

INUNDACIÓN PLUVIAL

ASOCIADA A **EVENTOS EXTREMOS**
DE PRECIPITACIÓN EN **ESCENARIOS**
DE CAMBIO CLIMÁTICO EN EUSKADI



Herri-baltza
Sociedad Pública del



EUSKO JAURLARITZA
GOBIERNO VASCO

EKONOMIAREN GARAPEN,
JASANGARRITASUN
ETA INGURUMEN SAILA
DEPARTAMENTO DE DESARROLLO
ECONÓMICO, SOSTENIBILIDAD
Y MEDIO AMBIENTE

© Ihobe S.A., diciembre 2022

EDITA:

Ihobe, Sociedad Pública de Gestión Ambiental
Departamento de Desarrollo Económico, Sostenibilidad y Medio Ambiente
Gobierno Vasco

Alda. Urquijo, 36 6º Planta
48011 Bilbao
Tel: 900 15 08 64
www.ihobe.eus

CONTENIDO:

Este documento ha sido elaborado por Tecnalía Research and Innovation con la colaboración de DHI Water & Environment

DISEÑO:

Dual comunicación y diseño



Los contenidos de este libro, en la presente edición, se publican bajo la licencia: Reconocimiento - No comercial - Sin obras derivadas 3.0 Unported de Creative Commons (más información https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/deed.es_ES).

ÍNDICE

RESUMEN EJECUTIVO	5
1. INTRODUCCIÓN	10
2. ESTUDIO PLUVIOMÉTRICO Y DEFINICIÓN DE LLUVIAS DE DISEÑO BAJO DISTINTOS ESCENARIOS CLIMÁTICOS	12
2.1. ANÁLISIS DE EVENTOS HISTÓRICOS EXTREMOS DE PRECIPITACIÓN	12
2.2. PROYECCIONES DE PRECIPITACIÓN EXTREMA	14
2.3. DEFINICIÓN DE LLUVIAS DE DISEÑO ACTUALES Y FUTURAS	18
3. ESCENARIOS DE INUNDACIÓN PLUVIAL	22
3.1. CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL MODELO MIKE 21	22
3.2. DATOS DE ENTRADA	24
3.2.1. PARÁMETROS BÁSICOS	
3.2.2. PARÁMETROS HIDRODINÁMICOS	
3.3. REPRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS DEL MODELO	27
3.4. INUNDABILIDAD PLUVIAL A NIVEL DE CUENCA	29
3.5. INUNDABILIDAD PLUVIAL A NIVEL MUNICIPAL	33
4. LIMITACIONES Y RECOMENDACIONES DEL ESTUDIO	38
5. CONCLUSIONES	41
6. REFERENCIAS	44

RESUMEN EJECUTIVO

Tradicionalmente, el estudio relativo a la probabilidad de que se produzca una inundación ha estado centrado al fenómeno de inundación fluvial; sin embargo, muchas de las inundaciones son de origen pluvial. Este tipo de inundaciones son causadas por precipitaciones intensas de corta duración, que dan lugar a potenciales impactos en los núcleos urbanos ya que es donde se concentra una mayor proporción de infraestructuras y equipamientos, y es donde se originan debido a la alta impermeabilidad del terreno.

Los escenarios de cambio climático elaborados para la Comunidad Autónoma del País Vasco (CAPV) auguran un incremento en la precipitación extrema siendo ligeramente superiores para la zona norte del territorio (Ihobe, 2019); por ello, se espera un aumento en la probabilidad de ocurrencia de este tipo de eventos, así como de los impactos potenciales asociados.

La generación de conocimiento sobre los eventos extremos y la profundización del efecto del cambio climático –medida abordada en la revisión y actualización del Plan de Gestión del Riesgo de Inundación 2ºCiclo– resulta fundamental para la prevención de los impactos y riesgos derivados de este fenómeno.

Por este motivo, este estudio tiene como objetivo avanzar en el conocimiento del fenómeno de inundación pluvial en la CAPV, de forma que se puedan (i) identificar de forma preliminar las zonas potencialmente críticas que podrían albergar inundabilidad pluvial actual y/o futura y sufrir potenciales impactos, (ii) priorizar estudios específicos o de detalle, que contemplen la definición de zonas de actuación prioritarias en materia de adaptación al cambio climático, y (iii) analizar las tendencias asociadas al cambio climático de este fenómeno. Por ello, caracteriza los eventos extremos de precipitación para distintos escenarios climáticos (escenario actual y de cambio climático) y define las lluvias de diseño, con el fin de modelizar sus efectos en las 38 cuencas que conforman la CAPV.

La caracterización de los eventos extremos del escenario actual forma parte del estudio pluviométrico llevado a cabo en primer lugar y consiste en la definición de umbrales a partir del cálculo de los periodos de retorno de las precipitaciones máximas registradas en las estaciones meteorológicas de la CAPV. Este estudio indica un comportamiento relativamente similar en las precipitaciones máximas horarias de la CAPV (Tabla 1).

ARABA	PR10	PR25	PR50
Mín.	19,2	22,01	23,86
Media	26,5	34,83	42,45
Máx.	34,32	60,72	98,68
BIZKAIA			
Mín.	18,08	19,58	20,51
Media	24,59	31,12	37,05
Máx.	33,32	49,36	80,87
GIPUZKOA			
Mín.	20,02	21,77	22,87
Media	26,73	31,72	35,68
Máx.	33,77	46,52	60,62

TABLA 1. PR 10, 25 y 50 (mínimo, medio y máximo) de la precipitación horaria para los tres territorios históricos a partir de los datos observados en 71 estaciones meteorológicas.

Para la caracterización de estos eventos extremos bajo el escenario de cambio climático se ha analizado el indicador de torrencialidad de las precipitaciones, RV10, RV25 y RV50 (precipitación media máxima diaria asociada a los periodos de retorno de 10, 25 y 50 años respectivamente), disponible en el visor de escenarios climáticos de Ihobe¹. Este indicador augura un incremento en la torrencialidad de las precipitaciones, que aumenta a mayor horizonte temporal (Tabla 2). Estos resultados van en concordancia con el comportamiento observado en otros estudios locales (p.ej. Diputación Foral de Gipuzkoa, 2018); sin embargo, todos ellos, al igual que este estudio, destacan la elevada incertidumbre que existe en los escenarios climáticos de precipitación extrema.

¹ <http://escenariosklima.ihobe.eus/>

	Media (%)	2011-2040	2041-2070	2071-2100
RV10 EQM	Media-sd	2,74	9,00	4,18
	Media	14,44	20,14	18,70
	Media +sd	26,19	31,27	33,19
RV10 GPQM	Media-sd	-28,10	-27,01	-32,75
	Media	6,00	14,09	17,83
	Media +sd	40,06	55,15	68,42
RV25 EQM	Media-sd	1,52	8,33	3,73
	Media	15,72	21,92	20,72
	Media +sd	29,93	35,54	37,72
RV25 GPQM	Media-sd	-32,75	-31,30	-37,79
	Media	7,03	16,41	21,09
	Media +sd	46,85	64,09	79,96
RV50 EQM	Media-sd	0,06	7,11	2,76
	Media	16,54	23,02	21,94
	Media +sd	33,02	38,92	41,08
RV50 GPQM	Media-sd	-36,16	-34,29	-41,21
	Media	7,81	17,94	23,17
	Media +sd	51,75	70,13	87,56

TABLA 2. Porcentaje de cambio de las precipitaciones máximas en 1 hora para tres horizontes futuros en la CAPV (Corrección de sesgo EQM y GPQM de PR 10, 25 y 50 años).

En cuanto a la definición de las lluvias de diseño, se han identificado del conjunto de las estaciones meteorológicas los eventos reales que superan o se encuentran cercanos a los periodos de retorno medios de la Tabla 1. De un total de 164 eventos identificados se ha seleccionado un único evento, correspondiente a la estación de Jaizkibel, con periodo de retorno de 25 años (por ser el periodo con el que se diseñan las redes de drenaje urbanas). Este evento ha sido considerado como lluvia de diseño actual y modelizado para toda la CAPV.

Para la definición del comportamiento de esta lluvia de diseño bajo el escenario de cambio climático se ha aplicado el porcentaje de cambio observado en el indicador de torrencialidad de las precipitaciones (RV25) para el peor caso posible (media +sd). Los resultados de la modelización de estos dos escenarios se observan en la Figura 1.

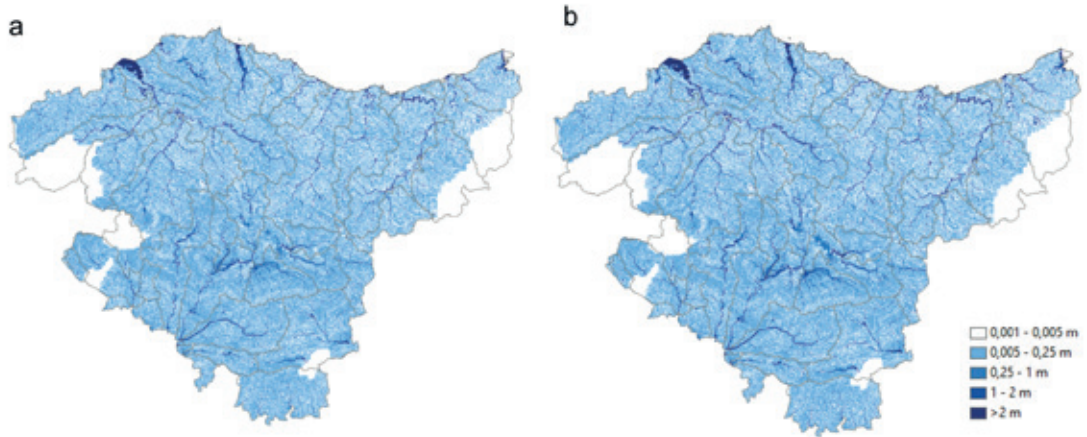


FIGURA 1. Resultados del calado del fenómeno de inundación pluvial para un periodo de retorno de 25 años bajo el escenario actual (a) y de cambio climático (b).

A partir de estos resultados, se ha analizado la inundabilidad pluvial de la CAPV extrayendo los polígonos envolventes de las manchas de inundación pluvial de ambos escenarios, de acuerdo con varios criterios (calado del polígono superior a 1 m y tamaño del polígono de 400 m²). Una vez aplicados los criterios, se ha representado gráficamente la variabilidad espacial de este fenómeno, así como la influencia del cambio climático (Figura 2).

Los resultados de inundabilidad indican zonas potencialmente inundables a lo largo de la mayor parte de los cursos y márgenes fluviales de la vertiente cantábrica, y, en particular, en los ríos del Nervión, Ibaizabal, Butroe, Bakio, Oka, Lea, Artibai, Deba, Urola, Oria, Urumea y Bidasoa. En la vertiente mediterránea, se aprecia también una potencial inundabilidad sobre los cursos y márgenes fluviales de los ríos Baia, Zadorra, Ihuda, Izki, Berrón y Ega.

