

Consultoría para la elaboración de mapa probabilístico de inundaciones

Contrato MARN/AECID/SLV-056-B N° 12/2018

INFORME FINAL



FECHA: FEBRERO 2019

AUTORES:

PABLO BLANCO GÓMEZ
LUIS FERNÁNDEZ MARTÍNEZ
CONSTANCIO AMURRIO
EDUARDO LÓPEZ
ÀLVAR ESCRIVÀ BOU
JUAN ORTIZ VALLESPÍ

INFORME FINAL

INDICE

1.	INTRODUCCIÓN.....	5
2.	OBJETIVO.....	5
3.	RESUMEN EJECUTIVO.....	6
4.	RESULTADOS CONSOLIDADOS E INTERPRETACIÓN.....	9
4.1.	PRIMER INFORME DE AVANCE.....	9
4.2.	SEGUNDO INFORME DE AVANCE.....	12
4.2.1.	CATÁLOGO DE TORMENTAS.....	13
4.2.2.	CURVAS PADF.....	14
4.2.3.	MALLAS DE PRECIPITACIÓN MÁXIMA.....	15
4.3.	TERCER INFORME DE AVANCE.....	17
5.	DESCRIPCIÓN DE MODELOS UTILIZADOS.....	17
5.1.	CONSISTENCIA DE LOS DATOS DE PRECIPITACIÓN.....	22
5.2.	CATÁLOGO DE INUNDACIONES.....	22
5.3.	CATÁLOGO DE TORMENTAS.....	25
5.3.1.	ANÁLISIS DE LA CONSISTENCIA DE LOS DATOS MEDIANTE ANÁLISIS DE DOBLE MASA.....	25
5.3.2.	INTERPOLACIÓN ESPACIAL.....	26
5.3.3.	SELECCIÓN DE EVENTOS Y CATÁLOGO DE TORMENTAS IMPORTANTES.....	27
5.4.	CONSTRUCCIÓN DE CURVAS PRECIPITACIÓN-ÁREA-DURACIÓN-FRECUENCIA (PADF).....	28
5.4.1.	PRECIPITACIÓN AREAL MÁXIMA PARA LAS DISTINTAS DURACIONES DE EVENTO.....	28
5.4.2.	ANÁLISIS DE EXTREMOS DE LAS PRECIPITACIONES.....	28
5.4.3.	CONSTRUCCIÓN DE LAS CURVAS PADF.....	28
5.5.	GENERACIÓN DE MALLAS DE PRECIPITACIÓN MÁXIMA.....	29
5.5.1.	MALLA PAÍS.....	29
5.5.2.	MALLA EVENTO.....	29
5.6.	MODELACIÓN DEL ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL.....	30
5.6.1.	CÁLCULO DE CAUDALES.....	30
5.6.2.	MAPAS DE INUNDACIÓN.....	34
6.	MANUAL PARA LA REPLICACIÓN DE LOS ANÁLISIS REALIZADOS.....	37
6.1.	CATÁLOGO DE TORMENTAS IMPORTANTES.....	37
6.1.1.	ANÁLISIS DE LA CONSISTENCIA DE LOS DATOS: ANÁLISIS DE DOBLE MASA.....	37
6.1.2.	INTERPOLACIÓN ESPACIAL.....	44
6.1.3.	SELECCIÓN DE EVENTOS.....	45
6.1.4.	CATÁLOGO DE TORMENTAS IMPORTANTES.....	46

6.2. CURVAS PRECIPITACIÓN-ÁREA-DURACIÓN-FRECUENCIA.....	47
6.2.1. PRECIPITACIÓN AREAL MÁXIMA PARA CADA UNA DE LAS DURACIONES DE EVENTOS.....	47
6.2.2. ANÁLISIS DE EXTREMOS DE LAS PRECIPITACIONES AREALES MÁXIMAS	50
6.2.3. CONSTRUCCIÓN DE CURVAS PRECIPITACIÓN-ÁREA-DURACIÓN-FRECUENCIA	55
6.3. MALLAS DE PRECIPITACIÓN	55
6.3.1. MALLAS PAÍS	55
6.3.2. MALLAS EVENTO	57
6.4. MODELACIÓN DEL ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL.....	60
6.4.1. PROPROCESAMIENTO Y CAUDALES	61
6.4.2. CALCULO DE LAS CURVAS DE GASTO	68
6.4.3. CÁLCULO DE LAS SUPERFICIES DE INUNDACIÓN	71
7. ATLAS DE MAPAS PROBABILÍSTICOS DE INUNDACIONES.....	79
8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	81
9. BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA	84
APÉNDICE 1: MAPAS DE INUNDACIONES.....	85

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Registros de las series temporales en las estaciones pluviométricas principales	10
Tabla 2. Ejemplo de curva PADF a partir del ajuste GEV para 1 día de duración	14
Tabla 3. Ejemplo de caudales calculados (15 puntos del evento ct_d1r1)	18
Tabla 4. Ranking de tormentas más importantes para 1 d, 2 d y 5 d de duración	27
Tabla 5. Clasificación de suelos	33
Tabla 6. Análisis estadístico de los resultados del diagrama de doble masa	41
Tabla 7. Ejemplo del resultado de precipitación acumulada en todo El Salvador para los eventos de 1, 2 y 5 días.....	46
Tabla 8. Catálogo de tormentas importantes. Téngase en cuenta que los datos que están incluidos en otras tormentas (por ejemplo, los valores de la tormenta de octubre de 2011 en las tormentas de 5 días) no se han tenido en cuenta .	47
Tabla 9. A modo de ejemplo se presenta el valor focal máximo y la localización para las precipitaciones de 1 día de duración y radio 10 km ²	50
Tabla 10. Resultado del ajuste de extremos de la precipitación máxima areal para diferentes áreas, duraciones de evento, y períodos de retorno según las funciones de distribución GEV y Gumbel	53
Tabla 11. Resultados del ajuste de extremos obtenido para cada una de las estaciones.....	56
Tabla 12. Ejemplo de la corrección realizada para la construcción de las mallas para los eventos de 1 día de duración y 100 años de período de retorno	58

Tabla 13. Valores de P0.....	65
Tabla 14. Relación entre códigos de mapa y evento generador	79

LISTADO DE FIGURAS

informe FINAL	1
Figura 1. Períodos de información disponible en las estaciones pluviométricas principales.....	9
Figura 2. Histograma box&whisker mensual con registros en estaciones según tipologías	10
Figura 3. Histograma de registros de incidencias relativas a inundaciones	11
Figura 4. Mapa de ocurrencia de registros de inundación en municipios	12
Figura 5. Mapa de ocurrencia de víctimas mortales en departamentos	12
Figura 6. Raster de eventos máximos históricos de precipitación para distintas duraciones	14
Figura 7. Curva PADF para 1 d de duración	15
Figura 8. Distribución espacial de los focos de precipitaciones máximas registradas	16
Figura 9. Ejemplo de mallas de precipitación: a) Malla país 5 d y T500; b) Malla evento con foco en Santiago de María; 5 d y T500.....	17
Figura 10. Numero de Curva	19
Figura 11. Ejemplo de curva de gasto obtenida en el punto CS_02	20
Figura 12. Mapa de inundación, evento Agatha, hoja 19.....	21
Figura 13. Ejemplo de curva de doble masa para el Aeropuerto de Ilopango	25
Figura 14. Ejemplo de interpolación para la precipitación máxima diaria del 30 de mayo de 2010.....	26
Figura 15. Esquema de la herramienta empleada	36
Figura 16. Diagramas de doble masa para la estación del Aeropuerto de Ilopango.....	39
Figura 17. Ejemplos de correcciones realizadas a partir de los análisis de doble masa.....	43
Figura 18. Ejemplo del proceso de interpolación espacial seguido a partir de los datos diarios obtenidos	44
Figura 19. Como ejemplo se muestra la interpolación obtenida en la consultoría para el 30 de mayo de 2010	45
Figura 20. Ejemplo de análisis focal	49
Figura 21. Diagnósticos del ajuste de la función GEV para los máximos anuales de los eventos de duración 5 días y un área de 500 km ²	51

Figura 22. Ejemplo de la malla interpolada a partir de los datos del ajuste de extremos para cada una de las estaciones para la duración de 1 día y periodo de retorno de 2 años	56
Figura 23. Esquema elíptico conceptual considerado	58
Figura 24. Distribución espacial de los centroides de los eventos de precipitación anual máxima.....	59
Figura 25. Ejemplo de la malla para el evento elíptico centrado en San Salvador de duración 1 día y período de retorno de 25 años	60
Figura 26. Relación existente entre las superficies de elipses y los semiejes de las mismas	60
Figura 27. Modelo de escorrentía.....	61
Figura 28. Modelo de escorrentía.....	63
Figura 29. Números de curva	66
Figura 30. Ejemplo de generación de geometría para Hec-RAS en QGIS con el complemento Q-RAS.....	69
Figura 31. Información extraída del MDE con Q-RAS e importada en Hec-RAS.....	69
Figura 32. Vista de la definición de perfiles de caudal estacionario y las condiciones de contorno del modelo.....	70
Figura 33. Ejemplo de curva de gasto obtenida en el punto CS_02	71
Figura 34. Serie de tiempo. Campos generados	73
Figura 35. Tabla de variables (VAR)	73
Figura 36. generación de línea 3D y línea ráster.....	74
Figura 37. Extracción de valores de altura a red de puntos densificada y cálculo de elevaciones	75
Figura 38. Asignación de valores a los puntos del buffer y unión de todos los puntos	76
Figura 39. Parte final del modelo, creación de la capa de superficie de elevación de la lámina de agua e intersección con el terreno	76
Figura 40. TIN de elevaciones de lámina de agua.....	77
Figura 41. Formula calculadora raster	77
Figura 42. Punto de calibración DT12E	78
Figura 43. Punto de calibración MITCH	78

1. INTRODUCCIÓN

El presente documento constituye el INFORME FINAL correspondiente a la *‘Consultoría para la elaboración de mapa probabilístico de inundaciones’*.

Estos servicios de consultoría de estudios y diseños se desarrollan dentro del marco del *Proyecto Integrado de Agua, Saneamiento y Medio Ambiente*, que ejecuta el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN) y que persigue contribuir al incremento de cobertura, calidad y sostenibilidad de los servicios de agua potable y saneamiento, así como el fortalecimiento de la gestión integrada del recurso hídrico.

En el ‘Informe final’ se incluye la modelación del escurrimiento superficial, el cálculo de los caudales y los mapas de inundación correspondientes a los 111 eventos expuestos en el “Segundo Informe de Avance” de la presente consultoría. Estos 111 eventos se corresponden con: 6 eventos históricos, 30 eventos correspondientes a las mayores tormentas (ranking del 1 al 10) para cada duración de 1, 2 y 5 días, 15 mallas de país correspondientes a eventos estadísticos de duración 1, 2 y 5 días para períodos de retorno de 2, 10, 25, 100 y 500 años, y 60 eventos elípticos centrados en 4 localizaciones para duraciones de 1, 2 y 5 días y períodos de retorno de 2, 10, 25, 100 y 500 años.

