente de los valores observados. El procedimiento descrito se utiliza para obtener un mapeo adecuado de los valores del modelo en el escenario futuro que superan el valor máximo del modelo bajo el escenario actual. De no realizarse el ajuste lineal, todos esos valores se mapearían al valor máximo observado histórico y no se generarían extremos superiores a los históricos en los escenarios futuros.

La metodología del *q-q mapping* puede utilizarse para tener en cuenta los cambios en la distribución de la variable de interés entre diferentes periodos temporales. Su ecuación se describe a continuación:

$$q_{raw}^* = F_{obs}^{-1}(F_{mod}(q_{raw}))$$

Donde:

q_{raw} y q_{raw}^* : corresponden a los cuantiles de la serie del GCM original y corregidas para los periodos 2006-2040, 2041-2070 y 2071-2100

F_{mod} y F_{obs} : corresponden a las CDF empírica de la serie de los GCMs y de la serie observada diaria para el periodo de referencia 1950-2005, respectivamente.

Las series observada en este caso corresponden con las series con resolución temporal diaria descrita en los datos de partida.

5.6. Metodología para la construcción del modelo hidráulico en la zona de proyecto

Para la elaboración del modelo hidráulico, es necesario hacer uso de herramientas computacionales, las cuales se aplican con el fin de obtener las áreas susceptibles a inundación en un área determinada, previa a la utilización de los modelos se deben definir características relacionadas con el terreno, condiciones de flujo, condiciones de contorno, coeficientes de rugosidad, entre otros parámetros, los cuales serán descritos en este capítulo.

5.6.1. Modelo HEC RAS

El programa HEC-RAS fue elaborado por el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos de Norte América y diseñado para uso interactivo en un entorno multitarea (*HEC-RA>*, n.d.). El sistema se compone de una interfaz gráfica de usuario (GUI), componentes de análisis separados, almacenamiento de datos y capacidades de gestión, gráficos e informes. El sistema HEC-RAS contiene los siguientes componentes de análisis de ríos para:

- Cálculos de perfil de superficie de agua de flujo constante; (1)
- Simulación de flujo inestable unidimensional y / o bidimensional; (2)
- Cálculos de transporte de sedimentos límite de flujo casi inestable o totalmente inestable; (3)
- Análisis de calidad del agua. (4)

Un elemento clave es que los cuatro componentes usan una representación común de datos geométricos y rutinas comunes de cálculo geométrico e hidráulico. Además de los cuatro componentes de análisis de ríos, el sistema contiene varias características de diseño hidráulico que pueden involucrarse una vez que se calculan los perfiles de la superficie del agua.

Este modelo simula la hidráulica del flujo para canales de cualquier tipo de sección transversal bajo flujo gradualmente variado, trabajando de acuerdo con la ecuación de Bernoulli.

$$Z_1 + Y_1 + (V_1^2/2g) = Z_2 + Y_2 + (V_2^2/2g) + h$$

Donde:

- Z: Nivel del fondo del canal aguas arriba (1) y abajo (2) del tramo, denominado este término cabeza de posición, en m.
- Y: Lámina de agua aguas arriba (1) y abajo (2) del tramo, denominado este término cabeza de presión, en m.
- $V^2/2g$: Cabeza de velocidad aguas arriba (1) y abajo del tramo (2), denominado este término cabeza de velocidad, en m.
- h: Pérdidas de energía en el tramo, dividiéndose en pérdidas por fricción y localizadas, en m.

Las pérdidas por fricción en el tramo h_f para flujo gradualmente variado en un tramo de longitud L del canal se pueden expresar por medio de la ecuación de Manning:

$$h_f = ((S_{e_1} + S_{e_2}) / 2) L$$

Donde:

S_{e_1} y S_{e_2} corresponden a los valores de la pendiente de la línea de energía aguas arriba (1) y abajo (2) del tramo. Estos valores se expresan por medio de la fórmula de Manning para flujo uniforme en cada sección del tramo:

$$S_e = (n^2 V^2 / R^{4/3})$$

Donde:

- n: Coeficiente de rugosidad de Manning, valor adimensional.
- V: Velocidad promedio del agua, en m/s.
- R: Radio hidráulico, en m, igual al área hidráulica A, en m^2 , dividida entre el perímetro mojado P, en m.

Por otro lado, las pérdidas localizadas en un punto del canal se expresan mediante la ecuación:

$$h_l = K ABS ((V_1^2 / 2g) - (V_2^2 / 2g))$$

Donde:

- K: Coeficiente de pérdidas localizadas, adimensional.
- V: Velocidad promedio aguas arriba (1) y aguas abajo (2) del punto o tramo en donde se produce la pérdida localizada, en m/s.
- ABS: Valor absoluto del término.

5.6.2. ArcGIS Versión 10.5.1 – HEC-GeoRAS

ArcGIS es un completo sistema que ofrece paquetes de software, los cuales permiten organizar analizar, recopilar, administrar, compartir y distribuir información geográfica, fue creado por ESRI y mediante su herramienta ArcMap se pueden generar modelos digitales del terreno (MDT) a partir de nubes de datos topográficos de una región específica tales como curvas de nivel, puntos de elevación, etc. (ESRI, 2020)

Una de las extensiones de este software es HEC-GeoRAS, la cual proporciona al usuario un conjunto de herramientas y utilidades para la preparación de datos SIG, con el fin de tener información del MDT tal como líneas centrales de la corriente, líneas centrales de la ruta de flujo, los bancos de canales principales, las líneas de corte de sección transversal, uso del suelo, alineación de diques, áreas de flujo ineficaz y áreas de almacenamiento, para el análisis GIS para mapeo de llanuras de inundación, cálculos de daños por inundación, restauración del ecosistema y respuesta y preparación de advertencia de inundación.

5.6.3. Coeficiente de Rugosidad de Manning

En 1889 el ingeniero irlandés Robert Manning presentó una ecuación, para el cálculo de flujo uniforme en canales abiertos. Debido a la simplicidad de su forma y a los resultados satisfactorios que arroja en aplicaciones prácticas, la ecuación de Manning se ha convertido en la más utilizada de todas las ecuaciones de flujo uniforme, dentro de esta ecuación se incluye el coeficiente de rugosidad del canal. (Chow V.T., Maidment D.R., 1998)

La mayoría de los cálculos hidráulicos relacionados con las estimaciones indirectas de descarga requieren una evaluación de las características de rugosidad del canal. En ausencia de un procedimiento cuantitativo satisfactorio, esta evaluación sigue siendo principalmente un arte.

La capacidad de evaluar los coeficientes de rugosidad debe desarrollarse a través de la experiencia. Una forma de obtener esta experiencia es examinando y familiarizándose con la aparición de algunos canales típicos cuyos coeficientes de rugosidad son conocidos.

Chow recopiló una gran cantidad de coeficientes de rugosidad para canales artificiales con buen mantenimiento presentando los valores mínimo, normal y máximo de n para diferentes tipos de superficies (Chow V.T., Maidment D.R., 1998). Algunos de los valores recopilados y presentados en el texto de la referencia, se presentan en la Tabla 7.

Tabla 7. Valores del coeficiente de rugosidad n de Manning (Chow V.T., Maidment D.R., 1998)

Descripción de la corriente	Mínimo	Normal	Máximo
A Canales naturales			
A.1 Cursos secundarios (ancho de la superficie libre en crecida < 30 m)			
<i>A.1.1 Cursos en planicies</i>			
- Limpios, rectos, sin fallas ni pozos	0,025	0,030	0,033
- Rectos con algunas piedras y pastos	0,030	0,035	0,040
- Limpios con meandros, con algunos pozos y bancos	0,033	0,040	0,045
- Meandros con algunas piedras y pastos	0,035	0,045	0,050
- Meandros con muchas piedras	0,045	0,050	0,060
- Tramos sucios, con pastos y pozos profundos	0,050	0,070	0,080
- Tramo con mucho pasto, pozos profundos y cauce en crecida con muchos arbustos y matorral	0,075	0,100	0,150
<i>A.1.2 Cursos montañosos, carentes de vegetación en el fondo, laderas con pendientes pronunciadas y árboles y arbustos en las laderas que se sumergen en niveles de crecida</i>			
- Cauce de grava, cantos rodados y algunas rocas	0,030	0,040	0,050
- Cauce de cantos rodados, con grandes rocas	0,040	0,050	0,070
A.2 Cursos en planicies inundadas			
<i>A.2.1 Zonas de pastos, sin arbustos</i>			
- Pasto corto	0,025	0,030	0,035
- Pasto alto	0,030	0,035	0,050
<i>A.2.2 Zonas cultivadas</i>			
- Sin cultivo	0,020	0,030	0,030
- Cultivos sembrados en línea en fase de madurez fisiológica	0,025	0,035	0,045
- Cultivos sembrados a voleo en fase de madurez fisiológica	0,030	0,040	0,050
<i>A.2.3 Zonas arbustivas</i>			
- Escasos arbustos y pasto abundante	0,035	0,050	0,070
- Pequeños árboles y arbustos sin follaje (parada invernal)	0,035	0,050	0,060
- Pequeños árboles y arbustos con follaje (fase vegetativa)	0,040	0,060	0,080
- Arbustos medianos a densos durante la parada invernal	0,045	0,070	0,110
- Arbustos medianos a densos durante la fase vegetativa	0,070	0,100	0,160
<i>A.2.4 Zonas arbóreas</i>			
- Sauces densos, temporada invernal	0,110	0,150	0,200
- Terreno claro con ramas sin brotes	0,030	0,040	0,050
- Terreno claro con ramas con gran crecimiento de brotes	0,050	0,060	0,080
- Zonas de explotación maderera con árboles caídos, poco crecimiento en las zonas bajas y nivel de inundación por debajo de las ramas	0,080	0,100	0,120
- Zonas de explotación maderera con árboles caídos, poco crecimiento en las zonas bajas y nivel de inundación que alcanza a las ramas	0,100	0,120	0,160
A.3 Cursos importantes (ancho de la superficie libre en crecida > 30 m)			
En este caso, los valores del coeficiente n son inferiores a los correspondientes de cauces secundarios análogos, ya que los bancos ofrecen una resistencia efectiva menor,			
- Sección regular sin rocas ni arbustos	0,025		0,060
- Sección irregular y rugosa	0,035		0,100

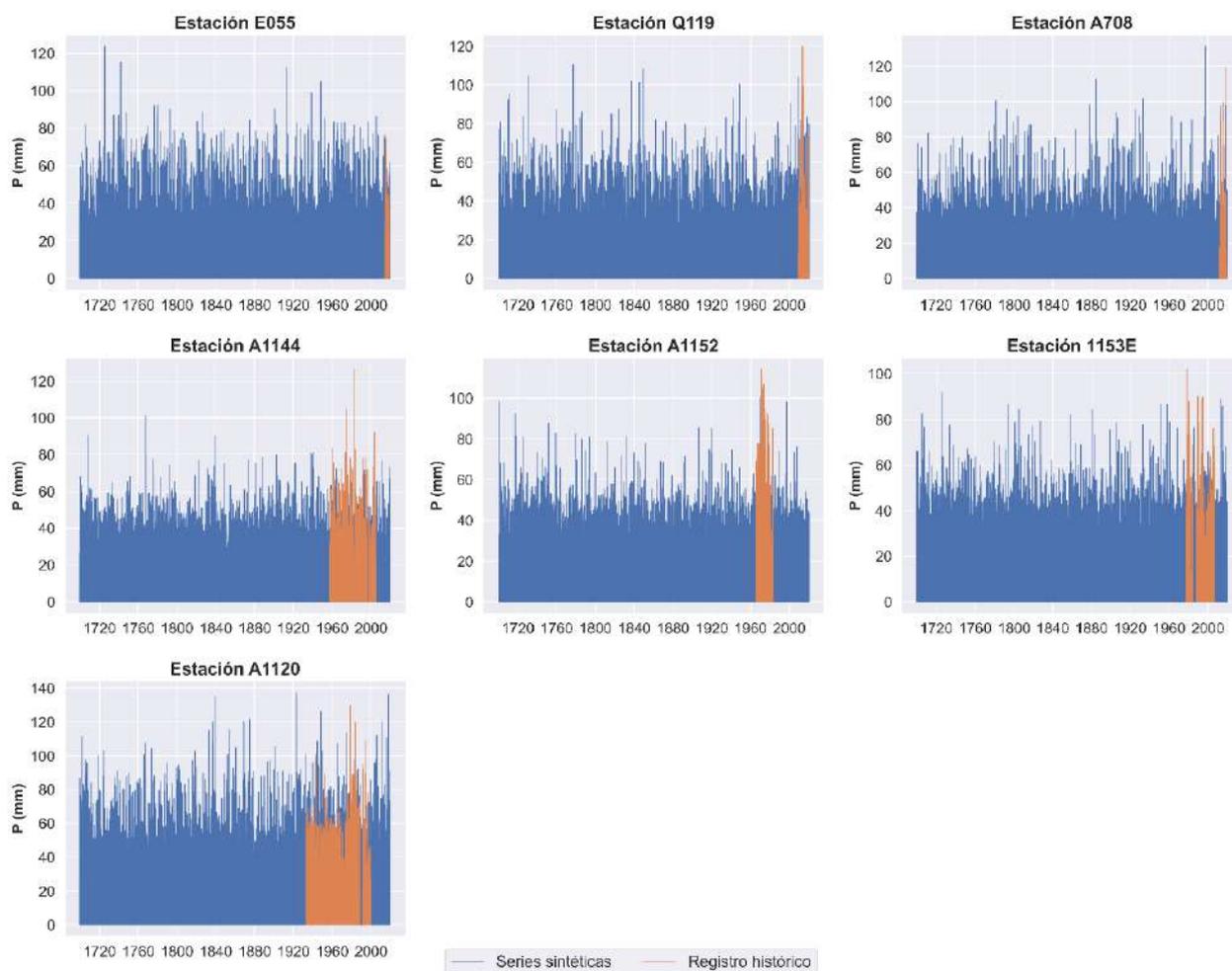
6. Análisis de resultados

6.1. Análisis de resultados caracterización climática de la zona de estudio

6.1.1. Análisis y resultados de la precipitación

Con los valores de la precipitación horaria y diaria registrada por las estaciones seleccionadas en la zona de proyecto y a partir del método de desagregación temporal descrito en la metodología, se realizó la reconstrucción de lluvias horarias sintéticas. Los datos generados corresponden a datos de precipitación total horaria, comprendida entre el año 1700 a 2020, lo que equivale a un total de 320 años generados, los cuales se consideran suficientes para realizar la caracterización extremal de la zona de estudio. En la Figura 16 se representan los datos generados en color azul, mientras que los datos registrados por cada estación se presentan en color naranja.

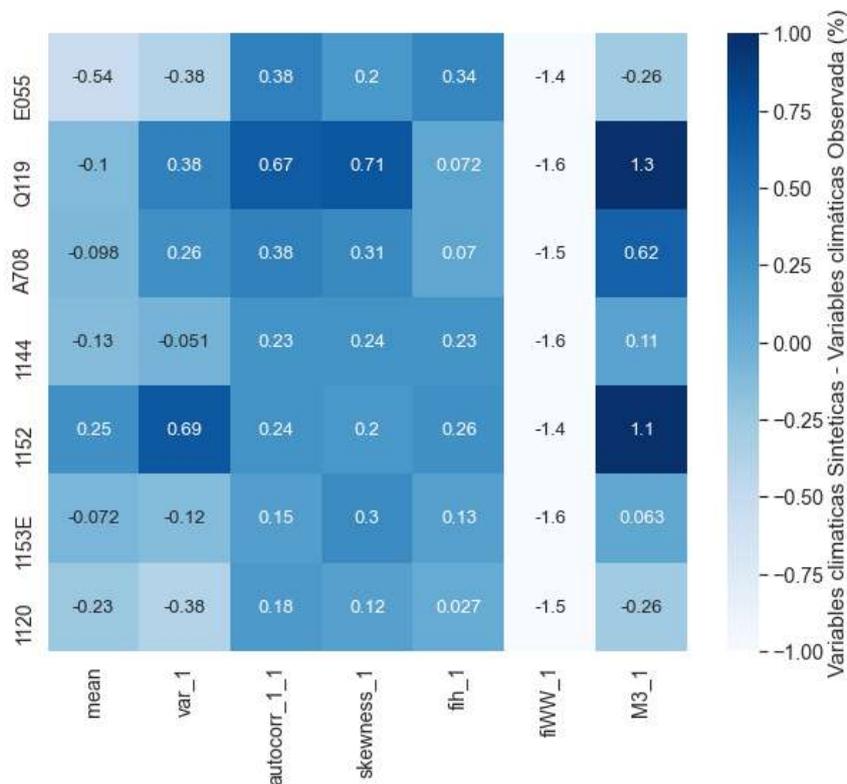
Figura 16. Lluvias horarias sintéticamente a partir de los datos registrados por las estaciones pluviométricas en la zona de proyecto.



Para validar los datos de precipitación generados sintéticamente con respecto a las series registradas por las estaciones pluviométricas, se realizó el cálculo de los estadísticos descritos en el Capítulo 5.4.2.

y posteriormente se calculó la variación porcentual de uno, comparando las series sintéticas, respecto a las series reales. Los resultados de la evaluación comparativa se presentan en la Figura 17.

Figura 17. Comparativa entre diversos estadísticos generados entre las series de precipitación registradas en las estaciones de precipitación y las series sintéticas reconstruidas en el periodo de referencia 1700 - 2019 | mean -Media; var_1- varianza 1 día; autocorr_1_1 - Autocorrelación con un lag de 1 día; fih_1 – Proporción de días secos; fiww_1 – probabilidad de días húmedos consecutivos; fiDD_1 – probabilidad de días secos consecutivos; Skewness_1 – Asimetría diaria).



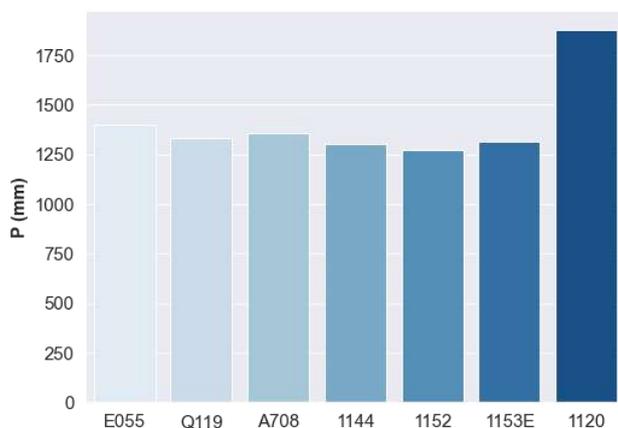
En la Figura 17 se puede ver que la diferencia de las medias más elevada corresponde a la estación E055, con respecto a las otras estaciones. Analizando el estadístico de la varianza, se pueden apreciar diferencias importantes en la estación 1152, seguida de la estación E055 y Q119. En cuanto al comportamiento de los otros estadísticos evaluados, presentan un comportamiento similar al de la media y la varianza, sin embargo, los cambios más significativos se presentan en el estadístico fiww, que representa la probabilidad de días húmedos consecutivos, dado a que esta variable el que mayor incertidumbre presenta. Para conocer el comportamiento de la precipitación se calcularon los valores medios de la precipitación total a nivel multianual para la información reconstruida sintéticamente en cada una de las estaciones, los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 8 y se representan gráficamente en la Figura 18.

Tabla 8. Valores medios de la precipitación total anual a nivel multianual para las estaciones seleccionadas.

Estación	E055	Q119	A708	A1144	A1152	1153E	A1120
P (mm)	1397.49	1335.66	1357.36	1304.00	1271.09	1316.52	1880.14

Teniendo en cuenta la localización de las estaciones, se observa que la cantidad de agua precipitada incrementa en la zona alta de la cuenca, siendo la estación 1120 la que se localiza en la parte más alta.

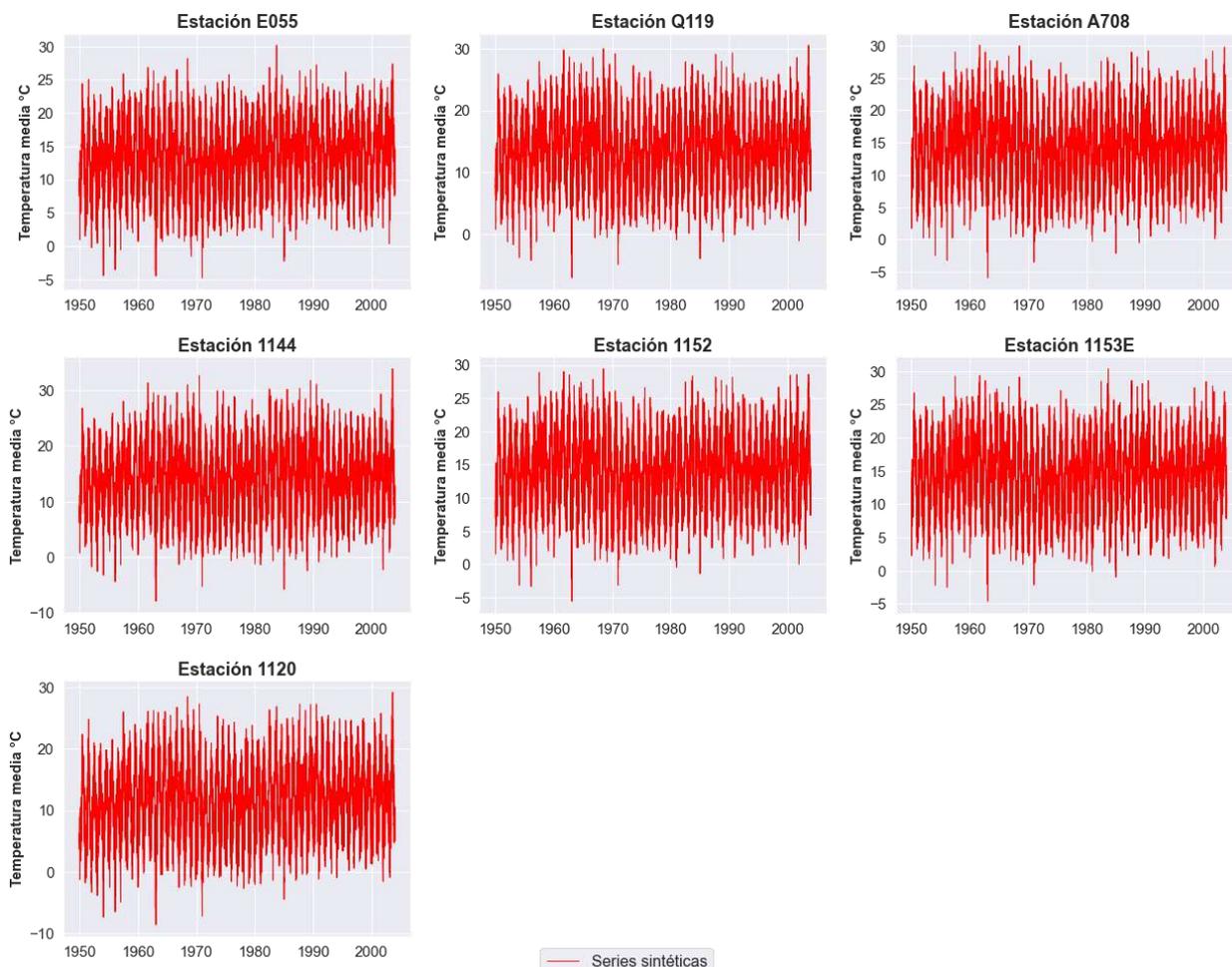
Figura 18. Valores medios de la precipitación total anual a nivel multianual para las estaciones seleccionadas.



6.1.2. Análisis y resultados de la temperatura

Para el caso de la temperatura no fue necesario realizar la simulación sintética de datos a nivel horario, ya que los registros diarios registrados por las estaciones climatológicas se consideran suficientes para analizar el comportamiento histórico de esta variable. Con el fin de analizar el comportamiento histórico de esta variable se representó la temperatura media diaria para un intervalo de tiempo comprendido entre el año 1950 a 2020, los resultados se representan en la Figura 19.

Figura 19. Comportamiento de la temperatura media diaria en la zona de proyecto.

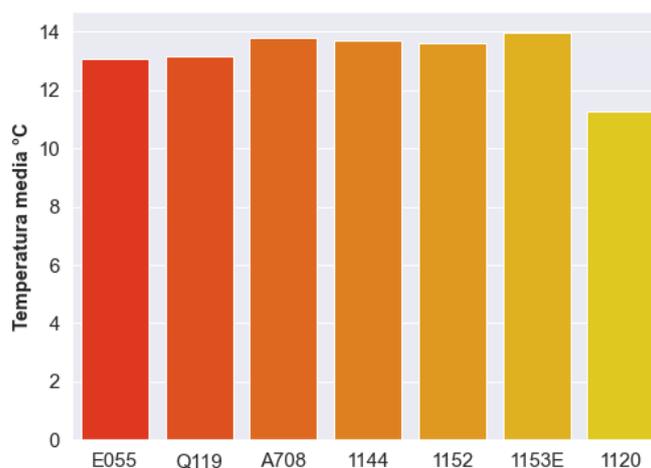


De igual forma al igual que con la variable anterior se calculó el valor promedio anual a nivel multianual para la información registrada en cada una de las estaciones, los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 9 y se representan gráficamente en la Figura 20.

Tabla 9. Temperatura media anual a nivel multianual para las estaciones seleccionadas.

Estadístico	E055	Q119	A708	1144	1152	1153E	1120
Media (°C)	13.06	13.17	13.77	13.68	13.59	13.98	11.29
Std (°C)	4.73	5.24	5.07	5.64	4.97	4.91	5.52

Figura 20. Temperatura media anual a nivel multianual para las estaciones pluviométricas seleccionadas.



Teniendo en cuenta la localización de las estaciones, se observa que la temperatura media disminuye en la zona alta de la cuenca, siendo la estación 1120 la que se localiza en la parte más alta.

6.1. Análisis y resultados de la modelación hidrológica en la zona de estudio

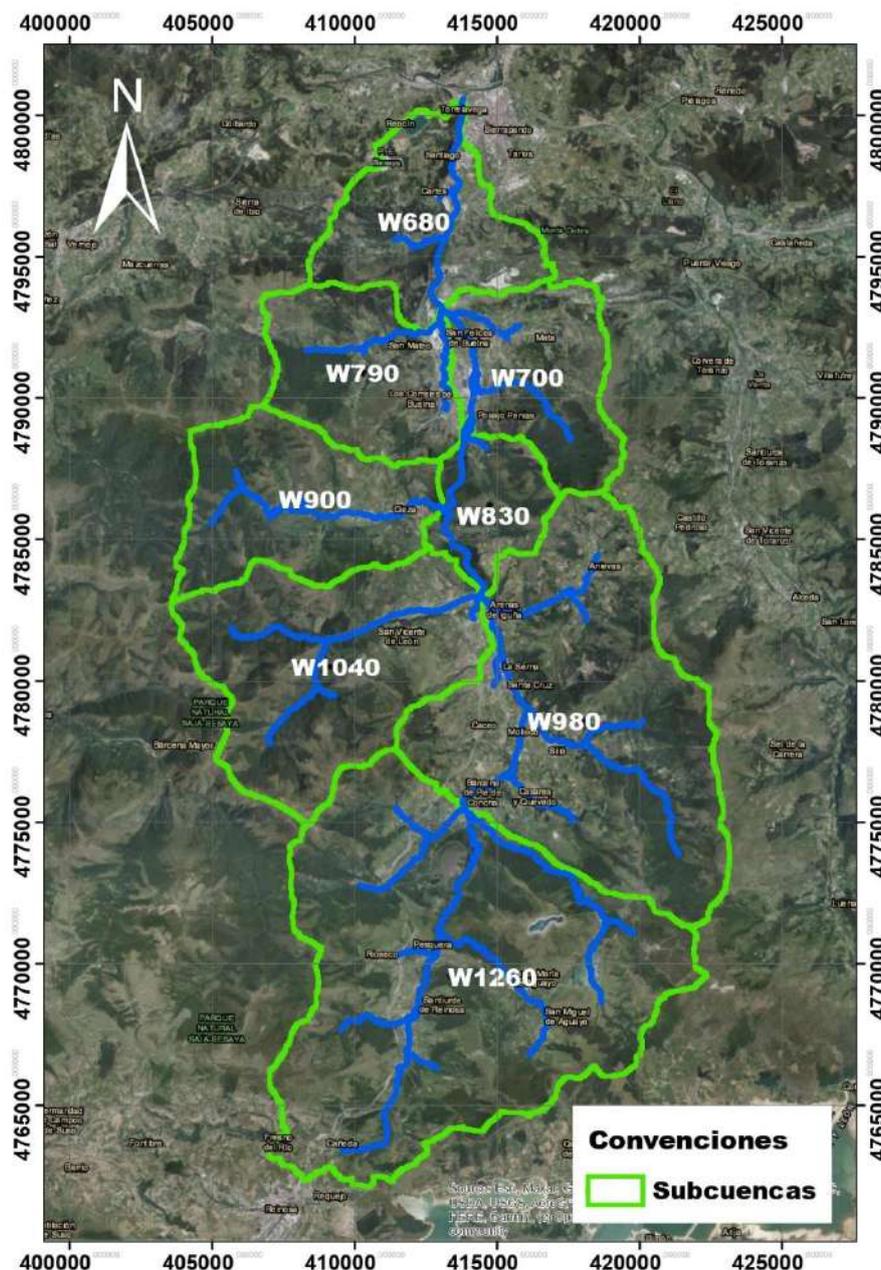
6.1.1. Resultados de las características geomorfológicas de las subcuencas

Con el fin de establecer los caudales en la cuenca de estudio, se determinaron las principales características geomorfológicas. En la Tabla 10, se presentan las áreas, la longitud del cauce principal y el cálculo de la pendiente ponderada para la cuenca en estudio, mientras que en la Figura 21 se presenta la distribución espacial.