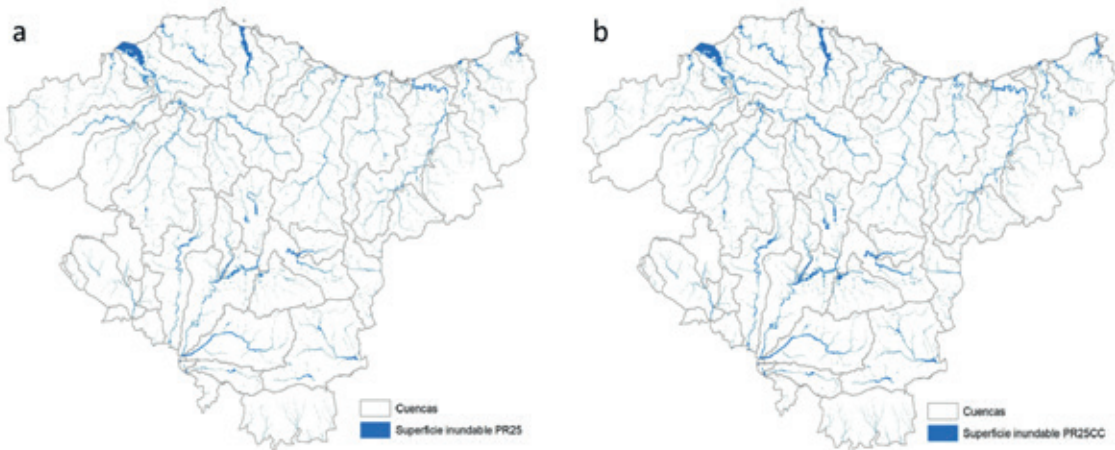


FIGURA 2. Mancha de inundación pluvial para un periodo de retorno de 25 años bajo el escenario actual (a) y de cambio climático (b).

En lo que respecta a las tendencias del cambio climático, se observa un incremento en la inundabilidad, que difiere ligeramente entre la vertiente cantábrica (aumento de 10-20%) y mediterránea (aumento superior al 20%) (Figura 3).

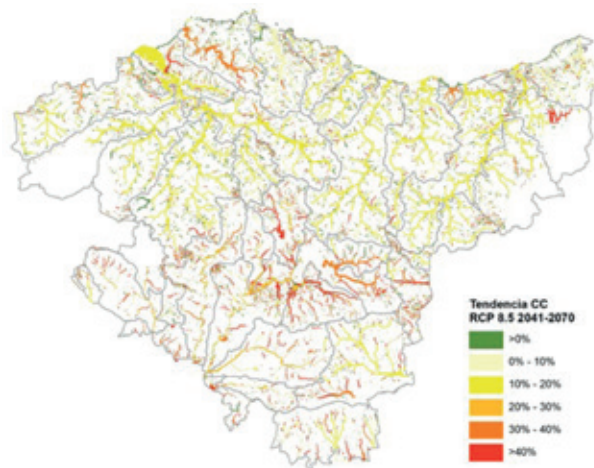


FIGURA 3. Tendencia de cambio climático observada en el fenómeno de inundación pluvial para un periodo de retorno de 25 años.

Más concretamente en los núcleos urbanos, se identifican potenciales puntos críticos, donde el agua se acumula de forma repentina, que se asocian a zonas deprimidas del terreno. Ejemplos de estos puntos críticos se encuentran en los municipios de Bilbao, Vitoria y Donostia. Estos puntos se presentan en formato fichas donde se incluyen las principales características de la zona en cuestión, las tendencias del cambio climático esperadas y los eventos históricos registrados de naturaleza similar (Figura 4).



FIGURA 4. Ejemplo de potencial punto crítico en el municipio de Erandio.

Cabe indicar, no obstante, la incertidumbre a la que están sujetos estos resultados debido a las hipótesis de partida asumidas en la modelización hidrodinámica (ausencia de sistema de drenaje y saneamiento y cobertura y usos de suelo homogénea), así como en la definición de las lluvias de diseño bajo el escenario de cambio climático (incertidumbre en los escenarios futuros de precipitación extrema). En cualquier caso, los resultados obtenidos podrían ser empleados en futuros estudios. Por ejemplo, se podría llevar a cabo una modelización a micro escala del fenómeno de inundación pluvial en aquellos puntos críticos identificados en este estudio.

1. INTRODUCCIÓN

La inundación pluvial es un fenómeno causado por precipitaciones intensas que supera la capacidad de drenaje y puede ocasionar potenciales impactos sobre las viviendas e infraestructuras urbanas, así como daños indirectos, como retenciones en carreteras, interrupción de los servicios básicos (agua, luz y gas) o pérdidas económicas debido a alteraciones en el comercio e industria.

De acuerdo con el último informe del Panel Intergubernamental de cambio Climático (IPCC), se prevé que el cambio climático contribuya a aumentar la probabilidad de ocurrencia de este tipo de eventos, así como los impactos potenciales asociados (IPCC, 2022). En concreto, en la CAPV si bien se espera una disminución en la precipitación total anual, que oscila para los horizontes futuros entre el -10% y el -20% de lo observado bajo el periodo de referencia, se augura un incremento en la precipitación extrema, esperándose mayores aumentos para la zona norte de Euskadi (Ihobe, 2019). Las áreas urbanas serán las que mayor vulnerabilidad presenten ante las inundaciones pluviales ya que en ellas se concentra una mayor proporción de infraestructuras y equipamientos. Por tanto, su evaluación es fundamental para su prevención y actuación.

La estimación de los efectos del cambio climático sobre las inundaciones pluviales presenta hoy en día numerosas incertidumbres. A nivel europeo, existen varios retos asociados a la evaluación del efecto del cambio climático en las inundaciones pluviales. El primer reto corresponde con la disponibilidad restringida de registros de lluvia por hora observados que, junto con la variabilidad espacial de los regímenes de lluvia intensa, dificulta la definición de lluvias de diseño históricos. El segundo reto hace referencia a la dificultad de los modelos climáticos para simular precipitaciones intensas con una resolución horaria bajo el clima actual, lo que, a su vez, impide la modelización de escenarios futuros con la misma resolución horaria. El tercer y último reto corresponde con la necesidad de ejecutar modelos hidrodinámicos detallados y de alta resolución a escala local con el fin de cuantificar qué áreas se inundarán para diferentes eventos de lluvia.

Este estudio tiene como objetivo ahondar en el conocimiento del fenómeno de inundación pluvial en la Comunidad Autónoma del País Vasco (CAPV), con aras a (i) identificar de forma preliminar las zonas potencialmente críticas que podrían albergar inundabilidad pluvial actual y/o futura y sufrir potenciales impactos, (ii) priorizar estudios específicos o de detalle, que contemplen la definición de zonas de actuación prioritarias en materia de adaptación al cambio climático, y (iii) analizar las tendencias asociadas al cambio climático en este fenómeno.

Como antecedentes de este estudio resulta preciso señalar la Evaluación Preliminar del Riesgo de Inundación llevada a cabo en el marco de la "Revisión y Actualización del Plan de Gestión del Riesgo de Inundación. 2º ciclo" (URA, 2022), la cual incluye las zonas potencialmente inundables cuyo origen es pluvial. Adicionalmente, incluye una valoración cualitativa del riesgo de inundación debido al cambio climático para varios periodos de retorno y escenarios climáticos a nivel de subcuencas.

El documento consta de cuatro fases principales:

- **Estudio pluviométrico y definición de lluvias de diseño bajo distintos escenarios climáticos** (apartado 2). Analiza los eventos pluviométricos severos históricos ocurridos en la CAPV, que tienen el potencial de provocar inundaciones pluviales y un mal funcionamiento de la red de drenaje urbano, y estudia los escenarios locales de cambio climático con el fin de definir las lluvias de diseño, que son necesarias para la simulación del fenómeno de inundación pluvial.
- **Desarrollo de escenarios de inundación pluvial** (apartado 3). Evalúa el potencial impacto de las inundaciones pluviales bajo el escenario actual y de cambio climático representando su variabilidad espacial, así como las tendencias observadas del cambio climático. La modelización realizada abarca todo el ámbito de la CAPV; por tanto, conlleva la adopción de determinadas hipótesis y una representación simplificada de las condiciones de inundabilidad, que limita la utilidad de este estudio. En cualquier caso, el desarrollo de estos mapas, así como la representación de los potenciales puntos críticos no pretenden servir como un instrumento de planificación urbanística; más bien, tienen el objetivo de que se avance en el conocimiento de la amenaza inundabilidad pluvial de la CAPV - medida abordada dentro de la revisión y actualización del Plan de Gestión del Riesgo de Inundación (PGRI 2º Ciclo).
- **Limitaciones y recomendaciones del estudio** (apartado 4). Recoge las limitaciones de los resultados del estudio, que se asocian principalmente a la incertidumbre de los modelos climáticos y a las hipótesis adoptadas en la simulación del modelo. Adicionalmente, proporciona recomendaciones para que posibles trabajos futuros palien las limitaciones observadas.
- **Conclusiones del estudio**. Extrae y resume las principales conclusiones del informe.

2. ESTUDIO PLUVIOMÉTRICO Y DEFINICIÓN DE LLUVIAS DE DISEÑO BAJO DISTINTOS ESCENARIOS CLIMÁTICOS

Este apartado presenta los pasos llevados a cabo para la definición de las lluvias de diseño, que son la base para el establecimiento del modelo hidrodinámico y la construcción de los escenarios de inundación pluvial. Estos pasos consisten en el análisis de los eventos históricos, el estudio de los escenarios climáticos de la precipitación extrema y la definición de las lluvias de diseño para la modelización del fenómeno de inundación pluvial.

A continuación, se describen cada uno de ellos en detalle.

2.1. ANÁLISIS DE EVENTOS HISTÓRICOS EXTREMOS DE PRECIPITACIÓN

El análisis de eventos históricos extremos de precipitación corresponde con el primer paso para la definición de las lluvias de diseño y la modelización de la inundación pluvial, y consiste en el cálculo de periodos de retorno con el fin de establecer umbrales para la identificación de eventos tipo.

Para este cálculo se ha empleado la información climatológica disponible en la red de estaciones de Euskalmet (Euskalmet, 2020) y dentro de esta, se han seleccionado aquellas con al menos una resolución temporal de 15 años. Así, se han analizado un total de 71 estaciones, que se encuentran distribuidas de la siguiente forma por territorios históricos (Tabla 3).

TERRITORIO HISTÓRICO	NÚMERO DE ESTACIONES
Álava	19
Bizkaia	27
Gipuzkoa	25

TABLA 3. Número de estaciones por provincia en la CAPV.

Estas estaciones si bien cuentan con varios estadísticos de la variable precipitación para el periodo 2002-2018, se ha utilizado el estadístico de precipitación máxima horaria diaria por su mayor resolución.

A partir de esta variable se han calculado las precipitaciones máximas de las estaciones seleccionadas para los periodos de retorno de 10, 25 y 50 años. Los dos primeros (PR10 y PR25) se han escogido por ser los periodos con los que normalmente se diseña el drenaje urbano y el tercero (PR50) por alinear el estudio con *Copernicus SIS*.

La Tabla 4 recoge los periodos de retorno observados en las 71 estaciones seleccionadas de la CAPV y la Tabla 5 representa los valores mínimos, medios y máximos para toda la CAPV y cada territorio histórico. En general, se aprecia que las precipitaciones máximas horarias varían ligeramente de una zona a otra en la CAPV, a excepción de determinados puntos, como son las estaciones de La Garbea o Gorbea, donde se registran valores superiores a la media. Las precipitaciones máximas horarias medias de la CAPV son de 25,8 mm, 32,2 mm y 37,8 mm para los periodos de retorno de 10, 25 y 50 años respectivamente y el territorio histórico de Álava es el que recoge los valores medios más altos debido a la intensidad de los eventos más extremos ocurridos en la estación de Gorbea.