2. OBJETIVO

El objetivo general de la presente consultoría es el desarrollo de mapas de inundación para diferentes probabilidades de ocurrencia y duración a una escala nacional, usando información a escalas disponibles y basados en eventos estocásticos de precipitación.

El Informe Final constituye un compendio de resultados, en el que se presentan de manera unificada los diferentes productos elaborados a lo largo de la consultoría, además de un atlas de mapas a doble carta tanto de precipitaciones y número de curva como de inundaciones históricas y estadísticas, así como de tormentas estocásticas.

Además de un Resumen Ejecutivo de los productos elaborados y del referido Atlas de mapas de resultados, el Informe Final contiene:

- Resultados consolidados de los distintos informes de avance, incluyendo su interpretación.
- Descripción de los modelos empleados para su cálculo.
- Procedimiento o manual para replicar los análisis.
- Bibliografía de referencia.

3. RESUMEN EJECUTIVO

La presente consultoría da respuesta a la solicitud del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN) de El Salvador de elaborar un Mapa Probabilístico de Inundaciones.

Vielca Ingenieros, S.A. resultó adjudicataria del trabajo de referencia recibiendo la Orden de Inicio de la consultoría a mediados de julio de 2018 y disponiendo de un plazo de 180 días calendario para la elaboración de los distintos productos demandados en los TdR, a saber:

- Análisis de las series de precipitación y catálogo de inundaciones más relevantes, en base a la información suministrada por el MARN – i.e. registros pluviométricos de máximos diarios de precipitación en las estaciones de referencia a escala nacional, así como registros de inundaciones relevantes tanto de la base de datos DESINVENTAR como el catálogo del MARN – y la que pudiera recabar la consultora de diversas fuentes, como la Dirección General de Protección Civil.
- Desarrollo de un catálogo de tormentas, en el que se destaquen los 10 eventos de mayor precipitación acumulada de la serie a escala nacional para duraciones de 1 día, 2 días y 5 días.
- Construcción de las curvas Precipitación-Área-Duración-Frecuencia (PADF) a partir de un análisis de extremos de las series de precipitación – aplicando las funciones de distribución de probabilidad GEV y Gumbel a los registros previamente analizados y corregidos – y obteniendo, mediante la generación de mapas ráster para diferentes áreas circulares concéntricas y un procedimiento de integración de resultados con variación focal, los valores máximos de precipitación para las 3 duraciones de cálculo y distintos eventos de diversos periodos de retorno.
- Generación de mallas de precipitación máxima, en las que se distingue entre:

- Malla país (adicional a lo demandado en los TdR) y en donde se representan los mapas de precipitación máxima acumulada para una determinada duración y periodo de retorno.
- Malla evento, asociada a un determinado evento estocástico en donde se han variado las características físicas de las áreas de acumulación – i.e. de superficies circulares concéntricas consideradas para la elaboración de las curvas PADF, a superficies elípticas concéntricas con distinta orientación de ejes y tamaños de superficies.

Las mallas evento se han generado para las distintas duraciones y periodos de retorno establecidos en los TdR y 4 focos diferenciados que han sido planteados en función de la recurrencia y severidad de los eventos registrados en las series de precipitación.

- Modelación del escurrimiento y mapeo de inundaciones, para lo que se ha establecido una metodología gráfica basada en ArcGIS – y en el empleo del complemento Arc-HydroTools – que sirve para la representación de las superficies de inundación a partir de los resultados de elevación del agua en distintos puntos de la red de drenaje natura y su interacción con el MDE del terreno.

El presente producto constituye un compendio de los resultados anteriores, estructurando la información de manera global y refiriendo a sus contenidos en base a la siguiente estructura:

- Resultados consolidados e interpretación de los mismos. Cabe destacar que se han presentado la tipología de resultados e indicado de manera genérica las claves para su interpretación, sin pretender reproducir los resultados completos, refiriendo a los mismos a los distintos informes de avance presentados con anterioridad.
- Descripción de los modelos utilizados, en donde éstos son presentados y se exponen sus fundamentos y principios de cálculo.
- Manual para la replicación de los modelos, en el que se pretende definir de manera secuencial los procesos a seguir para ser capaces de repetir los cálculos desde el inicio.

Finalmente se presenta un apartado de Conclusiones y Recomendaciones en el que se sintetizan los aspectos más relevantes de cada uno de los productos y alcances de la consultoría; y en donde se recomienda profundizar en la generalización del método de mapeo de inundaciones para ser capaces de desarrollar una herramienta que permita obtener en tiempo real mapas del

escurrimiento asociado a las precipitaciones registradas en las redes hidrométricas desplegadas en el país.

4. RESULTADOS CONSOLIDADOS E INTERPRETACIÓN

4.1. PRIMER INFORME DE AVANCE

El primer informe de avance perseguía recopilar y analizar la información pluviométrica disponible a escala nacional y a escala región hidrográfica – para aquellas cuencas transnacionales – evaluando la consistencia en los datos y evidenciando los períodos de registro.

El análisis se realizó de manera diferenciada para las estaciones principales del país, el resto de estaciones nacionales y las estaciones hidrométricas de Guatemala y Honduras, presentando la siguiente tipología de registros - :

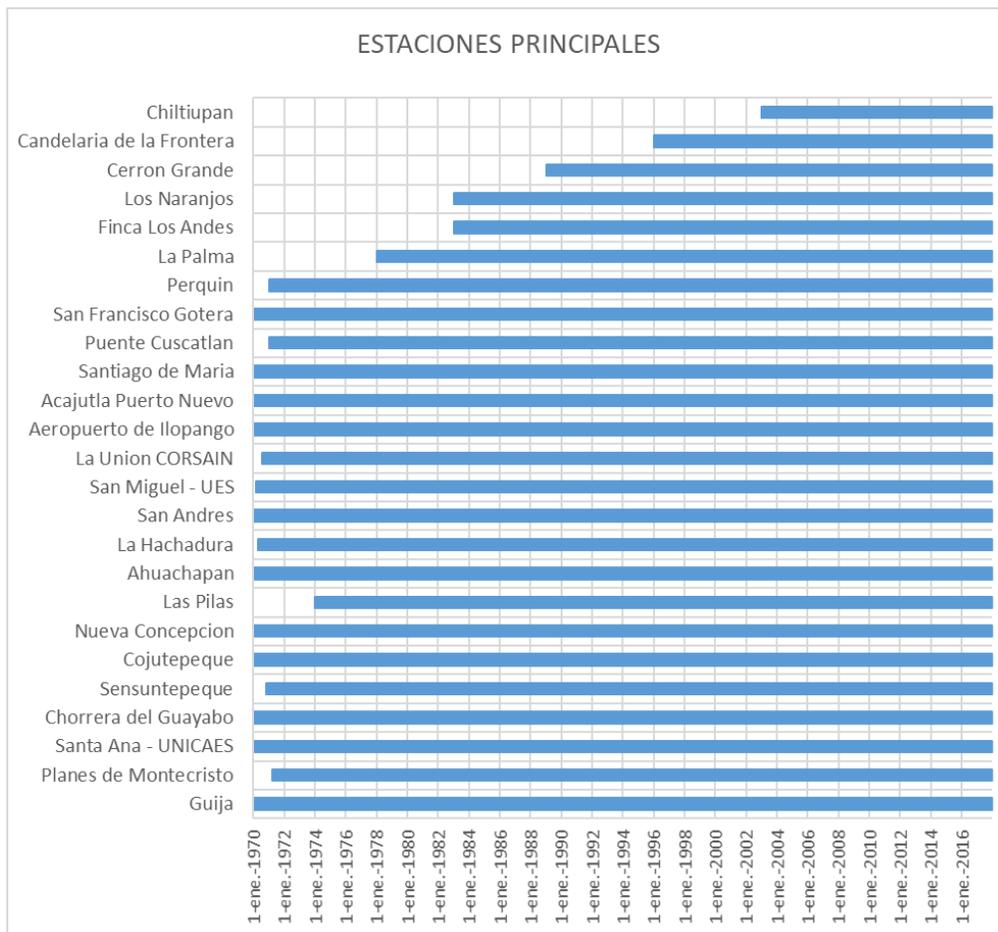


Figura 1. Períodos de información disponible en las estaciones pluviométricas principales

ESTACIONES PRINCIPALES													
Indice	Estacion	Longitud	Latitud	Inicio Serie	Final Serie	Días en la serie	Datos Válidos	% Datos Válidos	Errores en la serie	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90	Máximo diario
A-15	Guija	-89.478	14.228	01-ene-70	31-dic-17	17531	17523	100.0%	No	5.70	15.50	29.93	140.20
A-31	Planes de Montecristo	-89.36	14.3983333	18-mar-71	31-dic-17	17090	17082	100.0%	No	5.70	18.70	35.87	245.50
A-37	Santa Ana - UNICAES	-89.54833333	13.982	01-ene-70	31-dic-17	17531	17523	100.0%	No	7.40	19.00	35.00	150.00
B-01	Chorrera del Guayabo	-88.757	13.997	01-ene-70	31-dic-17	17531	17523	100.0%	No	8.10	20.50	37.00	131.40
B-06	Sensuntepeque	-88.650	13.870	01-nov-70	31-dic-17	17227	17188	99.8%	No	8.80	20.70	37.00	140.20
C-09	Cojutepeque	-88.927	13.720	01-ene-70	31-dic-17	17531	17523	100.0%	No	6.50	17.20	31.50	240.30
G-03	Nueva Concepcion	-89.290	14.125	01-ene-70	31-dic-17	17531	17523	100.0%	No	6.80	18.30	33.50	123.20
G-13	Las Pilas	-89.090	14.365	01-ene-74	31-dic-17	16070	16069	100.0%	No	7.00	17.00	29.36	185.00
H-08	Ahuachapan	-89.860	13.943	01-ene-70	31-dic-17	17531	17492	99.8%	No	7.00	17.50	30.20	252.90
H-14	La Hachadura	-90.090	13.860	20-abr-70	31-dic-17	17422	17414	100.0%	No	6.70	18.92	39.40	483.00
L-04	San Andres	-89.407	13.808	01-ene-70	31-dic-17	17531	17523	100.0%	No	7.50	18.40	32.00	210.00
M-24	San Miguel - UES	-88.158	13.438	01-mar-70	31-dic-17	17472	17434	99.8%	No	7.20	19.00	34.52	221.60
N-02	La Union CORSAIN	-87.882	13.332	01-ago-70	31-dic-17	17319	17158	99.1%	No	7.20	20.20	37.81	296.00
S-10	Aeropuerto de Ilopango	-89.118	13.698	01-ene-70	31-dic-17	17531	17523	100.0%	No	7.00	18.90	33.90	219.10
T-06	Acajutla Puerto Nuevo	-89.833	13.573	01-ene-70	31-dic-17	17531	17492	99.8%	No	6.40	18.90	39.50	243.00
U-06	Santiago de Maria	-88.472	13.485	01-ene-70	31-dic-17	17531	16548	94.4%	No	7.80	19.70	35.65	314.50
V-09	Puente Cuscatlan	-88.593	13.602	01-ene-71	31-dic-17	17166	16428	95.7%	No	7.90	19.30	34.40	148.00
Z-02	San Francisco Gotera	-88.090	13.697	01-ene-70	31-dic-17	17531	17523	100.0%	No	8.90	22.30	40.50	182.20
Z-03	Perquin	-88.162	13.958	01-ene-71	31-dic-17	17166	12913	75.2%	No	10.40	23.60	40.80	251.20
G-04	La Palma	-89.162	14.292	01-ene-78	31-dic-17	14609	14120	96.7%	No	9.00	23.70	42.70	195.60
A-18	Finca Los Andes	-89.645	13.875	01-ene-83	31-dic-17	12783	12599	98.6%	No	7.70	22.50	38.80	364.00
T-24	Los Naranjos	-89.675	13.875	01-ene-83	31-dic-17	12783	12754	99.8%	No	8.10	20.60	37.40	449.00
B-10	Cerron Grande	-88.785	13.938	01-ene-89	31-dic-17	10591	10588	100.0%	No	7.50	19.70	35.37	118.20
A-27	Candelaria de la Frontera	-89.652	14.120	01-ene-96	31-dic-17	8035	8033	100.0%	No	6.80	18.80	33.90	186.20
L-27	Chiltiupan	-89.482	13.595	01-ene-03	31-dic-17	5478	5479	100.0%	Sí	7.80	21.30	39.59	237.90