Tabla 10 Características geomorfológicas de las sub cuencas en la zona de estudio.

NOMBRE CUENCA	ÁREA CUENCA (km ²)	LONGITUD DEL CAUCE (km)	Cota máxima. (m)	Cota mínima (m)	ΔH (m)	PENDIENTE PONDERADA DEL CAUCE S (m/m)
W680	36.09	12.29	705.54	10.86	694.7	0.05654
W790	33.82	9.57	792.70	60.97	731.7	0.07643
W700	32.99	11.45	810.04	60.97	749.1	0.06541
W830	17.18	9.35	478.22	93.53	384.7	0.04115
W900	42.17	14.55	963.52	126.73	836.8	0.05751
W1040	64.29	14.79	1220.30	158.44	1061.9	0.07181
W980	101.79	17.41	1219.74	159.30	1060.4	0.06090
W1260	139.42	21.52	1415.01	283.89	1131.1	0.05255

Figura 21. Distribución espacial de las subcuencas en el área de estudio.



6.1.2. Análisis y resultados de los tiempos de concentración

Con el fin de encontrar la duración de las lluvias de diseño se ha seleccionado la mediana de los valores de tiempos de concentración analizados. En este caso, la mediana se considera un valor más real del tiempo de concentración que el valor medio, debido a que representa un valor característico típico del tiempo de concentración. Además de acuerdo a las referencias bibliográficas citadas en la descripción metodológica del estudio, se ha seleccionado un tiempo de concentración mínimo de 15 minutos, el cual no depende de las características de la cuenca. En la Tabla 11. Tiempos de concentración se presentan los tiempos de concentración calculados, así como el tiempo seleccionado, los cuales se usarán para realizar el cálculo de los hidrogramas para la condición extremal.

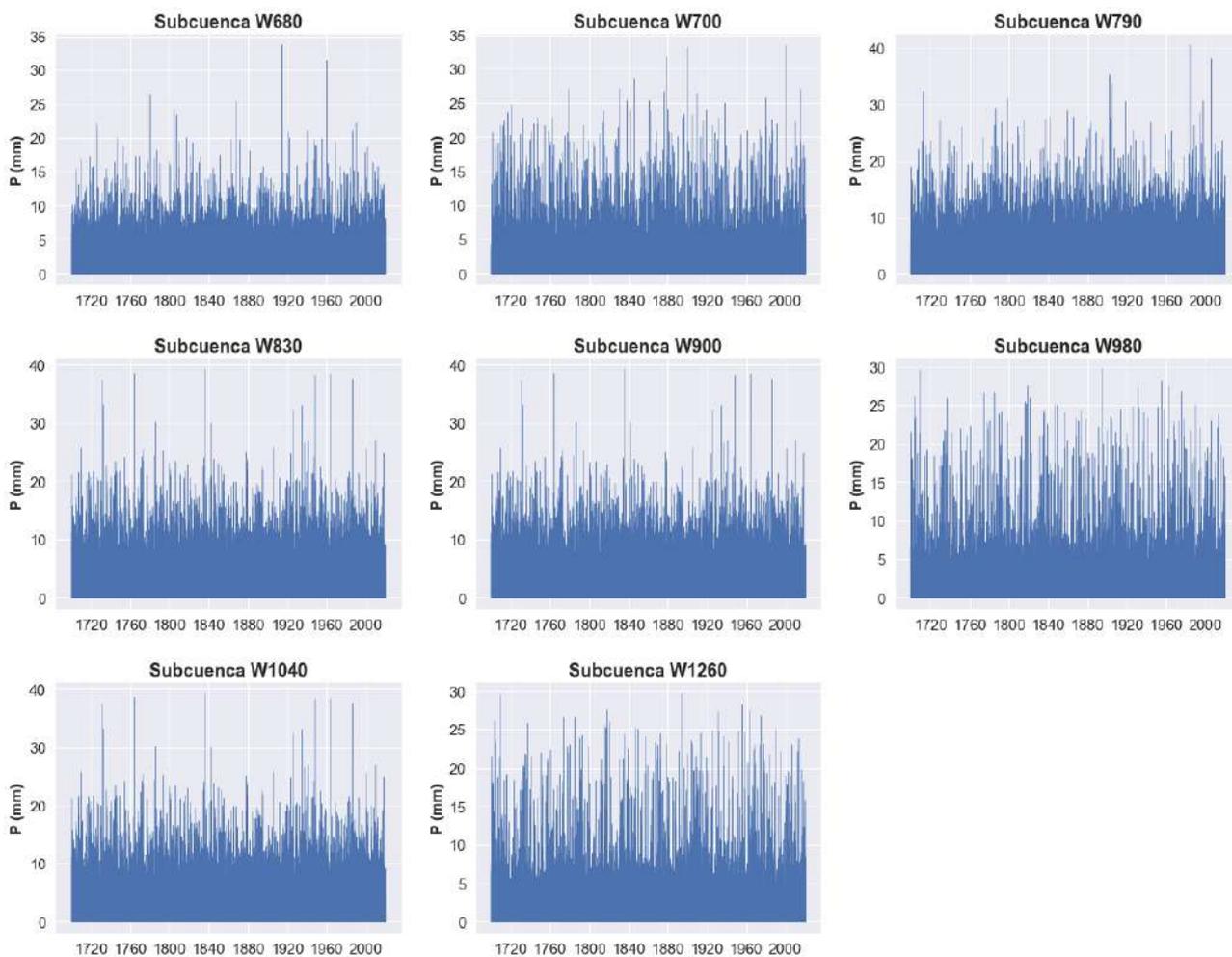
Tabla 11. Tiempos de concentración de las subcuencas en la zona de estudio.

CUENCA	KIRPICH (min)	TÉMEZ (min)	GIANDOTTI (min)	VT CHOW (min)	CUERPO DE INGENIEROS (min)	WILLIAMS (min)	JOHNSTONE Y CROSS (min)	SCS-RANSE R (min)	VENTURAS HERAS (min)	HATHA WAY (min)	MEDIANA (min)	t_{lag} (min)
W680	82.91	85.37	120.82	204.56	195.14	220.47	199.42	82.93	85.37	166.25	143.54	86.12
W790	60.92	66.90	104.31	158.32	152.44	162.78	163.24	60.93	66.90	137.88	121.09	72.66
W700	74.25	78.79	110.02	186.62	179.91	201.38	185.62	74.27	78.79	155.48	132.75	79.65
W830	75.92	73.82	117.02	190.12	168.41	192.54	188.33	75.94	73.82	157.63	137.32	82.39
W900	93.83	96.60	123.93	226.70	221.19	256.19	216.09	93.85	96.60	179.20	151.56	90.94
W1040	87.22	93.79	124.86	213.35	214.67	238.77	206.08	87.24	93.79	171.42	148.14	88.88
W980	105.39	109.35	153.09	249.69	250.79	277.53	233.03	105.42	109.35	192.28	172.69	103.61
W1260	131.32	131.78	177.31	299.78	302.99	342.37	268.81	131.35	131.78	219.74	198.52	119.11
TOTAL	470.16	338.87	522.53	865.36	788.99	987.04	615.36	470.27	338.87	476.64	499.59	299.75

6.1.3. Análisis y resultados de la interpolación por el método de la distancia inversa

A partir de las series de precipitación reconstruidas en las estaciones y por medio del uso del método de la distancia inversa, se interpolaron los valores de precipitación horaria a los centroides de las subcuencas. En la Figura 22 se representa de forma gráfica los resultados obtenidos en la interpolación.

Figura 22. Valores interpolados de precipitación horaria en los centroides de las subcuencas para el periodo histórico.



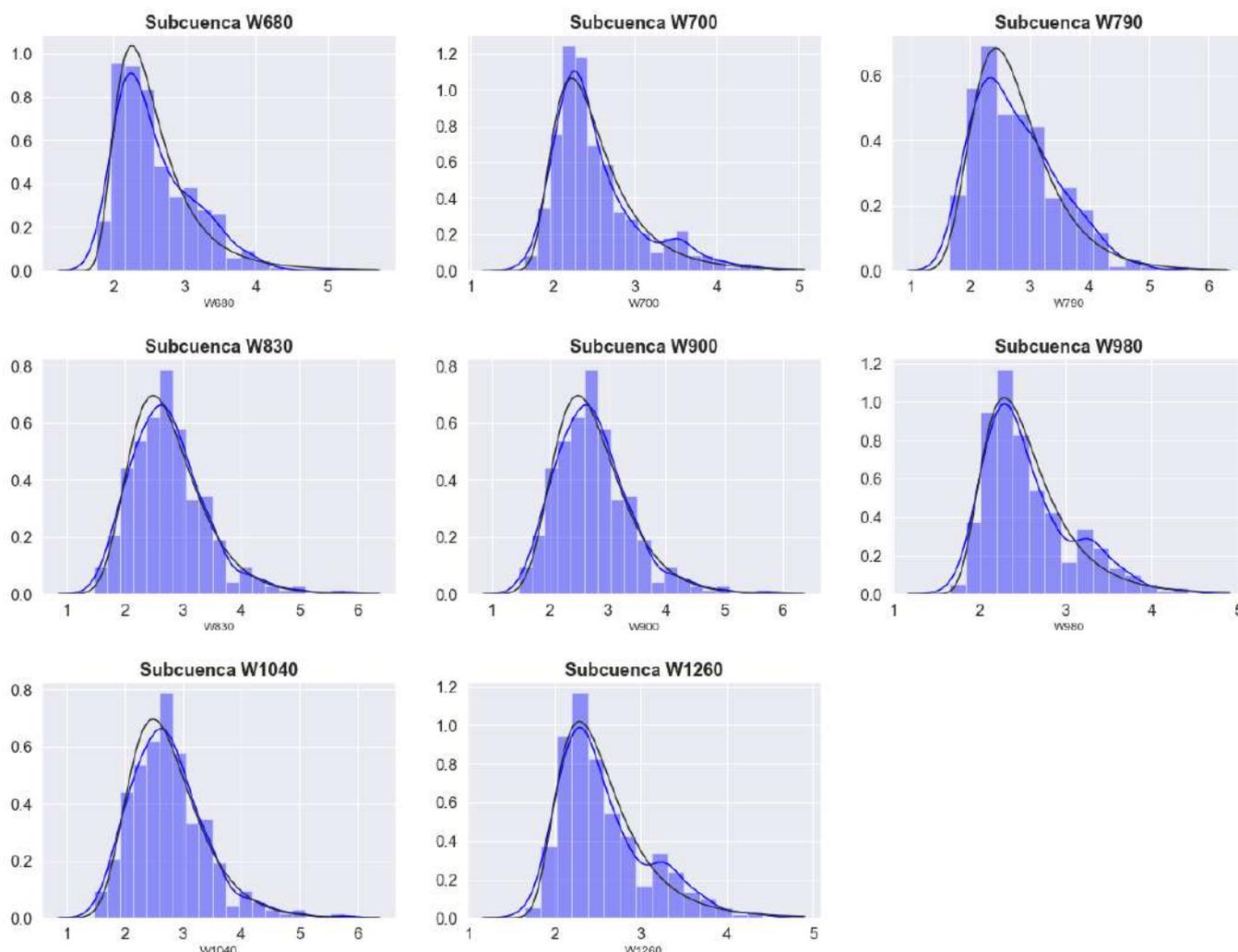
6.1.4. Análisis y resultados del cálculo de las curvas IDF para el periodo histórico

Con el fin de obtener las curvas de Intensidad – Duración – Frecuencia y con base en la información horaria generada para cada uno de los centroides de las subcuencas, se computaron los datos de precipitación total para intervalos de 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 12, 18, 24 horas. Posteriormente se calcularon las series de los valores de precipitación máximos por año para cada intervalo de tiempo, seguido de esto sobre las series generadas se realizó el ajuste estadístico correspondiente a la distribución de valores extremos generalizados (GEV). Los resultados obtenidos para cada una de las subcuencas analizadas se presenta a continuación.

6.1.4.1. Ajuste de la serie de datos a la distribución GEV en el periodo histórico

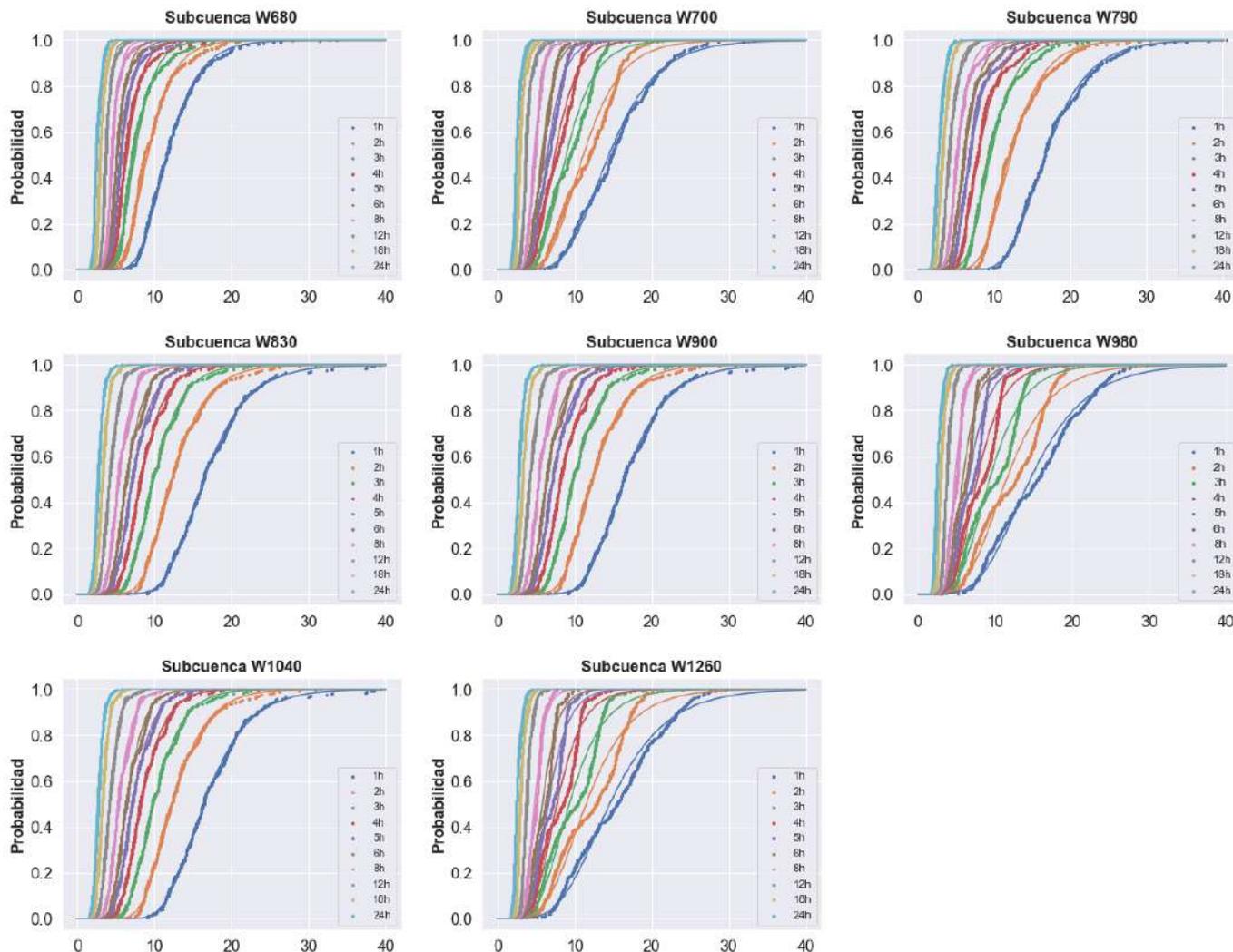
Como se mencionó, las series de los valores máximos de precipitación fueron ajustados a la distribución de valores extremos. Para este caso y por tratarse de un cálculo de valores extremos, el parámetro de forma (ξ) se tomará como 0, correspondiendo el ajuste a una distribución Gumbel. Con el fin presentar de forma esquemática el procedimiento realizado, en la Figura 23 se presenta el ajuste para la serie de valores máximos de precipitación con un intervalo de tiempo de 24 horas, teniendo en cuenta que el mismo proceso se ejecutó para todos los intervalos descritos previamente.

Figura 23. Ajuste de la serie de valores máximos a la distribución GEV para intervalos de tiempo de 24 horas en el periodo histórico.



Con los parámetros definidos se realizó el ajuste de los datos a la distribución de valores extremos generalizados, obteniendo la función de distribución acumula para cada uno de los intervalos seleccionados como se presenta en la Figura 24.

Figura 24. Función de distribución acumulada en las sub cuencas para valores de intensidad máxima anual en intervalos de tiempo seleccionados para el periodo histórico.



Para calcular la IDF empírica, se debe conocer el valor de la intensidad de la lluvia para una duración de tormenta determinada y un período de retorno. La duración de la tormenta define cuál de las distribuciones de GEV previamente ajustadas se debe aplicar, mientras que el período de retorno define la probabilidad de no excedencia con la cual ingresar a la distribución de GEV.

La probabilidad de no excedencia (es decir, el valor de la función de distribución acumulativa) y el período de retorno están relacionados por la ecuación:

$$R = \frac{1}{1 - CDF(x)}$$

Dónde:

R: período de retorno.

CDF(x): función de distribución acumulativa (o probabilidad de no excedencia).

A partir de esta expresión, podemos estimar la probabilidad de no excedencia para un período de retorno dado:

$$CDF(x) = \frac{R - 1}{R} = 1 - \frac{1}{R}$$

Dicho esto, se calculó la intensidad de lluvia para cada intervalo de tiempo con sus respectivos periodos de retorno asociados.

6.1.4.2. Estimación de las ecuaciones de las curvas por el método de correlación lineal múltiple

Haciendo uso del algoritmo para el cálculo de los términos de una correlación lineal múltiple a partir del inverso de la matriz de los coeficientes de correlación simple o total, se encontraron los coeficientes de la ecuación de la curva IDF. La ecuación calculada tiene la siguiente forma:

$$I = \frac{a * T^b}{t^c}$$

I: intensidad de precipitación (mm/hr).

T: periodo de retorno (años).

t: tiempo de duración de precipitación (min).

a, b, c: coeficientes adimensionales obtenidos a partir de la correlación lineal múltiple.

Los coeficientes a, b y c obtenidos a partir de la correlación lineal múltiple para cada subcuenca en el periodo histórico se presentan en la Tabla 12.

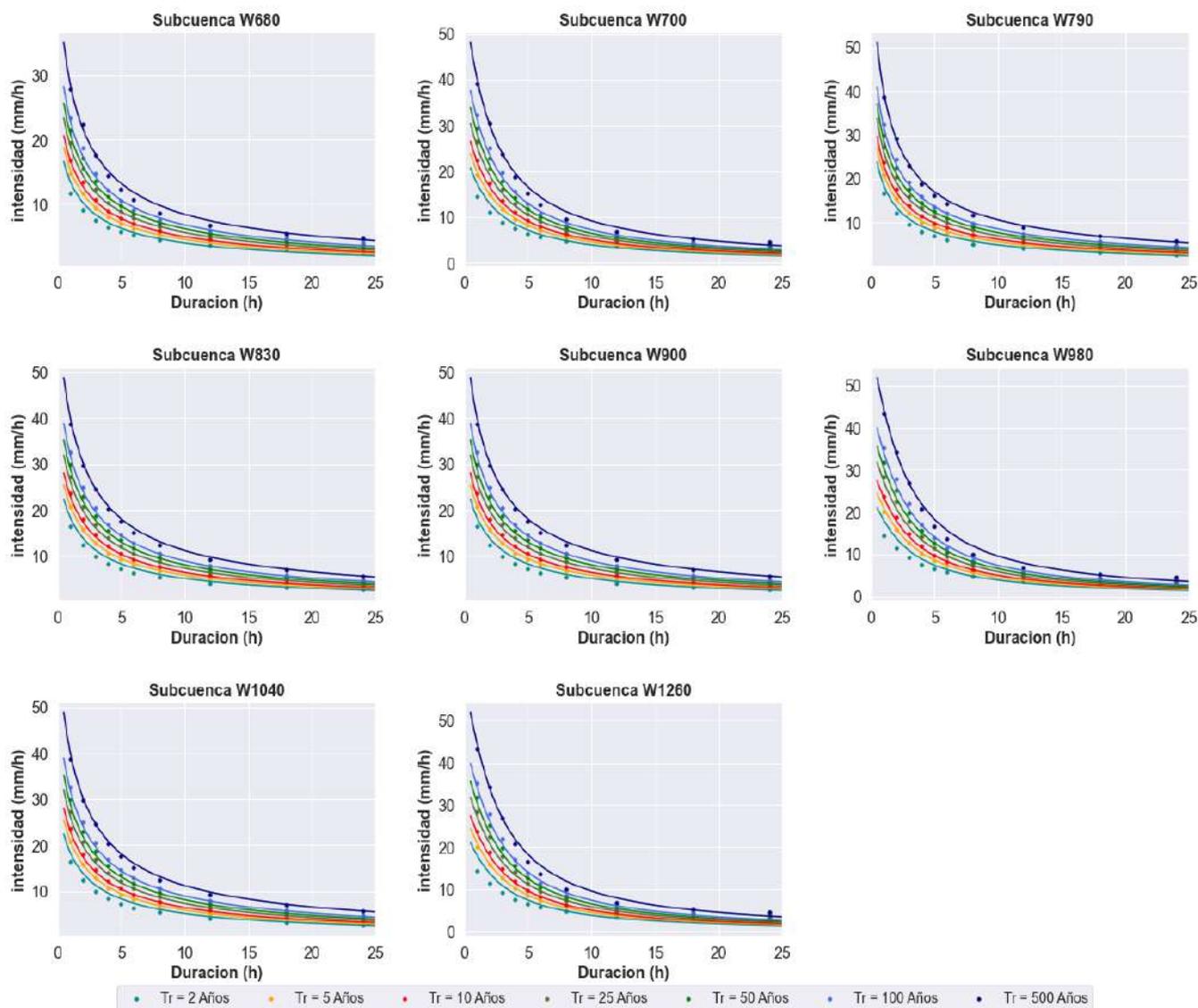
Tabla 12. Coeficientes de la ecuación para el cálculo analítico de las curvas IDF en el periodo histórico.

CUENCA	a	b	c
W680	131.84	0.13	0.56
W700	291.26	0.14	0.68
W790	217.97	0.15	0.61
W830	227.06	0.15	0.61
W900	227.06	0.15	0.61
W980	351.58	0.15	0.70
W1040	227.06	0.15	0.61
W1260	351.58	0.15	0.70

6.1.4.3. Curvas Intensidad duración frecuencia para las estaciones en el periodo histórico

Finalmente, se calcularon y graficaron los valores presentados en la ecuación anterior para cada subcuenca. Los resultados se presentan en la Figura 25.

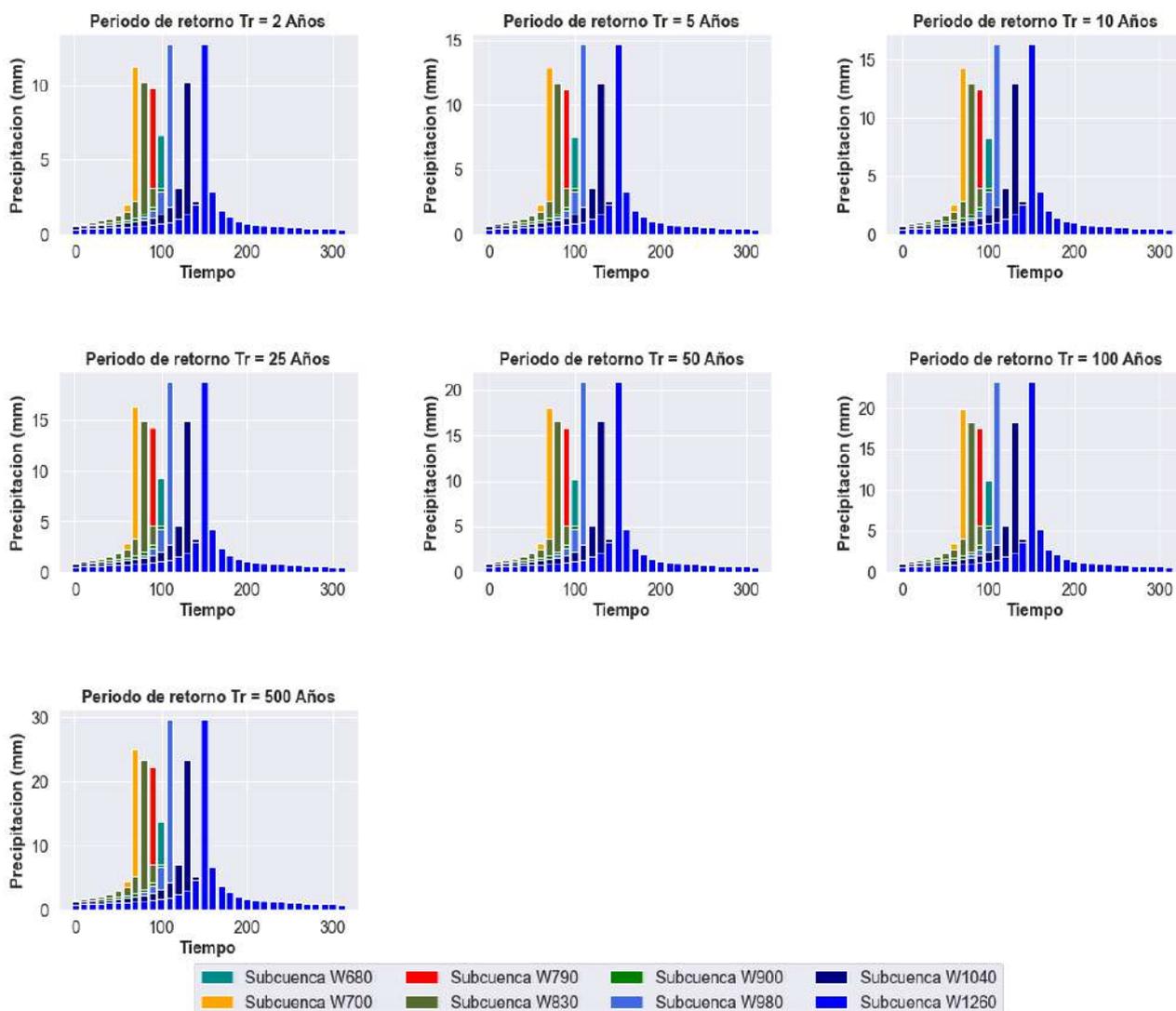
Figura 25. Curvas de Intensidad – Duración – Frecuencia para las subcuencas en el periodo histórico.