Nombre	Periodo	PR_10	PR_25	PR_50	Nombre	Periodo	PR_10	PR_25	PR_50
Cerroja	2002-2018	18,08	19,58	20,51	Aizarnazabal	2002-2018	25,57	29,38	32,3
Arboleada	2004-2018	19,78	23,75	27,34	Muxika	2002-2018	25,76	33,09	40,1
Altzola	2002-2018	20,02	21,77	22,87	San Prudentzio	2002-2018	26,01	31,4	35,53
Balmaseda	2002-2018	20,23	23,17	25,22	Altube	2002-2018	26,13	34,44	42,22
Mañaria	2003-2018	20,57	22,89	24,46	Oñati	2002-2018	26,2	36,42	46,74
Matxinbenta	2002-2018	20,7	22,15	23,02	Zizurkil	2002-2018	26,24	31,49	35,56
Oiz	2002-2018	20,81	30,59	41,43	Kapildui	2002-2018	26,28	33,68	40,08
Ozaeta	2002-2018	21,21	25,69	29,38	Igorre	2002-2018	26,55	35,86	45,04
Zaratamo	2002-2016	21,22	23,94	25,77	Amerauñ	2002-2018	26,76	30,53	33,14
Bidania	2002-2018	21,66	23,7	24,99	Zarautz	2002-2018	26,83	30,77	33,57
Saratxo	2002-2018	21,68	26,36	30,53	Arrasate	2002-2018	27,78	37,13	45,88
Berna	2002-2018	21,81	23,6	24,62	Berriatua	2002-2018	27,82	39,75	52,61
Iurreta	2002-2018	22,06	26,32	29,69	Belauntza	2002-2018	28,3	33,41	37,35
Estanda	2002-2018	22,42	25,03	26,78	Lasarte	2002-2018	28,45	32,84	36,1
Ibai Eder	2002-2018	22,46	24,4	25,58	Aixola	2002-2018	28,46	42,81	59,34
Aranguren	2002-2018	22,5	24,39	25,47	Mungia	2002-2018	28,58	32,24	34,65
Ordizia	2002-2018	22,62	23,47	23,83	Espejo	2004-2018	28,78	35,18	39,83
Arkaute I	2002-2016	22,85	26,99	30	Amorebieta	2002-2018	28,98	35,24	40,24
Párganos	2004-2018	22,88	28,57	33,37	Subijana	2002-2018	29,47	36,98	42,97
Abetxuko	2002-2018	22,96	33,1	43,74	Oiartzun	2002-2018	29,95	35,39	39,61
Zambrana	2002-2018	23,09	26,77	29,33	Agautza	2002-2018	30,12	34,29	37,05
Punta Galea	2002-2018	23,25	29,68	35,55	Berastegi	2002-2018	30,19	34,53	37,52
Elorrio	2002-2018	23,34	29,81	35,81	Almike (Bermeo)	2002-2018	30,2	38,73	45,98
La Garbea	2002-2018	23,86	48,24	80,87	Oleta	2002-2018	30,35	37,11	42,53
Orozko	2002-2018	23,86	26,07	27,29	Deusto	2002-2018	30,49	44,63	60,68
Iturrieta	2002-2018	23,97	31,87	39,4	Añarbe	2002-2018	31,91	36,92	40,49
Herrera	2002-2018	23,98	27,21	29,48	Alegia	2002-2018	32,77	42,85	52,08
Abusu	2002-2018	24,26	27,51	29,82	Amundarain	2002-2018	32,92	39,52	44,35
Orduña	2002-2018	24,28	29,99	34,73	Salvatierra	2002-2018	33,04	41,67	57,7
Llodio	2002-2014	24,36	30,85	36,32	Gorbea	2002-2018	33,24	60,72	98,68
Aitzu	2002-2018	24,61	30,95	36,67	Ereñozu	2002-2018	33,25	45,4	60,62
Alegria	2002-2018	24,89	29,34	32,51	Urkiola	2002-2018	33,32	49,36	66,76
Derio	2002-2018	25,03	31,35	37,16	Gardea	2002-2018	33,45	47,97	63,15
Zaldiaran	2002-2018	25,29	31,74	36,84	Urkulu	2002-2018	33,77	48,52	58,76
Urkizu	2002-2018	25,31	34,95	44,68	Navarrete	2002-2018	34,32	48,34	62,19
Andoain	2002-2018	25,53	33,3	41,06					

TABLA 4. PR 10, 25 y 50 de precipitación horaria para las 71 estaciones seleccionadas en la CAPV.

TOTAL	PR10	PR25	PR50
Mín.	18,08	19,59	20,51
Media	25,80	32,20	37,80
Máx.	34,32	60,72	98,68
ARABA			
Mín.	19,20	22,01	23,86
Media	26,50	34,83	42,45
Máx.	34,32	60,72	98,68
BIZKAIA			
Mín.	18,08	19,58	20,51
Media	24,59	31,12	37,05
Máx.	33,32	49,36	80,87
GIPUZKOA			
Mín.	20,02	21,77	22,87
Media	26,73	31,72	35,68
Máx.	33,77	46,52	60,62

TABLA 5. PR 10, 25 y 50 (mínimo, medio y máximo) para los tres territorios históricos.

2.2. PROYECCIONES DE PRECIPITACIÓN EXTREMA

Una vez estudiados los eventos históricos de precipitación extrema, se han analizado los escenarios de cambio climático mediante el análisis del indicador de torrencialidad de las precipitaciones, RV10, RV25 y RV50 (precipitación media máxima diaria asociada a los periodos de retorno de 10, 25 y 50 años respectivamente).

Para ello, se han empleado los escenarios climáticos regionalizados de alta resolución para la CAPV (Ihobe, 2019), que reflejan el comportamiento de este indicador con una resolución espacial de 1 km x 1 km para dos correcciones de sesgo (EQM o GPQM). En concreto, se han analizado el escenario RCP 8.5 (por ser el más desfavorable) del indicador para el periodo histórico (1981-2010) y los periodos futuros (2011-2040, 2041-2070 y 2071-2100). Cabe indicar que estos escenarios actualizan y complementan los mapas climáticos de alta resolución de la CAPV, elaborados en el marco de la convocatoria KLIMATEK 2016.

Para poder comparar estos periodos de retorno diarios con los periodos de retorno de los datos observados horarios, se ha establecido una relación entre los periodos de retorno de 1 hora y 24 horas de los datos observados, puesto que los escenarios climáticos de precipitación están disponibles únicamente con una resolución diaria (Tabla 6).

	% de cambio 1h-24 h		
	PR10	PR25	PR50
Mín.	17	14	12
Moda	27	24	21
Media	30	31	32
Máx.	61	75	91

TABLA 6. Resumen de los porcentajes de cambio de PR 10, 25, 50 años para pasar de máximas de 1 hora a precipitaciones diarias.

De este modo, se ha aplicado esta relación (% de cambio medio 1h-24h) al comportamiento del indicador de la precipitación extrema (RV10, RV25 y RV50) y se ha obtenido la precipitación media máxima horaria, así como el intervalo de confianza [media-sd, media+sd] para cada tipo de método estadístico (EQM o GPQM), periodo de retorno y horizonte temporal (1981-2010, 2011-2040, 2041-2070, 2071-2100) (Tabla 7).

	Media (mm)	1981-2010	2011-2040	2041-2070	2071-2100
PR10 EQM	Media-sd		23,62	25,06	23,95
	Media	22,99	26,31	27,62	27,29
	Media +sd		29,01	30,18	30,62
PR10 GPQM	Media-sd		16,53	16,78	15,46
	Media	22,99	24,37	26,23	27,09
	Media +sd		32,20	35,67	38,72
PR25 EQM	Media-sd		28,02	29,90	28,63
	Media	27,60	31,94	33,65	33,32
	Media +sd		35,86	37,41	38,01
PR25 GPQM	Media-sd		18,56	18,96	17,17
	Media	27,60	29,54	32,13	33,42
	Media +sd		40,53	45,29	49,67

	Media (mm)	1981-2010	2011-2040	2041-2070	2071-2100
PR50 EQM	Media-sd		31,52	33,74	32,37
	Media	31,50	36,71	38,75	38,41
	Media +sd		41,90	43,76	44,44
PR50 GPQM	Media-sd		20,11	20,70	18,52
	Media	31,51	33,96	37,15	38,80
	Media +sd		47,80	53,59	59,08

TABLA 7. Precipitaciones máximas en 1 hora para el intervalo histórico y tres horizontes futuros en la CAPV (modelos EQM y GPQM de PR 10, 25 y 50).

Por último, se ha calculado el porcentaje de cambio de los periodos de retorno de los horizontes futuros (2011-2040, 2041-2070 y 2071-2100) con respecto al periodo histórico (1981-2010), y al igual que en el caso anterior, se ha definido también el porcentaje de cambio medio, así como sus intervalos de confianza (Tabla 8).

	Media (%)	2011-2040	2041-2070	2071-2100
PR10 EQM	Media-sd	2,74	9,00	4,18
	Media	14,44	20,14	18,70
	Media +sd	26,19	31,27	33,19
PR10 GPQM	Media-sd	-28,10	-27,01	-32,75
	Media	6,00	14,09	17,83
	Media +sd	40,06	55,15	68,42
PR25 EQM	Media-sd	1,52	8,33	3,73
	Media	15,72	21,92	20,72
	Media +sd	29,93	35,54	37,72
PR25 GPQM	Media-sd	-32,75	-31,30	-37,79
	Media	7,03	16,41	21,09
	Media +sd	46,85	64,09	79,96
PR50 EQM	Media-sd	0,06	7,11	2,76
	Media	16,54	23,02	21,94
	Media +sd	33,02	38,92	41,08

	Media (%)	2011-2040	2041-2070	2071-2100
PR50 GPQM	Media-sd	-36,16	-34,29	-41,21
	Media	7,81	17,94	23,17
	Media +sd	51,75	70,13	87,56

TABLA 8. Porcentaje de cambio de las precipitaciones máximas en 1 hora (corrección de sesgo EQM y GPQM de PR 10, 25 y 50 años).

Estos resultados reflejan un incremento en la precipitación extrema que es mayor a medida que aumenta el horizonte temporal, salvo en algunos casos, como por ejemplo en el caso de PR10 – EQM, donde el porcentaje de cambio del periodo de retorno medio para los años 2071-2100 es un poco menor que para los años 2041-2070. Esto puede ser contrario a lo esperado, pero, si se observa la incertidumbre (cuya información viene proporcionada por la desviación estándar), esta es mayor; por tanto, el límite superior (media+sd) del periodo más lejano es también superior.

Este comportamiento general de aumento va en concordancia con otros estudios, como por ejemplo el estudio elaborado por Larsen et al. (2009), donde analizaron el aumento de la precipitación extrema por el cambio climático en Europa. En concreto utilizaron el modelo climático HIRHAM4 para Europa en los periodos 1961-1990 (histórico) y 2071-2100 (siguiendo el escenario A2 del IPCC), y concluyeron que los eventos extremos con 1 y 24 horas de duración para periodos de retorno de entre 2 a 100 años, tendrán un aumento de la intensidad en general en Europa.

Otros estudios locales auguran también un incremento en las precipitaciones extremas, como el desarrollado por la Diputación Foral de Gipuzkoa en 2018, que evalúa la influencia del cambio climático en la inundabilidad de Gipuzkoa a partir del estudio de los escenarios de alta resolución de la CAPV de la convocatoria KLIMATEK 2016 (escenarios previos a los actuales disponibles).

Por el contrario, otros trabajos como el elaborado por el Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX, el cual analiza el impacto del cambio climático en las precipitaciones máximas en España (CEDEX, 2021), predice cambios porcentuales en la precipitación diaria máxima anual muy escasos y de magnitud reducida para el periodo de retorno de 10 años. No obstante, este estudio de CEDEX al igual que el resto coinciden en la elevada incertidumbre que muestran los resultados debido a la dificultad que tienen los modelos climáticos regionales para predecir el comportamiento de los valores extremos de la precipitación.

2.3. DEFINICIÓN DE LLUVIAS DE DISEÑO ACTUALES Y FUTURAS

Las lluvias de diseño hacen referencia a eventos de precipitación intensos. Son definidos para una duración dada y una recurrencia asignada y corresponden con el factor forzante que alimenta al modelo hidráulico.