Tabla 1. Registros de las series temporales en las estaciones pluviométricas principales

La tabla anterior presenta un resumen de los registros de las distintas series temporales de precipitación máxima diaria en las estaciones principales, donde se incluye la siguiente información:

- Referencia de la estación y su ubicación en coordenadas.
- Inicio y fin de la serie.
- No. de registros y No. de registros válidos.
- Existencia de errores en la serie – i.e. aparición de *outliers* en la serie, determinados a partir de los estadísticos y la elaboración de un histograma *box & whisker*.

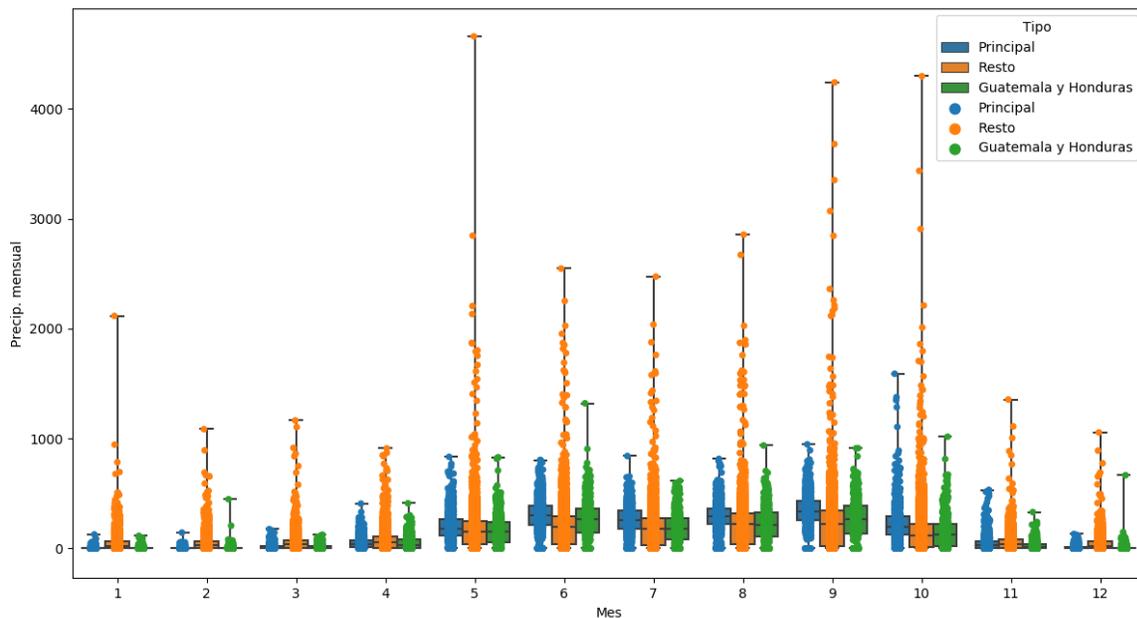


Figura 2. Histograma box&whisker mensual con registros en estaciones según tipologías

- Estadísticos principales, en cuanto a percentiles 50-75-90 y valores máximos.

Adicionalmente se elaboró un catálogo de inundaciones a partir de la información disponible en el catálogo del MARN, en la base de datos DESINVENTAR y las fichas de eventos registrados por la Comisión Técnica Científica de la Dirección General de Protección Civil.

Se planteó el desarrollo de tablas relacionales con un identificador común numérico correlativo, en donde se registró lo siguiente:

- INUNDACION, registra información relativa a la fecha en la que se produjo, las causas, efectos y daños producidos – en infraestructuras, edificaciones, cultivos – así como de las víctimas y heridos.
- INUNDACION_LOCALIZACION, registra información física y administrativa de la localización por categorías – i.e. coordenadas, región hidrográfica, departamento-municipio-cantón.
- INUNDACION_MEDIDA, registra la precipitación asociada al evento que produjo la inundación en una determinada estación de referencia.

Los resultados se presentaron en forma de histograma de fichas de registros y mediante la elaboración de mapas administrativos en las que se registra el número de registros de inundación y el de víctimas mortales en tres niveles diferenciados: regiones hidrográficas, departamentos y municipios.

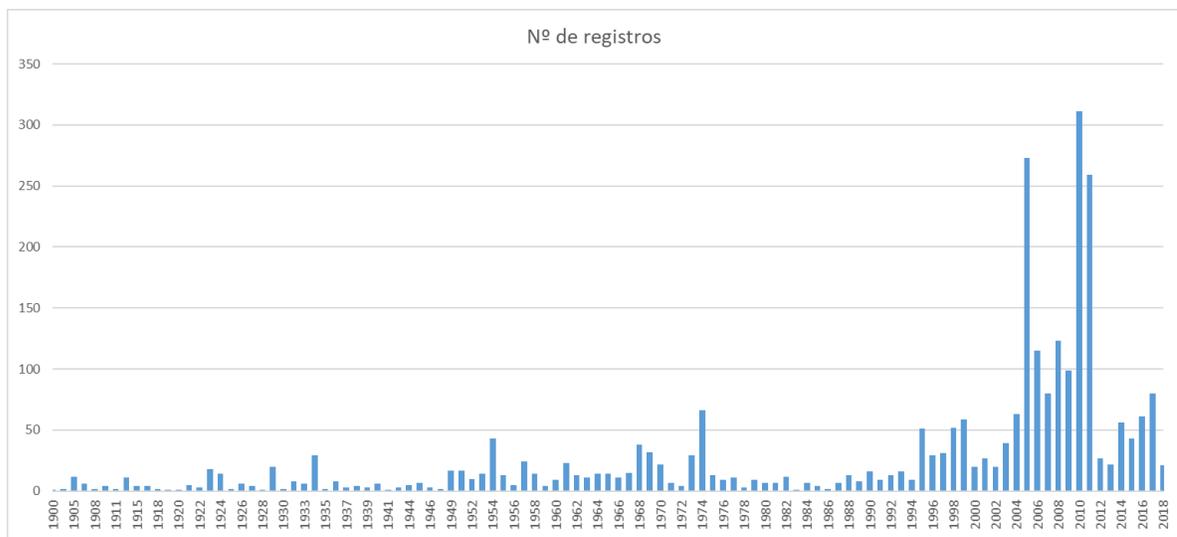


Figura 3. Histograma de registros de incidencias relativas a inundaciones

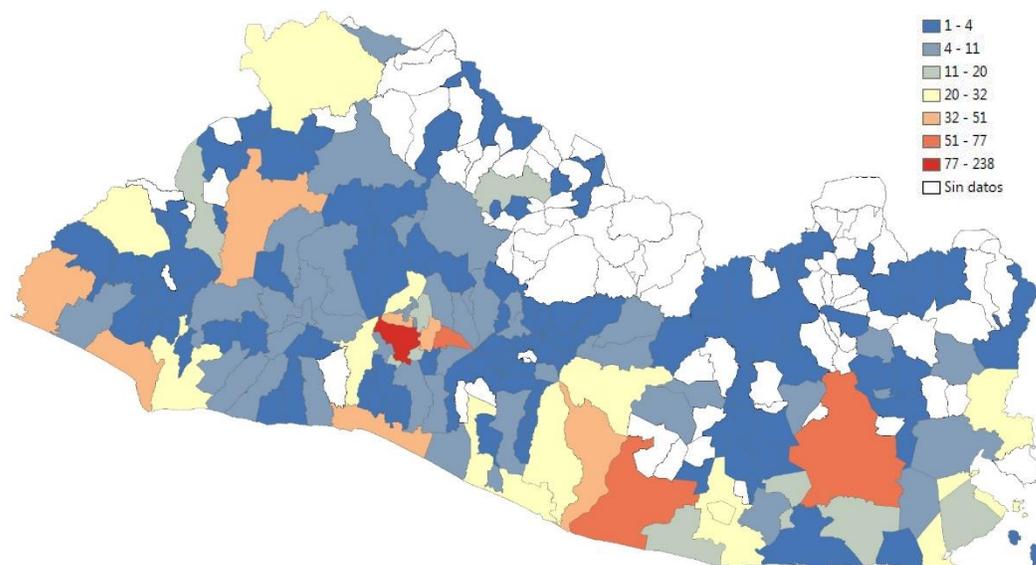


Figura 4. Mapa de ocurrencia de registros de inundación en municipios

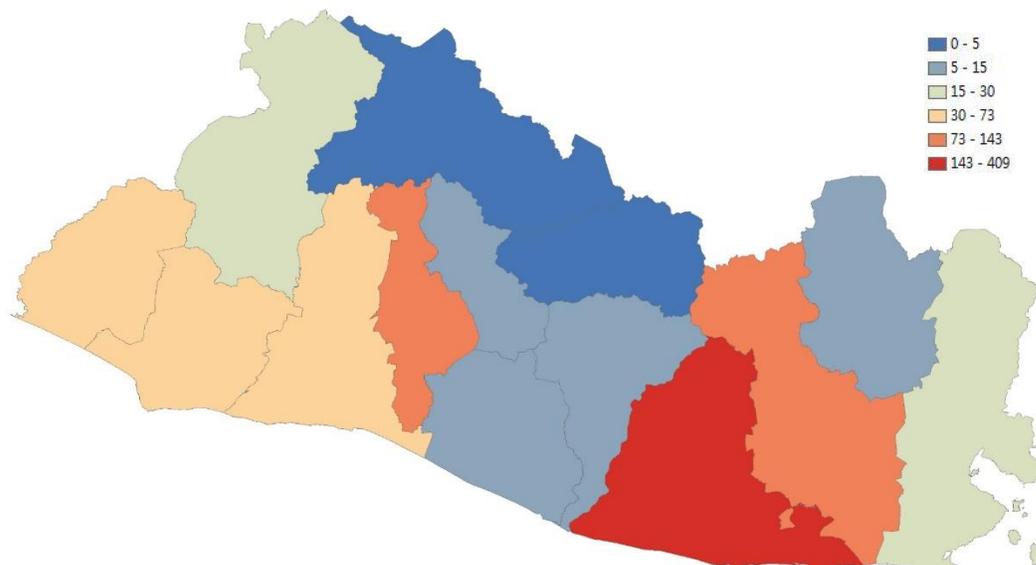


Figura 5. Mapa de ocurrencia de víctimas mortales en departamentos

4.2. SEGUNDO INFORME DE AVANCE

Los resultados obtenidos en este segundo informe de avance pueden estructurarse en los siguientes grupos principales:

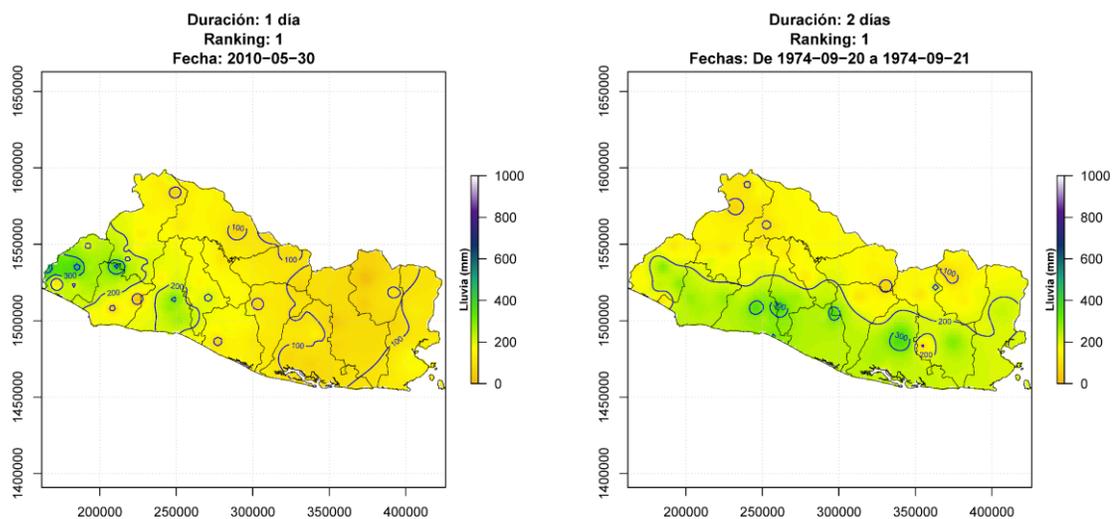
- Catálogo de tormentas.
- Curvas PADF.
- Mallas de precipitación máxima.

En el apartado ***¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..*** Descripción de modelos utilizados se presentan los modelos empleados para cada uno de dichos productos, siendo los resultados más destacados los siguientes:

4.2.1. CATÁLOGO DE TORMENTAS

Constituye un listado con las 10 tormentas más importantes a escala nacional, de 1 día de duración, de 2 días de duración y 5 días de duración; teniendo un total de 30 entradas el listado y habiendo considerado para su elaboración los eventos de precipitación máxima diaria desde el 1 de enero de 1970 y el 31 de diciembre de 2017.

Los resultados se presentan en forma de mapas de precipitación como los de la siguiente figura (en donde se representan los Top 1 de cada duración), en el que se reflejan las isolíneas de precipitación acumulada en la duración de cada evento.



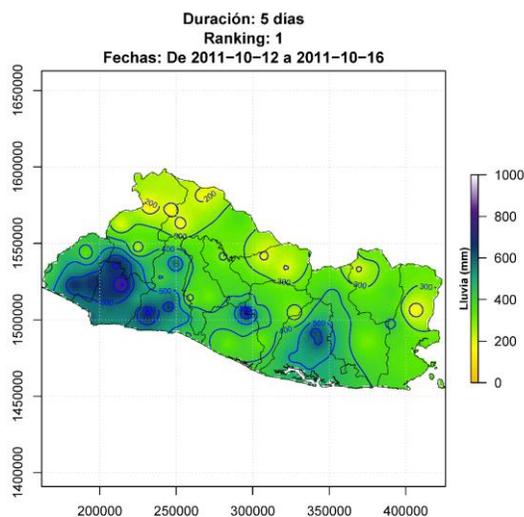


Figura 6. Raster de eventos máximos históricos de precipitación para distintas duraciones

4.2.2. CURVAS PADF

A partir de un análisis de extremos de los máximos de precipitación asociados a las distintas duraciones se obtienen las curvas PADF en formato tabular.

Generalized Extreme Value

Duración (días)	Area (km ²)	Período de retorno						
		2 años	5 años	10 años	25 años	50 años	100 años	500 años
1	10	198.7	262.8	316.1	398.7	473.5	561.3	831.0
1	25	181.9	240.1	287.7	360.7	425.9	501.7	730.4
1	100	157.0	207.9	249.7	313.9	371.4	438.4	641.2
1	500	112.5	155.0	189.2	241.1	286.8	339.4	495.3
1	1000	95.8	133.7	164.9	213.1	256.4	307.1	461.4
1	5000	63.5	89.4	111.2	145.5	176.9	214.3	331.5
1	21041	44.9	62.5	78.9	107.1	135.2	171.2	299.2

Tabla 2. Ejemplo de curva PADF a partir del ajuste GEV para 1 día de duración

De igual modo, se presenta el resultado anterior en formato gráfico como sigue:

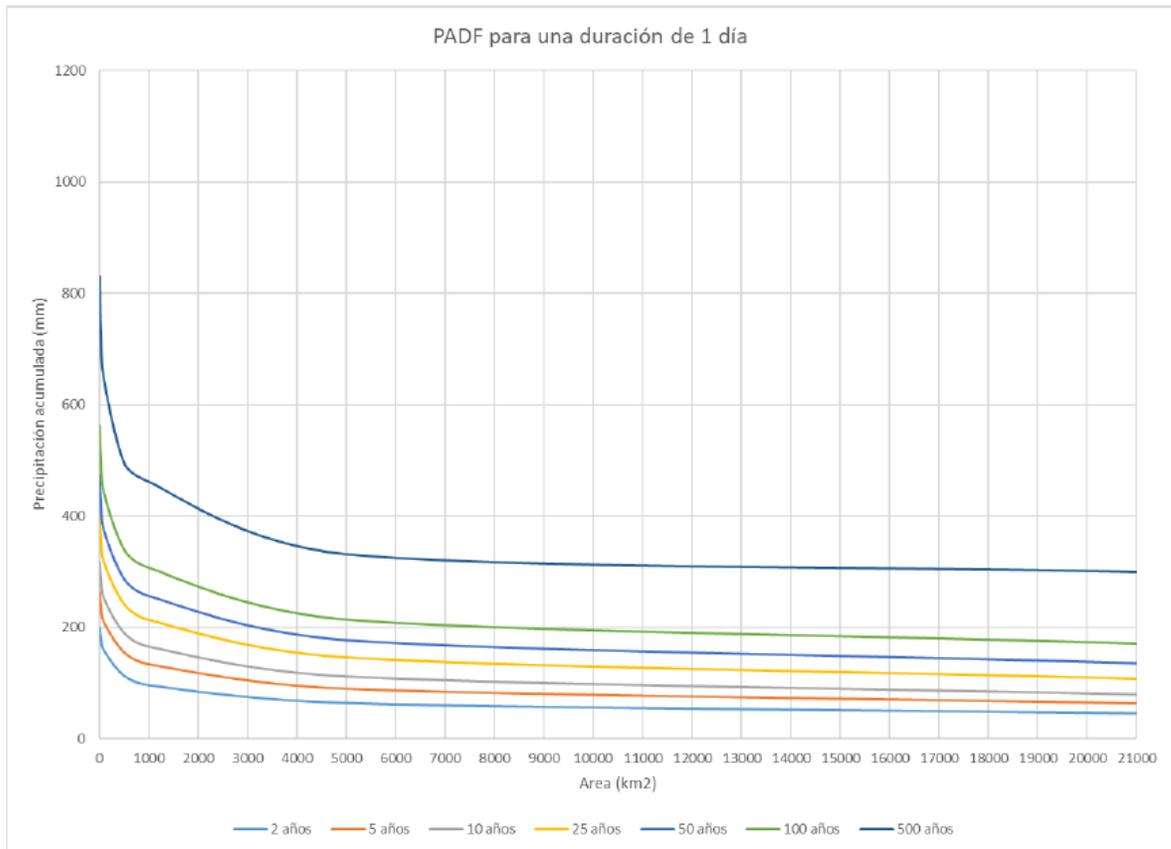


Figura 7. Curva PADF para 1 d de duración

4.2.3. MALLAS DE PRECIPITACIÓN MÁXIMA

Por último, se elaboraron las mallas de precipitación máxima para las distintas duraciones, tanto de tamaño país para los eventos estadísticos descritos; como las asociadas a determinados eventos estocásticos generados variando el foco y la forma de un evento elíptico con diferentes centros.

En base al análisis realizado se evaluó la ubicación de los focos más interesantes, tal y como se representa en la siguiente figura:

Distribución espacial de los centroides de los eventos de precipitación máximos anuales

- Duración 1 día
- Duración 2 días
- Duración 5 días

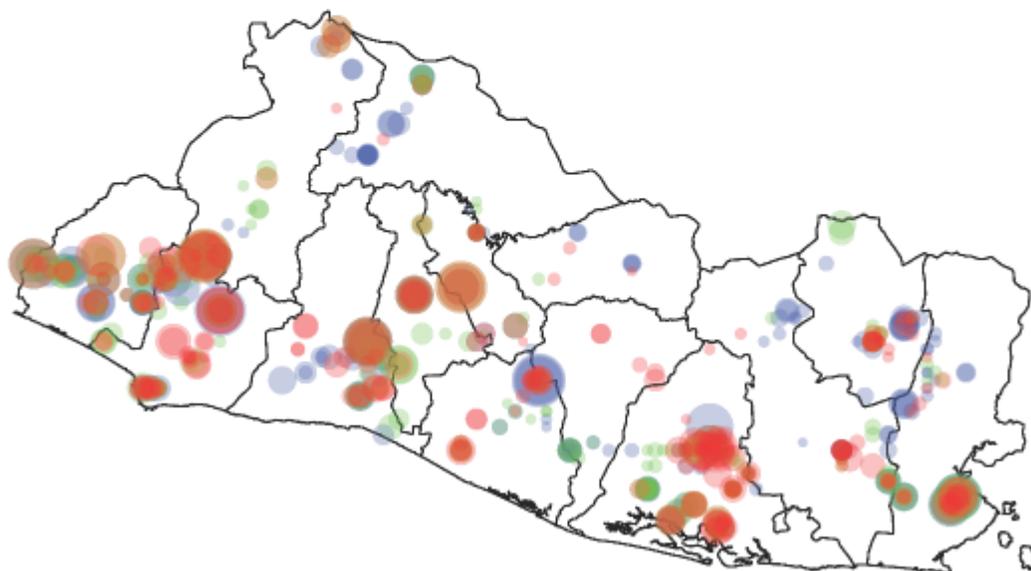


Figura 8. Distribución espacial de los focos de precipitaciones máximas registradas

Los resultados representan a escala país, tanto los raster suavizados de máximos acumulados en una determinada duración asociados a un período de retorno, como las isolíneas de precipitación correspondiente.