6.1.5. Análisis y resultados de los hietogramas de aguaceros puntuales para el periodo histórico.

Haciendo uso de las curvas intensidad – duración – frecuencia obtenidas previamente, se calcularon las curvas de masas de los aguaceros puntuales para duraciones entre 0 y 300 min y periodos de retorno entre 2 y 500 años. Con las curvas de masas se calcularon los hietogramas de los aguaceros puntuales respectivos. Para dar una secuencia más crítica del aguacero, como es usual en este tipo de análisis, mediante el método del Bloque Alterno, se arreglaron los incrementos de lluvia de la siguiente manera: el valor más bajo se colocó en el primer lugar, el segundo valor en orden creciente se colocó en último lugar, el tercer valor en tal orden se ubicó en segundo lugar, el cuarto valor se localizó en el penúltimo lugar, y así sucesivamente. La metodología fue aplicada a la familia de curvas IDF en cada una de las subcuencas y los resultados gráficos se pueden ver en la Figura 26.

Figura 26. Hietogramas de diseño asociados a diferentes eventos con periodo de retorno para las subcuencas en el periodo histórico.



6.1.6. Análisis y resultados iniciales del modelado hidrológico de la cuenca (HEC-HMS)

Mediante el uso del software HEC HMS descrito en el capítulo 5, los parámetros del uso del suelo, los datos de precipitación histórica, la evapotranspiración potencial, las características geomorfológicas de las subcuencas y algunos valores de referencia utilizados para la construcción del módulo *Soil-moisture Accounting (SMA)*, se realizó un primer modelo con el fin de calibrar y observar el comportamiento del mismo, comparando los valores de caudal simulados con los valores de caudal registrados en la estación de aforo para el periodo de tiempo comprendido entre el año 2000 y 2003. Para verificar la capacidad del modelo HEC-HMS para reproducir eventos reales, se calculó el valor del *NASH-SHUTCLIFFE* y *BIAS*. Los resultados obtenidos corresponden a un NS igual a 0.2 y un valor de PBIAS igual a 10% lo que se debe a que algunos parámetros iniciales del modelo están desajustados. Algunas ideas intuitivas pueden estar enfocadas al aumento de la capacidad de los acuíferos, el aumento de la capacidad de interceptación de la vegetación, al aumento de la velocidad de infiltración del suelo o a una combinación y ajuste de varios parámetros en simultáneo. Por las razones expuestas fue necesario

realizar una calibración del modelo, los resultados, así como el análisis correspondiente se presenta a continuación.

6.1.7. Análisis y resultados del proceso de calibración del modelo

Para realizar la calibración del modelo se utilizó inicialmente el método de prueba y error, con el fin de observar las variables a las que el modelo era más sensible, una vez se ajustaron un poco mejor los parámetros se utilizó el método automático del programa, en el cual se utilizaron las diferentes funciones de bondad y ajuste. A continuación, se describe de forma detallada cada uno de los procesos realizados.

6.1.7.1. Método de prueba y error

Previo a la aplicación de los métodos de calibración se definió un periodo de calibración y otro de validación. Se tomó un periodo de registro de la estación de aforo como referencia en donde, 2/3 del periodo se tomaron para realizar la calibración, mientras que 1/3 para realizar la validación, las fechas utilizadas para los procesos descritos se presentan en la Tabla 13.

Tabla 13. Periodo de calibración y de validación del modelo hidrológico.

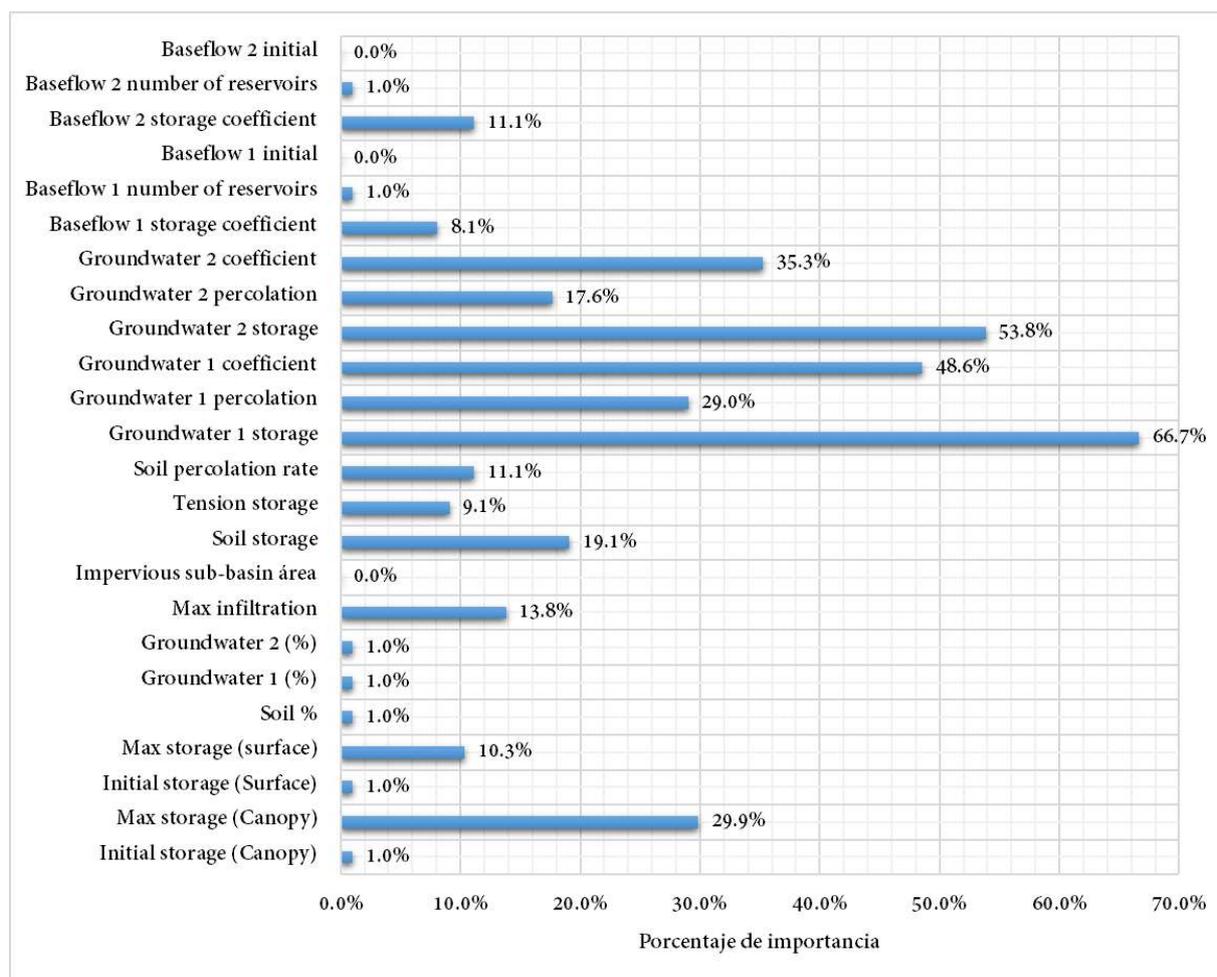
Descripción	Fecha de inicio	Fecha de fin
Periodo de calibración del modelo	01 de octubre del año 2001	30 septiembre del año 2003
Periodo de validación del modelo	01 de octubre del año 2000	30 septiembre del año 2001

Definido el periodo de calibración del modelo por medio del método de prueba y error, se fueron variando uno a uno los parámetros, midiendo las pequeñas variaciones en los resultados de la simulación. El planteamiento típico correspondió a modificar cada uno de los parámetros en un rango de $\pm 10\%$ para comprobar su influencia en los resultados del modelo. Sin embargo, de este primer análisis se observó que algunas de las variables tenían que variarse en un porcentaje mayor al rango establecido para obtener los resultados esperados.

6.1.7.2. Análisis de sensibilidad del modelo

Con los resultados del método de prueba y error, se identificaron los parámetros más sensibles del modelo calculando para cada uno la variación porcentual, respecto a los valores iniciales. De igual forma, se obtuvo una lista con el valor ajustado de cada parámetro como producto de la calibración manual los cuales se presentan en la Tabla 14. También se elaboró el gráfico del análisis de sensibilidad de los parámetros consignados en la tabla descrita, el cual se presenta en la Figura 27 en donde se representa el porcentaje de importancia de cada elemento, respecto a la calibración manual realizada del modelo.

Figura 27. Análisis de sensibilidad de las variables en el modelo hidrológico.



Del análisis hecho, se observó que el almacenamiento de agua de las capas *GW1* y *GW2* superior e inferior, así como los coeficientes que establecen las condiciones de tiempo para transformar el agua en almacenamiento en salidas laterales son los que mayores cambios generan en los resultados del modelo, teniendo porcentajes de importancia en un rango de entre un 66.7% y un 53.8% respectivamente.

Posteriormente se ubica el *GW 1* y *GW2 coefficient* con un porcentaje de importante del 48.6% y el 35.3%, los cuales representan el coeficiente de almacenamiento de la capa 1 y la capa 2.

Seguido de ello, encontramos *GW1 percolation* con un 29 % de importancia, el *soil storage* con un 19.1%, que indica almacenamiento de la capa superficial del suelo. Finalmente, se encuentran otros parámetros que generan menos cambios en los resultados y a los que el modelo no es tan sensible. En la Tabla 14, se presentan los valores iniciales del modelo, el valor obtenido como producto de la calibración manual realizada, así como el porcentaje de importancia calculado para cada uno de los parámetros del modelo, lo que corresponde al análisis de sensibilidad.

Tabla 14. Parámetros del modelo obtenidos a partir del método de calibración manual.

Métodos	Parámetros	Valores iniciales	Porcentaje de Importancia (%)	Valor estimado en calibración manual	Unidades
Soil Moisture Accounting SMA	Initial storage (Canopy)	0	1.0%	0	%
	Max storage (Canopy)	10	29.9%	10	mm
	Initial storage (Surface)	0	1.0%	0	%
	Max storage (surface)	8	10.3%	7	mm
	Soil %	75	1.0%	75	%
	Groundwater 1 (%)	85	1.0%	85	%
	Groundwater 2 (%)	95	1.0%	95	%
	Max infiltration	7	13.8%	7	mm/hr
	Impervious sub-basin área	0	-	0	%
	Soil storage	70	19.1%	100	mm
	Tension storage	65	9.1%	70	mm
	Soil percolation rate	5	11.1%	5	mm/hr
	Groundwater 1 storage	100	66.7%	19	mm
	Groundwater 1 percolation	4	29.0%	3	mm/hr
	Groundwater 1 coefficient	45	48.6%	120	hr
	Groundwater 2 storage	150	53.8%	50	mm
	Groundwater 2 percolation	0.05	17.6%	0.05	mm/hr
	Groundwater 2 coefficient	550	35.3%	1200	hr
Baseflow method / Linear Reservoir	Baseflow 1 storage coefficient	100	8.1%	90	hr
	Baseflow 1 number of reservoirs	1	1.0%	1	
	Baseflow 1 initial	0	0.0%	0	m ³ /s
	Baseflow 2 storage coefficient	1000	11.1%	1000	hr
	Baseflow 2 number of reservoirs	1	1.0%	1	
	Baseflow 2 initial	0	0.0%	0	m ³ /s

De acuerdo con los datos presentados en la Tabla 14, hubo parámetros que tuvieron variaciones porcentuales significativas en relación con los parámetros considerados inicialmente. Una vez hecha la calibración manual, se realizó la calibración automática del modelo a partir de los módulos de optimización del programa descritos en el Capítulo 5.

6.1.7.3. Método de optimización automática

Una vez ajustados los datos manualmente, se realizó la calibración automática del modelo mediante el módulo de optimización determinista del programa. Se evaluaron tanto las funciones de maximización como las funciones objetivo de minimización, con el fin de analizar cuál de todas tenía el grado de ajuste óptimo entre los datos de aforo y los resultados de la calibración. El criterio de selección del método óptimo, se fundamentó en las funciones de bondad de ajuste NASH-SHUTCLIFFE y BIAS; los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 15, mientras que de forma gráfica en la Figura 28 y Figura 29.

Tabla 15. Evaluación de los métodos de optimización determinista del modelo continuo HEC-HMS para la etapa de calibración.

	Función objetivo	BIAS	Nash
MAXIMIZACIÓN	Coefficient of Determination	17.4%	0.545
	Discharge Volume	10.5%	0.51
	Index of Agreement	8.5%	0.49
	Nash Sutcliffe	-8.6%	0.51
	Peak Discharge	19.8%	0.45
	Relative Index of Agreement	9.1%	0.52
	Relative Nash Sutcliffe	0.5%	0.63
MINIMIZACIÓN	First Lag Autocorrelation	8.5%	0.506
	Maximum of Absolute Residuals	11.8%	0.505
	Maximum of Squared Residuals	9.5%	0.587
	Mean of Absolute Residuals	14.2%	0.485
	Mean of Squared Residuals	0.1%	0.598
	Peak-Weighted RMSE	8.7%	0.622
	Percent Error in Discharge Volume	-8.6%	0.612
	Percent Error in Peak Discharge	1.5%	0.511
	Root Mean Square Error	5.4%	0.581

MUY BUENO	$PBIAS < \pm 10$	$0.75 < NASH \leq 1.00$
BUENO	$\pm 10 \leq PBIAS < \pm 15$	$0.65 < NASH \leq 0.75$
SATISFACTORIO	$\pm 15 \leq PBIAS < \pm 25$	$0.50 < NASH \leq 0.65$
INSATISFACTORIO	$PBIAS \geq \pm 25$	$NASH \leq 0.50$

Figura 28. Evaluación de los métodos de maximización del modelo continuo HEC-HMS para la etapa de calibración.

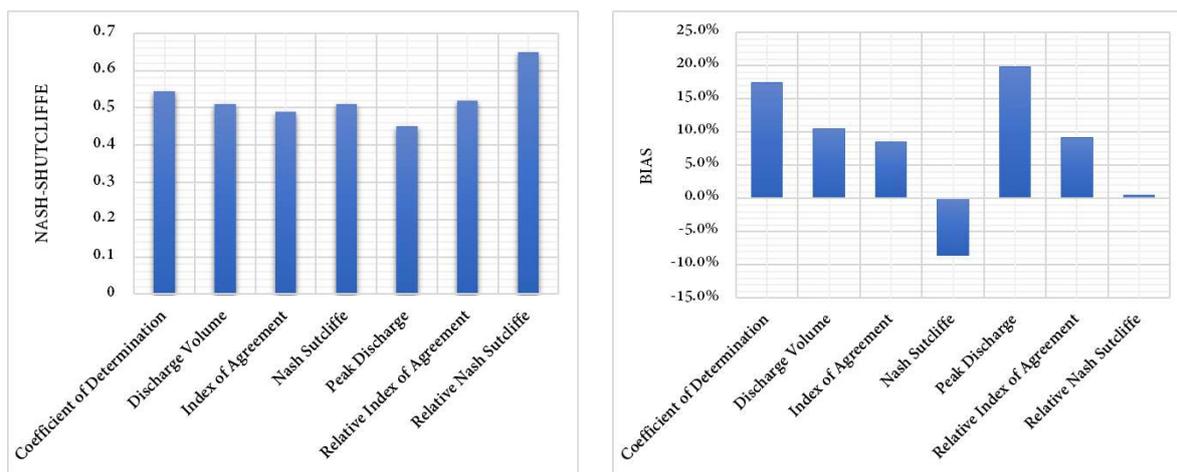
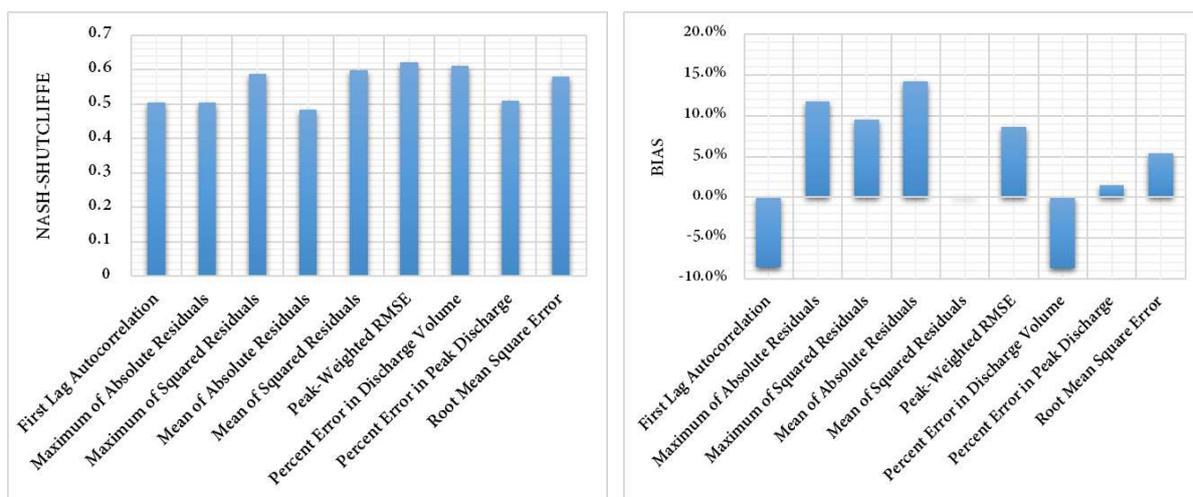


Figura 29. Evaluación de los métodos de minimización del modelo continuo HEC-HMS para la etapa de calibración.



En las figuras, se observa que los métodos de maximización tienen valores de NASH similares a las funciones de minimización, los cuales varían en un rango comprendido entre 0.45 y 0.63. De acuerdo con la valoración de este término los valores obtenidos para estos métodos se describen como satisfactorios, buenos y muy buenos.

En cuanto a los valores de PBIAS calculados, se observan variaciones con un rango más amplio en los métodos de maximización, los cuales varían en un rango comprendido entre -9% y 20%. En el caso de los métodos de minimización el rango del PBIAS oscila entre -9% y 15%. En términos generales el PBIAS, presenta valoraciones similares al NASH con rangos satisfactorios, buenos y muy buenos.

En este caso y en relación con la valoración del valor PBIAS y NASH descrito en la Tabla 15, la función objetivo seleccionada para la calibración automática del modelo corresponde al Nash Sutcliffe del método de maximización. Los valores obtenidos mediante el uso de esta función corresponden a un PBIAS de 0.5% lo que se considera un resultado muy bueno por estar dentro del rango de $\pm 10\%$. Igualmente, el valor obtenido mediante esta función para el NASH corresponde a un valor de 0.65, valor que también se considera bueno por estar dentro del rango 0.65 y 0.75.

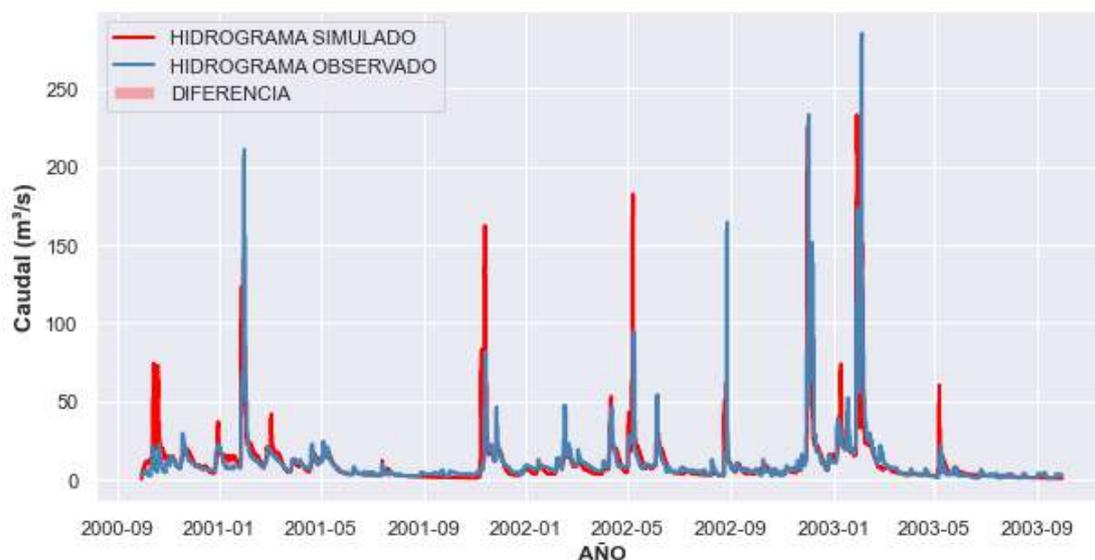
Los valores obtenidos para cada uno de los parámetros en la optimización automática se presentan en la Tabla 16, mientras que el hidrograma calculado con el modelo calibrado se presenta en la Figura 30.

Tabla 16. Método de calibración automática de los parámetros del modelo.

Métodos	Parámetros	Valores iniciales	Valor estimado en calibración automática	Unidades
Soil Moisture Accounting SMA	Initial storage (Canopy)	0	0.1	%
	Max storage (Canopy)	15	5.4	mm
	Initial storage (Surface)	0	0	%
	Max storage (surface)	35	6.5	mm
	Soil %	0	75	%
	Groundwater 1 (%)	0	85	%
	Groundwater 2 (%)	0	95	%
	Max infiltration	7	5.3	mm/hr
	Impervious sub-basin área	0	0	%

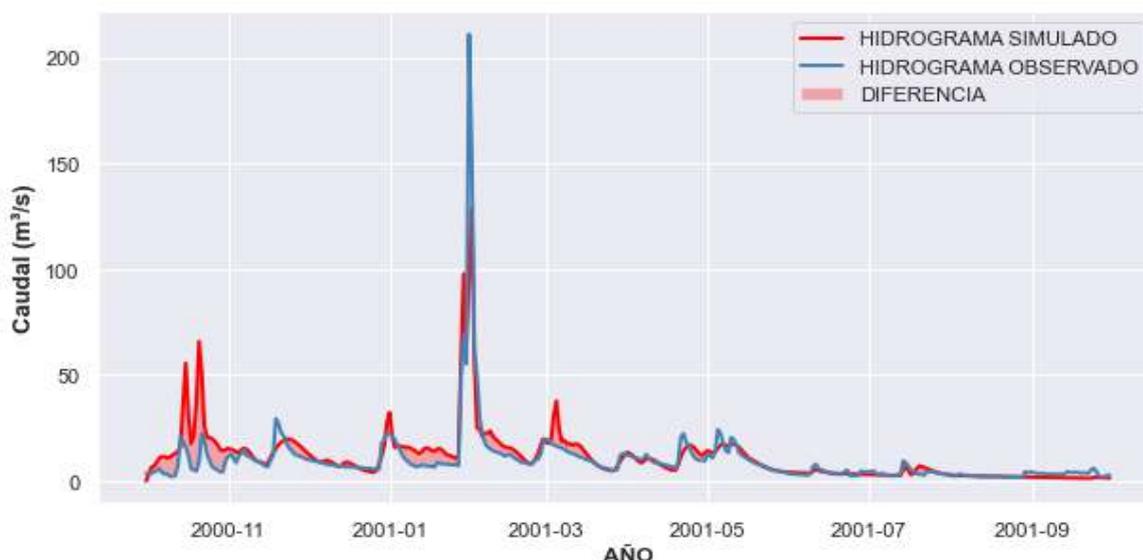
Métodos	Parámetros	Valores iniciales	Valor estimado en calibración automática	Unidades
Soil Moisture Accounting SMA	Soil storage	80	103	mm
	Tension storage	65	78	mm
	Soil percolation rate	10	4	mm/hr
	Groundwater 1 storage	25	20	mm
	Groundwater 1 percolation	5	2.2	mm/hr
	Groundwater 1 coefficient	80	130	hr
	Groundwater 2 storage	35	45	mm
	Groundwater 2 percolation	0.05	0.035	mm/hr
	Groundwater 2 coefficient	1000	1150	hr
Baseflow method / Linear Reservoir	Baseflow 1 storage coefficient	100	85	hr
	Baseflow 1 number of reservoirs	1	1	
	Baseflow 1 initial	0	0.1	m ³ /s
	Baseflow 2 storage coefficient	1000	1250	hr
	Baseflow 2 number of reservoirs	1	1	
	Baseflow 2 initial	0	0	m ³ /s

Figura 30. Hidrograma simulado versus hidrograma observado para la etapa de calibración del modelo.



Como se mencionó, se realizó la validación del modelo aplicando los coeficientes obtenidos en la calibración automática en el periodo descrito en la Tabla 13. Los resultados obtenidos en este caso, al igual que en la calibración fueron satisfactorios. Como resultado de la simulación se obtuvo un valor de NASH correspondiente a 0.517 y un valor de PBIAS de 21.92%. Adicionalmente, se elaboró el grafico de la etapa de validación del modelo el cual se presenta en la Figura 31.

Figura 31. Hidrograma simulado versus hidrograma observado para la etapa de validación del modelo.



En relación con las figuras presentadas, se observa que el hidrograma calculado, presenta un comportamiento similar al flujo observado. Teniendo en cuenta los valores de PBIAS y NASH descritos, queda concluida la etapa de calibración.

6.1.8. Análisis y resultados de la modelación hidrológica construida a partir de datos históricos

El hidrograma total resultante es la suma de las ordenadas de los diversos hidrogramas unitarios para cada valor constante de tiempo. Para ello, se usó el modelo de computador HEC-HMS, considerando la referencia (U.S. Army E.E.U.U, 2020a).

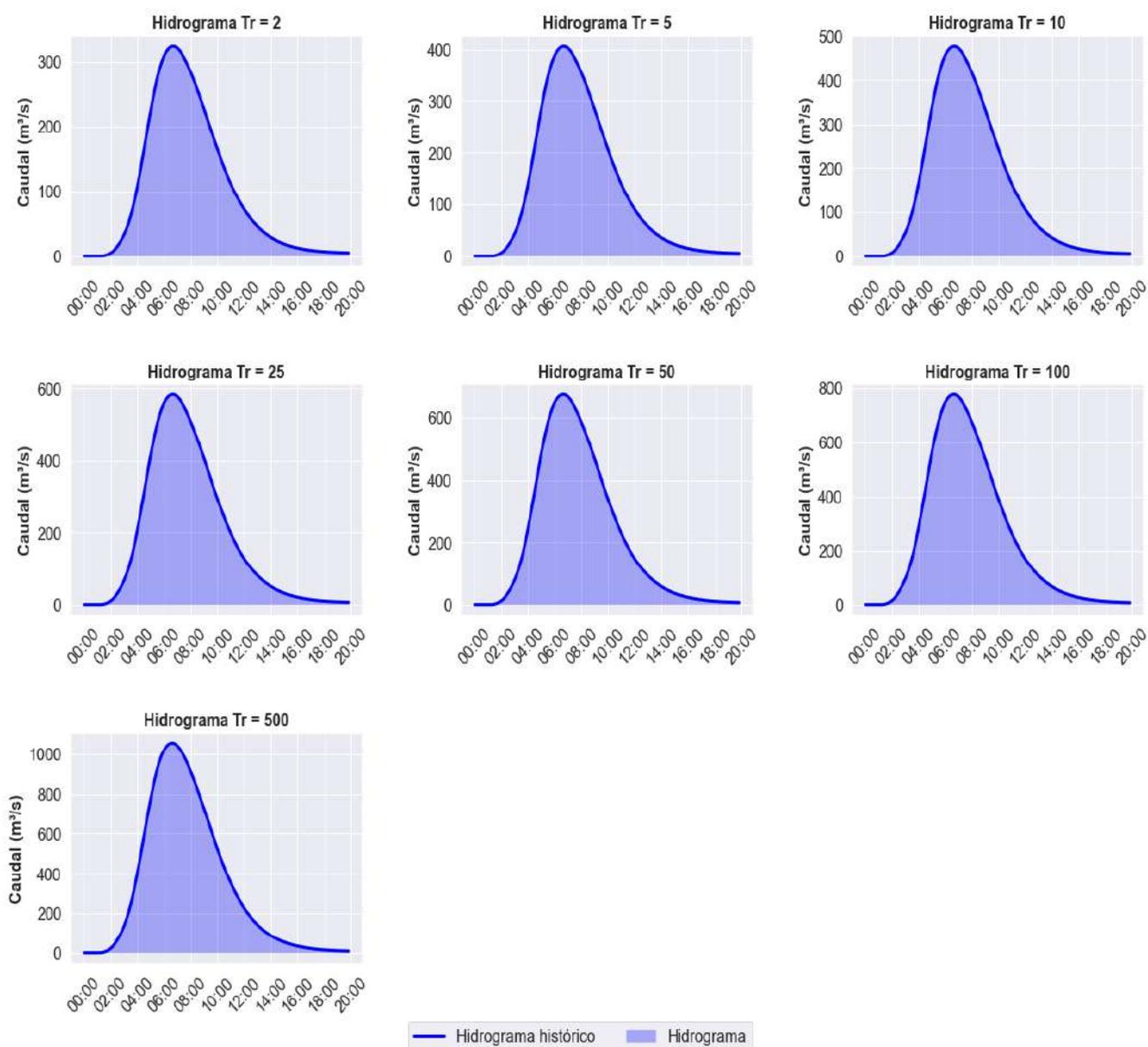
6.1.8.1. Crecientes y caudales máximos instantáneos de escorrentía Superficial

Mediante la aplicación del modelo de computador HEC-HMS, y con las características de la lluvia total espacial, las áreas de drenaje y del tiempo de desfase para las hoyas hidrográficas analizadas, se calcularon las crecientes de diseño aferentes a las subcuenca hidrográficas analizadas, para periodos de retorno entre 2 y 500 años, los valores obtenidos se presentan en la Tabla 17. De igual forma los modelos hidrológicos llevados a cabo se presentan anexos junto con el presente informe.