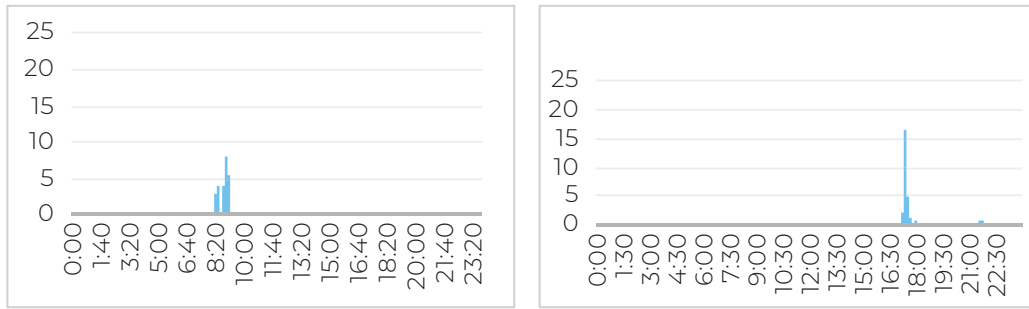
Para su definición se han identificado del conjunto de las estaciones meteorológicas los eventos reales que superan o se encuentran cercanos a los periodos de retorno medios de 10, 25 y 50 años calculados en el paso previo. En total se han identificado 164 eventos que superan dicho umbral. La Tabla 9 recoge seis de ellos, dos para cada periodo de retorno, con características (máx. en 1 h, máx. en 10 min y duración aproximada) ligeramente distintas.

ID	PERIODO DE RETORNO	FECHA	ESTACIÓN	CÓDIGO	MÁX 1 h (mm)	MÁX 10 min (mm)	DURACIÓN APROX. (h)
1	PR 10	09/09/2016	Aitzu	C0DB	24,7	7,9	2
2	PR 10	02/08/2014	Arkaute	C001	26,1	16,5	6
3	PR 25	01/10/2015	Elorrio	C074	32,6	7,7	4
4	PR 25	19/07/2004	Jaizkibel	C071	32,5	18,7	2
5	PR 50	04/08/2004	Jaizkibel	C071	39,9	10,2	9
6	PR 50	04/08/2015	Leitzaran	G052	33,2	14,7	3

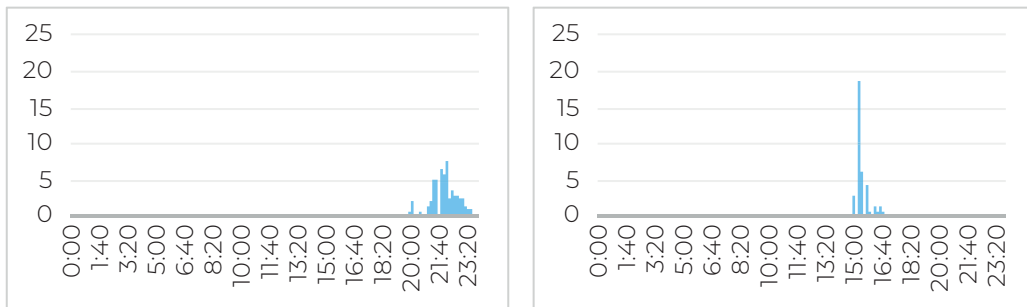
TABLA 9. Descripción de los eventos de precipitación extrema seleccionados.

Una vez identificados estos eventos reales se ha analizado el comportamiento que presentan cada uno de ellos con una resolución diez minutaría. Los patrones observados son de dos tipos (Figura 5). Un primero en el que la precipitación se concentra en 1, 2 o 3 tomas, siendo estas mucho mayores que el resto; y un segundo, donde la precipitación es mucho más homogénea y las tomas 10 minutarías se distribuyen con forma de Gauss.

PR 10 años (C0DB - C001)



PR 25 años (C074 - C071)



PR 50 años (C071 - C052)

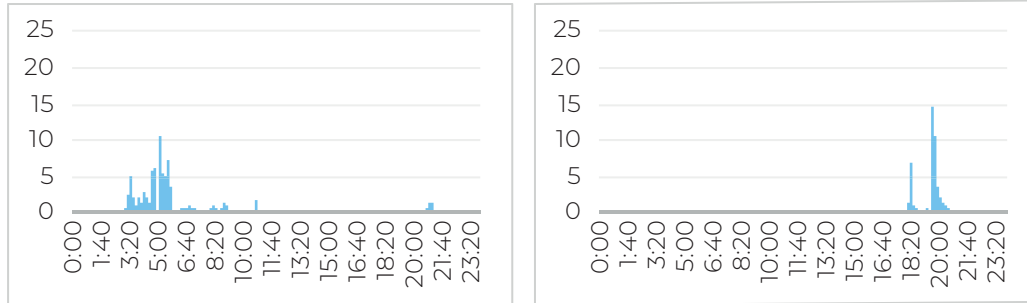
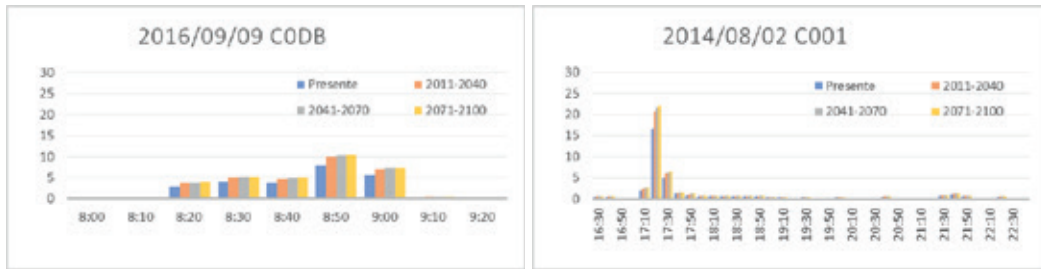


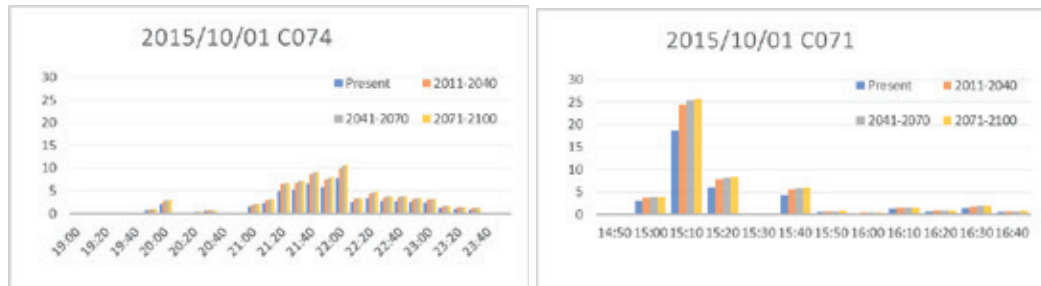
FIGURA 5. Distribución temporal diez minutaria de eventos reales que superan los umbrales de los periodos de retorno de 10, 25 y 50 años.

A continuación, se ha definido el comportamiento de estos eventos para el escenario de cambio climático, aplicando sobre ellos el porcentaje de cambio observado en el indicador de torrencialidad de las precipitaciones (precipitación media máxima asociada para los periodos de retorno de 10, 25 y 50 años) para el peor caso posible, es decir el límite superior del intervalo de confianza (media+sd) (Figura 6). Entre los dos métodos estadísticos de corrección de sesgo, se ha seleccionado el método EQM.

PR 10 años EQM



PR 25 años EQM



PR 50 años EQM



FIGURA 6. Distribución diez minutaría de los eventos seleccionados bajo el escenario actual y de cambio climático.

Finalmente, de estos seis eventos reales se ha seleccionado un evento tipo, que ha consistido en la lluvia de diseño empleada para la simulación del fenómeno de inundación pluvial en toda la CAPV. La Figura 7 presenta la tasa de precipitación del evento seleccionado, que corresponde con el evento registrado en la estación de Jaizkibel (C074) de PR 25 años (por ser el periodo con el que se diseñan las redes) para el escenario actual y de cambio climático. Este evento presenta una duración aproximada de 4 horas y alcanza en 10 min. una precipitación máxima de 7,7 mm bajo el escenario actual y de 10,4 mm bajo el escenario de cambio climático.

El incremento asociado al cambio climático corresponde al aumento observado en la precipitación media máxima asociada a PR 25 años, una vez aplicada la corrección de sesgo EQM bajo el escenario RCP 8.5 y periodo 2041-2070 (Ihobe, 2019). Este comportamiento indica una tendencia al aumento tanto en el límite inferior y superior del intervalo de confianza, como en el valor medio, que oscila entre el 8% y 36% con respecto al periodo observado. La lluvia de diseño que se observa en la Figura 7 para el escenario de cambio climático representa el porcentaje de cambio del límite superior del intervalo de confianza (36%), por lo que representa el peor escenario posible para este periodo futuro.



FIGURA 7. Tasa de precipitación (en mm/día) para un periodo de retorno de 25 años bajo el escenario actual y de cambio climático.

3. ESCENARIOS DE INUNDACIÓN PLUVIAL

El presente capítulo describe el conjunto de pasos llevados a cabo para la representación de la inundación pluvial a escala de la CAPV bajo distintos escenarios climáticos. Primero, se detallan las características generales del modelo hidrodinámico empleado (MIKE 21 *Flood Screening Tool*) para la simulación del modelo. A continuación, se indica la información necesaria para la simulación y el tratamiento realizado para la representación de los resultados. Por último, se muestran los resultados obtenidos para dos escalas: cuenca y municipio.

El estudio de la inundabilidad pluvial a nivel de cuenca refleja la variabilidad espacial del fenómeno de inundación pluvial, así como las tendencias observadas bajo el escenario de cambio climático a escala de cuenca hidrográfica. Este análisis se ofrece a grandes rasgos puesto que la escala a la que se presentan los resultados no permite describir con gran precisión el impacto que ejerce este fenómeno en las zonas urbanizadas, ámbito que se caracteriza por presentar la mayor vulnerabilidad ante este fenómeno.

Por tanto, tras describir el comportamiento de este fenómeno a escala cuenca se ofrece un mayor detalle del fenómeno en determinados núcleos urbanos, identificando ejemplos de potenciales zonas críticas donde pueden producirse acumulaciones repentinas de agua.

3.1. CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL MODELO MIKE 21

MIKE 21 *FLOOD Screening Tool* (MIKE 21 FST) es una herramienta, desarrollada por DHI (*Danish Hydraulic Institute*) y basada en el modelo MIKE 21, que simula las variaciones del nivel de agua y los flujos, teniendo en cuenta aspectos como la topografía, precipitación, rugosidad del terreno, infiltración, entre otros (Figura 8).

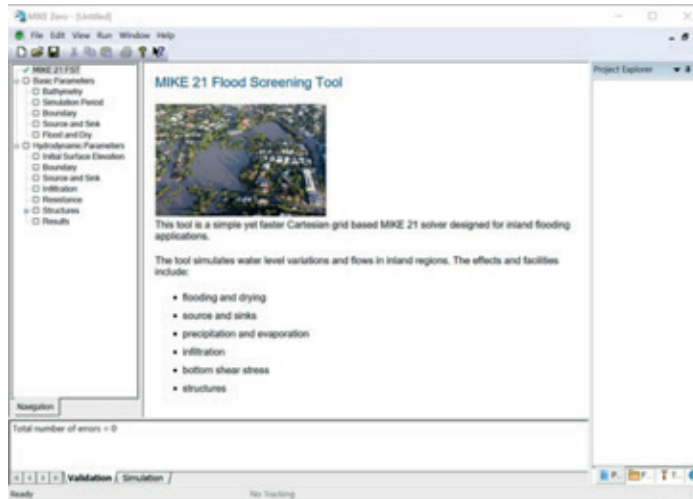


FIGURA 8. Interfaz del usuario de MIKE 21 FST.