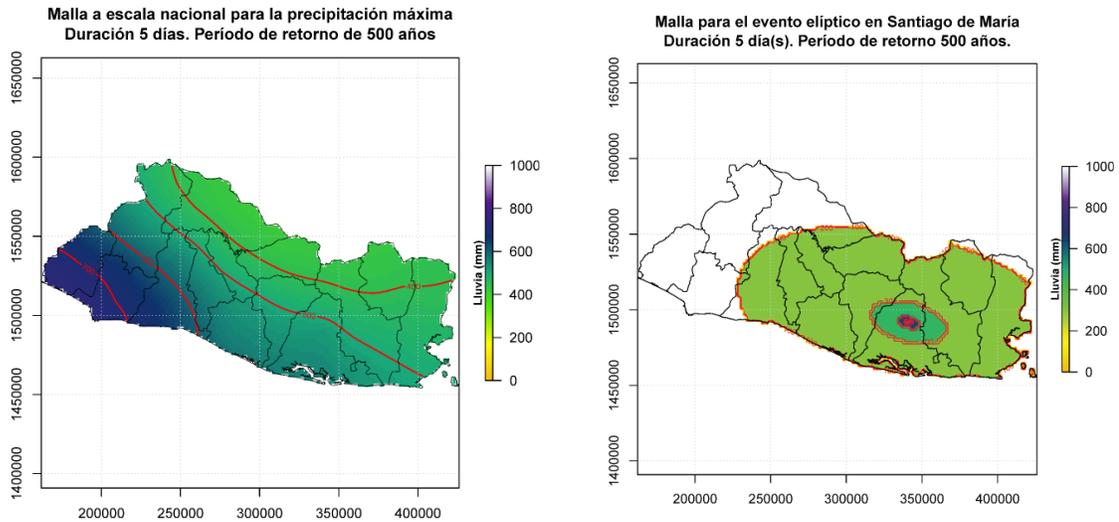


Figura 9. Ejemplo de mallas de precipitación: a) Malla país 5 d y T500; b) Malla evento con foco en Santiago de María; 5 d y T500

4.3. TERCER INFORME DE AVANCE

El tercer informe de avance incluía la modelación del escurrimiento superficial, incluyendo el cálculo de los caudales y los mapas de inundación correspondientes a 18 de los eventos expuestos en el “Segundo Informe de Avance” de la presente consultoría, para toda la superficie del país. Estos 18 eventos se corresponden con: 6 eventos históricos, 12 mallas de país correspondientes a eventos estadísticos de duración 1, 2 y 5 días para períodos de retorno de 2, 25, 50 y 100 años.

Para el cálculo de caudales se empleó el método racional modificado expuesto en la publicación del profesor D. José Ramón Témez en el número 82 de la serie *Ingeniería Civil del Centro de Estudios Experimentales del Ministerio de Fomento de España*. Para lo cual se extrajeron las variables necesarias mediante la utilización de las herramientas contenidas en la extensión de ArcGis “ArcHydroTools”.

Así pues, se calcularon las áreas de las cuencas para cada punto en el que se pretendía conocer el caudal, así como el tiempo de concentración de dicha cuenca, y de los rasters calculados en anteriores informes de avance se extrajo la precipitación para cada una de ellas.

A partir de dichos datos se obtuvieron resultados como los mostrados a continuación.

Name	Pend	Lc	Jc	Tc	li/ld	Fint	Ka	ld	P0	Pd	I	C	A	Q
CS_01	12,488	36,350	0,125	6,836	10	2,911	0,866	8,889	24,474	246,387	25,878	0,630	102,917	465,769
CS_01_B	12,788	35,271	0,128	6,651	10	2,968	0,866	8,890	24,397	246,387	26,386	0,631	102,504	473,812
CS_03	13,135	33,723	0,131	6,395	10	3,051	0,892	9,297	27,325	250,124	28,364	0,608	41,652	199,512
GS-01	12,696	47,854	0,127	8,398	10	2,514	0,844	8,916	32,657	253,467	22,415	0,533	216,932	719,396
GS_10	9,259	52,094	0,093	9,511	10	2,297	0,840	5,067	20,710	144,789	11,639	0,494	252,414	403,227
GS_06	9,027	53,070	0,090	9,693	10	2,266	0,825	5,995	23,602	174,381	13,582	0,507	420,408	804,652
GS_07	7,966	38,508	0,080	7,779	10	2,656	0,852	8,318	27,974	234,368	22,091	0,562	167,427	577,613
GS_07_B	9,031	28,004	0,090	5,962	10	3,204	0,854	8,257	27,689	232,127	26,456	0,563	156,349	647,121
GS_08	10,449	26,529	0,104	5,566	10	3,361	0,870	7,900	27,175	217,946	26,550	0,554	89,282	365,059
GS_09	19,423	26,468	0,194	4,939	10	3,648	0,879	9,676	26,766	264,170	35,303	0,628	65,110	401,008
MC_01	16,472	24,665	0,165	4,830	10	3,704	0,891	8,235	23,709	221,778	30,507	0,615	42,882	223,431
MC_01_B	17,633	19,656	0,176	4,012	10	4,199	0,895	8,141	23,883	218,337	34,180	0,609	37,777	218,283
MC_02	14,875	26,926	0,149	5,264	10	3,493	0,891	9,132	26,578	246,009	31,894	0,611	43,304	234,508
MC_02_B	16,225	23,540	0,162	4,675	10	3,787	0,893	9,199	27,226	247,309	34,841	0,606	40,654	238,299
MC_03	16,844	31,063	0,168	5,731	10	3,293	0,875	9,440	29,723	258,861	31,090	0,585	74,463	376,045

Tabla 3. Ejemplo de caudales calculados (15 puntos del evento ct_d1r1)

Para la aplicación de dicho método también fue necesaria la elaboración de una cartografía de los distintos “Números de Curva”, en toda la superficie del país, con el objetivo de conocer el Coeficiente de esorrentía a aplicar a cada una de las cuencas calculadas. Esta cartografía se elaboró a partir de los insumos proporcionados por el MARN (mapa de usos del suelo de 2011, mapa pedológico del país, y DEM de 5x5), y como resultado se obtuvo el siguiente mapa que fue empleado posteriormente en los cálculos de los caudales:

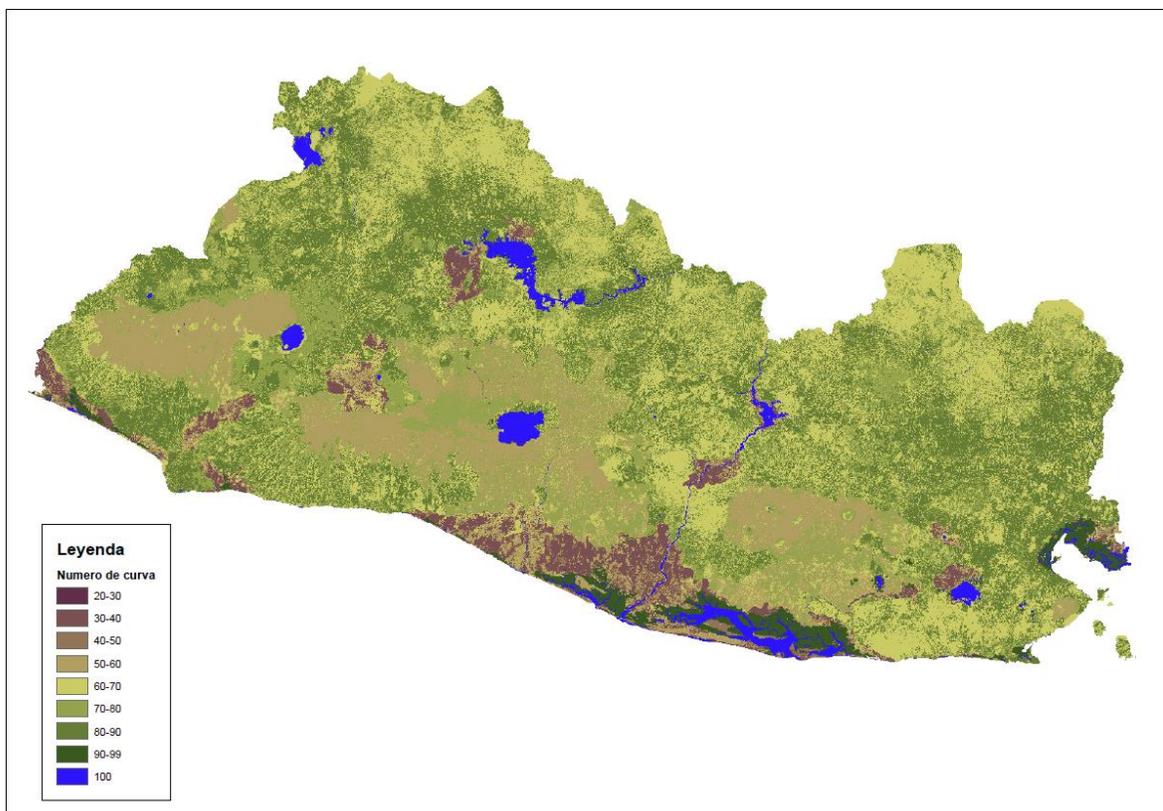


Figura 10. Numero de Curva

Finalmente, para la modelación de la escorrentía superficial y la obtención de los mapas de inundación se empleó un método gráfico, por lo que fue necesario convertir los diferentes caudales calculados para cada uno de los eventos en alturas de lámina de agua en cada uno de los puntos empleados. Para ello se calcularon las curvas de gasto en los puntos en los que no se contaba con ellas mediante el software hidráulico unidimensional Hec-RAS (USACE, 2016) y un DEM de 2x2 en el ámbito de los cauces definidos, completado con un DEM 5x5 en el ámbito más próximo.

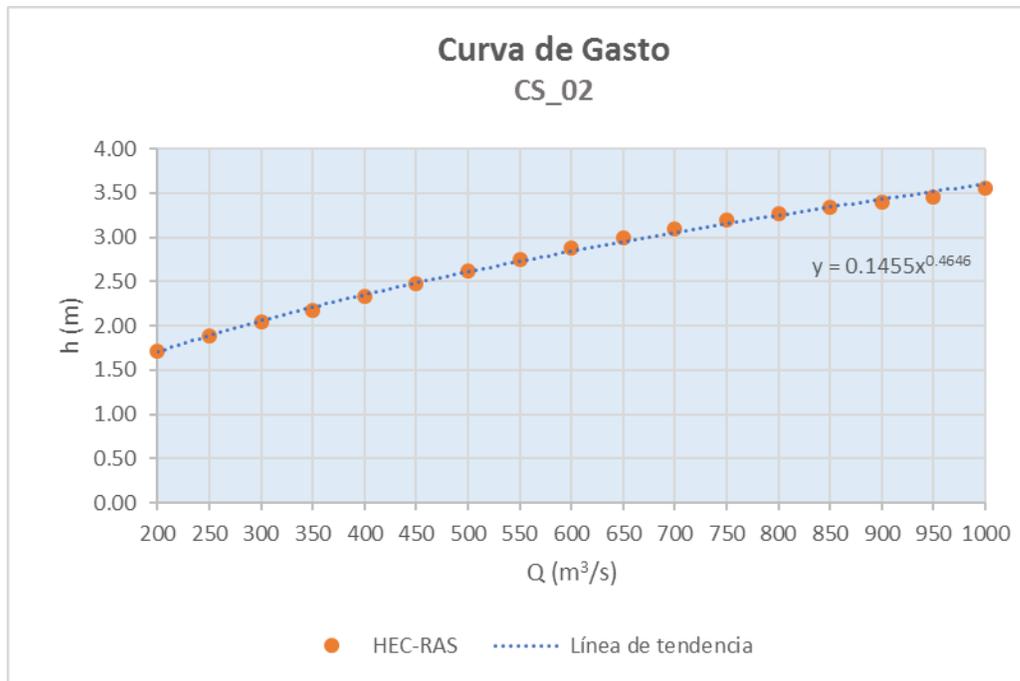


Figura 11. Ejemplo de curva de gasto obtenida en el punto CS_02

Tras la obtención de alturas de lámina de agua en todos los puntos, se empleó un método gráfico mediante las herramientas incluidas en “ArcHydroTools” para estimar una superficie de inundación, así como sus respectivas profundidades a lo largo de toda la red de drenaje definida.