Tabla 17 Caudales máximos instantáneos para las subcuencas de estudio.

Nombre	Caudal (m³/s)						
	T= 2 años	T= 5 años	T= 10 años	T= 25 años	T= 50 años	T= 100 años	T= 500 años
W680	34.8271	44.7559	53.2458	65.5566	75.9254	87.4096	117.745
W700	31.0389	47.0893	54.8125	87.4534	87.6198	102.894	131.594
W790	54.0568	68.9995	81.6933	100.837	116.759	134.341	182.457
W830	28.6771	36.438	43.1105	52.9744	61.3501	70.6741	96.0157
W900	63.2399	79.2096	92.8992	113.456	130.992	150.32	203.215
W980	134.94	170.476	200.923	246.166	284.785	327.831	446.397
W1040	98.7138	123.853	145.398	177.385	204.663	234.701	316.836
W1260	163.413	205.76	242.347	296.419	342.61	394.083	535.919

Figura 32. Hidrograma de creciente asociados a diferentes eventos con periodo de retorno en las subcuencas.

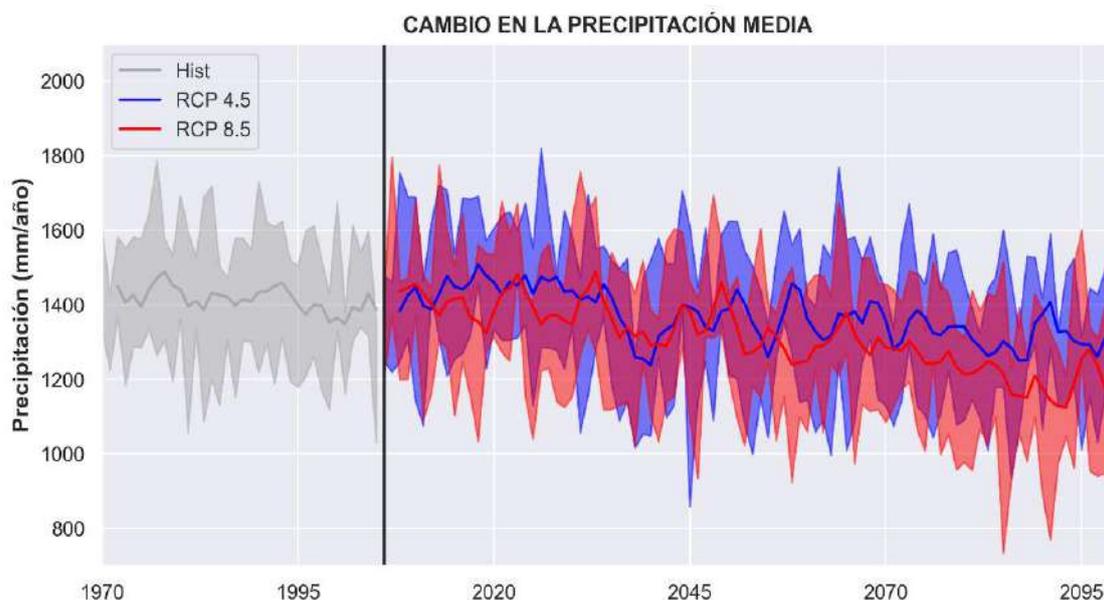


6.2. Resultados y análisis de cambio climático

6.2.1. Análisis de modelos de cambio climático

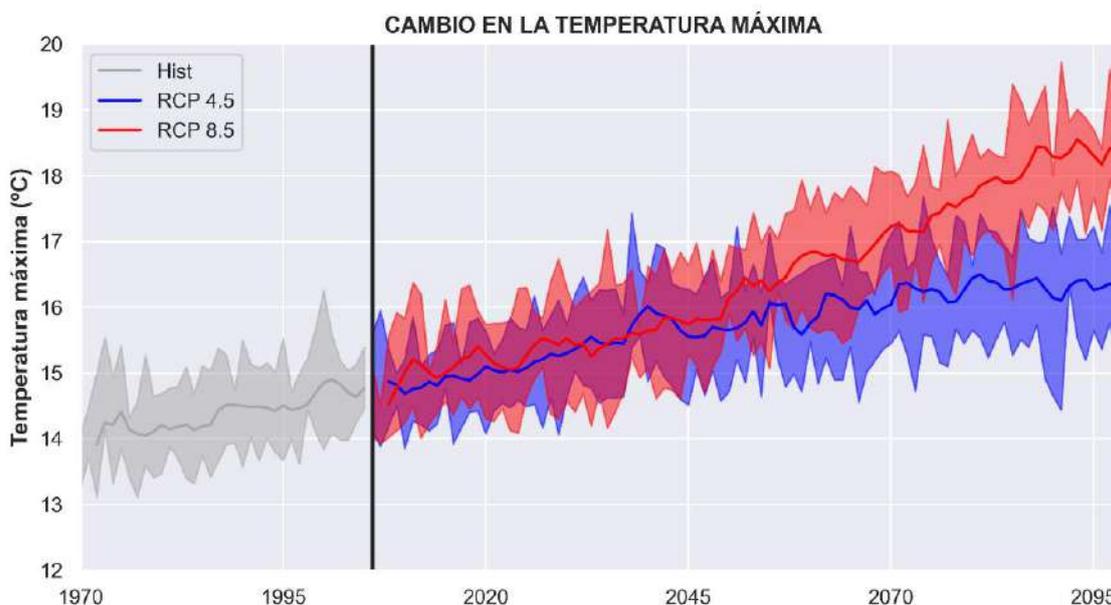
Con el fin de evaluar el impacto que tendrá el cambio climático en las variables climáticas, se debe seleccionar el modelo que tenga un comportamiento similar al evidenciado en la zona de estudio durante el periodo histórico de referencia (1959-2005). Un procedimiento previo a la evaluación, es conocer el comportamiento de los valores medios en las series de temperatura y precipitación. Para ello, se ha construido la Figura 33 en donde se presentan los cambios que tendrá la precipitación media en el futuro bajo los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5, la Figura 34 en donde se evidencia el comportamiento futuro de la temperatura máxima en los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 y la Figura 35 en donde se puede ver la variación que tendrá la temperatura máxima en el futuro bajo los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5.

Figura 33. Tendencia de la precipitación media anual en Los Corrales de Buelna para los RCPs 4.5 y 8.5.



Con respecto al comportamiento de la precipitación media anual, se observa una disparidad entre los resultados que proporcionan los diferentes escenarios existentes en la actualidad (cuyo rango de variación está representado por las franjas de colores). Del mismo modo se puede ver una disminución de los valores pasando de 1400 mm/año en el año 2006 a 1200 mm/año en el año 2100 para el escenario RCP 8.5 siendo este el más crítico. Con respecto al escenario RCP 4.5 se ve igualmente una disminución, presentándose un valor de 1300 mm/año para el año 2100 respectivamente.

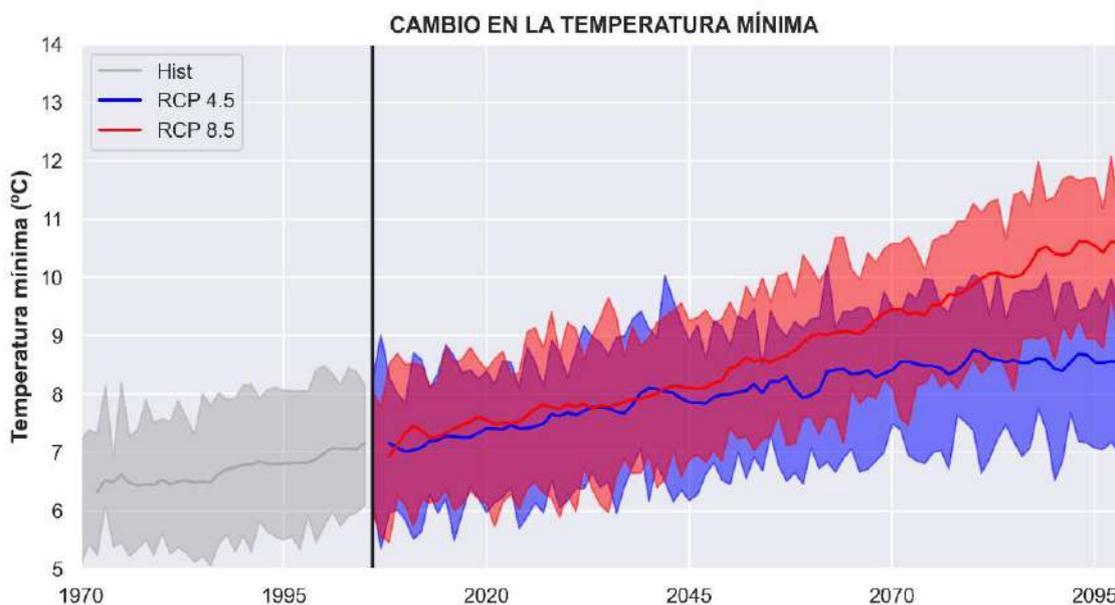
Figura 34. Tendencia de la temperatura máxima en Los Corrales de Buelna para los RCPs 4.5 y 8.5.



Para el caso de la temperatura máxima, se observa al igual que en el caso anterior una disparidad entre los resultados que proporcionan los diferentes escenarios existentes en la actualidad. De igual forma, se puede ver un aumento de los valores pasando de 14.7 °C en el año 2006 a 18.8°C en el año 2100, es decir, un aumento de más de 4 °C para el escenario RCP 8.5 siendo este el más crítico. Con respecto al

escenario RCP 4.5 se ve igualmente un incremento, presentándose un valor de 16.3 °C para el año 2100 respectivamente.

Figura 35. Tendencia de la temperatura mínima en Los Corrales de Buelna para los RCPs 4.5 y 8.5.

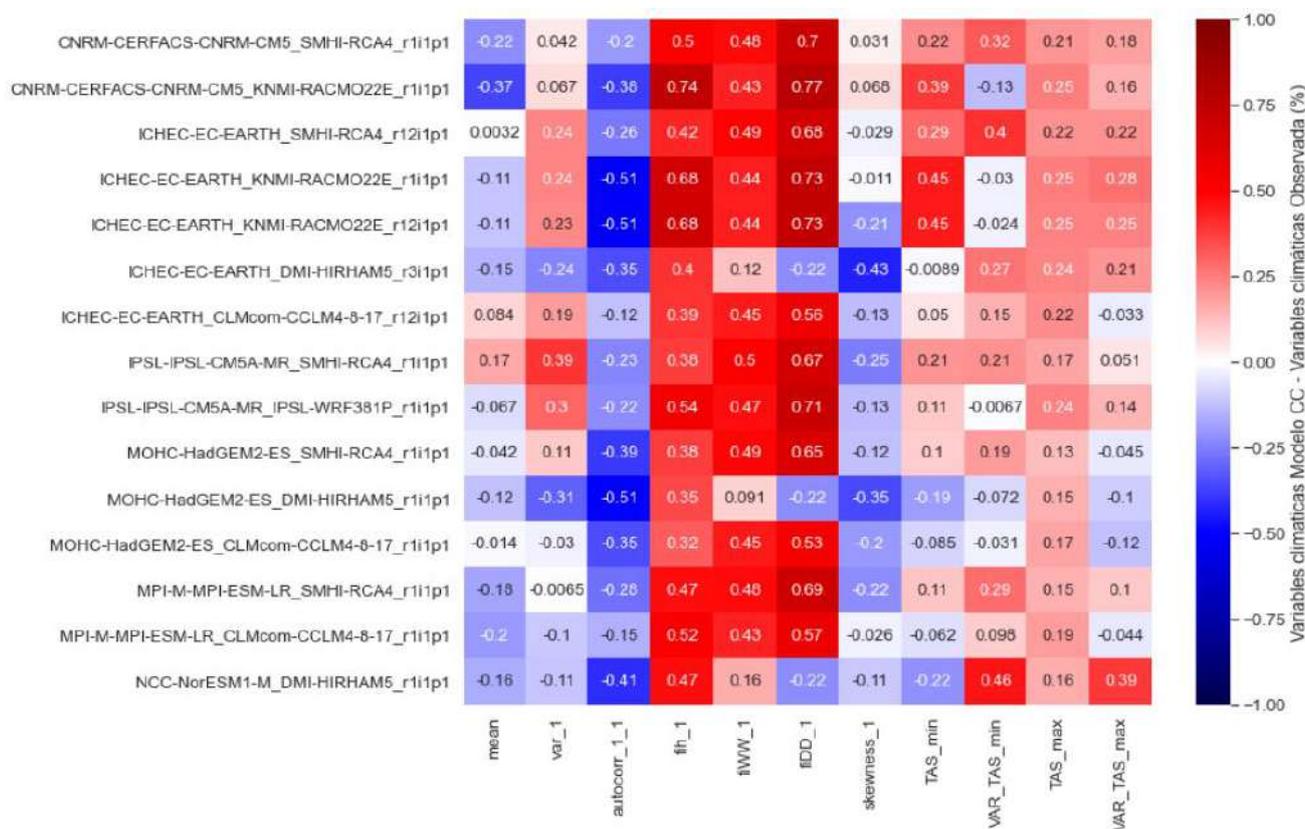


En el caso de la temperatura mínima, se observa también una disparidad entre los resultados que proporcionan los diferentes escenarios existentes en la actualidad. Al igual que en el caso anterior, se puede ver un aumento de los valores pasando de 6.8 °C en el año 2006 a 10.9°C en el año 2100, es decir, un aumento de más de 4 °C para el escenario RCP 8.5 siendo este el más crítico. Con respecto al escenario RCP 4.5 se ve igualmente un incremento, presentándose un valor de 7.7 °C para el año 2100 respectivamente.

6.2.2. Selección de modelos de cambio climático

Teniendo en cuenta los estadísticos descritos en el Capítulo 5.4.2, se representó gráficamente la diferencia de los mismos para cada modelo evaluado y para la serie reconstruida, los resultados se presentan en la Figura 36 donde se puede ver que la diferencia de las medias, es similar en todos los modelos, sin embargo, analizando el estadístico de la varianza, se pueden apreciar diferencias importantes. Para seleccionar el modelo que menor variación porcentual tiene respecto de los datos históricos se utilizó el método estadístico *KNN – Neighbors*, obteniendo que el modelo más representativo y elegido corresponde a *MOHC-HadGEM2-ES_CLMcom-CCLM4-8-17_r1i1p1*. Elegido el modelo, se ubica el nodo más cercano a la estación o estaciones seleccionadas en el estudio y se extrae la información de precipitación, temperatura máxima y mínima.

Figura 36. Comparativa entre diversos estadísticos de los modelos globales de cambio climático y los datos locales reconstruidos en el periodo de referencia 1959-2005 | mean -Media; var_1- varianza 1 día; autocorr_1_1 - Autocorrelación con un lag de 1 día; fih_1 – Proporción de días secos; fiww_1 – probabilidad de días húmedos consecutivos; fiDD_1 – probabilidad de días secos consecutivos; Skewness_1 – Asimetría diaria).



6.2.3. Proyecciones de cambio climático: régimen medio

Con el fin de analizar la incidencia que tendrá el cambio climático en las variables de estudio, se han reconstruido las series de precipitación tomando como base la metodología descrita en el capítulo 5.2.1.1. Para ello en la Figura 37 se presenta la variación porcentual de la precipitación media total en cada uno de los meses del año, del mismo modo se presenta el cambio relativo de la temperatura en °C. La descripción, evaluación y análisis del comportamiento predicho en cada una de las variables se presenta a continuación.

6.2.3.1. Precipitación

El comportamiento observado para la variable precipitación en la Figura 37 deja en evidencia los cambios para diferentes intervalos de tiempo en los dos escenarios de cambio climático estudiados. Dependiendo del mes analizado, se pueden apreciar incrementos o decrecimientos en el comportamiento de la variable.

Si se analiza el corto plazo, para el periodo comprendido entre el año 2006 al 2040, bajo el escenario de emisiones RCP 4.5 se puede observar incrementos hasta del 60% en los primeros 5 meses del año. A partir del mes 5 se genera un decrecimiento brusco de la variable que inicia en el mes de junio y termina en el mes de septiembre, presentando variaciones hasta del -75%. En el lapso comprendido entre el mes de octubre al mes de diciembre la variable oscila sufriendo incrementos y decrecimientos mes a

mes. Realizando el cálculo de la variación porcentual global de la precipitación anual, se obtiene un cambio que equivale al 2.12%, es decir, un incremento general de la precipitación.

Evaluando los periodos de mediano (2041-2070) y largo plazo (2071-2100), para este mismo escenario, se observa un comportamiento similar al descrito previamente, sin embargo, en este caso los incrementos sufren una disminución significativa, aumentando el porcentaje de decrecimiento mes a mes. Realizando el cálculo de la variación porcentual global de la precipitación anual, se obtiene un cambio medio equivalente al -17.34% en el mediano plazo y -18.75% en el largo plazo.

Analizando el comportamiento en el corto plazo bajo el escenario de emisiones RCP 8.5, se observan conductas similares, destacándose por tener cambios más bruscos, con una tendencia anual en decrecimiento en el entorno del -3.07%. El comportamiento en el mediano plazo, se destaca por tener variaciones más significativas en la variación porcentual global de la precipitación anual, la cual para este escenario tiene una variación media equivalente al -22.5% en el mediano plazo y -32.95% en el largo plazo.

6.2.3.2. *Temperatura*

Con respecto a la variable temperatura se observa un comportamiento similar en los tres períodos analizados, encontrándose algunas diferencias entre los dos escenarios evaluados.

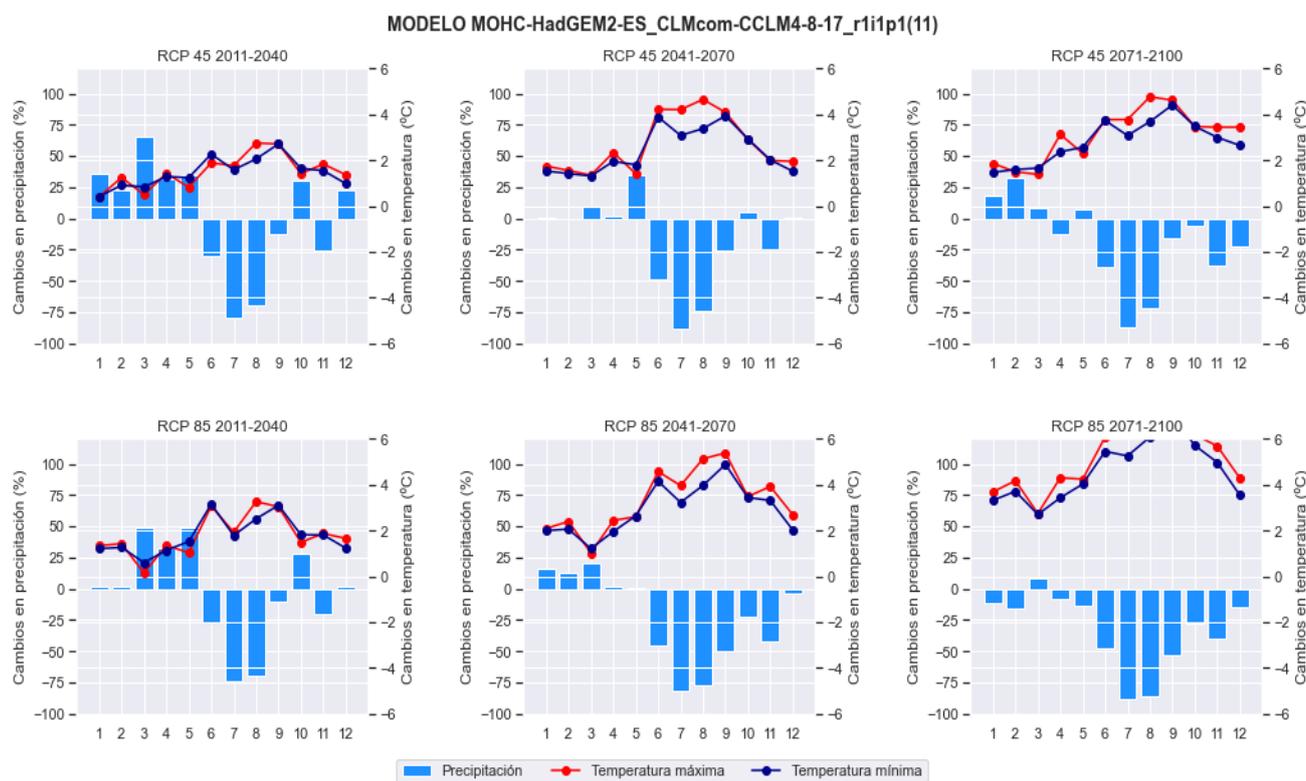
Para los meses de enero a septiembre la tendencia en todos los períodos en el RCP 4.5 corresponden con el incremento de la temperatura máxima y mínima siendo estos valores más bajos en el corto plazo en comparación con el medio y largo plazo. Para tener una perspectiva más clara, a continuación, se describen los incrementos de temperatura medios anuales para cada periodo y escenario estudiado.

- Para el período 2011-2040: el cambio en la temperatura máxima es de 1.5 °C y de 1.4 °C para la temperatura mínima.
- Para el período 2041-2070: el cambio en la temperatura máxima es de 2.7 °C y de 2.4 °C para la temperatura mínima.
- Para el período 2071-100: el cambio en la temperatura máxima es de 3.1 °C y de 2.8 °C para la temperatura mínima.

Para el caso del escenario RCP 8.5 los incrementos de la temperatura los meses correspondientes son mayores, mientras que el decrecimiento es menor en todos los periodos.

- Para el período 2011-2040: el cambio en la temperatura máxima es de 1.8 °C y de 1.6 °C para la temperatura mínima.
- Para el período 2041-2070: el cambio en la temperatura máxima es del 3.3 °C y de 2.9 °C para la temperatura mínima.
- Para el período 2071-100: el cambio en la temperatura máxima es del 5.3 °C y de 4.6 °C para la temperatura mínima.

Figura 37. Análisis de las variables precipitación, temperatura máxima y mínima para escenarios de cambio climático.



6.2.4. Proyecciones de cambio climático: régimen extremo para la precipitación

El análisis extremal de la precipitación se realizó para el horizonte medio comprendido entre el año 2041 al 2070, el cual se elaboró con la metodología descrita en el capítulo 5 y aplicada en la caracterización extremal en el periodo de registro histórico en el capítulo 6.1.1. El objetivo principal, correspondió al cálculo de las curvas IDF y los hietogramas de diseño necesarios para la obtención de los hidrogramas de caudal futuros, asociados a eventos asociados a diferentes periodos de retorno. Los cálculos fueron realizados para los dos escenarios de estudio y los resultados, el análisis y la evaluación de los mismos se describen a continuación.

6.2.4.1. Escenario RCP 4.5

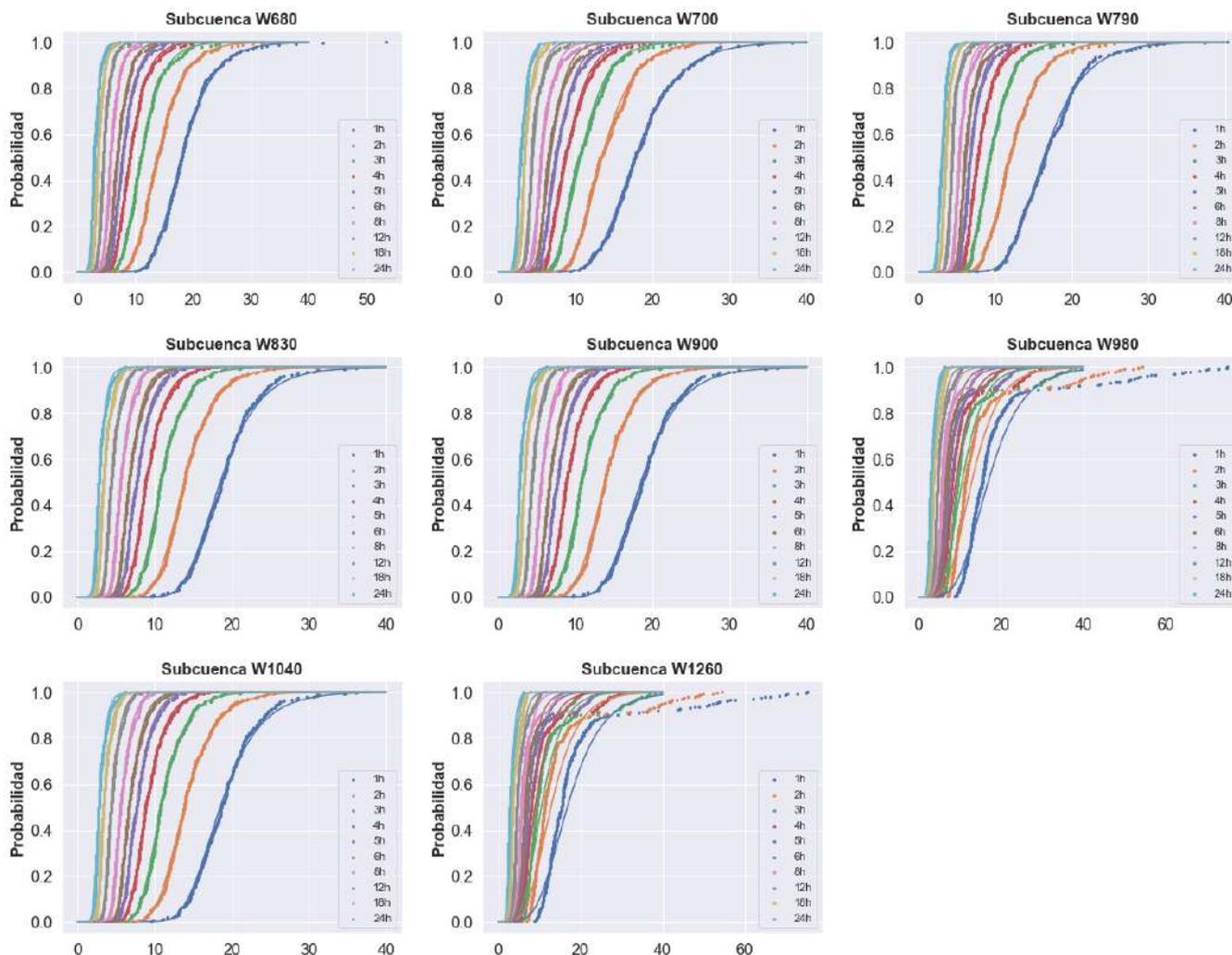
Con los valores de la precipitación horaria y diaria registrada por las estaciones seleccionadas en la zona de proyecto y a partir del método de desagregación temporal y los estadísticos calculados a partir las series futuras de precipitación en el escenario RCP 4.5, se realizó la reconstrucción de lluvias horarias sintéticas en las estaciones en un periodo total de 320 años.

Una vez obtenidas las lluvias futuras en las estaciones de proyecto, se realizó la interpolación de los datos de precipitación a los centroides de las subcuencas, mediante el método de la distancia inversa.