El módulo hidrodinámico resuelve las ecuaciones verticalmente integradas de conservación de volumen y momento (ecuaciones de Saint Venant). Las siguientes ecuaciones (Figura 9), de conservación de la masa y el momento integrados en la vertical, describen las variaciones de flujo y nivel de agua.

$$\frac{\partial h}{\partial t} - \frac{\partial d}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{p^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{gq \sqrt{p^2 + q^2}}{C^2 \cdot h^2} - \frac{1}{\rho_w} \left[\frac{\partial}{\partial x} (h \tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (h \tau_{xy}) \right] - \Omega q$$

$$- fVV_x + \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial x} (p_a) + (\alpha + \beta) (u_{slide} - \frac{p}{h})^2 = 0$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{gp \sqrt{p^2 + q^2}}{C^2 \cdot h^2} - \frac{1}{\rho_w} \left[\frac{\partial}{\partial y} (h \tau_{yy}) + \frac{\partial}{\partial x} (h \tau_{xy}) \right] + \Omega p$$

$$- fVV_y + \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial y} (p_a) + (\alpha + \beta) (v_{slide} - \frac{q}{h})^2 = 0$$

FIGURA 9. Ecuaciones de Saint Venant.

3.2. DATOS DE ENTRADA

Los datos de entrada que precisa el modelo MIKE 21 FST para la simulación de la inundación pluvial se dividen en parámetros básicos y parámetros hidrodinámicos. A continuación, se describen cada uno de ellos.

3.2.1 PARÁMETROS BÁSICOS

Batimetría

Hace referencia a la información topográfica del terreno y ofrece datos de altura con respecto al nivel medio del mar.

En el presente estudio se ha empleado el MDEH (Modelo Digital de Elevaciones para Hidrología) de 2012, generado por el Gobierno Vasco y disponible en Geoeuskadi². Este modelo representa el terreno, junto con las edificaciones y construcciones exceptuando los puentes, con una resolución de 1 m x 1 m.

Debido a su gran extensión y la capacidad de computación que esto supone, se ha visto necesario reducir su tamaño y resolución. La reducción de su tamaño se ha llevado a cabo atendiendo a las cuencas hidrográficas de la CAPV (Figura 10), lo que ha dado lugar a un total de 38 modelos, cada uno ellos asociados a una cuenca hidrográfica.



FIGURA 10. Cuencas hidrográficas de la CAPV.

En cuanto a la resolución del MDEH, de cara a obtener la capacidad computacional requerida por el modelo y conseguir la viabilidad del proceso completo de simulación, se ha transformado su resolución a 10 m x 10 m.

² <http://www.geo.euskadi.eus/modelo-digital-de-elevaciones-para-hidrografia-mdeh-de-1m-de-la-comunidad-autonoma-del-pais-vasco-ano-2012/s69-geodir/es/>

Adicionalmente, se ha procedido a corregir el MDEH de cada cuenca mediante un proceso iterativo compuesto por los siguientes pasos: (i) simulación de la escorrentía teniendo en cuenta el MDEH original, (ii) identificación de las áreas donde se acumula el agua, (iii) comprobación de la topografía donde el agua se acumula con imágenes satelitales u ortofotos, (iv) ajuste y corrección de la topografía del terreno en caso necesario y (v) simulación de la escorrentía con la topografía corregida.

Entre las principales zonas que han sido necesarias corregir destacan los túneles y los pasos peatonales subterráneos (Figura 11). Estos espacios se han corregido en un gran número de áreas; sin embargo, no han podido ser corregidas todas ellas debido a la gran extensión que abarca el estudio.

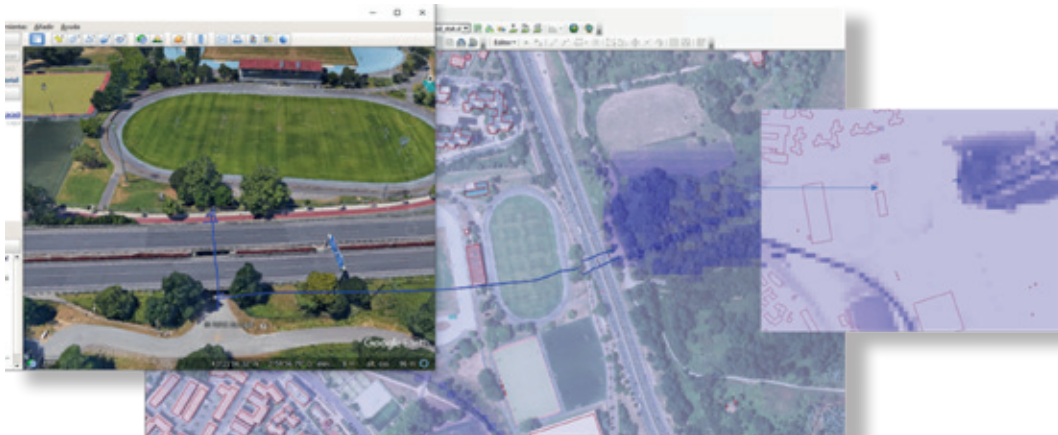


FIGURA 11. Ejemplo de paso peatonal corregido en el MDEH.

Periodo de simulación

Corresponde con el tiempo de simulación del modelo y viene determinada por la siguiente información:

- Rango del paso del tiempo: es el número de pasos de tiempo que debe contemplar la simulación.
- Intervalo del paso del tiempo: es la cantidad de tiempo que se incrementa entre cada paso de tiempo.
- Fecha de inicio de la simulación: es la fecha y hora correspondiente de inicio de la simulación y viene definida por la fecha del evento de lluvia seleccionado.

Los parámetros definidos en el presente estudio se recogen en la siguiente Tabla 10.

	ESCENARIO ACTUAL	ESCENARIO DE CAMBIO CLIMÁTICO
Rango del paso del tiempo	0-27000	0-27000
Intervalo del paso del tiempo	1	1
Fecha de inicio de la simulación	10/01/2015 19:30	10/01/2041 19:30

TABLA 10. Parámetros establecidos para la definición del periodo de simulación.

Nivel de inundación y secado

El nivel de inundación y secado establece los puntos del ámbito de estudio que son analizados dentro de la modelización hidrodinámica. La profundidad de secado establece el nivel de agua mínimo permitido en un punto antes de ser sacado del cálculo hidrodinámico del modelo; mientras que la profundidad de inundación se refiere al nivel del agua en el que el punto entra en el cálculo.

En el presente trabajo se han utilizado los valores recomendados por la guía de usuario del modelo (DHI, 2017), siendo de 0,001 m para la profundidad de secado y de 0,005 m para la de inundación.

Localización de los contornos

Representa la ubicación de los límites abiertos del modelo, donde el agua entra o sale del ámbito de estudio. En este estudio, estos límites se han identificado automáticamente por el programa y han variado en función de la cuenca de estudio.

3.2.2 PARÁMETROS HIDRODINÁMICOS

Nivel inicial de la superficie del agua

Hace referencia al nivel inicial de la superficie del agua. Varía en función del modelo de simulación, encontrándose valores cercanos a 2,8 m en las cuencas que vierten al mar y hasta 550 m en las cuencas del interior de la CAPV.

Nivel del agua en el contorno

Especifica el nivel de la superficie o el flujo en los contornos del modelo. El modelo dispone de cinco formatos diferentes (valor constante, serie sinusoidal, serie temporal, serie lineal, datos de transferencia y curva de clasificación) para poder introducir este parámetro. En el presente trabajo, el formato empleado ha sido un valor constante y este ha dependido de la cuenca hidrográfica de estudio.

Fuentes y sumideros

Incluye tanto la tasa de precipitación (en mm/día) bajo los distintos escenarios, como las fuentes externas (ríos) que descargan agua dentro del modelo.

La precipitación es el factor forzante que alimenta el modelo hidráulico y hace referencia a un evento de precipitación intensa, que es definido para una duración dada y una recurrencia asignada. En el presente estudio, la lluvia de diseño se ha obtenido a partir del análisis de los registros históricos horarios de precipitación de la red de estaciones de Euskalmet (Euskalmet, 2020), y de los escenarios climáticos regionalizados de alta resolución de la CAPV (Ihobe, 2019) (ver apartado 2 para más detalles). Este análisis si bien ha considerado varios periodos de retorno para las precipitaciones horarias, finalmente ha tomado como referencia el de 25 años por ser el periodo con el que se diseñan las redes (Figura 7).

En lo que respecta a las fuentes, la información requerida por el modelo (caudal de los ríos) se ha obtenido del software Caumax³. Este software, elaborado por el Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente, determina los caudales máximos en régimen natural para distintas probabilidades de recurrencia. En el presente estudio, se ha seleccionado una probabilidad de recurrencia menor a la lluvia de diseño modelizada (5 años) con el fin de que su efecto no enmascarase el fenómeno de inundación pluvial.

Infiltración

Se refiere al volumen de agua infiltrada en el suelo por las precipitaciones. En el presente trabajo no se tiene en cuenta este parámetro.

Resistencia

Hace referencia a la rugosidad del terreno y viene representado por el número de Manning o Chezy. En este estudio, se ha seleccionado el número de Manning como parámetro de entrada y ha sido constante para toda la zona de estudio con un valor de 15 (valor recomendado en la guía de usuario).

3.3. REPRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS DEL MODELO

Una vez definidos tanto los parámetros básicos como los hidrodinámicos, se ha procedido con la simulación del fenómeno de inundación pluvial en las 38 cuencas bajo el escenario actual y de cambio climático, lo que ha dado lugar a un total de 76 simulaciones. Como resultado de estas simulaciones, se ha obtenido el calado del fenómeno en formato ráster para cada uno de los escenarios climáticos analizados (Figura 12).

³ <https://www.miteco.gob.es/es/cartografia-y-sig/ide/descargas/agua/mapa-caudales.aspx>

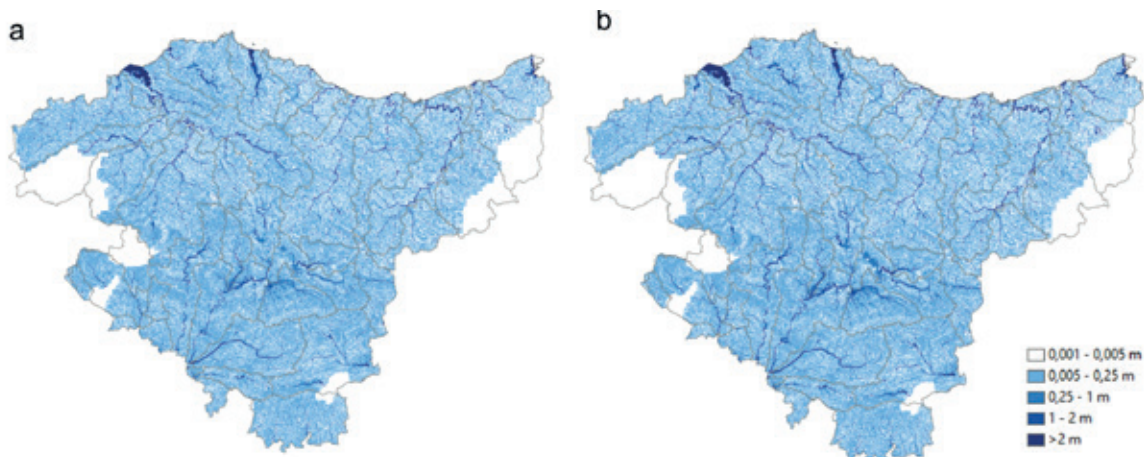


FIGURA 12. Resultados del calado del fenómeno de inundación pluvial para un periodo de retorno de 25 años bajo el escenario actual (a) y de cambio climático (b).