Al tratarse de un método gráfico, este presenta una serie de limitaciones, y su precisión se ve muy afectada por el número de puntos empleados. A mayor densidad de puntos, más fieles son los resultados a la realidad ya que el método interpola alturas entre dos puntos y eso puede producir superficies de inundación inexistentes en puntos en los que se produzcan cambios de pendiente bruscos.

De igual manera, al tratarse de un método gráfico no tiene en cuenta los principios esenciales de la hidráulica como la conservación de la cantidad de movimiento, la ecuación de continuidad o el volumen total de la tormenta, de tal forma que, si un punto del terreno se encuentra más bajo que la superficie de inundación interpolada, este dibujará una mancha de inundación en dicho punto, y en todos los que tengan una cota menor más allá de este – sin importar el volumen total de agua .

Para limitar la incidencia de ambos inconvenientes, se ha densificado la red de puntos en la medida de lo posible, y se ha limitado la extensión del cálculo de la superficie de inundación, impidiendo

que el método genere superficies de inundación más allá de unos límites establecidos a partir de la orografía del terreno.

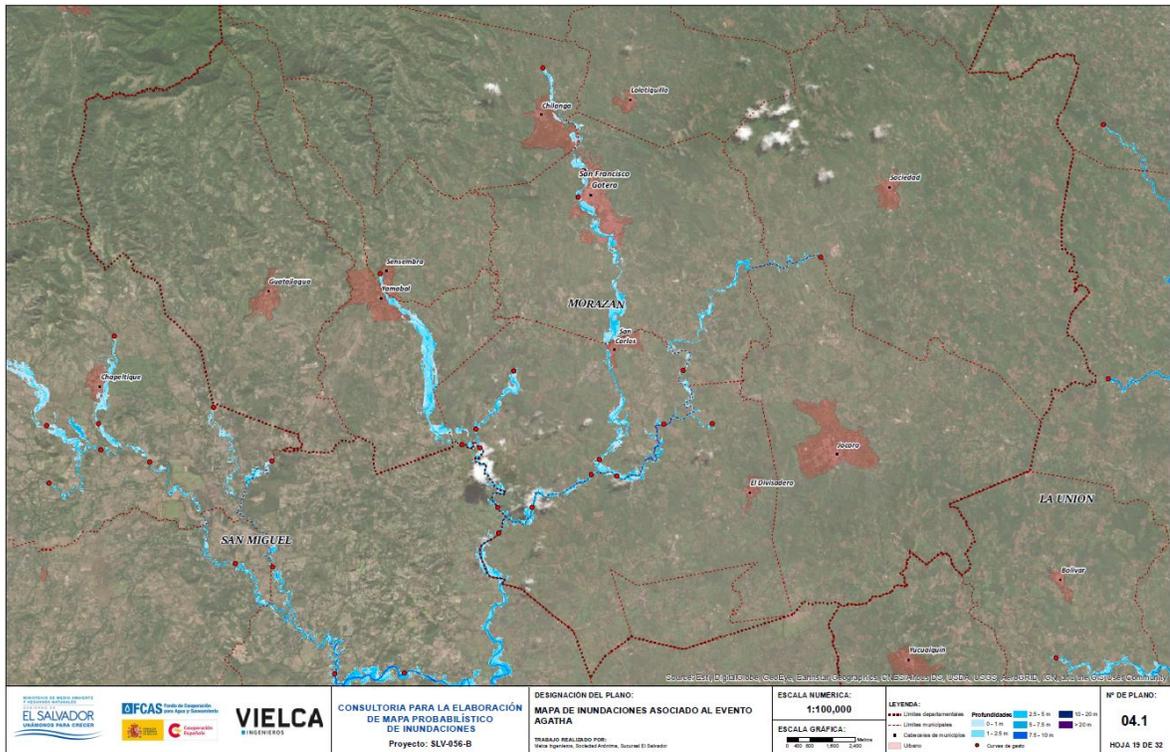


Figura 12. Mapa de inundación, evento Agatha, hoja 19

Cabe destacar que para el cálculo final de la superficie de inundación, ha sido necesario completar la información de curvas de gasto facilitada por el MARN en algunos puntos, ya que las existentes presentaban unos rangos definidos y los caudales que se obtuvieron a partir de los eventos simulados hacían que las alturas quedaran fuera de los valores esperables, resultando por tanto anómalos para esos puntos, representados por superficies de inundación que no se ajustaban suficientemente a la realidad.

La subsanación de dichos valores forma parte del proceso de calibración de resultados y queda limitada a aquéllos puntos en los que se cuenta con información correspondiente a eventos históricos destacados.

Cabe destacar que los modelos son representaciones gráficas de los niveles alcanzados por el agua, interpolados a partir de determinados puntos en los que son conocidas y/o calculadas las curvas de gasto, con lo que entre sus limitaciones está la no consideración de las infraestructuras hidráulicas

– e.g. obras de drenaje transversal, bóvedas, puentes, regulación en embalses, etc. –, el almacenaje por propagación de caudales del propio cauce, la existencia de muros y obstáculos, entre otros.

5. DESCRIPCIÓN DE MODELOS UTILIZADOS

5.1. CONSISTENCIA DE LOS DATOS DE PRECIPITACIÓN

Para cada una de las estaciones pluviométricas proporcionadas se realizó un análisis inicial para regularizar la información de entrada en base a las siguientes fases:

- Definición del periodo de validez de los datos de cada estación pluviométrica: aquel periodo en el que existen datos con una regularidad suficiente para ser incluida en el análisis.
- Análisis de validez: se realizó un análisis para detectar datos erróneos (por ejemplo, valores negativos o fuera del rango) y fueron limpiados en su caso.

Una vez regularizados los datos de las diferentes estaciones pluviométricas se realizó un análisis con múltiples periodos de registro, adaptados a los datos disponibles en cada una de ellas.

5.2. CATÁLOGO DE INUNDACIONES

Se ha generado un catálogo de inundaciones tomado como referencia las siguientes fuentes de información:

- Servicio Nacional de Estudios Territoriales (SNET). A través de información web, se han obtenido los datos del histórico de las inundaciones sucedidas en el país, su localización y las mediciones de precipitación registradas por las estaciones meteorológicas.
- Desinventar. Base de datos web sobre desastres naturales sucedidos en varios países del mundo, entre los que se encuentra El Salvador. De esta fuente de información se ha recopilado los registros de inundaciones históricas del país.
- Protección Civil. Se ha recopilado información sobre los efectos de las inundaciones y las acciones llevadas a cabo por Protección Civil durante los periodos invernales de los años 2015 a 2017.

- DT12E. Información sobre el evento Depresión Tropical 12E recopilada por Protección Civil y que fue registrada por distintos organismos (MOP, VMVDU...).

A partir de estas fuentes de datos, se ha normalizado la información recopilada haciendo una selección de los campos comunes entre los distintos orígenes, los campos de interés no comunes de cada base de datos y se ha incorporado algún campo nuevo que en opinión de Vielca Ingenieros podría aportar calidad en la información sobre los eventos de la inundación.

La información se ha tratado en 3 tablas relacionales – i.e. INUNDACION, INUNDACION_LOCALIZACION e INUNDACION_MEDIDA, con la siguiente información en cada una de ellas:

Tabla “INUNDACION”

Campo	Descripción
id_inundacion	Id general de la inundación registrada.
bbdd_origen_informacion	Origen de donde proviene la información (SNET, DESINVENTAR, PROTECCIÓN CIVIL o DT12E).
fecha	Fecha inicial de la inundación. Este campo se ha normalizado entre las distintas bases de dato y es de formato fecha (aaaa-mm-dd)* ¹ .
num_dias	Número de días que dura la inundación.
tipo_fuente	Organismo o medio que reporta la información de la inundación que se registra en la BD (gubernamental/alcaldía/prensa/periódico digital/ONG).
fuentes	Documento/plataforma/web que registra la información.
causa	Evento principal que provoca la inundación: lluvias/depresión tropical/tormenta/rotura conducción/sismo/...
observaciones_causa	Observaciones sobre el evento que provoca la inundación.
efectos_danos	Descripción breve de los daños.
observaciones_efectos	Descripción de los daños y efectos producidos por la inundación.
infraestructura_dañada	Descripción de la infraestructura que ha sido dañada, en caso de que exista.
danos_edificacion	<u>Campo de Si/No. Si ha producido daños en edificios/viviendas, tanto públicos como privados.</u>
danos_cultivos	Campo de Si/No. Si ha producido daños en cultivos o en ganado.
competencia	Competencia de las resoluciones a los problemas causados por la inundación.
num_victimas_mortales	Valor numérico con el número de víctimas mortales.
num_heridos	Número de heridos registrados.

Campo	Descripción
medicion	Cuantificación de los elementos dañados (m de carretera, m ² de superficie, m ³ de deslizamiento, ...)
intervencion_propuesta	Propuesta de acciones para resolver los problemas causados por la inundación.
intervencion_realizada	Intervención realizada para la resolución de los problemas causados por la inundación.
equipo_inspeccion	Equipo u organismo que lleva a cabo la intervención.
informacion_adicional	Cualquier dato extra que se quiera añadir respecto a la inundación y que no haya sido registrado usando alguno de los campos definidos anteriormente.
bbdd_origen_id	Identificador único en la base de datos de origen de la información.

TABLA “INUNDACION LOCALIZACION”

Campo	Descripción
id_inundacion	Id general de la inundación registrada.
latitud	Latitud del punto de referencia de localización de la inundación.
longitud	Longitud del punto de referencia de localización de la inundación.
region_hidrografica	Región hidrográfica donde tiene lugar la inundación.
departamento	Departamento donde se ha registrado la inundación.
municipio	Municipio donde se ha registrado la inundación.
canton	Cantón donde se ha registrado la inundación.
observaciones_localizacion	Información precisa sobre localización exacta de la inundación.