Siguiendo el mismo procedimiento descrito en el capítulo 5.3.4 y utilizando los datos de las lluvias obtenidos mediante el método de la distancia inversa en las subcuencas, se computaron los datos de precipitación total para intervalos de 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 12, 18, 24 horas. Posteriormente se calcularon las series de los valores de precipitación máximos por año para cada intervalo de tiempo, seguido de esto sobre las series generadas se realizó el ajuste estadístico correspondiente a la distribución de valores

extremos generalizados (GEV), obteniendo la función de distribución acumulada para cada uno de los intervalos seleccionados como se presenta en la Figura 38.

Figura 38. Función de distribución acumulada en las sub cuencas para valores de intensidad máxima anual en intervalos de tiempo seleccionados para el modelo de cambio climático seleccionado en el escenario RCP 4.5.



Siguiendo el mismo procedimiento descrito en el capítulo 6.1.4.2, mediante el uso del algoritmo para el cálculo de los términos de una correlación lineal múltiple, y a partir del inverso de la matriz de los coeficientes de correlación simple, se encontraron los coeficientes de familia de curvas IDF. Los coeficientes a, b y c obtenidos a partir de la correlación lineal múltiple para cada subcuenca en el escenario RCP 4.5 se presentan en la Tabla 18.

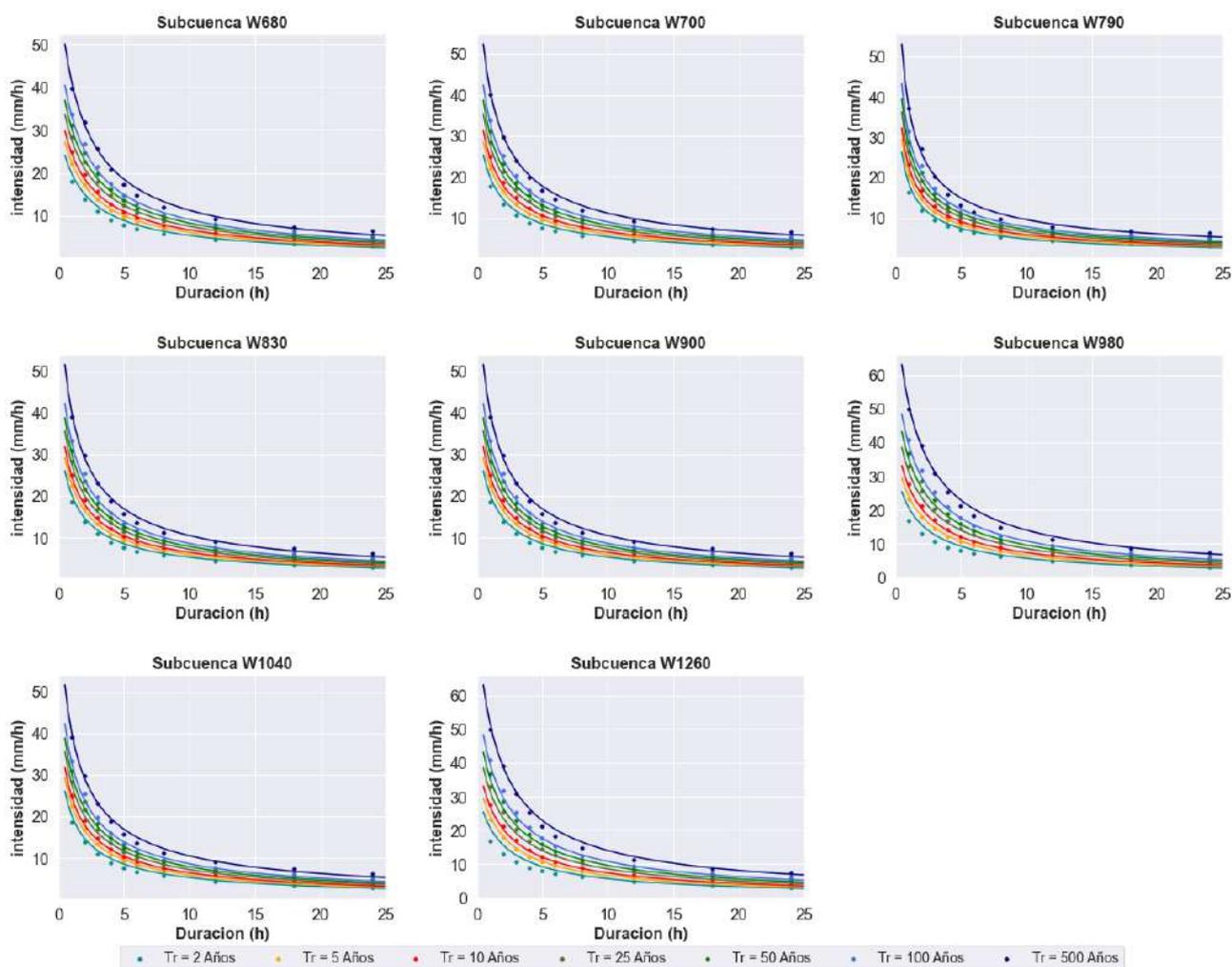
Tabla 18. Coeficientes de la ecuación para el cálculo analítico de las curvas IDF para el modelo de cambio climático seleccionado en el escenario RCP 4.5.

CUENCA	a	b	c
W680	233.53	0.139	0.603
W700	221.13	0.138	0.597
W790	184.76	0.123	0.579
W830	234.58	0.131	0.607

CUENCA	a	b	c
W900	234.58	0.131	0.607
W980	240.97	0.170	0.606
W1040	234.58	0.131	0.607
W1260	240.97	0.170	0.606

Finalmente, se calcularon y graficaron los valores presentados en las ecuaciones anteriores para cada subcuenca y en cada periodo de retorno determinado. Los resultados se presentan en la Figura 39.

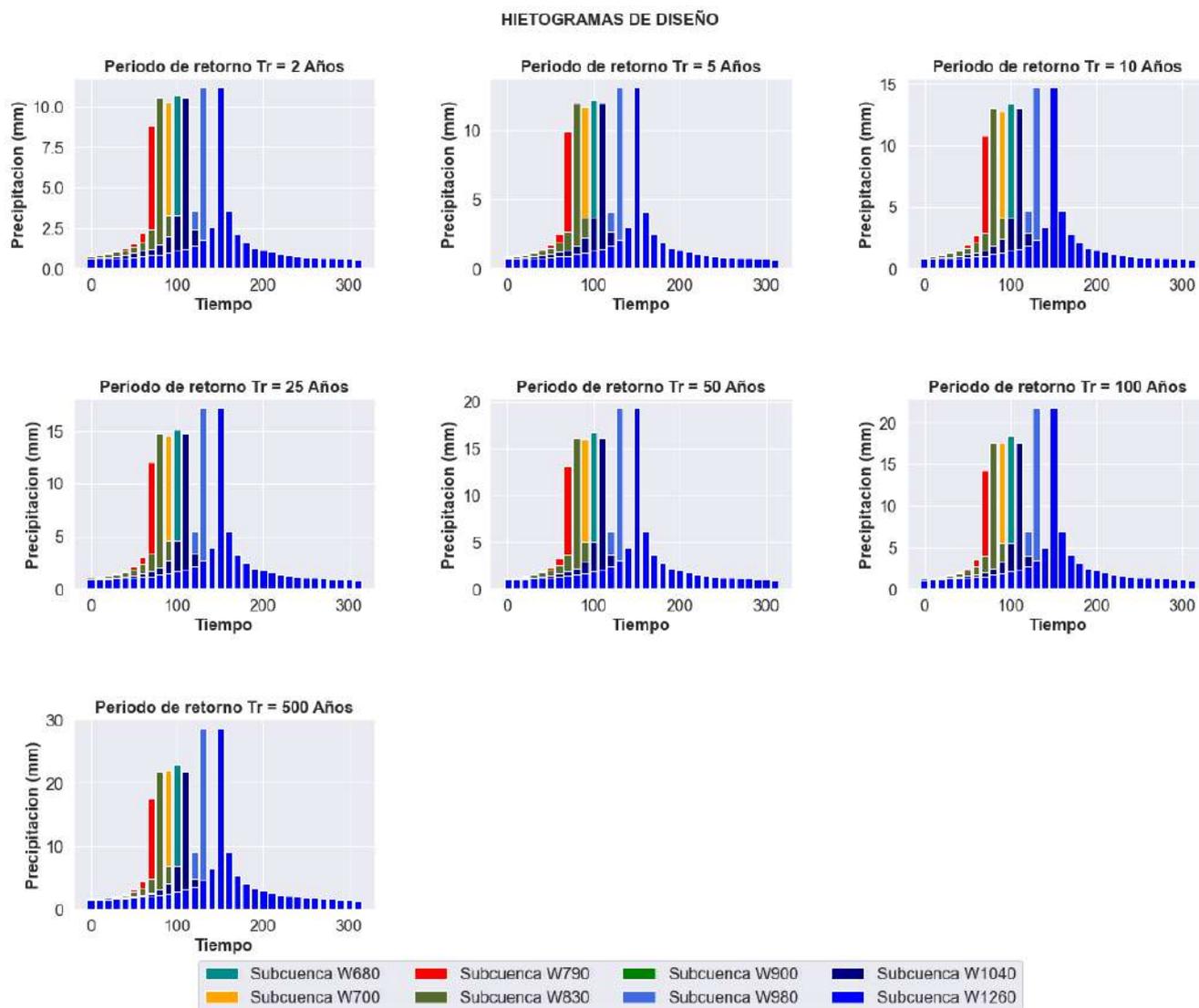
Figura 39. Curvas de Intensidad – Duración – Frecuencia para las subcuencas para el modelo de cambio climático seleccionado en el escenario RCP 4.5.



Haciendo uso de las curvas intensidad – duración – frecuencia obtenidas previamente, se calcularon las curvas de masas de los aguaceros puntuales para duraciones entre 0 y 300 min y periodos de retorno entre 2 y 500 años. Con las curvas de masas se calcularon los hietogramas de los aguaceros puntuales respectivos. Para dar una secuencia más crítica del aguacero, como es usual en este tipo de análisis, mediante el método del Bloque Alterno, se arreglaron los incrementos de lluvia de la siguiente manera: el valor más bajo se colocó en el primer lugar, el segundo valor en orden creciente se colocó en último lugar, el tercer valor en tal orden se ubicó en segundo lugar, el cuarto valor se localizó en el penúltimo

lugar, y así sucesivamente. La metodología fue aplicada a la familia de curvas IDF en cada una de las subcuencas y los resultados gráficos se presentan en la Figura 40.

Figura 40. Hietogramas de diseño asociados a diferentes eventos con periodo de retorno para las subcuencas para el modelo de cambio climático seleccionado en el escenario RCP 4.5.



6.2.4.2. Escenario RCP 8.5

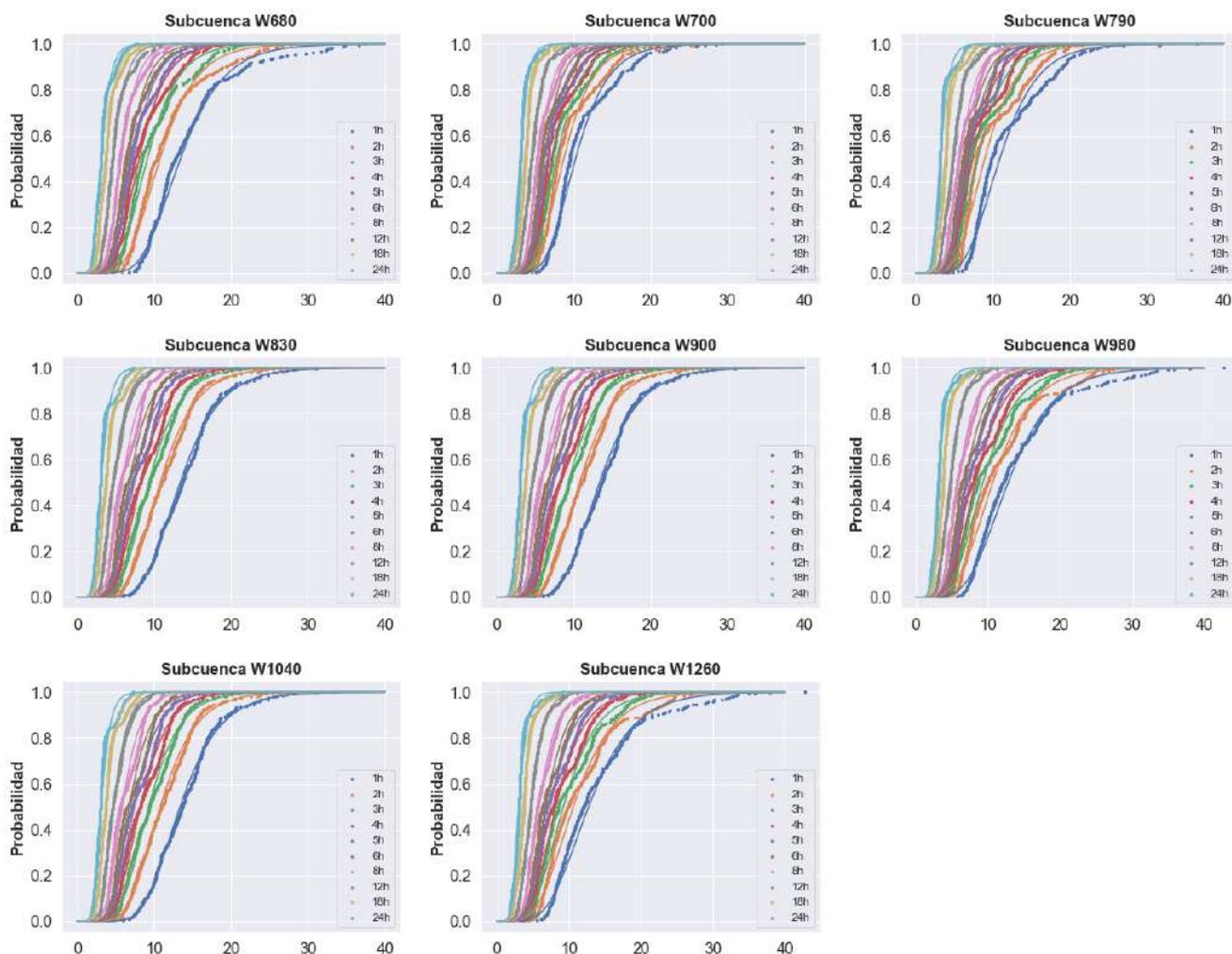
Con los valores de la precipitación horaria y diaria registrada por las estaciones seleccionadas en la zona de proyecto y a partir del método de desagregación temporal y los estadísticos calculados a partir las series futuras de precipitación en el escenario RCP 8.5, se realizó la reconstrucción de lluvias horarias sintéticas en las estaciones en un periodo total de 320 años.

Una vez obtenidas las lluvias futuras en las estaciones de proyecto, se realizó la interpolación de los datos de precipitación a los centroides de las subcuencas, mediante el método de la distancia inversa.

Siguiendo el mismo procedimiento descrito en el capítulo 5.3.4 y utilizando los datos de las lluvias obtenidos mediante el método de la distancia inversa en las subcuencas, se computaron los datos de precipitación total para intervalos de 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 12, 18, 24 horas. Posteriormente se calcularon las

series de los valores de precipitación máximos por año para cada intervalo de tiempo, seguido de esto sobre las series generadas se realizó el ajuste estadístico correspondiente a la distribución de valores extremos generalizados (GEV), obteniendo la función de distribución acumulada para cada uno de los intervalos seleccionados como se presenta en la Figura 41.

Figura 41. Función de distribución acumulada en las sub cuencas para valores de intensidad máxima anual en intervalos de tiempo seleccionados para el modelo de cambio climático seleccionado en el escenario RCP 8.5.



Siguiendo el mismo procedimiento descrito en el capítulo 6.1.4.2, mediante el uso del algoritmo para el cálculo de los términos de una correlación lineal múltiple, y a partir del inverso de la matriz de los coeficientes de correlación simple, se encontraron los coeficientes de familia de curvas IDF. Los coeficientes a, b y c obtenidos a partir de la correlación lineal múltiple para cada subcuenca en el escenario RCP 8.5 se presentan en la Tabla 19.

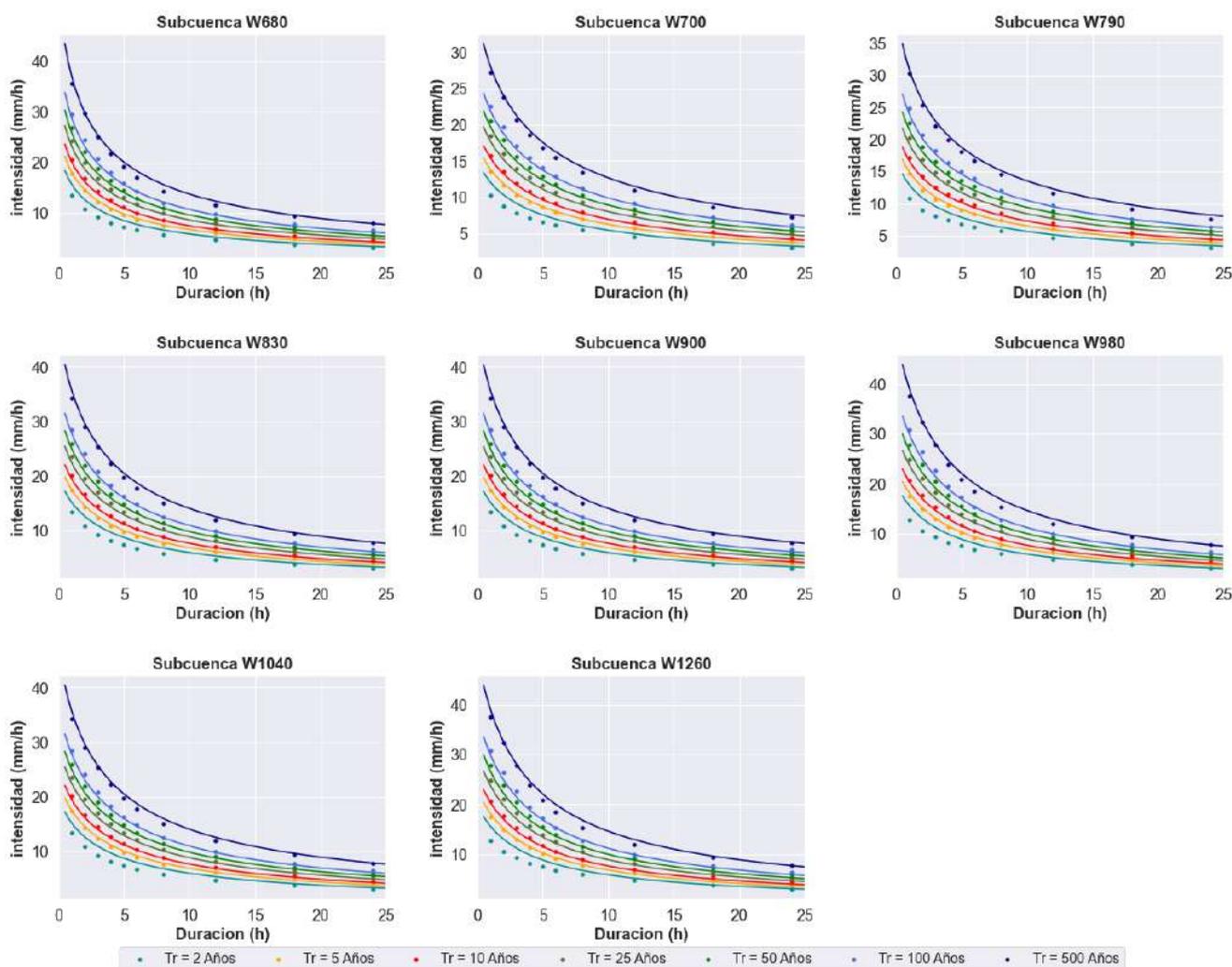
Tabla 19. Coeficientes de la ecuación para el cálculo analítico de las curvas IDF para el modelo de cambio climático seleccionado en el escenario RCP 8.5.

CUENCA	a	b	c
W680	108.98	0.170	0.486
W700	63.99	0.164	0.412
W790	70.13	0.169	0.421

CUENCA	a	b	c
W830	106.92	0.169	0.480
W900	106.92	0.169	0.480
W980	121.96	0.178	0.503
W1040	106.92	0.169	0.480
W1260	121.96	0.178	0.503

Finalmente, se calcularon y graficaron los valores presentados en las ecuaciones anteriores para cada subcuenca y en cada periodo de retorno determinado. Los resultados se presentan en la Figura 42.

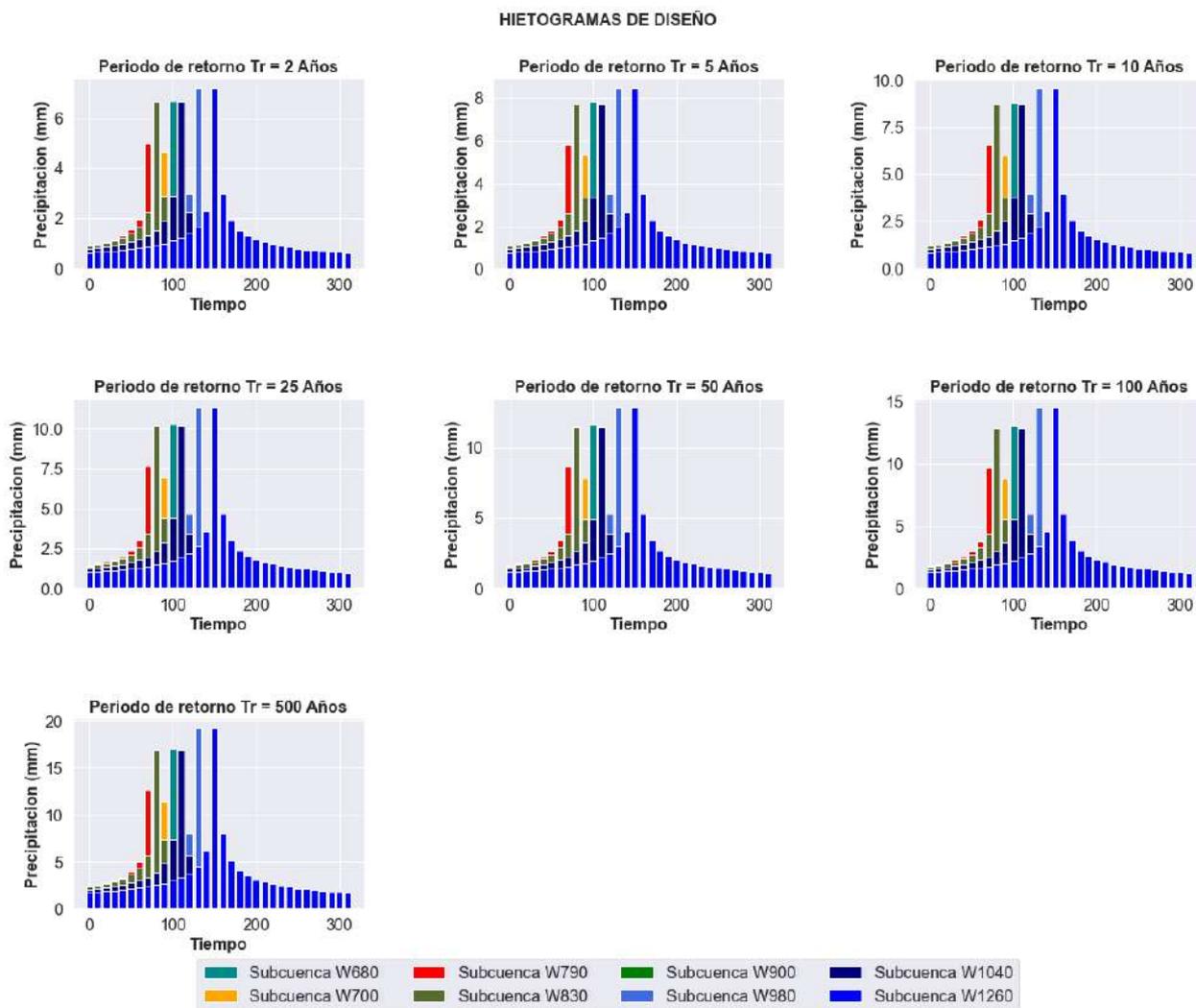
Figura 42. Curvas de Intensidad – Duración – Frecuencia para las subcuencas para el modelo de cambio climático seleccionado en el escenario RCP 8.5.



Haciendo uso de las curvas intensidad – duración – frecuencia obtenidas previamente, se calcularon las curvas de masas de los aguaceros puntuales para duraciones entre 0 y 300 min y periodos de retorno entre 2 y 500 años. Con las curvas de masas se calcularon los hietogramas de los aguaceros puntuales respectivos. Para dar una secuencia más crítica del aguacero, como es usual en este tipo de análisis, mediante el método del Bloque Alterno, se arreglaron los incrementos de lluvia de la siguiente manera: el valor más bajo se colocó en el primer lugar, el segundo valor en orden creciente se colocó en último lugar, el tercer valor en tal orden se ubicó en segundo lugar, el cuarto valor se localizó en el penúltimo

lugar, y así sucesivamente. La metodología fue aplicada a la familia de curvas IDF en cada una de las subcuencas y los resultados gráficos se presentan en la Figura 43.

Figura 43. Hietogramas de diseño asociados a diferentes eventos con periodo de retorno para las subcuencas para el modelo de cambio climático seleccionado en el escenario RCP 8.5.



6.2.4.3. Caudales

Para realizar el análisis extremal de los caudales del río Besaya en escenarios de cambio climático se ha utilizado el modelo hidrológico implementado para el cálculo de los hidrogramas de caudal asociados al periodo histórico. Sin embargo, para este caso se han actualizado los hietogramas calculados a partir de las lluvias del modelo de cambio climático seleccionado en los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5. Todos los cálculos de régimen extremal se realizaron evaluando el modelo en el periodo de mediano plazo (2041-2070). Los hidrogramas de caudal calculados en punto de concentración analizado, se presentan en la Tabla 20 para el modelo seleccionado en el escenario RCP 4.5, mientras que su representación gráfica se presenta en la Figura 44. De igual forma, los hidrogramas de caudal calculados en punto de concentración analizado para el modelo seleccionado en el escenario RCP 8.5 se presentan en la Tabla 21, mientras que su representación gráfica se presenta en la Figura 45.

Tabla 20. Caudales máximos instantáneos para las subcuencas de estudio asociados a diferentes periodos de retorno para el modelo seleccionado en el escenario RCP 4.5.

Nombre	Caudal (m ³ /s)						
	T= 2 años	T= 5 años	T= 10 años	T= 25 años	T= 50 años	T= 100 años	T= 500 años
W680	66.082	80.933	93.609	111.987	127.668	144.539	191.630
W700	59.684	73.309	84.893	95.436	116.447	132.327	175.479
W790	51.321	63.250	73.284	88.244	100.507	113.827	149.323
W830	31.717	38.864	44.826	53.527	60.845	68.817	90.106
W900	69.744	84.447	96.703	114.868	130.173	146.713	191.284
W980	176.918	223.603	264.250	325.262	378.273	437.465	603.499
W1040	108.896	132.033	151.327	179.597	203.407	229.114	298.331
W1260	219.017	275.813	325.351	399.839	464.113	536.299	738.679

Figura 44. Hidrograma de creciente asociados a diferentes eventos con periodo de retorno en las subcuencas para el modelo seleccionado en el escenario RCP 4.5.