A partir de esta cartografía, se han extraído los polígonos envolventes de las manchas de inundación pluvial de ambos escenarios, atendiendo a los siguientes criterios:

- **Calado del polígono:** superior a 1 m. Este umbral es definido como "nivel de afección grave" dentro de la Guía técnica de apoyo a la aplicación del reglamento del dominio público hidráulico en las limitaciones a los usos del suelo en las zonas inundables de origen fluvial, publicada por el Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente en 2017.
- **Tamaño del polígono:** 400 m². Este umbral se considera lo suficientemente visible (es decir no son puntos aislados) en un mapa con una escala de 1:25.000.

Aplicando estos criterios, se ha representado gráficamente el fenómeno de inundación pluvial bajo los distintos escenarios (escenario actual y de cambio climático), así como las tendencias asociadas al cambio climático mediante el estudio de las diferencias observadas en la superficie de los polígonos envolventes de ambos escenarios.

Finalmente, con esta información se ha llevado a cabo una evaluación del fenómeno analizando su comportamiento a:

- **Escala cuenca:** donde se recoge una descripción a grandes rasgos del fenómeno de inundación pluvial y se evalúan los cambios esperados en la inundabilidad bajo el escenario de cambio climático.
- **Escala municipal:** donde se identifican los potenciales puntos críticos dentro de las zonas urbanizadas de la CAPV. Estos puntos atienden a los criterios previamente descritos (calado superior a 1 m y tamaño superior a 400 m²) por lo que representan áreas de la ciudad, donde se produce una acumulación repentina de agua y son, por tanto, susceptibles a sufrir impactos negativos, como daños en viviendas e infraestructuras urbanas, retenciones en carreteras, interrupción de los servicios básicos (agua, luz y gas), entre otros.

La identificación de estos potenciales puntos se ha presentado en una ficha resumen, que ha recogido las principales características de la zona en cuestión, así como las tendencias del cambio climático esperadas para dicha zona. En total se han elaborado 6 fichas resumen con el fin de mostrar el potencial de los resultados obtenidos en la modelización; no obstante, cabe indicar la cautela con la que han de ser considerados estos resultados debido a las hipótesis que se han tenido en cuenta en la simulación fenómeno de inundación pluvial (ver apartado 4 para más detalles).

3.4. INUNDABILIDAD PLUVIAL A NIVEL DE CUENCA

La Figura 13 y Figura 14 muestran el mapa de inundabilidad pluvial de la CAPV bajo el escenario actual y de cambio climático respectivamente para una lluvia de diseño corta pero muy intensa de periodo de retorno de 25 años (Figura 7). Cabe recordar que este mapa representa las áreas de inundación que poseen un calado superior a 1 m con un tamaño superior a 400 m².

Como es esperable, las zonas inundables de ambos escenarios se localizan principalmente a lo largo de la mayor parte de los cursos y márgenes fluviales de la vertiente cantábrica, y, en particular, en los ríos del Nervión, Ibaizabal, Butroe, Bakio, Oka, Lea, Artibai, Deba, Urola, Oria, Urumea y Bidasoa. En la vertiente mediterránea, se aprecia principalmente en los cursos y márgenes fluviales de los ríos Baia, Zadorra, Ihuda, Izki, Berrón y Ega.

Esta inundabilidad, además, recibe los aportes de los caudales máximos con probabilidad de recurrencia de 5 años introducidos en el modelo, que incrementan, por tanto, la superficie de inundación en dicha zona.



FIGURA 13. Mancha de inundación pluvial para un periodo de retorno de 25 años bajo el escenario actual.

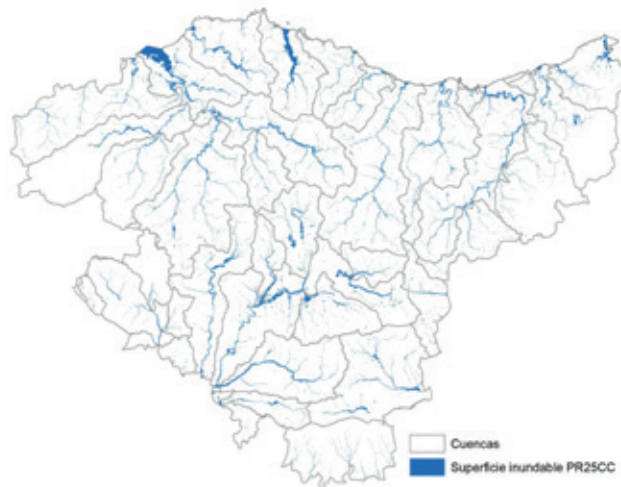


FIGURA 14. Mancha de inundación pluvial para un periodo de retorno de 25 años bajo el escenario de cambio climático (RCP 8.5. 2041-2070).

Las cuencas que muestran una mayor extensión de inundación pluvial son las cuencas de Aguera, Asua, Altube, Ibaizabal, Arratia, Herrerias y Kadagua, pertenecientes a la vertiente cantábrica y caracterizadas por un mayor tamaño con respecto al resto. Por el contrario, las cuencas con menor superficie corresponden con las de Iñurritza, Purón, Igara, Jerea, Barbadun y Omecillo, que pertenecen a las dos vertientes (cantábrica y mediterránea) y son de menor tamaño (Tabla 11).

Bajo el escenario de cambio climático, las superficies de inundación incrementan, destacando las cuencas de Igara, Arakil, Zadorra, Barrundia, Alegría y Jerea con el mayor incremento en la superficie inundable y las cuencas de Omecillo, Golako, Bidasoa y Barbadun, con el menor aumento (Tabla 11). Este incremento se debe a la tendencia al aumento observada en el indicador extremo RV25 (precipitación media máxima asociada a un periodo de retorno de 25 años), una vez aplicada la corrección de sesgo EQM bajo el escenario RCP 8.5 y el periodo 2041-2070 (Ihobe, 2019).

Cabe indicar, no obstante, que la evolución de este indicador asociado a la torrencialidad está sujeto a una alta incertidumbre (Ihobe, 2019); incertidumbre que también es remarcada en otros estudios locales y nacionales (CEDEX, 2017; CEDEX, 2021; Diputación Foral de Gipuzkoa, 2018).

CUENCA	Superficie inundación pluvial PR25 Escenario actual (ha²)	Superficie inundación pluvial PR25 Escenario de CC (ha²)
Aguera	5.910,57	6.887,60
Altube	5.539,56	6.390,97
Asua	5.536,29	6.434,08
Ibaizabal	5.485,66	6.308,02
Arratia	5.387,01	6.226,67
Herrerias	5.339,19	6.188,82
Kadagua	5.337,62	6.157,65
Zadorra	2.946,31	3.924,15
Ebro	2.490,22	3.444,87
Santa Engracia	2.363,68	3.359,49
Zalla	2.133,11	2.723,62
Alegría	2.112,30	3.030,59
Estanda	2.010,21	2.341,30
Ayuda	1.991,29	2.746,29
Amezqueta	1.863,69	2.290,30
Añarri-Alzania	1.806,70	2.215,58
Arantzazu	1.479,43	1.745,11
Golako	1.360,05	1.462,96
Altzolaratz	952,06	1.128,62
Baia	841,56	1.079,03
Bidasoa	811,92	857,73
Ega	803,74	1.011,84
Andrakas	747,01	985,74
Barrundia	555,59	791,3
Añarbe	549	716,27
Omecillo	361,01	463,9
Artibai	355,54	405,31
Ea	274,17	321,35
Húmedo – Omecillo	253,26	328,97
La Muera – Omecillo	250,16	325,98
Arakil	222,94	314,38
Inglares	222,71	286,37
Iñurritza	68,74	88,88
Purón	28,81	35,65
Igara	23,37	32,81
Jerea	5,63	8,17
Barbadun	1,27	1,19
Linares	0,1	0,11

TABLA 11. Superficie de inundación pluvial para el escenario actual y de cambio climático.

Particularmente esta tendencia del cambio climático muestra un incremento en la inundabilidad, que difiere ligeramente entre la vertiente cantábrica (aumento de 10-20%) y mediterránea (aumento superior al 20%) (Figura 15). Este comportamiento se debe a que la superficie de inundabilidad observada en las cuencas de la vertiente mediterránea (que ocupan un 39% de la CAPV), es de menor tamaño, por lo que los cambios que se registran bajo el escenario de cambio climático dan lugar a porcentajes de cambio mayores.

Por el contrario, en las cuencas cantábricas (que ocupan en torno al 63% de la CAPV), los cursos fluviales si bien son más pronunciados, su red fluvial muestra una mayor longitud y como consecuencia, los pequeños cambios que se observan bajo el escenario de cambio climático no dan como resultado cambios tan acusados.

Sin embargo, estos cambios podrían verse condicionados por las amenazas de inundación costera y fluvial principalmente a lo largo de las áreas costeras y en las márgenes fluviales. Se prevé que el cambio climático incremente la superficie inundable de estos fenómenos (URA, 2021; URA, 2022; Ihobe, 2022); por este motivo, será necesario llevar a cabo estudios de mayor resolución, principalmente en aquellos espacios donde puede tener lugar un efecto combinado de las tres amenazas (inundación costera, inundación fluvial e inundación pluvial).

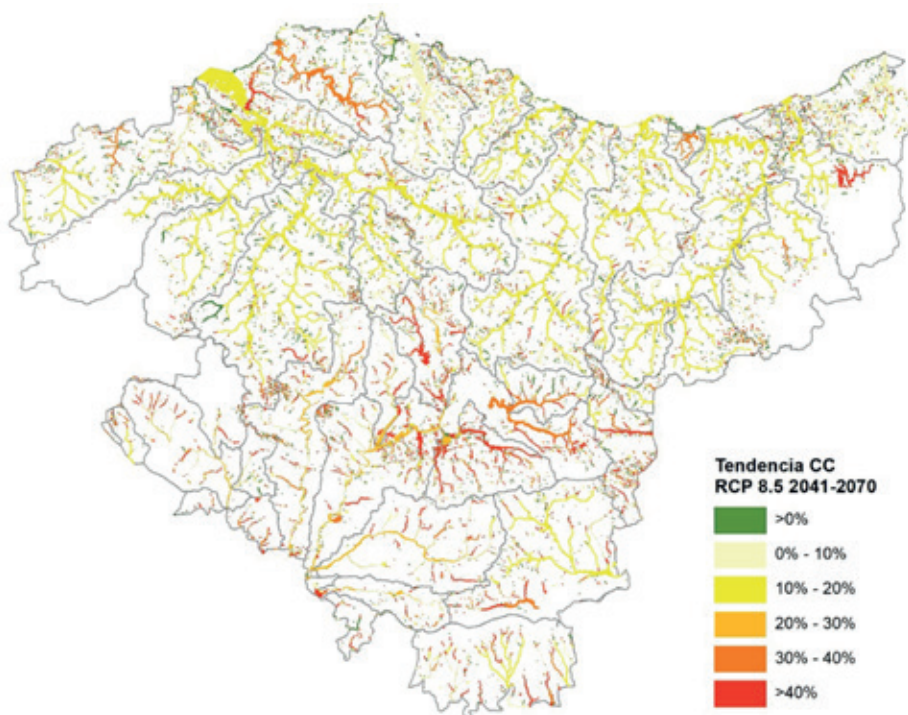


FIGURA 15. Tendencia de cambio climático observada en el fenómeno de inundación pluvial para un periodo de retorno de 25 años.