TABLA “INUNDACION MEDIDA”

Campo	Descripción
id_inundacion	Id general de la inundación registrada.
fecha	Día en el que se registra la medida.
cod_estacion	Código de la estación hidrometeorológica.
nom_estacion	Nombre de la estación hidrometeorológica.
precip_diaria	Precipitación diaria recogida por la estación hidrometeorológica.

5.3. CATÁLOGO DE TORMENTAS

5.3.1. ANÁLISIS DE LA CONSISTENCIA DE LOS DATOS MEDIANTE ANÁLISIS DE DOBLE MASA

Se construye una curva de doble masa para cada estación tomando como referencia – y representando en consecuencia en el eje de abscisas – los valores de precipitación media diaria acumulada de las estaciones principales en el período comprendido entre el 1 de enero de 1970 y el 31 de diciembre de 2017.

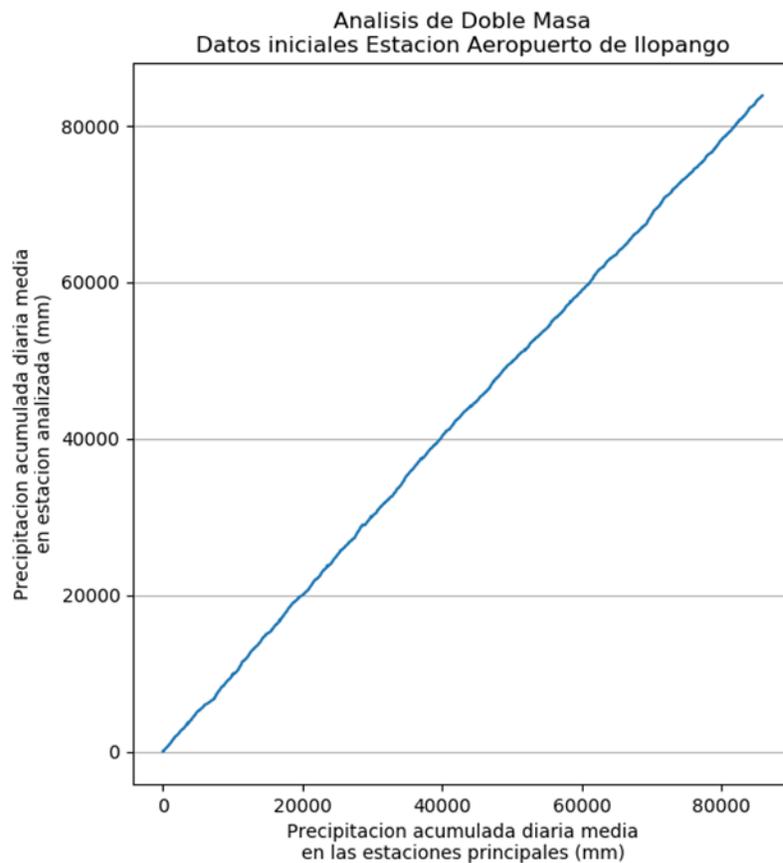


Figura 13. Ejemplo de curva de doble masa para el Aeropuerto de Ilopango

Del análisis de estas curvas se identifican problemas en las series tales como:

- Producción de lluvia no registrada en la estación de referencia: en este caso el gráfico presentará un tramo con pendiente horizontal.
- Errores de medición en la estación de referencia: identificados por variaciones en la pendiente media.

5.3.2. INTERPOLACIÓN ESPACIAL

Descartados los registros anómalos se ha procedido a la interpolación espacial mediante el algoritmo *Inverse Distance Weighted* (IDW) en donde la influencia de un valor puntual disminuye espacialmente conforme aumenta la distancia al mismo.

El resultado es una malla ráster que estima la distribución espacial de la lluvia en el territorio nacional a partir de los datos puntuales registrados (y validados – i.e. no descartados) en las estaciones pluviométricas.

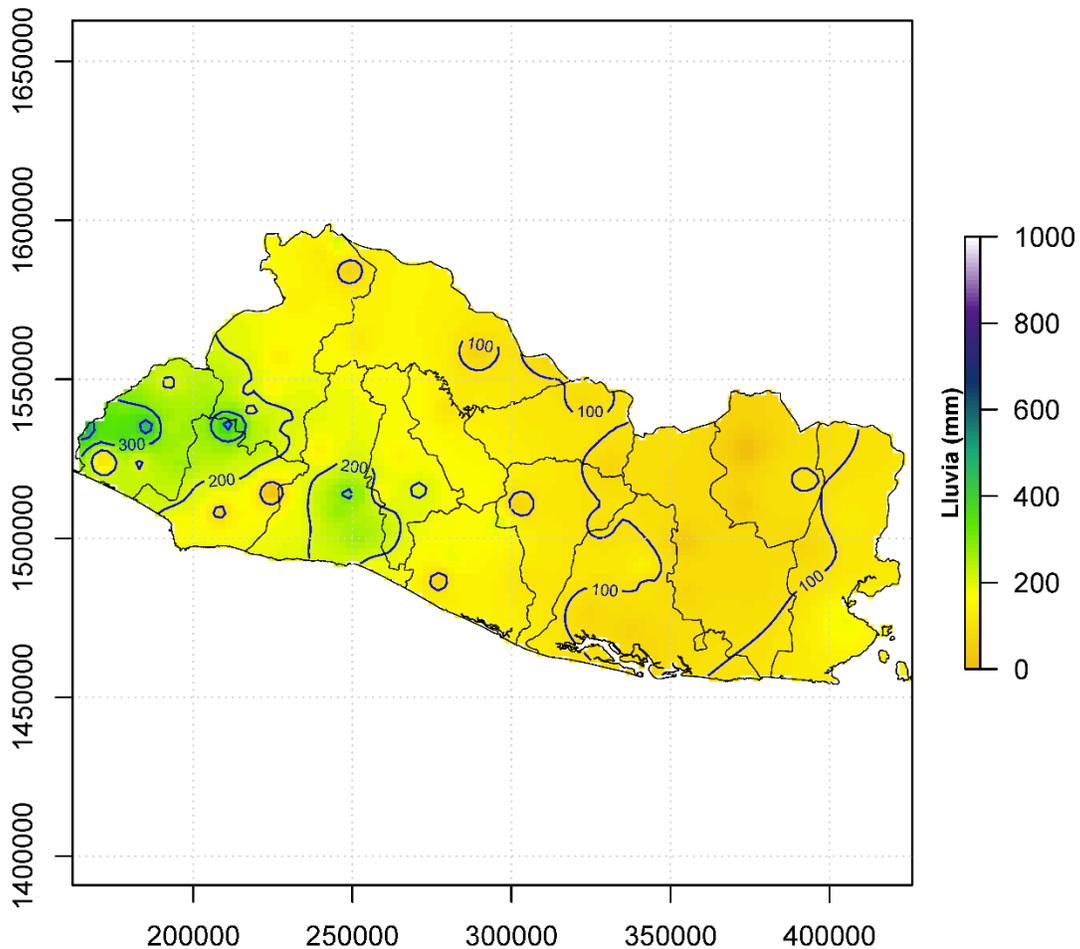


Figura 14. Ejemplo de interpolación para la precipitación máxima diaria del 30 de mayo de 2010

5.3.3. SELECCIÓN DE EVENTOS Y CATÁLOGO DE TORMENTAS IMPORTANTES

La selección de eventos se ha realizado a partir de integrar y acumular los resultados de los mapas ráster de precipitación (obtenidos a partir de la interpolación IDW de los registros puntuales) para duraciones de 1 día, 2 días y 5 días.

Estos registros constituyen 365 valores distintos para cada uno de los años del periodo y permiten – ordenando la serie de mayor a menor – determinar el ranking de las 10 fechas con valores más elevados para cada duración de tormenta.

Fecha	1D	Short date	Rank	Fecha	2D	Short date	Rank	Fecha	5D	Short date	Rank
5/30/2010	371055.7	May-10	1	9/20/1974	514240.8	Sep-74	1	10/12/2011	975067.5	Oct-11	1
9/19/1982	324522.6	Sep-82	2	10/16/2011	499232.5	Oct-11	2	10/13/2011	970304.9		
9/20/1974	312887.3	Sep-74	3	9/19/1982	492892.7	Sep-82	3	10/15/2011	919137.2		
10/16/2011	276190.4	Oct-11	4	10/15/2011	481887.3			10/14/2011	897581.5		
11/1/1998	232340.5	Nov-98	5	5/29/2010	478866.1	May-10	4	10/16/2011	808480.8		
5/20/2005	232233.6	May-05	6	5/30/2010	476965			5/27/2010	801575.2	May-10	2
10/12/2011	227804.6			9/18/1982	443018.9			5/26/2010	767686.9		
10/17/2011	223042			10/12/2011	410306.8			10/11/2011	759346.2		
5/31/2002	216879	May-02	7	10/31/1998	401345.5	Oct-98	5	5/28/2010	710192.2		
7/29/1996	214309.2	Jul-96	8	9/19/1974	345543.1			9/16/1982	687701.9	Sep-82	3
10/15/2011	205696.8			10/17/2011	332820.9			9/17/1982	664563.6		
6/13/1976	203699.6	Jun-76	9	9/15/1988	306152.9	Sep-88	6	9/18/1982	648976.2		
9/21/1974	201353.5			11/1/1998	301712.9			10/10/2011	607676.4		
11/8/2009	192421.5	Nov-09	10	10/4/2005	292580.7	Oct-05	7	9/17/1974	596062.1	Sep-74	4
9/16/1988	186724.8			10/14/2011	288570.2			5/29/2010	588803.8		
6/21/1988	184290.5			10/11/2011	288273.8			9/18/1974	588705.5		
10/13/2011	182502.2			9/26/2010	284208.8	Sep-10	8	9/26/2010	585247.7	Sep-10	5
10/31/1998	169005			11/7/2009	281093.9	Nov-09	9	9/19/1974	572502.3		
9/20/1982	168370			6/12/1976	280772	Jun-76	10	10/2/2005	556584.9	Oct-05	6
10/5/2005	167186.4			10/21/2007	280563.8			9/20/1974	556514.1		
10/24/1988	163362.4			5/19/2005	278936.2			10/9/2011	556090.8		
6/27/2010	161921.8			8/27/1988	277805.9			9/15/1982	555373		
3/10/2005	156730.5			7/28/1996	274004.6			9/19/1982	553621.1		
9/27/2010	152421.3			5/30/2002	265864			10/31/1998	548443.4	Oct-98	7
11/2/1985	151813.2			10/13/2011	265375.6			10/30/1998	540579		
8/28/1988	151305.4			10/17/2015	260997.1			10/17/2011	533878.1		
9/16/1989	148648.6			7/29/1996	260020.6			10/3/2005	530738.9		
12/10/2011	146396.8			10/3/2005	257665.3			9/25/2010	522482.7		
9/18/1993	146017			5/31/2002	252312			10/29/1998	515381.6		
5/20/1996	141834.6			9/18/1993	251386.2			10/1/2005	496838.9	Oct-05	
10/22/2007	141467.6			10/5/2005	250720.8			5/30/2010	492470.7		
5/5/1981	140450.6			6/20/1988	250253.3			9/24/2010	476292.2		
10/21/2007	139096.2			5/20/2005	249508.3			5/25/2010	471192.1		
10/17/2015	137726.9			9/16/1989	242853.7			10/28/1998	468914.3		
5/10/2005	136650.3			9/15/1989	241606			9/27/2010	468437.8		
10/3/2005	132271			9/27/2010	237647.9			8/24/1988	466226	Aug-88	8
9/26/2010	131787.5			8/30/1973	233785.8			5/27/2002	454733.7		
9/27/1999	131488.3			5/28/2010	231293.9			10/15/2015	451612.4	Oct-15	9
6/13/1993	131464.4			10/18/2015	231287.7			8/25/1988	445034.3		
9/29/1992	129726.6			11/8/2009	227358			10/16/2015	443921.4		
5/31/1977	127133.8			9/27/1999	222885.7			8/27/1973	443038.1	Aug-73	10