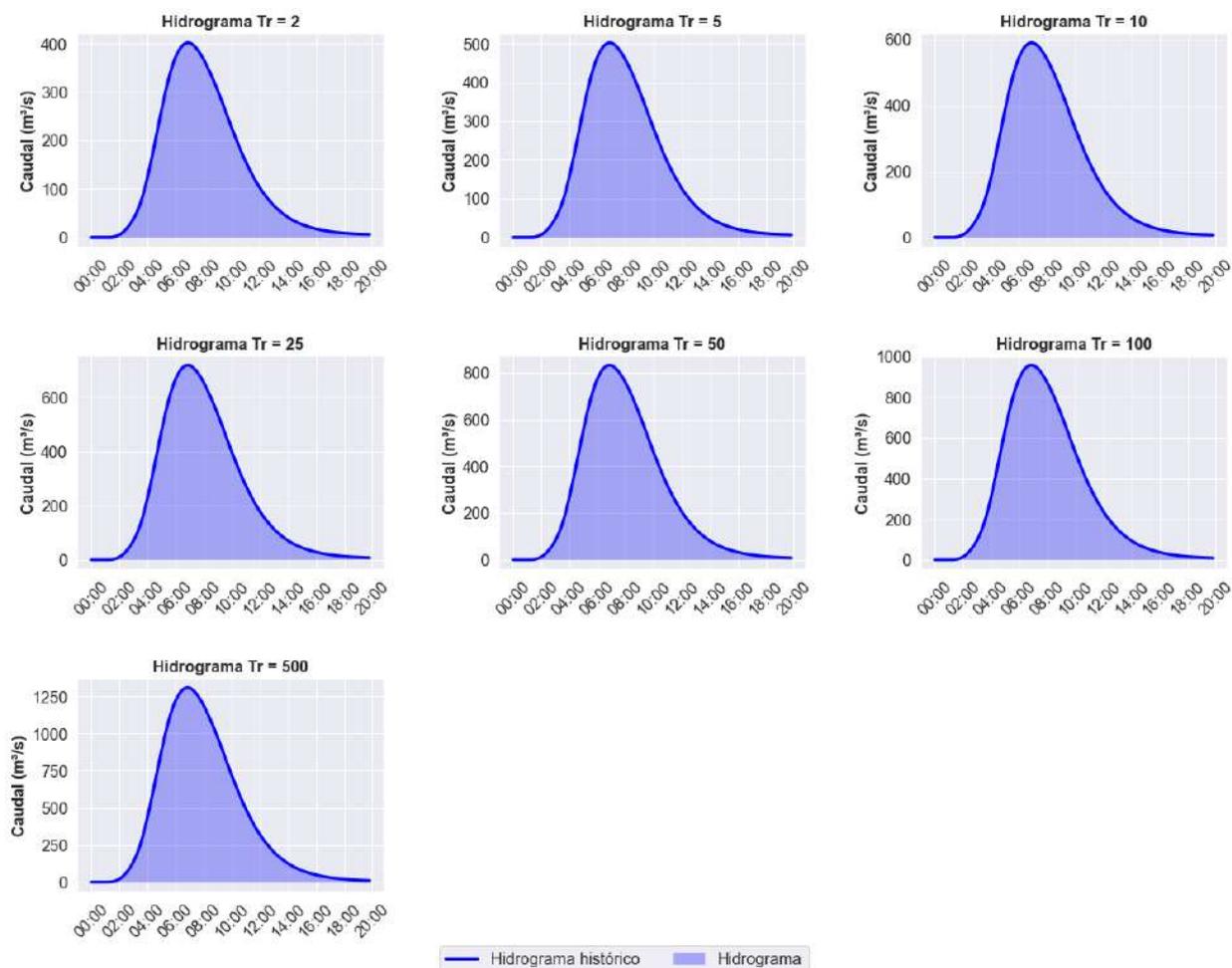
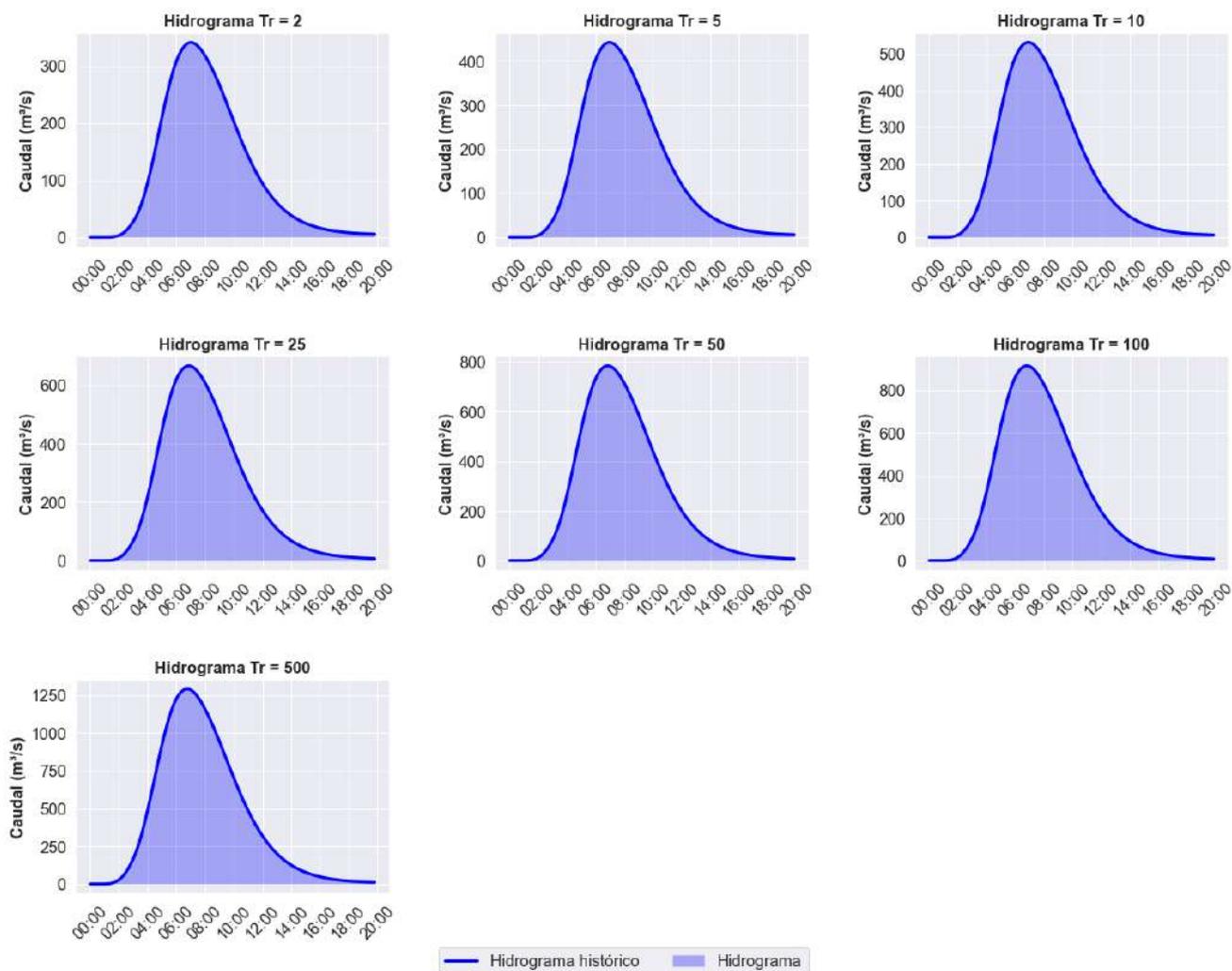


Tabla 21. Caudales máximos instantáneos para las subcuencas de estudio asociados a diferentes periodos de retorno para el modelo seleccionado en el escenario RCP 8.5.

Nombre	Caudal (m ³ /s)						
	T= 2 años	T= 5 años	T= 10 años	T= 25 años	T= 50 años	T= 100 años	T= 500 años
W680	52.652	68.401	82.314	102.997	121.183	141.217	196.755
W700	35.433	47.685	58.261	74.072	87.579	102.899	144.997
W790	38.427	52.269	64.730	83.384	99.327	117.058	167.030
W830	25.644	33.905	40.941	51.532	60.583	70.892	99.577
W900	59.697	77.281	92.486	115.240	134.895	156.808	218.095
W980	145.203	188.594	226.170	282.989	332.223	387.444	544.618
W1040	93.019	120.549	144.095	179.279	210.074	244.421	339.891
W1260	185.572	239.055	285.658	356.058	417.302	485.082	680.296

Figura 45. Hidrograma de creciente asociados a diferentes eventos con periodo de retorno en las subcuencas para el modelo seleccionado en el escenario RCP 4.5.

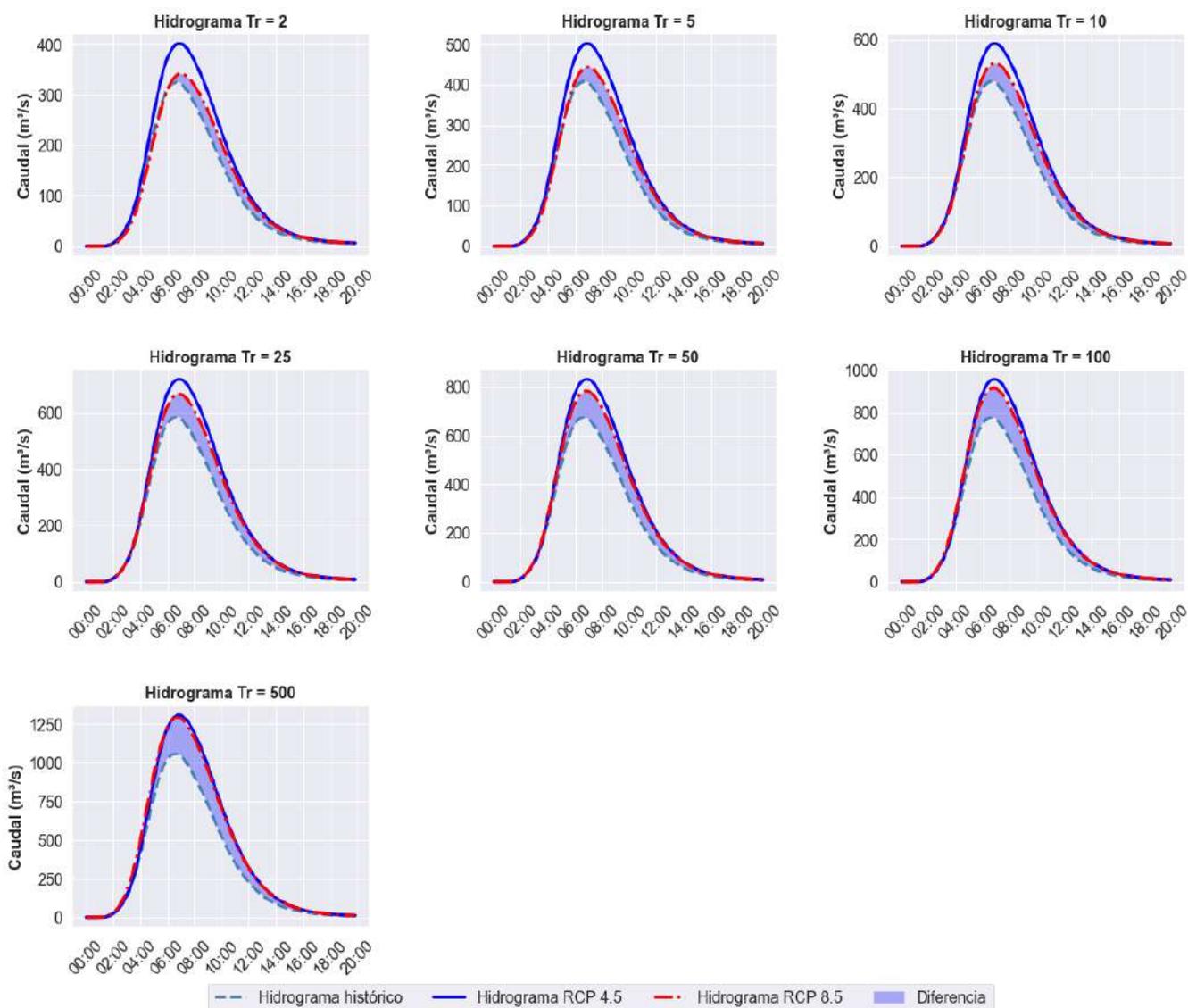


6.3. Selección de los hidrogramas del modelo y análisis comparativo de escenarios

Previo a la construcción del modelo hidráulico, es importante evaluar los resultados obtenidos en los modelos hidrológicos, para seleccionar la condición más crítica. De acuerdo con las simulaciones hechas, la condición más desfavorable está asociada a los hidrogramas generados por eventos de precipitación con 500 años de periodo de retorno, para la simulación hidrológica histórica y la generada en el escenario RCP 4.5 y RCP 8.5.

En segundo lugar, se debe identificar dentro del modelo hidrológico el nodo en el que se deben extraer los caudales de diseño, para este caso y en relación con el modelo hidrológico HEC-HMS presentado en el Anexo 1, el nodo seleccionado corresponde al J4, el cual se localiza en la parte baja de la zona urbana del municipio, específicamente en donde el río Besaya se intersecta con la zona de estudio. Los resultados obtenidos del análisis comparativo se presentan en la Figura 46.

Figura 46. Análisis comparativo entre los hidrogramas del río Besaya en la zona de estudio, para el periodo histórico, el RCP 4.5 y el RCP8.5.



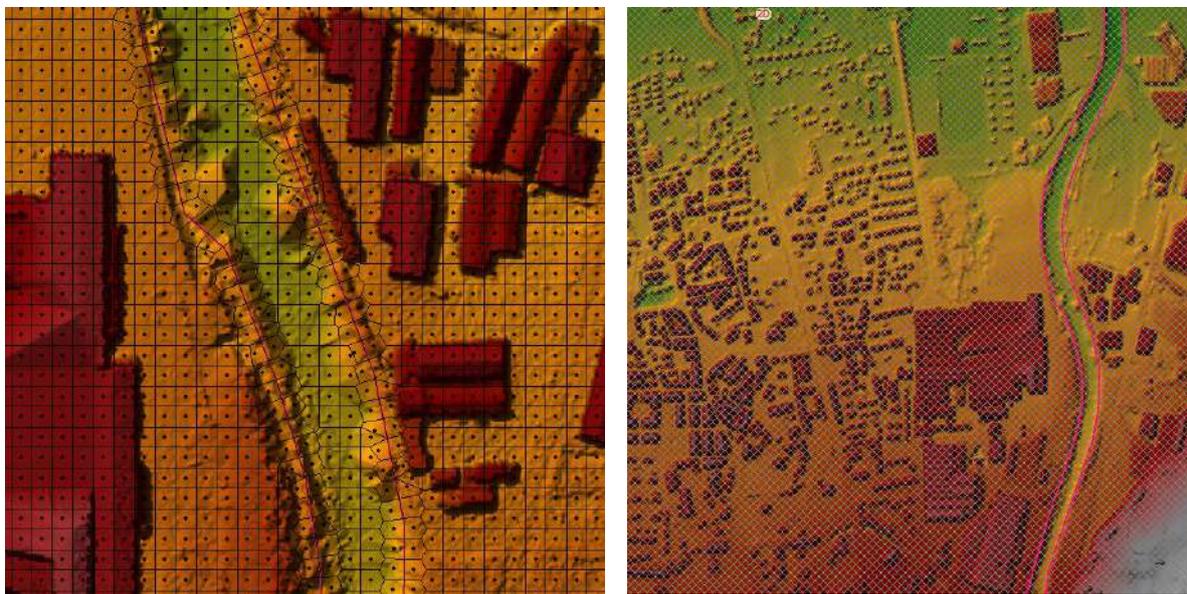
De acuerdo con los resultados obtenidos en la evaluación comparativa, se observa que los más desfavorables, sobre todo en eventos de precipitación con periodos de retornos bajos, corresponden al escenario RCP 4.5, sin embargo, a medida que se incrementa el periodo de retorno la diferencia entre el hidrograma producido por el escenario RCP 4.5 y el RCP 8.5 va disminuyendo, hasta llegar a un evento con 500 años, en donde la diferencia entre los dos escenarios es muy pequeña, siendo este último el seleccionado para elaborar el modelo hidráulico.

6.4. Análisis y resultados de la modelación hidráulica

6.4.1. Resultados para la definición de la malla de cálculo

A partir del modelo digital de terreno reconstruido, se generó una malla de cálculo con un ancho de cuadrícula correspondiente a 10.0 x 10.0 m, la cual tuvo en cuenta las diferencias de elevación entre celdas. La malla generada en comparación con el área definida para el proyecto confiere un conjunto de más de 2 millones de elementos, lo cual trae consigo una gran cantidad de cálculos y una gran resolución y precisión de los resultados. La extensión la malla detalla con gran precisión las llanuras de inundación del río Besaya y las zonas urbanas del municipio, con el fin de tener en cuenta la orografía de la población vulnerable dentro del modelo hidráulico. En la Figura 47, se presenta la definición de la malla de cálculo para una zona urbana del municipio, construida mediante el módulo *2D flow area* del programa *HEC-RAS*. La configuración descrita se replicó para cada uno de los puntos evaluados en el modelo hidráulico.

Figura 47. Definición de la malla de cálculo para la elaboración del modelo hidráulico HEC-RAS en la zona de estudio.



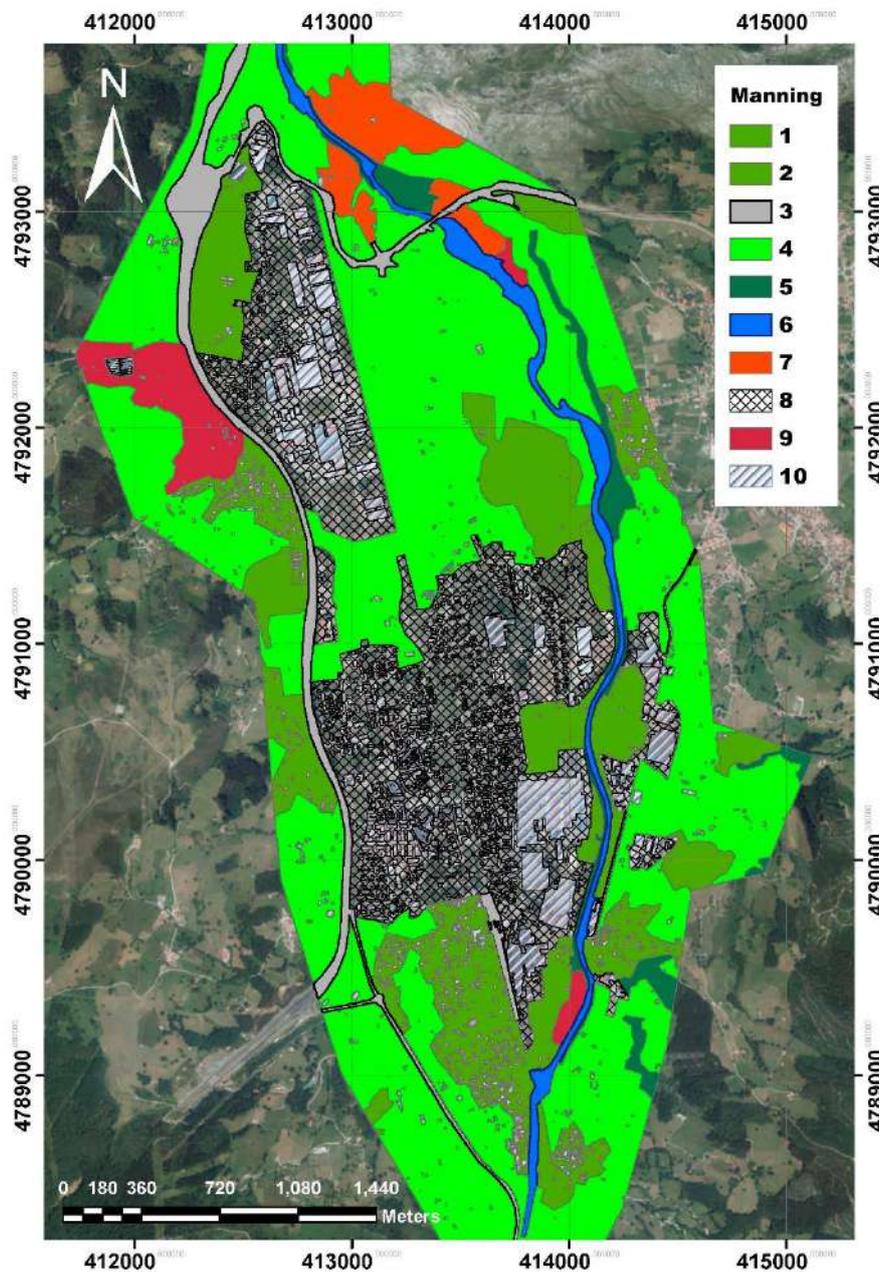
6.4.2. Resultados para la definición del coeficiente de rugosidad de Manning

De acuerdo con la metodología de cálculo descrita en el Capítulo 5 y a partir de imágenes satelitales, el coeficiente de rugosidad de Manning se asignó por sectores, teniendo en cuenta cada una de las áreas afectadas por la inundación. Para las zonas urbanizadas, se partió del mapa de usos del suelo, para ello se definió un coeficiente de rugosidad para cada una de las capas, asociando las mismas a una codificación de colores, los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 22 y en la Figura 48.

Tabla 22. Coeficientes de rugosidad de Manning seleccionados (Chow V.T., Maidment D.R., 1998)

ID	USO DEL SUELO	n
2	Vegetación urbana	0.06
6	Río(aguas)	0.035
8	Áreas residenciales	0.015
5	Bosque	0.15
1	Vegetación densa	0.07
3	Infraestructuras	0.020
9	Matorral	0.04
4	Vegetación dispersa	0.04
10	Industrial	0.05

Figura 48. Mapa de los coeficientes de rugosidad de Manning seleccionados.



6.4.3. Condiciones de flujo y contorno

Las condiciones de contorno del río Besaya para el modelo bidimensional, están gobernadas aguas arriba por el hidrograma generado por la cuenca para un evento con periodo de retorno de 500 años. De igual forma, se ha definido como condición de contorno aguas abajo del cauce la altura normal, para una condición de flujo subcrítico, debido a la baja pendiente que tiene el cauce.

6.4.4. Análisis y resultados del modelo hidráulico

Los resultados del modelo hidráulico están referidos a tres simulaciones distintas, la primera corresponde a la inundación que se produce en la zona de estudio con el caudal asociado al evento con periodo de retorno de 500 años, en este caso el hidrograma se ha construido a partir de la caracterización extremal hecha con los registros históricos de precipitación.

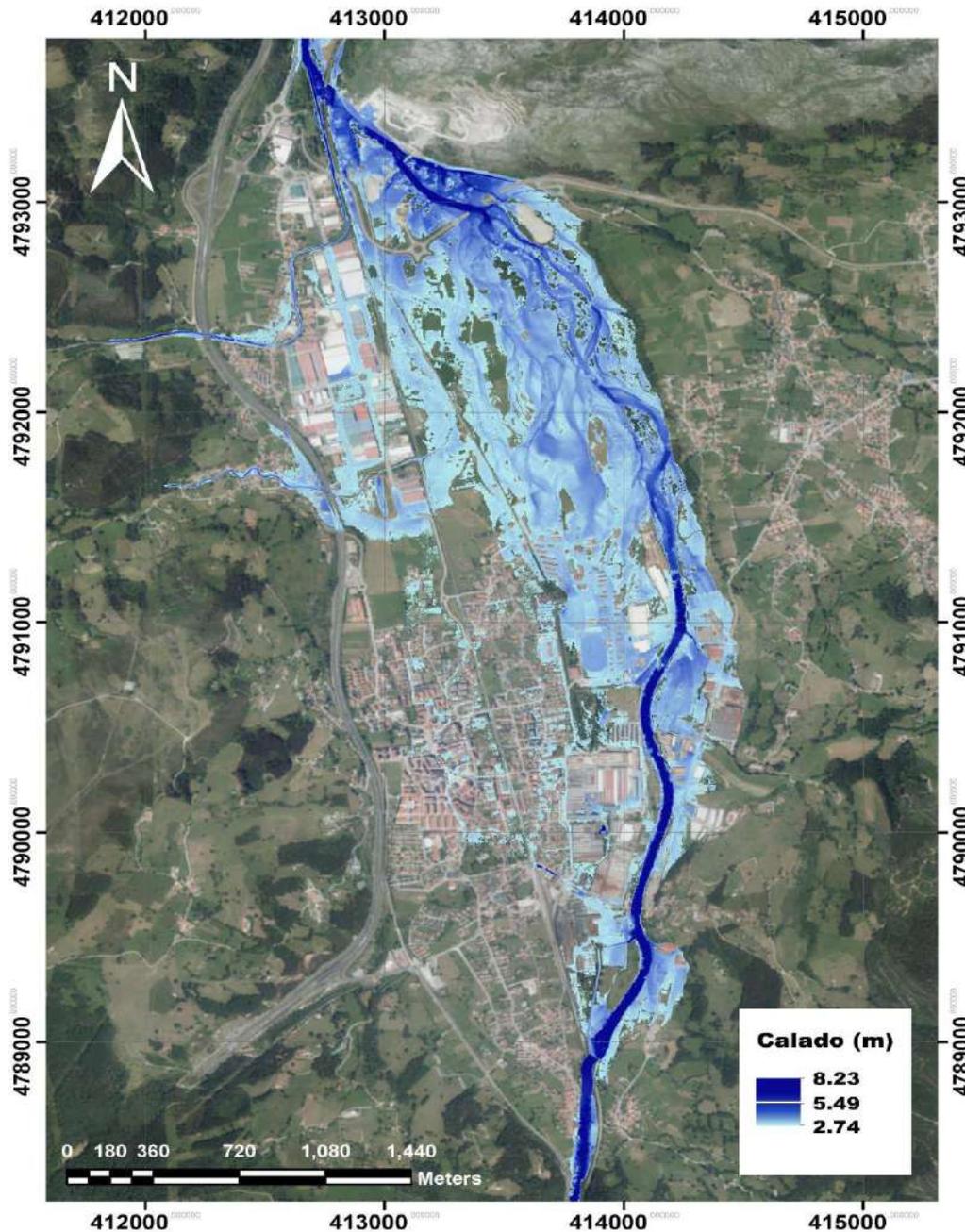
La segunda simulación, está referida a la inundación producida por el caudal asociado al evento de precipitación con periodo de retorno de 500 años, para este caso el hidrograma se ha elaborado a partir de la caracterización extremal hecha con registros futuros de precipitación bajo el escenario RCP 4.5.

La tercera y última simulación corresponde a la inundación producida por el hidrograma de caudal de 500 años de periodo de retorno, elaborado a partir de la caracterización extremal bajo el escenario RCP 8.5. Para cada simulación, se construyó el mapa de inundación y de distribución de velocidades para el caso más crítico, el cual se presenta cuando el hidrograma generado por la cuenca llega al pico. La mancha de inundación del río Besaya, sobre el área de estudio para la primera simulación se presentan en la Figura 49 y Figura 50.

En segunda instancia, en la Figura 51 y la Figura 52 se presentan los resultados del segundo escenario, los cuales están referidos a la mancha de inundación del río Besaya generada por el evento descrito y a la distribución de velocidades asociadas para el escenario RCP 4.5.

En tercera instancia, en la Figura 53 y la Figura 54 se presentan los resultados del último escenario, los cuales están referidos a la mancha de inundación del río Besaya generada por el evento descrito y a la distribución de velocidades asociadas para el escenario RCP 8.5.