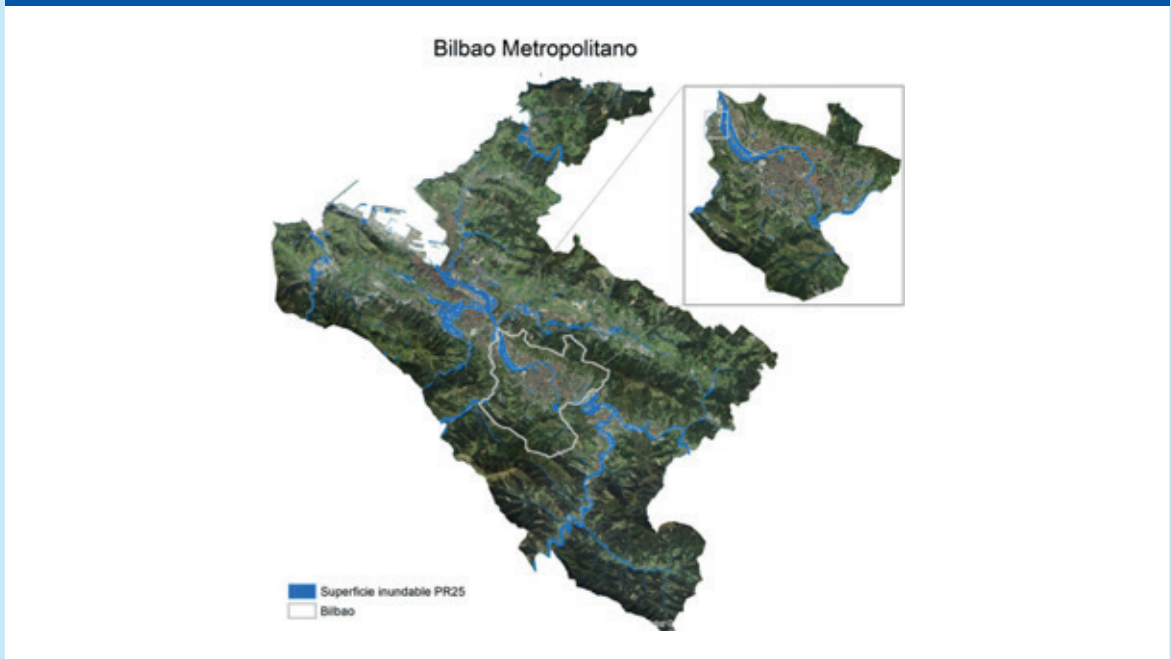
3.5. INUNDABILIDAD PLUVIAL A NIVEL MUNICIPAL

De acuerdo con los resultados obtenidos tras la simulación del evento de lluvia bajo ambos escenarios y teniendo en cuenta las limitaciones existentes del estudio (apartado 4), los núcleos urbanos de la CAPV experimentan zonas potencialmente críticas ante el fenómeno de inundación pluvial simulado ya que recogen manchas de inundación con un calado superior a 1 m.

El alcance de este estudio no permite evaluar cada una de ellas, es por ello por lo que se recogen varios ejemplos en formato ficha para los tres territorios históricos. Cada ficha recoge las principales características de la zona en cuestión, así como las tendencias del cambio climático esperadas para dicha zona. Adicionalmente, cada punto crítico es documentado por eventos históricos de naturaleza similar con el fin de poder validar cada uno de ellos.



PUNTO CRÍTICO I PLANO DE LA LOCALIZACIÓN



Delimitación inundabilidad
pluvial PR 25 años
Escenario actual

Tendencia
del cambio climático
RCP 8.5. 2041-2070



Datos de la localización

Área Funcional: Área Metropolitana de Bilbao

Municipio: Bilbao

Barrio: Zorroza

Infraestructuras potencialmente afectadas: calle Clara Campoamor a la altura del túnel

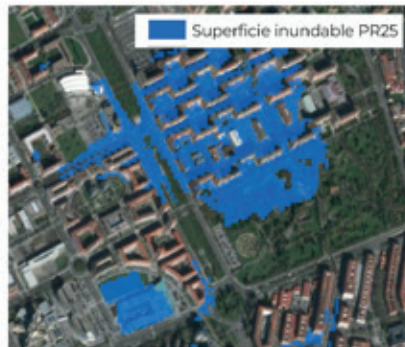
Documentación histórica encontrada

<https://www.deia.eus/bizkaia/bilbao/2021/11/29/arboles-caidos-balsas-agua-desprendimientos/1170981.html>

PUNTO CRÍTICO II PLANO DE LA LOCALIZACIÓN



Delimitación inundabilidad pluvial PR 25 años Escenario actual



Tendencia del cambio climático RCP 8.5. 2041-2070



Datos de la localización

Área Funcional: Álava Central

Municipio: Vitoria

Barrio: Lakua - Arriaga

Infraestructuras potencialmente afectadas: Calle Portal de Foronda

Documentación histórica encontrada

<https://www.gasteizhoy.com/charco-portal-de-foronda/>

<https://www.elcorreo.com/alava/otra-tormenta-balsas-agua-vitoria-20210621184242-ga.html#imagen1>

PUNTO CRÍTICO III PLANO DE LA LOCALIZACIÓN



Delimitación inundabilidad
pluvial PR 25 años
Escenario actual

Tendencia
del cambio climático
RCP 8.5. 2041-2070



Datos de la localización

Área Funcional: Álava Central

Municipio: Vitoria

Barrio: Arriaga

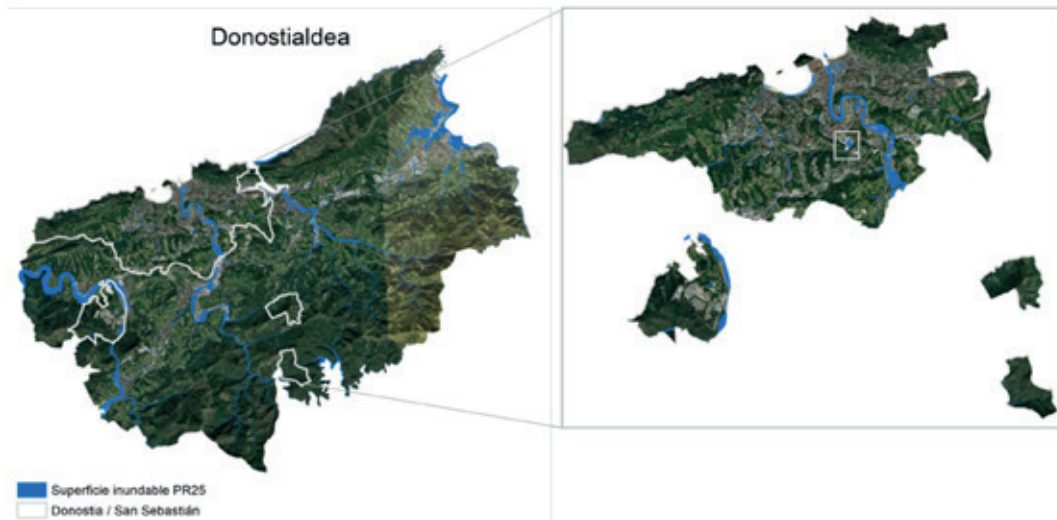
Infraestructuras potencialmente afectadas: Calle Zubibarri, Calle Portal de Gamarra, Calle Portal de Bergara

Documentación histórica encontrada

<https://www.gasteizhoy.com/portal-de-bergara-se-convierte-en-un-gran-lago-por-la-tormenta-de-agua/>

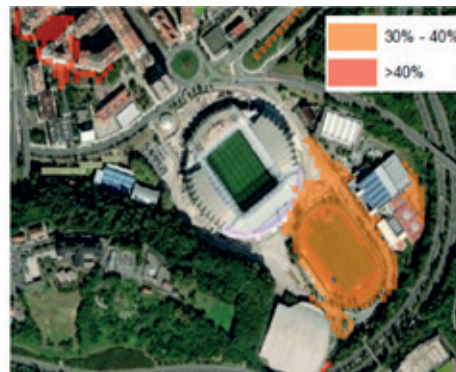
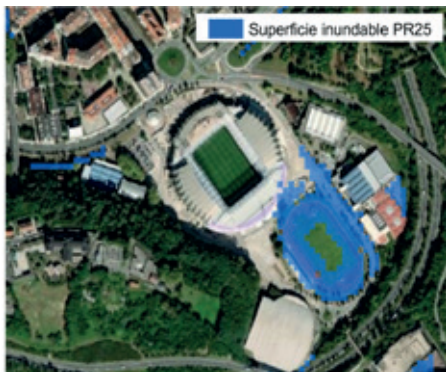
<https://www.elcorreo.com/alava/araba/vitoria-recibe-septiembre-20210902175513-nt.html>

PUNTO CRÍTICO IV PLANO DE LA LOCALIZACIÓN



Delimitación inundabilidad
pluvial PR 25 años
Escenario actual

Tendencia
del cambio climático
RCP 8.5. 2041-2070



Datos de la localización

Área Funcional: Donostialdea

Municipio: Donostia – San Sebastián

Barrio: Amara

Infraestructuras potencialmente afectadas: paseo de Anoeta e instalaciones deportivas de Anoeta

Documentación histórica encontrada

<https://www.diariovasco.com/20091111/al-dia-local/inundaciones-donostialdea-fuertes-lluvias-20091111.html>

4. LIMITACIONES Y RECOMENDACIONES DEL ESTUDIO

Este documento se ha concebido como un estudio que ahonda en el conocimiento de la amenaza de inundación pluvial en la CAPV. Por ello, analiza las zonas potencialmente críticas que podrían albergar inundabilidad por efecto directo de las precipitaciones y evalúa la potencial influencia del cambio climático en dicho fenómeno.

El documento ha tomado en consideración los escenarios climáticos más actuales para la CAPV y ha empleado un modelo hidrodinámico, que ha sido utilizado durante los últimos años internacionalmente en un gran número de estudios, con resultados óptimos. Sin embargo, para conocer la limitación de los resultados de este estudio es conveniente indicar ciertos condicionantes encontrados a lo largo del proceso, que son principalmente fruto de la escala a la que se ha desarrollado el trabajo, la CAPV, y a las fuentes de datos empleados para la caracterización del fenómeno bajo el escenario de cambio climático.

A continuación, se visibilizan dichos condicionantes.

LIMITACIONES RELATIVAS A LOS ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO

La modelización del cambio climático para el análisis de los impactos dista mucho de ser una cuestión resuelta puesto que las proyecciones climáticas se actualizan continuamente en términos de resolución, parametrizaciones, escenarios de emisiones, modelos globales, técnicas de regionalización aplicadas, entre otros.

En España la generación y actualización de los escenarios regionalizados de cambio climático es un mandato para la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) y así viene recogido en sus estatutos. En Euskadi, por el contrario, aunque no existe un mandato como tal, recientemente han sido actualizados por Ihobe (2019) y contienen escenarios de alta resolución espacial (1 km) y temporal (diaria). Estos modelos regionales pueden capturar mejor los efectos del forzamiento orográfico y los efectos locales, proporcionando así escenarios de cambio climático más plausibles

para eventos extremos a escala regional; aun así, todavía requieren de una mayor investigación.

En general, los escenarios de precipitación, a diferencia de los de temperatura, presentan una menor fiabilidad debido a que sobre este tipo de variable influyen muchos factores locales o mesoescalares que no son controlables (AEMET, 2017). Del mismo modo, indicadores extremos asociados a la precipitación, cuya caracterización resulta relevante para la simulación del fenómeno de inundación pluvial, está también sujetos a una alta incertidumbre en la CAPV (Ihobe, 2019).

Por este motivo, es necesario tomar con cautela los resultados de este estudio ya que el impacto que estiman, que conlleva un incremento en la inundabilidad, está sujeto a la previamente mencionada incertidumbre.

LIMITACIONES RELATIVAS AL MODELO HIDRODINÁMICO

A pesar de que la herramienta MIKE 21 FST ha sido ampliamente contrastada con otras herramientas de cálculo, presentando una buena calificación en cuanto a operatividad del software y estabilidad de los algoritmos de cálculo, su precisión depende en gran medida de los parámetros de entrada que son introducidos.