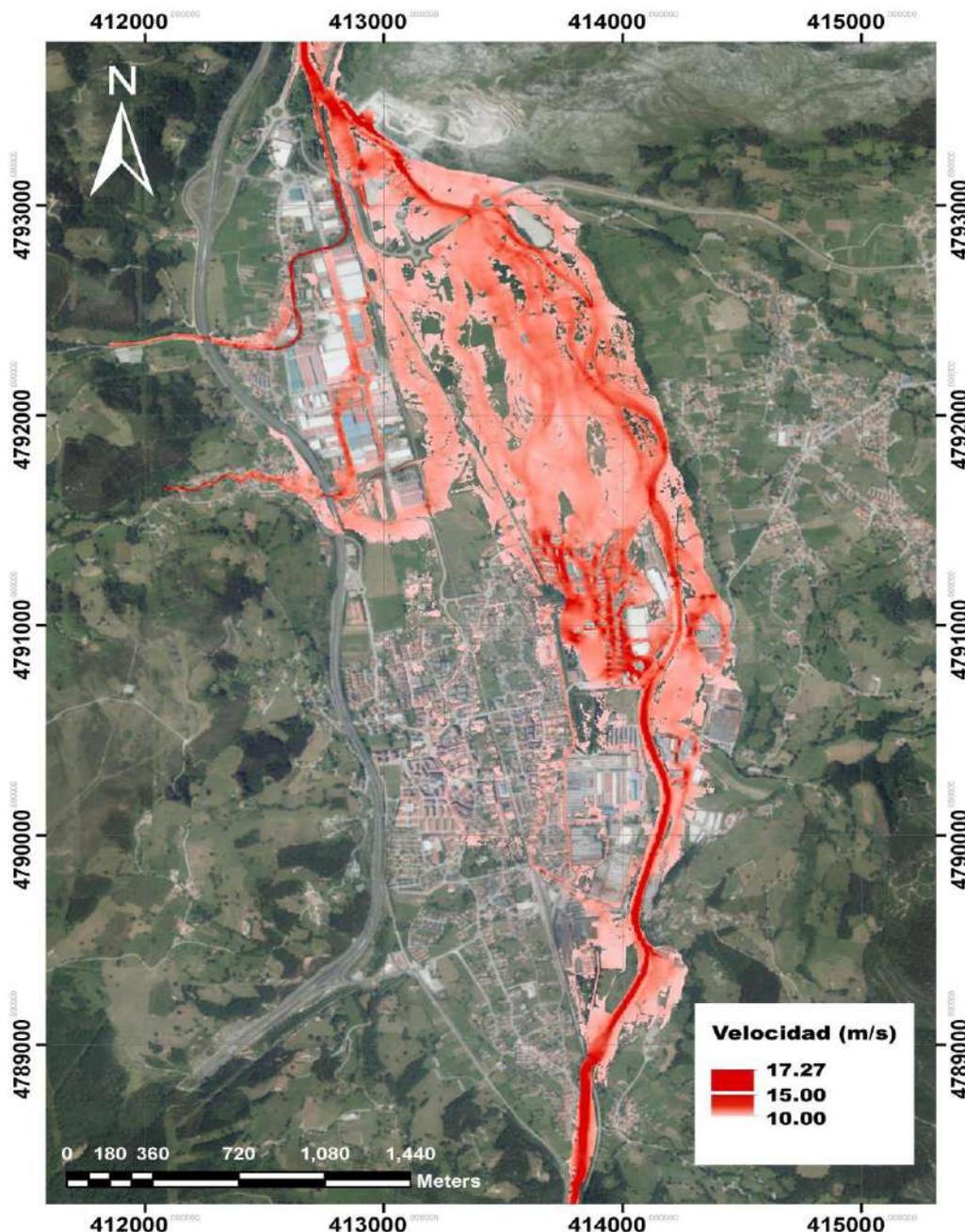
Figura 49. Mancha de inundación generada por un evento con 500 años de periodo de retorno para la caracterización extremal realizada con datos de precipitación histórica.



En la Figura 49 se evidencia que en la zona central del río Besaya, se presentan calados de hasta 8.23 m de profundidad, mientras que en las llanuras de inundación y áreas urbanas las láminas de agua alcanzan los 3.0 m, generando un riesgo importante. Las inundaciones en este caso, se magnifican como consecuencia de la afectación antrópica del área de estudio, generándose incapacidad hidráulica de la masa de agua. Debido a la incapacidad del lecho del cauce para transportar el caudal pico, se presentan múltiples desbordamientos en las márgenes y en las llanuras de inundación del río. Igualmente, por la baja capacidad hidráulica del cauce principal, se genera una restricción de flujo en las desembocaduras de los canales naturales que descargan sus aguas en el mismo, causando un efecto

hidráulico contrario, es decir, en vez de evacuar el caudal aportado, se generan remansos en los canales que a su vez inundan las áreas urbanas ubicadas aguas arriba de las desembocaduras.

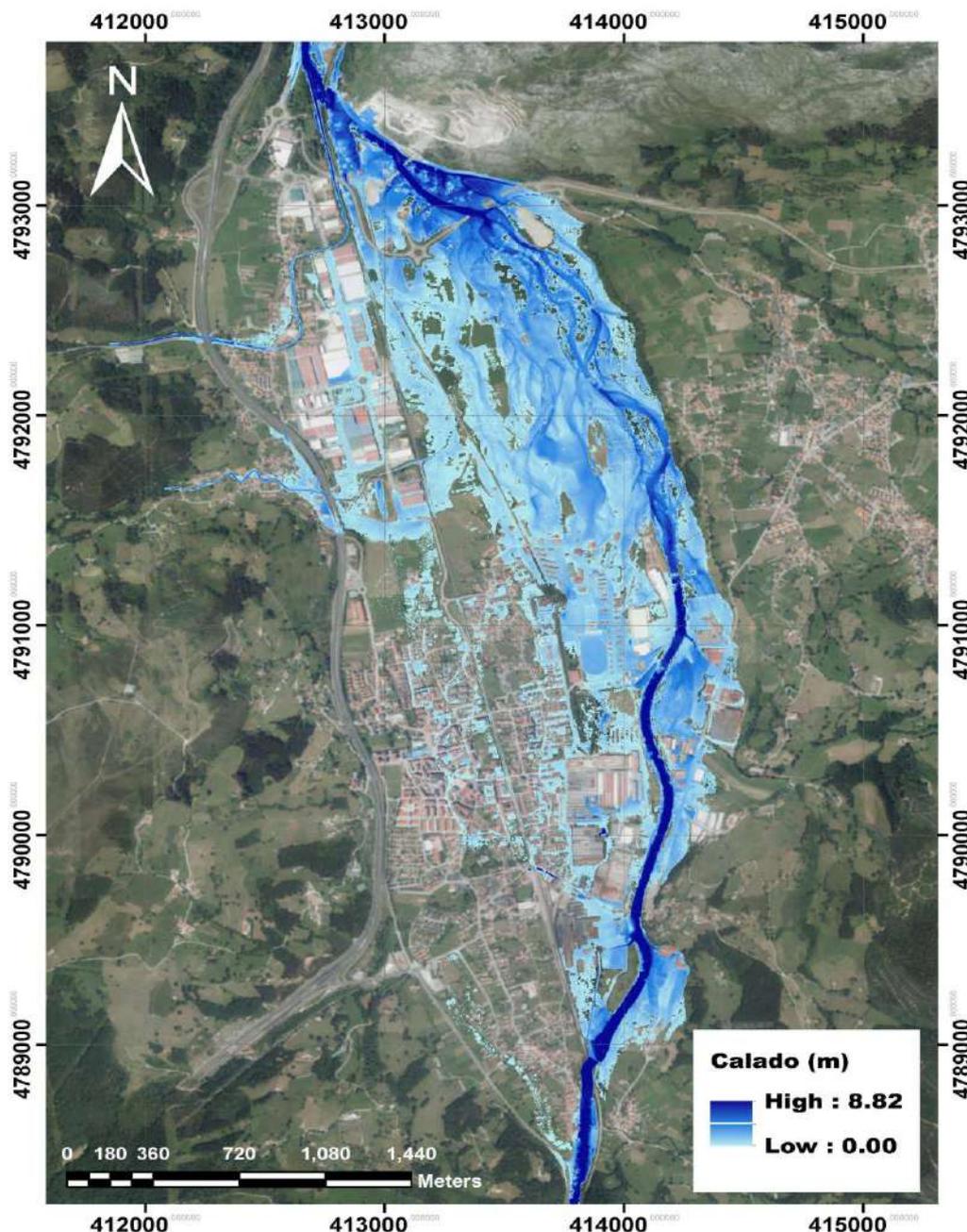
Figura 50. Mapa de velocidades generado por un evento con 500 años de periodo de retorno para la caracterización extremal realizada con datos de precipitación histórica.



Posterior al cálculo de niveles se generó el mapa de velocidades asociado a la mancha de inundación presentada en la figura anterior. Como se observa, la distribución de velocidades del río Besaya es mayor en la zona central, alcanzándose valores de hasta 17.27 m/s. La velocidad presenta un decrecimiento conforme la mancha se aleja del eje del río, debido al cambio de rugosidad del suelo y a la disminución del caudal que circula por las llanuras de inundación y los obstáculos que se van

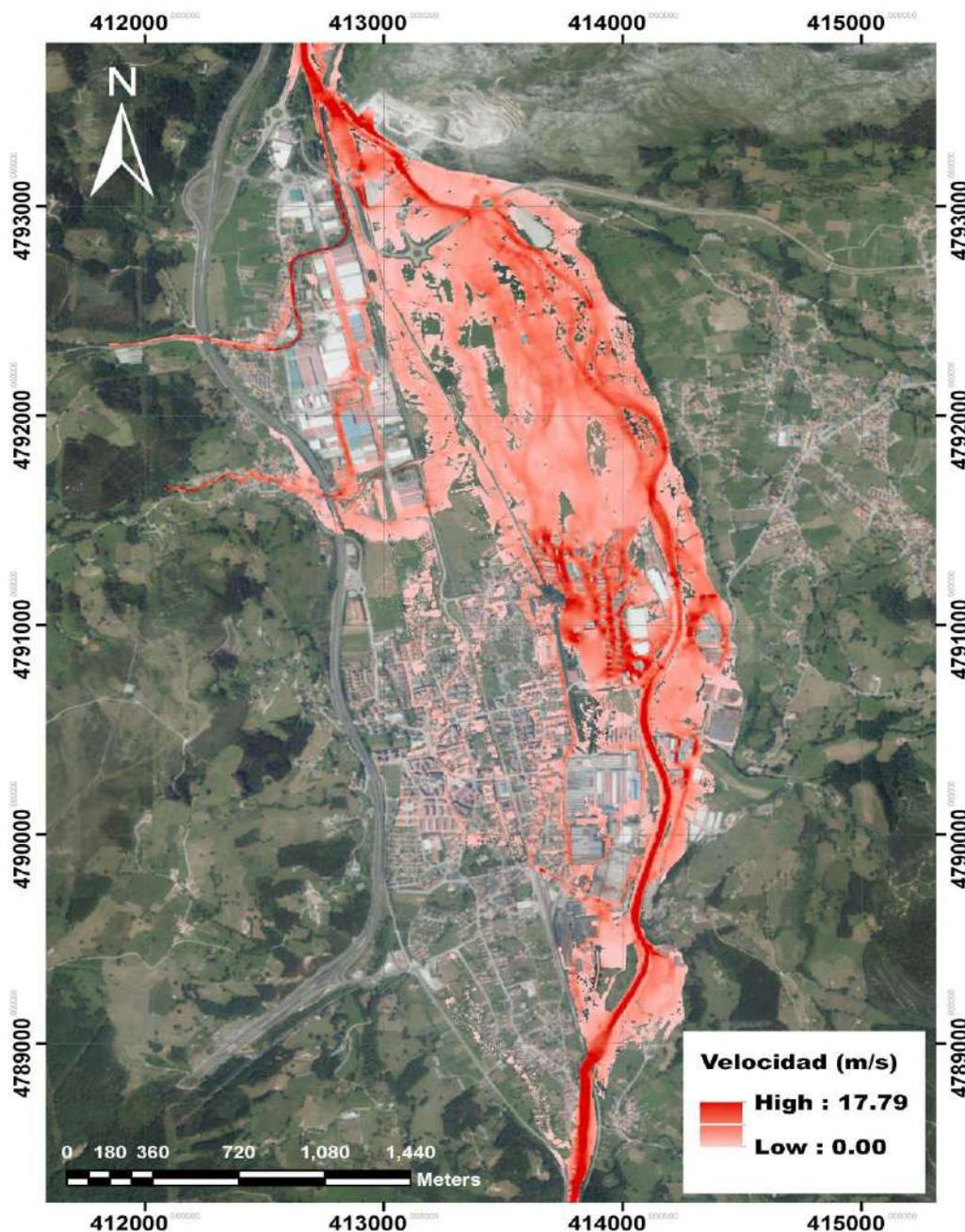
incrementando. En la zona urbana afectada, se presentan valores más bajos que oscilan entre un rango de 0.5 a 3 m/s.

Figura 51. Mancha de inundación generada por un evento con 500 años de periodo de retorno para la caracterización extremal realizada con datos de precipitación futura en el escenario RCP 4.5.



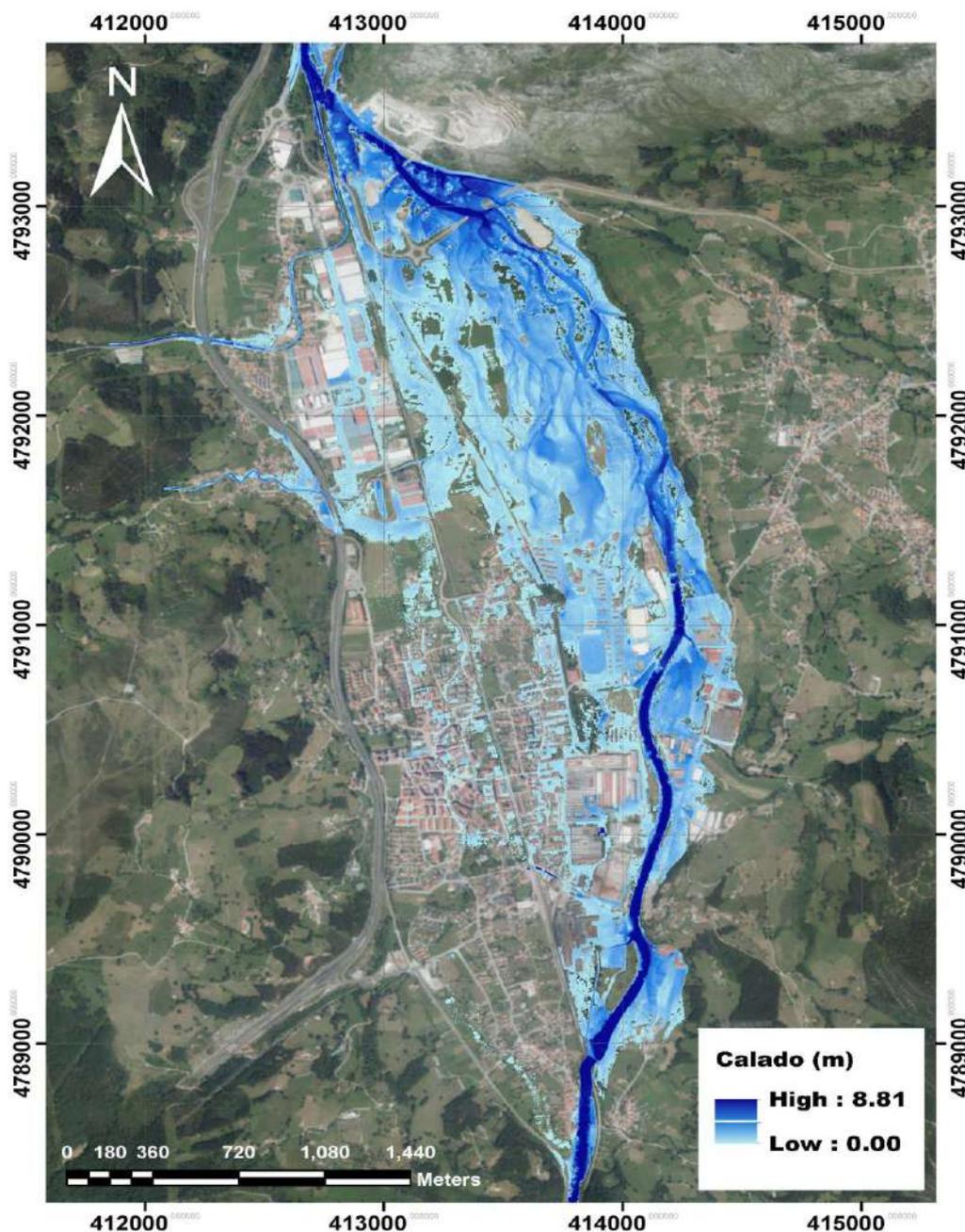
En comparación con la mancha de inundación presentada en la Figura 49, (generada para el primer escenario) se observa un incremento del 10% en el área de inundación total, acentuándose en las zonas localizadas al sur de la población. También se evidencia el incremento de la lámina de agua máxima, pasando de 8.23 m en la situación histórica a 8.82 m en el escenario RCP 4.5, lo que representa un aumento del 7%, correspondiente a 0.59 m.

Figura 52. Mapa de velocidades generado por un evento con 500 años de periodo de retorno para la caracterización extremal realizada con datos de precipitación para el escenario RCP 4.5.



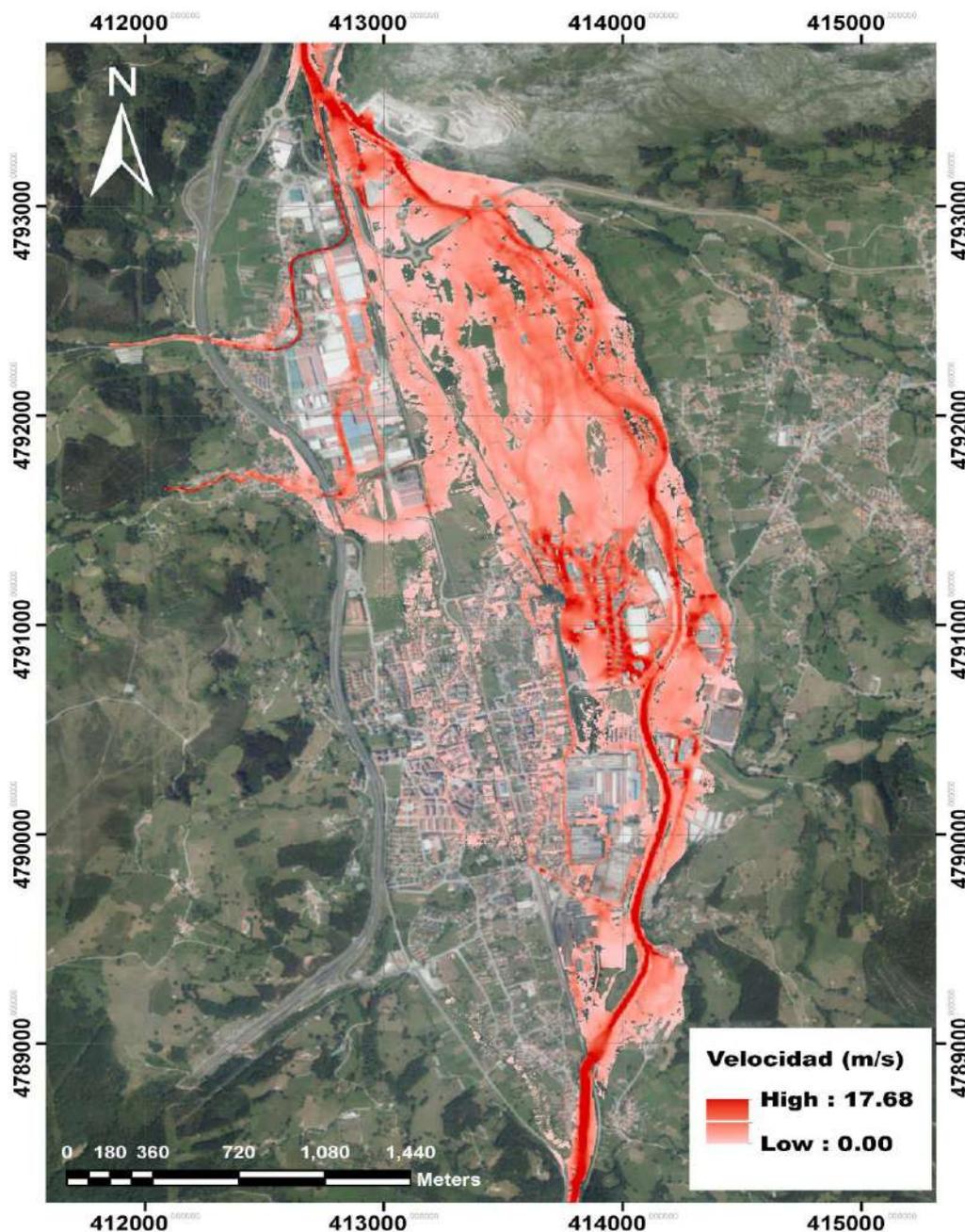
En el caso de la velocidad, al igual que en la profundidad se presenta un aumento de la misma, pasando de 17.27 m/s a 17.79 m/s, lo que equivale a un aumento del 3 % sobre el valor total histórico. La distribución de la velocidad, al igual que en el caso anterior presenta un decrecimiento conforme la mancha se aleja del eje del río, debido al cambio de rugosidad del suelo y a la disminución del caudal que circula por las llanuras de inundación y los obstáculos que se van incrementando. En la zona urbana afectada, se presentan valores más bajos que oscilan entre un rango de 0.6 a 3.1 m/s, respectivamente.

Figura 53. Mancha de inundación generada por un evento con 500 años de periodo de retorno para la caracterización extremal realizada con datos de precipitación para el escenario RCP 8.5.



En comparación con la mancha de inundación presentada en la Figura 49 y Figura 51, (generadas para el primero y segundo escenario) se observa al igual que en el escenario RCP 4.5 un incremento del 10% en el área de inundación total, acentuándose en las zonas localizadas al sur de la población. Esta situación se presenta, debido a que como se observó en el capítulo 6.2.4.3 los hidrogramas de caudal para los dos escenarios de estudio tienen muy poca variación. También se evidencia el incremento de la lámina de agua máxima, pasando de 8.23 m en la situación histórica a 8.81 m en el escenario RCP 8.5, lo que representa un aumento del 6.95%, correspondiente a 0.58 m.

Figura 54. Mapa de velocidades generado por un evento con 500 años de periodo de retorno para la caracterización extremal realizada con datos de precipitación para el escenario RCP 8.5.



En el caso de la velocidad, al igual que en la profundidad se presenta un aumento respecto de la descrita en el periodo histórico, pasando de 17.27 m/s a 17.68 m/s, lo que equivale a un aumento del 2.9% sobre el valor total histórico. La distribución de la velocidad, al igual que en el caso anterior presenta un decrecimiento conforme la mancha se aleja del eje del río, debido al cambio de rugosidad del suelo y a la disminución del caudal que circula por las llanuras de inundación y los obstáculos que se van incrementando. En la zona urbana afectada, se presentan valores más bajos que oscilan entre un rango de 0.55 a 3.05 m/s, respectivamente.

7. Planteamiento y selección de alternativas de intervención

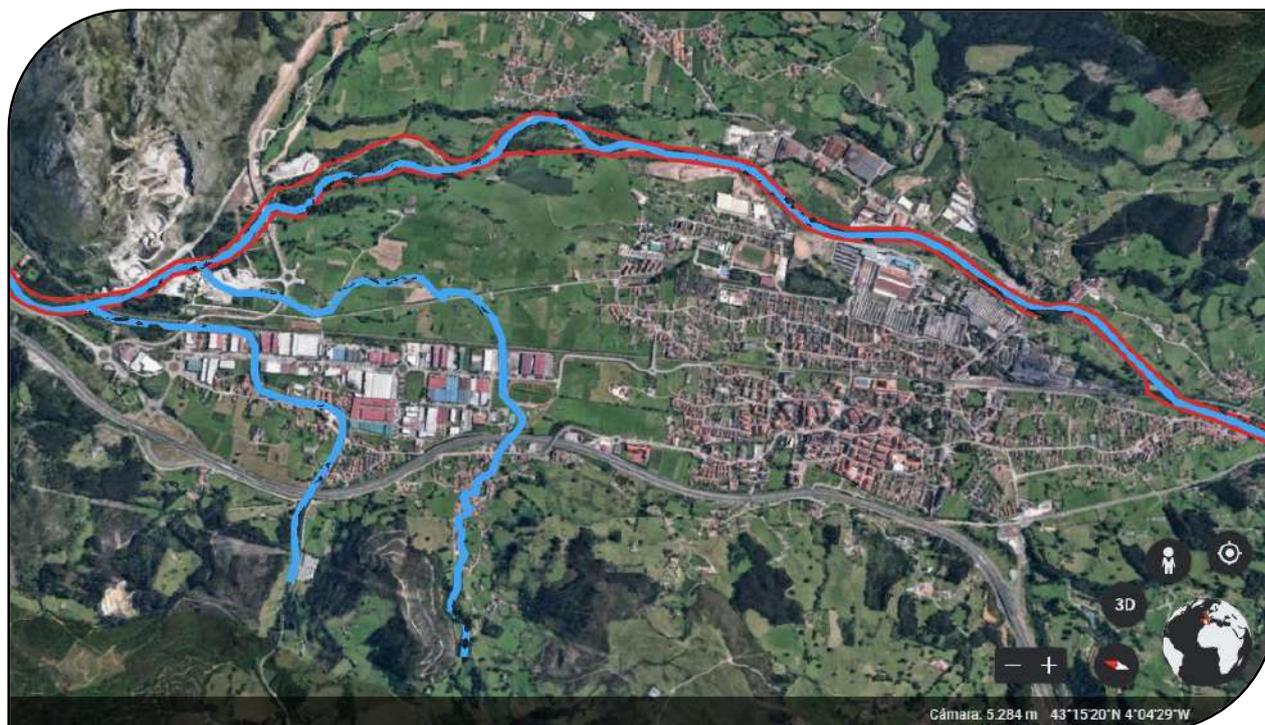
El planteamiento y la definición de alternativas, se realizará teniendo en cuenta las posibilidades de intervención existentes para el área de estudio, a partir de la evaluación del nivel de inundación al que se encuentra expuesta la zona. Dichas alternativas serán evaluadas con el fin de determinar desde el punto de vista económico, funcional y ambiental, cuál es la más viable. A continuación, se presenta una descripción de las alternativas propuestas.

7.1. Alternativa 1: construcción de muros y canalización del cauce en concreto

La alternativa 1, consiste en la canalización de los cauces, el diseño y construcción de muros de protección en concreto contra inundaciones sobre la margen derecha e izquierda del río Besaya, de tal forma que en una creciente se impida el paso del agua a la zona urbana del municipio, evitando así, poner en riesgo vidas o elementos materiales de mayor importancia.

Los muros propuestos tendrán una elevación adecuada para proteger la población a lo sumo contra una inundación con un período de retorno de 500 años contando con un borde libre adecuado. El encausamiento del río, se realizará mediante la construcción de secciones rectangulares tipo cajón, este tipo de soluciones libera mucho espacio, en especial en las llanuras de inundación de los ríos. Estos espacios son aprovechables, el problema es la pérdida del espacio natural del cauce del río. Para esta opción, denominada como alternativa 1, se propone construir una sección en concreto, rectangular, con aproximadamente 35 m de anchura y una profundidad promedio de 5 m. A continuación, en la Figura 55 se presenta la localización de los diques, los cuales están resaltados en color rojo.

Figura 55. Localización en planta de los diques y la canalización de los cauces propuestos.



El nivel de protección para este caso, hace referencia a la capacidad de proteger la población afectada y su funcionalidad ante un evento de igual o menor magnitud al de una creciente con un período de retorno de 500 años, teniendo en cuenta la caracterización extremal futura más crítica correspondiente al escenario RCP 4.5. A partir de esto se tienen en cuenta dos factores relevantes, los cuales corresponden a la protección de la población y a la protección de la infraestructura existente. Al tomar en cuenta las medidas de protección el riesgo de inundación en la población debe verse disminuido, haciendo que el nivel de protección a la inversión sea cercano al 100 % para un evento de igual o menor magnitud al de una creciente con un período de retorno de 500 años.

7.2. Alternativa 2: Rehabilitación del Besaya desde la parte alta de la cuenca hasta Los Corrales de Buelna

La segunda alternativa, consiste en la rehabilitación de la sección hidráulica y la restauración fluvial del río Besaya, para ello, es importante mencionar que, en el recorrido de la masa de agua, se identifican zonas más antropizadas que otras y por esta razón esta alternativa se ha dividido en dos sectores, en donde cada una de ellas trae consigo un tipo de intervención diferente.

Desde el punto de vista de la restauración, se deberán implementar planes, programas y proyectos enfocados en la restauración de la vegetación y los bosques de ribera, la recuperación ambiental de las zonas que puedan presentar un deterioro significativo, entre otras actuaciones desde el punto de vista ambiental. Con estas medidas se busca evitar que los picos de los hidrogramas sigan creciendo aguas abajo de la cuenca alta y media del río, como producto de la afectación de las coberturas del suelo y la intervención antrópica sobre el cauce, de esta manera se garantizará que a futuro las obras propuestas aguas abajo de la cuenca se vuelvan ineficaces para manejar las aguas y se produzcan nuevamente inundaciones. Por último, es importante mencionar que este tipo de medidas están planteadas en el largo mediano y largo plazo, puesto que dependen del desarrollo de la cuenca. A continuación, se describen las acciones propuestas para cada sector de intervención.

7.2.1. Sector de intervención 1

En el primer sector, se han identificado las áreas del río caracterizadas por tener baja densidad poblacional y poco tejido urbano, observándose también algunos sectores del cauce bastante antropizados. Además, se han identificado zonas de deposición de sedimentos, antiguas llanuras de inundación y meandros del río, los cuales están aislados. Actualmente, debido a las alteraciones que ha ido creando el hombre, sobre todo en las márgenes de los ríos, se observa un impacto significativo en la cobertura de la zona de ribera y en la sección original del cauce. Con la intervención de este tramo se pretende recuperar las llanuras de inundación y el área de meandros y su vegetación de ribera asociada. Para llevar a cabo esto, se propone recuperar la sección hidráulica del río, realizando un perfilamiento de las orillas para conseguir una pendiente suave entre el cauce y así recuperar las antiguas llanura de inundación y darle mayor capacidad hidráulica al cauce.

Para estas zonas en específico, es relevante plantear intervenciones, basadas en estrategias de ordenación territorial y restauración ambiental. Debido a que actualmente no tienen tejidos urbanos muy desarrollados y poco densificados que afecten de forma considerable los usos del suelo, es importante desarrollar una planificación urbanística ordenada, respetando las áreas de inundación del río, para eventos con periodos de retorno de mínimo 100 años. Estas zonas de corredores fluviales

estarán protegidas frente a las presiones que generan las expansiones urbanas (construcción de edificaciones que afecten el flujo normal del río, rellenos, etc.); con esta medida se protegerá en gran parte las zonas de inundación del río y se evitara afecciones como rellenos y actuaciones antrópicas que afecten el curso natural del agua.

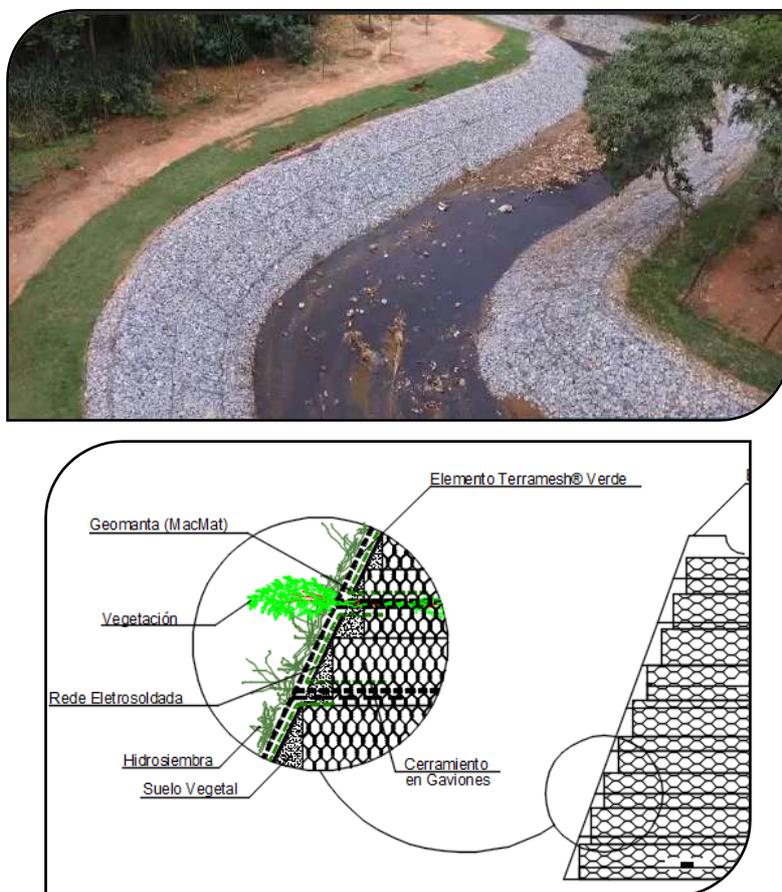
7.2.2. Sector de intervención 2

En el sector de intervención 2 se observa, se caracteriza por tener una interacción del río más grande con la población, debido a que el mayor porcentaje del área está poblado, en este se pretende realizar una adecuación de la sección hidráulica del río, mediante la construcción y adecuación de un canal con sección trapezoidal uniforme, la cual se mantendrá hasta la desembocadura del Besaya.

Para la adecuación hidráulica, se planea utilizar gaviones a lo largo y ancho de la sección, los cuales además de proteger los taludes, también protegerán el fondo y las orillas del cauce de la erosión. Es importante mencionar las ventajas de usar gaviones los cuales aceleran el estado de equilibrio del cauce, permitiendo que la vegetación de ribera crezca sobre ellos, generando una capa de protección natural, que disminuye en gran magnitud el desgaste de la estructura.

Al realizar un cambio en la sección del canal, se aumentará no solamente la capacidad hidráulica, sino que también potenciamos en gran medida el estado ecológico de la masa de agua. Esto minimizara también en gran medida el descontrolado aporte de sedimentos que actualmente se presenta en el río, por la erosión de las orillas y garantizará que el bosque de ribera que crezca en estas áreas, tenga un sustrato más firme. A continuación, en la Figura 56 se presenta la sección propuesta.

Figura 56. Propuesta de adecuación hidráulica del río para las áreas identificadas como sector 2.



7.3. Justificación de la solución adoptada

Para evaluar las dos alternativas propuestas y determinar la que presenta mayores ventajas, se ha establecido un sistema de puntuación, con una escala de 1 a 3, para cada uno de los ítems, en donde 3 es una puntuación favorable (menor impacto) y 1 desfavorable (mayor impacto). Los siguientes criterios de selección fueron elegidos para seleccionar la alternativa definitiva.

- **Generación de contaminación:** Este ítem hace referencia al impacto generado durante el proceso constructivo asociado con olores, ruidos, polvo y otros. Entre mayor sea el impacto generado menor será la calificación.
- **Cambios en el paisaje:** Este ítem se refiere a cambios que se generen en el entorno donde se emplazaran los sistemas; entre mayor sea la afectación, menor será la puntuación.
- **Contaminación y daños al suelo:** Este ítem se refiere a las afectaciones que se den al suelo producto de los procedimientos constructivos: eliminación de capa vegetal, infiltraciones al suelo producto de derrames de aceites durante la operación y mantenimiento de equipos. Entre mayor sea la afectación menor será el puntaje.
- **Incidencias sobre el medio bentónico y pelágico:** Este ítem se refiere a la afectación de las especies presentes en el medio pelágico y bentónico en el área de influencia del proyecto. Entre mayor sea la afectación menor será la puntuación.
- **Grado de afectación de la Red Natura 2000:** Este ítem hace referencia al grado de afección y de impacto que puede tener la red Natura 2000. Entre mayor sea la afectación menor será la puntuación.
- **Recuperación del curso natural del cauce:** Este ítem se refiere al grado de recuperación y área intervenida del curso natural del cauce. A mayor cauce intervenido y recuperado mayor será su puntuación.

A continuación, en la Tabla 23 se presenta la matriz de valoración para las dos alternativas propuestas, en donde se observa que la alternativa 2 tiene una puntuación de 16, frente a una puntuación de 8 de la alternativa 1. En cuanto al análisis funcional, se considera que las dos alternativas cumplen los objetivos planteados. Para el análisis económico es importante realizar un presupuesto, con el fin de determinar cuál de las dos actuaciones es más costosa, sin embargo, dicho estudio no está dentro del alcance del presente estudio. Por las razones expuestas, se le dará un peso importante a la valoración ambiental y de acuerdo con los criterios descritos la alternativa seleccionada es la 2.

Tabla 23. Matriz de valoración y selección de las alternativas propuestas.

COMPONENTES	VARIABLES	IMPACTO NEGATIVO			CALIFICACIÓN ALTERNATIVA 1	CALIFICACIÓN ALTERNATIVA 2
		BAJO	MEDIO	ALTO	PUNTAJE	PUNTAJE
AFECTACIONES O INCIDENCIAS DEL PROYECTO AL MEDIO AMBIENTE	Generación de contaminación	3	2	1	1	2
	Cambios en el paisaje	3	2	1	2	3
	Contaminación y daños al suelo	3	2	1	1	2
	Incidencias sobre medio bentónico y pelágico	3	2	1	1	3
	Grado de afectación de la Red Natura 2000	3	2	1	2	3
	Recuperación del curso natural del cauce	3	2	1	1	2
TOTAL					8	15

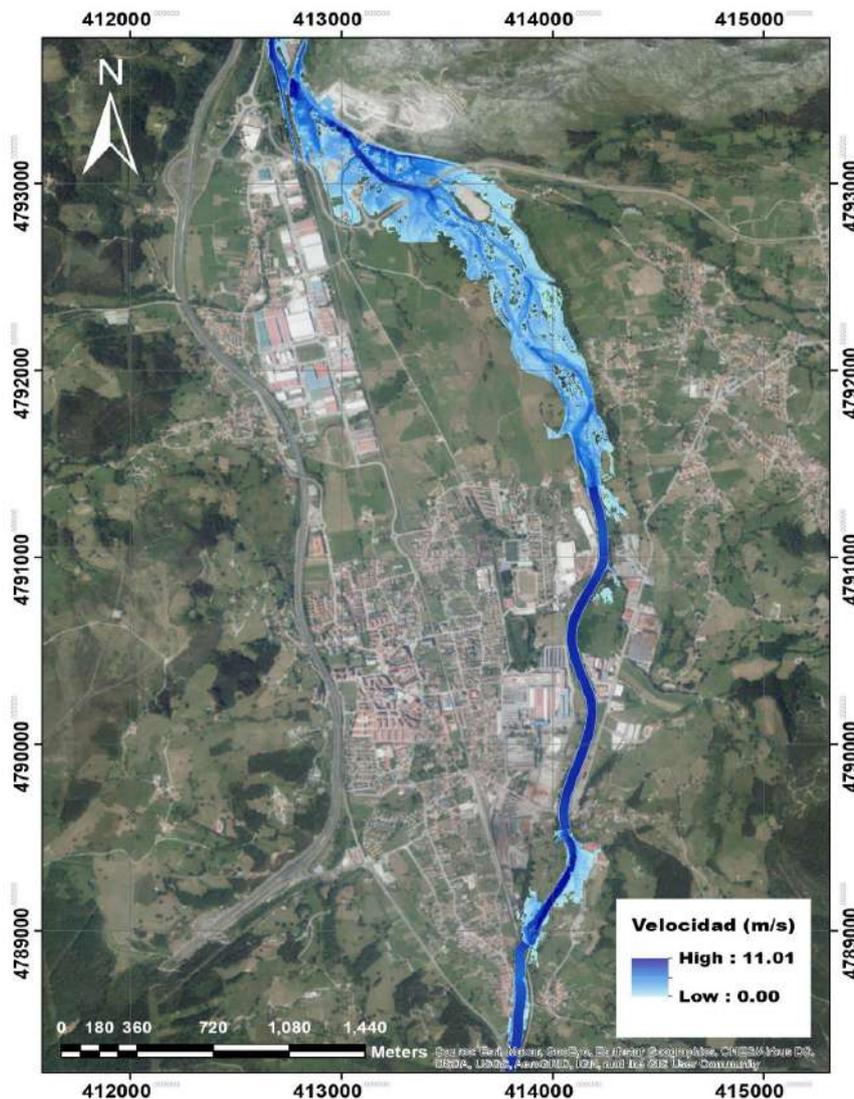
7.4. Evaluación de alternativa definitiva

Como se mencionó al inicio del informe los resultados del modelo hidráulico están referidos a dos escenarios distintos, el primero él se desarrolló en el Capítulo 6 donde se analizó la condición natural y el segundo se desarrolla en este capítulo, donde se analiza la situación una vez implantadas las medidas de mitigación. Bajo este escenario se calculó la mancha de inundación generada por bajo un evento de 500 años de periodo de retorno el cual se presenta en la Figura 57. De igual forma, se calculó el mapa de velocidad el cual se presentan en la Posterior al cálculo de niveles se procedió a realizar el cálculo de las velocidades que se presentan a lo largo de la corriente, en las zonas urbanas afectadas y en las áreas de vega del río. El resultado de las velocidades aplicando las medidas de mitigación se presenta en la **¡Error! La autoreferencia al marcador no es válida..** Como se observa se presenta un gradiente de velocidades, en donde las más altas están en la zona central del río y las más bajas se ubican en las márgenes del río. En general, las velocidades en la zona oscilan entre los 0 y 30 m/s para toda la zona, viéndose un aumento significativo frente a la condición inicial.

Figura 58. En cuanto a las condiciones de contorno, el número de Manning y la preparación del MDT, se tuvieron en cuenta las mismas consideraciones descritas en el Capítulo 6.

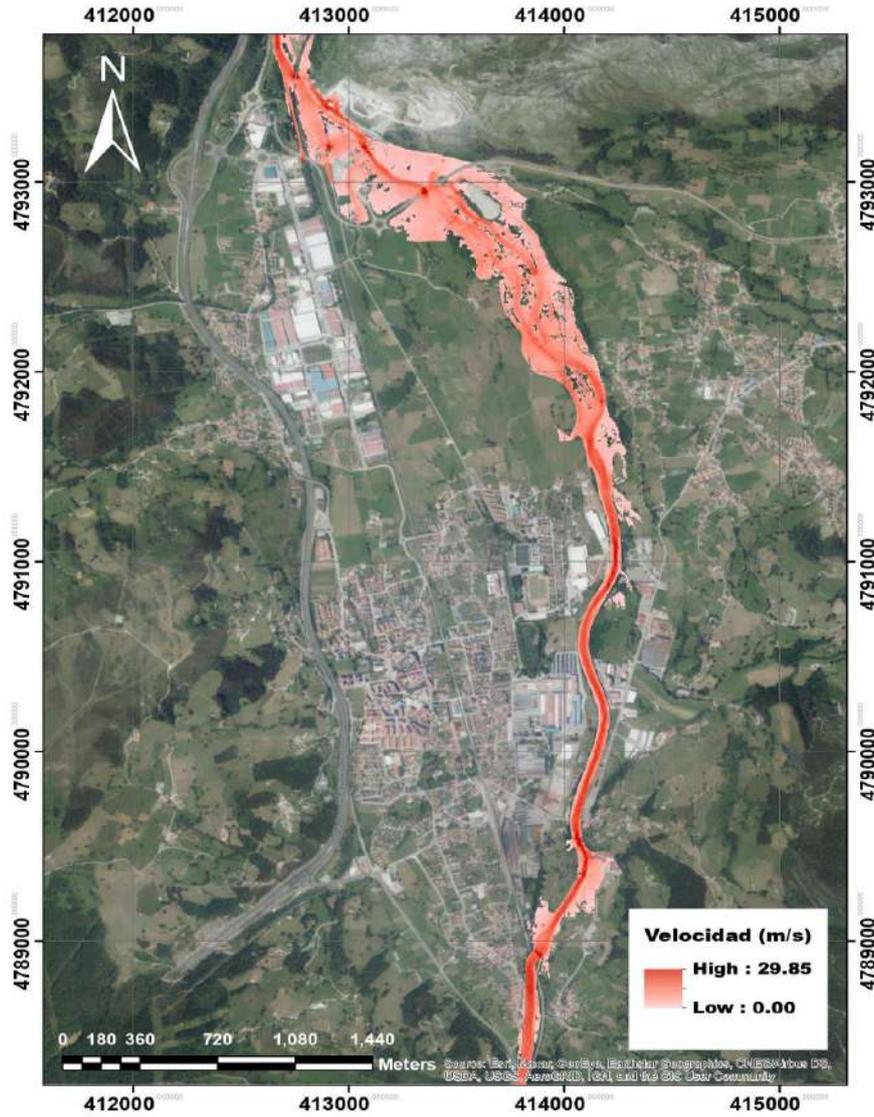
De acuerdo con los resultados obtenidos del modelo hidráulico, y en relación con la Figura 57 se observa que en la zona de estudio se presentan calados de hasta 7.7 m de profundidad. Del nuevo modelo se destaca la reducción de la inundación en la zona central de la población y se observa también, un aumento significativo en la capacidad hidráulica del río con la cual, se mejora en gran medida el transporte del caudal pico, evidenciándose así una disminución de los desbordamientos en las márgenes del cauce.

Figura 57. Mancha de inundación aplicando las medidas de mitigación para un evento con $Tr = 500$ años – RCP 4.5



Posterior al cálculo de niveles se procedió a realizar el cálculo de las velocidades que se presentan a lo largo de la corriente, en las zonas urbanas afectadas y en las áreas de vega del río. El resultado de las velocidades aplicando las medidas de mitigación se presenta en la **¡Error! La autoreferencia al marcador no es válida..** Como se observa se presenta un gradiente de velocidades, en donde las más altas están en la zona central del río y las más bajas se ubican en las márgenes del río. En general, las velocidades en la zona oscilan entre los 0 y 30 m/s para toda la zona, viéndose un aumento significativo frente a la condición inicial.

Figura 58. Mapa de velocidades aplicando las medidas de mitigación para un evento con $T_r = 500$ años – RCP 4.5.



8. Conclusiones

A partir de los modelos de cambio climático evaluados y mediante el uso de técnicas estadísticas avanzadas (*downscaling*) para la generación estocástica de variables climáticas bajo los escenarios de emisión de gases efecto invernadero RCP 4.5 y RCP 8.5, se construyó un modelo hidrológico y un modelo hidráulico, los cuales funcionaron como base para cuantificar, valorar, medir y evaluar los cambios de la inundación generada por el río Besaya en el municipio de Los Corrales de Buelna (Cantabria, España). Las principales conclusiones obtenidas, se presentan a continuación:

- La topografía y batimetría de la zona de estudio, componen una de las entradas más importantes del modelo hidráulico, dado que la resolución del MDT en donde se representan, define en gran medida los resultados de la simulación hidráulica de una inundación. Por esta razón, en el presente estudio se realizó un control estricto de los diferentes datos implementados en la construcción del MDT y se revisó minuciosamente la información referente a las batimetrías de los cauces, los datos LIDAR y los modelos digitales de terreno existentes. De esta forma se garantizó la veracidad de la información introducida en el modelo hidráulico, buscando que el MDT representará de forma exacta y precisa el terreno.
- Por medio de la elaboración del modelo hidrológico se determinó el régimen de caudales extremos producidos por la cuenca del río Besaya. Parte de la elaboración del modelo, consistió en la calibración y validación de los resultados; por medio de estos procesos se determinó que los coeficientes de almacenamiento de agua de las capas GW1 y GW2 superior e inferior, así como los coeficientes que establecen las condiciones de tiempo para transformar el agua en almacenamiento en salidas laterales son los más importantes en el modelo continuo *Soil Moisture Accontinue*. Como conclusión del proceso de calibración se obtuvo un PBIAS de 0.5% lo que se considera un resultado muy bueno por estar dentro del rango de $\pm 10\%$. Igualmente, el valor obtenido para el NASH correspondió a un valor de 0.65, valor que también se considera bueno por estar dentro del rango 0.65 y 0.75, según la valoración descrita en la Tabla 15.
- Teniendo en cuenta los estadísticos descritos en el Capítulo 5.4.2, los cuales fueron calculados para todos los modelos de cambio climático evaluados, se seleccionó el modelo que menor variación porcentual tuvo respecto de los estadísticos calculados para los datos históricos. Con este proceso se obtuvo el modelo de cambio climático que mejor representaba el área de estudio el cual corresponde al MOHC-*HadGEM2-ES_CLMcom-CCLM4-8-17_r1i1p1* del *Met Office Hadley Centre for Climate Science and Services* del Reino Unido (*Met Office Hadley Centre for Climate Science and Services*, 2020).
- Mediante la aplicación del modelo de cambio climático seleccionado, se determinó una variación notoria en el comportamiento de las variables climáticas estudiadas. En primera instancia, se evaluó el cambio de la precipitación bajo un escenario de emisiones de CO₂ al RCP 4.5 y en segunda instancia se evaluó el cambio de la precipitación bajo el escenario RCP 8.5. Las conclusiones del análisis para el primer caso corresponden a la disminución considerable de la precipitación media anual, pasando de 1400 mm/año en el año 2006 a 1300 mm/año en el año 2100. Con respecto al escenario RCP 8.5 se observó igualmente una disminución un poco más crítica que la anterior, presentándose un valor de 1200 mm/año para el año 2100 respectivamente. Para el caso de la

temperatura, se observa un incremento general, es decir, un aumento de la temperatura máxima y mínima, para el corto, mediano y largo plazo.

- Dentro de los procesos más críticos y notorios que traerá el cambio climático, se destaca el incremento en los eventos extremos de precipitación. Durante el proceso de caracterización extremal elaborado a partir de los datos de precipitación futura de la cuenca para los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5, se observó el incremento de las curvas IDF, lo cual refleja intensidades de lluvia mayores en comparación las intensidades obtenidas a partir de la caracterización extremal histórica. Dicho incremento se ve reflejado en la variación de los caudales para los diferentes periodos de retorno. De acuerdo con los resultados obtenidos para eventos con periodo de retorno de 500 años, hay un incremento en los caudales máximos calculados para el escenario RCP 4.5 del 24%, mientras que un aumento del 23% del RCP 8.5 con respecto a los calculados con el periodo histórico.
- De los procesos descritos previamente, concluye que el comportamiento histórico y la variación futura por efecto del cambio climático de las variables climáticas correspondientes a la precipitación y la temperatura, influyen considerablemente en el comportamiento actual y futuro de los caudales generados por cuenca del río Besaya. Siendo todas estas variables muy relevantes a la hora de abordar el análisis y planteamiento de medidas de mitigación contra la inundación en Los Corrales de Buena.
- Se observó un incremento de la mancha de inundación del 10%, para el modelo hidráulico simulado con el hidrograma de los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5, respecto del simulado con el hidrograma histórico, como consecuencia del aumento de los eventos extremos las medidas de mitigación propuestas, compensan de alguna manera los problemas de inundación que se han presentado como consecuencia de un aumento en el tejido urbano y el desarrollo que ha tenido la ciudad en las zonas aledañas al río. Es claro que, si se utilizan las medidas planteadas en el presente estudio y no se hace una correcta gestión y ordenación urbana de la ciudad a futuro, se pueden seguir presentando un aumento de población en las llanuras de inundación del río, lo cual tendrá como consecuencia pérdidas en términos económicos y de vidas humanas por efecto de las inundaciones que se pueden presentar en el futuro.
- En el corto y mediano plazo, las medidas de mitigación propuestas, compensan los problemas de inundación causados por el río Besaya en el área de estudio. Sin embargo, es claro que, si se utilizan las medidas planteadas en el presente estudio y no se hace una correcta gestión de ordenación urbana y rural de la cuenca a futuro, se pueden agudizar los inconvenientes, los cuales se pueden presentar por la densificación en el tejido urbano en las llanuras de inundación del río. Esto nuevamente traerá consecuencias en términos de pérdidas económicas, ambientales y de vidas humanas.
- Es recomendable que una vez se hayan implementado las medidas, se realicen mantenimientos periódicos al río, los cuales son de vital importancia para que se puedan mantener controladas las inundaciones. Cabe anotar que las actuaciones en la cuenca en el corto y mediano plazo, pueden atenuar los picos y las crecidas del río, sin embargo, queda a disposición de los gobiernos locales poner en marcha planes de gestión y recuperación del cauce natural del río, con el fin de generar espacios que no solamente mitiguen las inundaciones, sino que también restauren, protejan y conserven el medio natural y la masa de agua que lo compone.

9. Bibliografía

- AEMET, A. E. de M. (2020). *Agencia Estatal de Meteorología - AEMET. Gobierno de España*.
<http://www.aemet.es/es/portada>
- Ayuntamiento Los Corrales de Buelna. (2009). *Plan General de Ordenación Urbana de Los Corrales de Buelna*. Situación Geográfica.
- Bartier, P. M., & Keller, C. P. (1996). Multivariate interpolation to incorporate thematic surface data using inverse distance weighting (IDW). *Computers and Geosciences*, 22(7), 795–799.
[https://doi.org/10.1016/0098-3004\(96\)00021-0](https://doi.org/10.1016/0098-3004(96)00021-0)
- Burton, A., Fowler, H. J., Blenkinsop, S., & Kilsby, C. G. (2010a). Downscaling transient climate change using a Neyman–Scott Rectangular Pulses stochastic rainfall model. *Journal of Hydrology*, 381(1), 18–32. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.10.031>
- Burton, A., Fowler, H. J., Blenkinsop, S., & Kilsby, C. G. (2010b). Downscaling transient climate change using a Neyman-Scott Rectangular Pulses stochastic rainfall model. *Journal of Hydrology*, 381(1–2), 18–32. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.10.031>
- Cannon, A. J., Sobie, S. R., & Murdock, T. Q. (2015). Bias correction of GCM precipitation by quantile mapping: How well do methods preserve changes in quantiles and extremes? *Journal of Climate*, 28(17), 6938–6959. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00754.1>
- CHC, C. H. del C. (2015). *Plan Hidrológico De La demarcación Hidrográfica del Cantábrico Occidental 2015 – 2021*. Plan Hidrológico De La Demarcación Hidrográfica Del Cantábrico Occidental 2015 – 2021. <https://www.chcantabrico.es/las-cuencas-cantabricas/marco-fisico/hidrologia/rios/besaya>
- CHC, C. H. del C. (2020). *Sistema Automático de Información hidrológica*.
<https://www.chcantabrico.es/>
- Chow V.T., Maidment D.R., M. L. W. (1998). Applied Hydrology. In U. S. A. McGraw-Hill International Editions, Civil Engineering Series, New York (Ed.), *Applied Hydrology*.
- CNIG, M. de T. M. y A. U. de E. (2020). *Centro de Descargas del CNIG (IGN)*.
http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/locale?request_locale=es
- CORDEX, C. R. C. D. E. (2020). *Cordex – Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment*.
<https://cordex.org/>
- Cowpertwait, P. S. P. (1991). Further developments of the neyman-scott clustered point process for modeling rainfall. *Water Resources Research*, 27(7), 1431–1438.
<https://doi.org/10.1029/91WR00479>
- Diez-Sierra, J., & del Jesus, M. (2019). Subdaily rainfall estimation through daily rainfall downscaling using random forests in Spain. *Water (Switzerland)*, 11(1). <https://doi.org/10.3390/w11010125>
- Instituto Geográfico Nacional. (2016). ANEXO A : Especificaciones Técnicas para. *Plan Nacional de Ortofotografía Aérea, Versión 15*, 1–8.

Anexos

- Instituto Nacional de Estadística. (2020). *INE. Instituto Nacional de Estadística. Demografía y Población*. <https://www.ine.es/>
- IPCC. (2020). *Socio-Economic Data and Scenarios. REPRESENTATIVE CONCENTRATION PATHWAYS (RCPs)*. https://sedac.ciesin.columbia.edu/ddc/ar5_scenario_process/RCPs.html
- Met Office Hadley Centre for Climate Science and Services. (2020). *Modelado climático global de alta resolución - Met Office. Familia HadGEM3: Modelo de Predicción Climática de Met Office*. <https://www.metoffice.gov.uk/research/climate/understanding-climate/high-res>
- Moriasi, D. N., Gitau, M. W., Pai, N., & Daggupati, P. (2015). Hydrologic and Water Quality Models: Performance Measures and Evaluation Criteria. *Transactions of the ASABE*, 58(6), 1763–1785. <https://doi.org/10.13031/trans.58.10715>
- NASA. (2020). *NEX-GDDP | NASA Center for Climate Simulation. NASA Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections (NEX-GDDP)*. <https://www.nccs.nasa.gov/services/data-collections/land-based-products/nex-gddp>
- Prudhomme, C., Reynard, N., & Crooks, S. (2002). Downscaling of global climate models for flood frequency analysis: where are we now? *Hydrological Processes*, 16(6), 1137–1150. <https://doi.org/10.1002/hyp.1054>
- Sierra, J. D. (2019). *Predicción, desagregación y cambio climático en la precipitación para aplicaciones hidrológicas. Prediction, disaggregation and climate change in precipitation for hydrological applications*.
- U.S. Army E.E.U.U, C. de I. de los E. U. (2020a). *HEC-HMS Users Manual*. <https://www.hec.usace.army.mil/confluence/hmsdocs/hmsum/latest/model-optimization/optimization-trials>
- U.S. Army E.E.U.U, C. de I. de los E. U. (2020b). *HEC-RAS. HEC – RAS for Windows River Analysis System*. <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/>

**ANEXO No. 1 - MODELO HIDROLÓGICO HEC-HMS
(EN ARCHIVO MAGNÉTICO)**

**ANEXO No. 2 - MODELO HIDROLÓGICO HEC-RAS (EN
ARCHIVO MAGNÉTICO)**