En este trabajo, debido a que el ámbito de estudio ha abarcado toda la CAPV se ha visto necesario adoptar determinadas limitaciones e hipótesis en los parámetros de entrada como son las siguientes:

- **Inexactitudes topográficas en la topografía empleada:** el Modelo Digital de Elevaciones para Hidrología de la CAPV representa el terreno, junto con las edificaciones y construcciones con una resolución de 1 m x 1 m. En él se han observado inexactitudes topográficas que si bien se han corregido puntualmente no han podido ser corregidos en su totalidad por la amplia extensión que abarca el ámbito de estudio.
- **Homogeneidad en la resistencia e infiltración del ámbito de estudio:** la resistencia e infiltración del terreno son parámetros básicos, que dependen del uso del suelo, y que son introducidos en el modelo. En este estudio se ha establecido un mismo valor para toda la CAPV debido nuevamente a la escala a la que se ha desarrollado el estudio. En cualquier caso, los resultados derivados de esta simplificación han dado como resultado determinadas zonas potencialmente inundables, que han podido ser documentadas por eventos históricos de naturaleza similar (véase apartado 3.5 para más detalles).

En un futuro, se podrían establecer mejoras incorporando estos parámetros relativos a la resistencia e infiltración en el modelo. Junto a esta incorporación se podrían realizar también análisis de sensibilidad con el fin de evaluar los efectos de estos parámetros (rugosidad e infiltración) así como otros (tamaño de la malla computaciones o topografía) sobre el modelo.

- **Ausencia de sistemas de drenaje en la modelización:** el modelo Mike 21 simula las variaciones del nivel del agua atendiendo a la topografía del terreno y sin considerar los sistemas de drenaje y saneamiento urbano. La incorporación de esta información resulta fundamental para la caracterización de la amenaza de inundación pluvial; sin embargo, su aplicación a escala de la CAPV resulta inviable no solo en cuanto a la operatividad de cualquier software de modelización hidráulica, sino también en cuanto a la complejidad que esto supone, la cual se encuentra fuera del alcance y de los objetivos de este trabajo. Futuros estudios podrían integrar estos sistemas. Se recomienda para ello llevar a cabo análisis a micro escala partiendo por ejemplo de los potenciales puntos críticos identificados en este estudio.
- **Necesidad de verificación de los resultados:** la simulación de todo tipo de modelo debe ir acompañada de una validación de los resultados. A pesar de que los resultados de este estudio se han podido contrastar con los registros históricos observados en determinados núcleos urbanos de la CAPV (véase apartado 3.5), esta comprobación ha sido puntual y no ha abarcado la totalidad de la CAPV. En un futuro, se podrían contrastar los resultados en mayor profundidad. Para tal fin, será fundamental la monitorización de los impactos asociados a este fenómeno en los núcleos urbanos.

5. CONCLUSIONES

El presente trabajo avanza en el conocimiento de la inundación pluvial en la Comunidad Autónoma del País Vasco, fenómeno causado por precipitaciones intensas de corta duración que superan la capacidad de drenaje principalmente en los núcleos urbanos, donde el grado de artificialización exagera la insuficiencia del drenaje superficial.

Para ello, caracteriza los eventos extremos de precipitación bajo distintos escenarios y modeliza sus efectos en las 38 cuencas hidrológicas que conforman la CAPV. De este modo, evalúa la variabilidad espacial de este fenómeno, así como las tendencias observadas bajo el escenario de cambio climático a nivel de cuenca hidrográfica.

Adicionalmente, ofrece un mayor detalle del fenómeno en determinados núcleos urbanos, identificando ejemplos de potenciales zonas críticas donde se producen las acumulaciones repentinas de agua. Estas zonas críticas son representadas en formato ficha y en ellas se recogen las principales características de la zona en cuestión, las tendencias del cambio climático esperadas y los eventos históricos registrados de naturaleza similar.

Las conclusiones que se extraen de este estudio se resumen a continuación.

- Del análisis de los eventos históricos extremos de precipitación (apartado 2.1) se destaca la baja variabilidad espacial que presentan los periodos de retorno de la precipitación máxima horaria en la CAPV, con excepción de determinadas estaciones meteorológicas. Esta variabilidad depende en mayor medida del periodo de retorno analizado. A mayor periodo de retorno, mayor es la variabilidad entre las estaciones meteorológicas.
- Las proyecciones de precipitación extrema auguran un incremento en la torrencialidad de las precipitaciones (apartado 2.2). Este aumento se observa en el indicador extremo de la precipitación media máxima diaria asociada a los periodos de retorno de 10, 25 y 50 años bajo el escenario climático más pesimista (RCP 8.5), que aumenta a medida que incrementa el horizonte temporal analizado. Estos resultados van en concordancia con otros estudios locales; sin embargo, todos ellos, al igual que este estudio, remarcan la elevada incertidumbre que muestran los escenarios climáticos de precipitación extrema debido a la dificultad que tienen los modelos climáticos regionales para predecir el comportamiento de los valores extremos de esta variable.

- La lluvia de diseño actual y futura, que es seleccionada para la simulación del fenómeno de inundación pluvial, ofrece una aproximación de la influencia que ejerce el cambio climático en las precipitaciones que tienen el potencial de provocar inundaciones pluviales y un funcionamiento incorrecto de la red de drenaje urbano.
El dimensionamiento y comportamiento de las infraestructuras estratégicas (principalmente las de drenaje) depende de la distribución temporal y espacial de los eventos de lluvia; por tanto, conocer esta influencia es importante para una adecuada gestión de los recursos hídricos (apartado 2.3).
- La inundabilidad pluvial a escala CAPV indica potenciales zonas inundables a lo largo de la mayor parte de los cursos y márgenes fluviales de la vertiente cantábrica. El escenario de cambio climático más pesimista para el horizonte temporal 2041-2070 predice un incremento en esta inundabilidad, que difiere ligeramente entre la vertiente cantábrica (aumento de 10-20%) y mediterránea (aumento superior al 20%) (apartado 3.4).
- A nivel municipal se observan potenciales zonas inundables en los núcleos urbanos, que se asocian a zonas deprimidas del terreno. En estos potenciales puntos críticos se observa un incremento de la mancha de inundabilidad bajo el escenario de cambio climático y este incremento varía ligeramente de una zona a otra (apartado 3.5).
- Resulta preciso indicar la incertidumbre a la que están sujetos los resultados del estudio debido a las hipótesis de partida que son asumidas tanto en la modelización hidrodinámica, como en la definición de las lluvias de diseño bajo los escenarios de cambio climático. La modelización, carece de sistema de drenaje y saneamiento y considera una cobertura y usos de suelo homogénea en toda la CAPV, mientras que las lluvias de diseño del escenario de cambio climático están sujetas a la incertidumbre que caracteriza los escenarios futuros de precipitación extrema.
En un futuro, estas limitaciones podrían ser paliadas no solo estableciendo mejoras en el modelo y actualizando los escenarios, sino también elaborando estudios de detalle abarcando áreas más reducidas (escala ciudad) (apartado 4).
- En cualquier caso, los resultados generados en este estudio pueden servir para la elaboración de otros estudios como los que se describen en la Tabla 12.

POTENCIALES USOS

Inundación pluvial a micro escala	Partiendo de los resultados obtenidos en este trabajo se podría llevar a cabo una modelización a micro escala en aquellos puntos críticos identificados, incluyendo los sistemas de drenaje y saneamiento, así como los parámetros hidrodinámicos como la infiltración y rugosidad del terreno. De este modo, se podría cuantificar el impacto sobre la población o infraestructuras críticas e informar sobre el dimensionamiento necesario para un funcionamiento correcto de la red drenaje bajo condiciones climáticas futuras.
Análisis combinado de inundación (pluvial, fluvial y costera)	Los resultados generados en este estudio se podrían combinar con otros fenómenos de inundación, como son la fluvial y costera. Para ello se necesitaría la presencia de todos aquellos agentes que son clave en la gestión de las inundaciones.
Actualización de los índices de vulnerabilidad y riesgo de los municipios de la CAPV	Los mapas de inundación pluvial podrían servir como <i>input</i> al estudio de "Evaluación de la vulnerabilidad y riesgo de los municipios vascos ante el cambio climático".

TABLA 12. Potenciales usos de los resultados de este estudio.

6. REFERENCIAS

AEMET, 2017. *Guía de escenarios regionalizados de cambio climático sobre España*. A partir de los resultados del IPCC-AR5.

CEDEX, 2017. *Evaluación del Impacto del Cambio Climático en los Recursos Hídricos y Sequías en España (2015-2017)*. Disponible en: [Evaluación del impacto del cambio climático en los recursos hídricos y sequías en España \(2017\)](#). Documentos y Descargas - Centro de Estudios Hidrográficos (CEH) - Centros y Laboratorios - Organismo - CEDEX.

CEDEX, 2021. *Impacto del cambio climático en las precipitaciones máximas en España*. Disponible en: https://ceh.cedex.es/web_ceh_2018/documentos/Imp_CClimatico_Pmax/Informe_Impacto_Cambio_Climatico_Pmax_40-617-5-001.pdf

DHI, 2017. MIKE 21 Flow Model & MIKE 21 Flood Screening Tool. *Hydrodynamic Module Scientific Documentation*.

Diputación Foral de Gipuzkoa, 2018. *Cambio en las Condiciones de Inundabilidad en Gipuzkoa por el Cambio Climático*. Disponible en: <https://www.gipuzkoa.eus/es/web/obrahidraulikoak/estudios>

Defra, 2006. *The Flood Risks to People Methodology*. FD2321/TR1 Phase 2.

Euskalmet, 2020. Agencia Vasca de Meteorología. Disponible en: <http://www.euskalmet.euskadi.eus>

Ihobe, 2019. *Escenarios regionales de cambio climático de alta resolución para el País Vasco*. Elaborado por NEIKER para Ihobe – Gobierno Vasco. Disponible en: <http://escenarios.ihobe.eus>

Ihobe, 2022. *Vulnerabilidad, riesgo y adaptación de la costa del País Vasco frente al cambio climático. Kostageoki I. Análisis de vulnerabilidad y riesgo*. Elaborado por Azti para Ihobe – Gobierno Vasco. Disponible en: <https://www.ihobe.eus/publicaciones/kostaegoki-i-analisis-vulnerabilidad-y-riesgo>

IPCC, 2022. *Summary for Policymakers* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Tignor, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem (eds.)]. In: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.

Larsen, A. N., Gregersen, I. B., Christensen, O. B., Linde, J. J., y Mikkelsen, P. S., 2009. *Potential future increase in extreme one-hour precipitation events over Europe due to climate change*. *Water science and technology*, 60(9), 2205-2216.

MAPAMA, 2017. *Guía técnica de apoyo a la aplicación del reglamento del dominio público hidráulico en las limitaciones a los usos del suelo en las zonas inundables de origen fluvial*. Disponible en: [Guía técnica de apoyo a la aplicación del Reglamento del Dominio Público Hidráulico en las limitaciones a los usos del suelo en las zonas inundables de origen fluvial – CPAGE \(mpr.gob.es\)](#).

URA, 2021. *Análisis del efecto del cambio climático en la inundabilidad de la CAPV – Resumen*. Diciembre 2021.

URA, 2022. *Revisión y actualización del Plan de Gestión del Riesgo de Inundación 2º Ciclo. Anejo 1 Caracterización de las ARPSIs 20022-2027*. Disponible en: https://www.uragentzia.euskadi.eus/contenidos/informacion/plan_inundacion_2022_2027/es_def/adjuntos/01_ANEJO_1_DHCO_r_2C_20220330.pdf



Herri-baltzua
Sociedad Pública del

EUSKO JAURLARITZA
GOBIERNO VASCO

EKONOMIAREN GARAPEN,
JASANGARRITASUN
ETA INGURUMEN SAILA

DEPARTAMENTO DE DESARROLLO
ECONÓMICO, SOSTENIBILIDAD
Y MEDIO AMBIENTE

www.ihobe.eus