Tabla 4. Ranking de tormentas más importantes para 1 d, 2 d y 5 d de duración

5.4. CONSTRUCCIÓN DE CURVAS PRECIPITACIÓN-ÁREA-DURACIÓN-FRECUENCIA (PADF)

5.4.1. PRECIPITACIÓN AREAL MÁXIMA PARA LAS DISTINTAS DURACIONES DE EVENTO

Se ha desarrollado un algoritmo que trabaja los mapas de precipitación interpolada mediante IDW para las distintas duraciones – i.e. 1 d, 2 d y 5 d – a partir de los registros puntuales corregidos de las estaciones pluviométricas; y que realiza las siguientes rutinas:

- Generación de superficies circulares concéntricas de distintas áreas – i.e. 10, 25, 100, 500, 1,000, 5,000 y 21,041 Km².
- Obtención del ráster de precipitación diario de la serie completa – i.e. 1 de enero de 1970 hasta el 31 de diciembre de 2017 – y de su acumulado para 2 y 5 días.
- Análisis focal para todas las celdas del ráster en el que se integra el valor de precipitación areal para los distintos círculos generados a lo largo de todo el país.
- Selección del valor máximo de precipitación areal para cada día, cada duración y cada una de las superficies generadas, obteniendo el foco que produce dicho valor.

5.4.2. ANÁLISIS DE EXTREMOS DE LAS PRECIPITACIONES

A partir de los focos con valores máximos diarios (en realidad: 1 d, 2 d y 5 d) de precipitación areal se realiza un análisis de extremos para obtener la probabilidad de ocurrencia de cada evento.

Para dicho análisis se emplearon las funciones *Generalized Extreme Value* (GEV) y Gumbel para obtener el periodo de retorno del evento de precipitación asociado a cada una de las distintas duraciones y áreas descritas.

En este caso se contó con ayuda del *software* referido en Gilleland y Katz (2016).

5.4.3. CONSTRUCCIÓN DE LAS CURVAS PADF

El resultado ordenado del análisis del apartado anterior permite la construcción de las curvas PADF para El Salvador.

5.5. GENERACIÓN DE MALLAS DE PRECIPITACIÓN MÁXIMA

5.5.1. MALLA PAÍS

Se elaboran para cada una de las duraciones de eventos consideradas mediante un ajuste de extremos, empleando en este caso la función de distribución de probabilidad GEV por obtener valores más conservadores que la función Gumbel para altos períodos de retorno.

Obtenido un ajuste para cada una de las estaciones, se ha realizado una interpolación de valores para generar una malla de resultados a nivel país.

5.5.2. MALLA EVENTO

Las mallas evento se han construido a partir de las curvas PADF, desarrollando eventos elípticos de precipitación máxima diaria de manera estocástica a partir de parámetros morfológicos.

Dado que las curvas PADF se han generado para áreas circulares concéntricas, se debe determinar la morfología de la elipse de manera que cumpla de manera sucesiva entre elipses la relación existente entre la intensidad de precipitación de cada área y las áreas menores que engloba.

Los otros factores que se definen en el proceso estocástico es la localización y orientación de las elipses.

En base al proceso de trabajo realizado se plantea la generación de mallas con 4 centroides distintos en:

- La zona sudoeste, específicamente centrado cerca del Volcán de Santa Ana (y el municipio de Los Naranjos).
- Los alrededores de San Salvador.
- Los alrededores de Santiago de María.
- La zona sudeste, específicamente centrados en el municipio de La Unión.

5.6. MODELACIÓN DEL ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL

5.6.1. CÁLCULO DE CAUDALES

Para el cálculo de caudales se ha empleado el método racional modificado expuesto en Témiz-Peláez (1991).

El método racional modificado en cuencas naturales tiene un amplio campo de aplicación que alcanza hasta superficies de 3.000 km². Esto se cumple sin excepción para el cálculo del mapa probabilístico de inundaciones empleando los 544 puntos propuestos en este producto.

Siguiendo el método racional, el caudal máximo anual Q_T , correspondiente a un periodo de retorno T , se calcula mediante la fórmula:

$$Q_T = \frac{I(T, t_c) \cdot C \cdot A \cdot K_t}{3,6}$$

Donde:

- Q_T (m³/s): Caudal máximo anual correspondiente al periodo de retorno T , en el punto de desagüe de la cuenca.
- $I(T, t_c)$ (mm/h): Intensidad de precipitación correspondiente al periodo de retorno considerado T , para una duración del aguacero igual al tiempo de concentración t_c , de la cuenca.
- C (adimensional): Coeficiente medio de esorrentía de la cuenca o superficie considerada.
- A (km²): Área de la cuenca o superficie considerada.
- K_t (adimensional): Coeficiente de uniformidad en la distribución temporal de la precipitación:

$$K_t = 1 + \frac{t_c^{1,25}}{t_c^{1,25} + 14}, \text{ donde: } t_c \text{ (horas) Tiempo de concentración de la cuenca.}$$

5.6.1.1. INTENSIDAD DE PRECIPITACIÓN

La intensidad de precipitación $I(T, t)$ correspondiente a un periodo de retorno T se obtiene por medio de la siguiente fórmula:

$$I(T, t) = I_d \cdot F_{int}$$

Donde:

- $I(T, t)$ (mm/h): Intensidad de precipitación correspondiente a un periodo e retorno T y a una duración del aguacero t .
- I_d (mm/h): Intensidad media diaria de precipitación corregida correspondiente al periodo de retorno T
- F_{int} (adimensional): Factor de intensidad.

La intensidad de precipitación para calcular el caudal máximo anual para un periodo de retorno T , en el punto de desagüe de la cuenca, será la correspondiente a una duración del aguacero igual al tiempo de concentración ($t=t_c$) de dicha cuenca.

5.6.1.2. INTENSIDAD MEDIA DIARIA DE PRECIPITACIÓN CORREGIDA

Intensidad media diaria de precipitación corregida correspondiente al periodo de retorno T , se obtiene mediante la fórmula:

$$I_d = \frac{P_d \cdot K_A}{24}$$

Donde:

- P_d (mm): Precipitación diaria correspondiente al periodo de retorno T .
- K_A (adimensional): Factor de reducción de la precipitación por área de la cuenca:

$$\text{Si } A < 1\text{km}^2 \quad K_A = 1$$

$$\text{Si } A \geq 1\text{km}^2 \quad K_A = 1 - \frac{\log_{10} A}{15}$$

Donde: A (km^2) Área de la cuenca

El valor de precipitación diaria P_d (mm) para cada uno de los eventos se ha extraído de los rasters calculados anteriormente y asignado a cada uno de los puntos siguiendo la metodología explicada más adelante.

5.6.1.3. FACTOR DE INTENSIDAD FINT

El factor de intensidad empleado ha sido el obtenido mediante la siguiente ecuación:

Se toma el mayor valor de los obtenidos de entre los que se indican a continuación:

$$F_a = \left(\frac{I_1}{I_d}\right)^{3,5287-2,5287 \cdot t^{0,1}}$$

Donde:

(I_1/I_d) (adimensional) Índice de torrencialidad que expresa la relación entre la intensidad de precipitación horaria y la media diaria corregida. Su valor se determina en función de la zona geográfica.

Siendo en el caso que nos ocupa el **índice de torrencialidad $(I_1/I_d) = 10$** .

- t (horas) es la duración del aguacero. Para la obtención del factor F_a se debe particularizar la expresión para un tiempo de duración del aguacero igual al tiempo de concentración de la cuenca ($t = t_c$).

5.6.1.4. TIEMPO DE CONCENTRACIÓN

En el caso de cuencas en las que predomina el tiempo de recorrido del flujo canalizado por una red de cauces definidos, el tiempo de concentración t_c , en horas, se puede deducir de la siguiente fórmula:

$$t_c = 0,3 \cdot L_c^{0,76} \cdot J_c^{-0,19}$$

Donde:

- t_c (horas): Tiempo de concentración
- L_c (km): Longitud del cauce
- J_c (adimensional): Pendiente media del cauce

5.6.1.5. COEFICIENTE DE ESCORRENTÍA

La proporción de agua precipitada que escurre se conoce como coeficiente de escorrentía y depende del relieve de la cuenca y de la naturaleza y uso de su superficie. Por lo tanto, el caudal que circula es una cierta proporción de la precipitación total que supera el umbral de escorrentía.

El coeficiente C de escorrentía define la proporción de la componente superficial de la precipitación de intensidad I, y se obtiene mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Si } P_d \cdot K_A > P_o \quad C = \frac{\left(\frac{P_d \cdot K_A}{P_o} - 1\right) \left(\frac{P_d \cdot K_A}{P_o} + 23\right)}{\left(\frac{P_d \cdot K_A}{P_o} + 11\right)^2}$$

$$\text{Si } P_d \cdot K_A \leq P_o \quad C = 0$$

Donde:

- C (adimensional): Coeficiente de escorrentía
- P_d (mm): Precipitación diaria correspondiente al periodo de retorno T considerado
- K_A (adimensional): Factor reductor de la precipitación por área de la cuenca
- P_o (mm): Umbral de escorrentía

5.6.1.6. UMBRAL DE ESCORRENTÍA

El umbral de escorrentía P_o representa la precipitación mínima que debe caer sobre la cuenca para que se inicie la generación de escorrentía.

El valor inicial del umbral de escorrentía se ha obtenido para cada cuenca, determinando los grupos hidrológicos de suelo presentes en la cuenca según el tipo de suelo.

Grupo	Infiltración (cuando están muy húmedos)	Potencia	Textura	Drenaje
A	Rápida	Grande	Arenosa Areno-limosa	Perfecto
B	Moderada	Media a grande	Franco-arenosa Franca Franco-arcillosa-arenosa Franco-limosa	Bueno a moderado
C	Lenta	Media a pequeña	Franco-arcillosa Franco-arcillo-limosa Arcillo-arenosa	Imperfecto
D	Muy lenta	Pequeño (litosuelo) u horizontes de arcilla	Arcillosa	Pobre o muy pobre

Nota: Los terrenos con nivel freático alto se incluirán en el Grupo D.

Tabla 5. Clasificación de suelos

Una vez determinado el grupo hidrológico de suelo, se han diferenciado los diferentes tipos y usos del suelo existente, además de la pendiente del terreno en cada punto, atribuyendo a cada una el valor correspondiente de umbral de escorrentía inicial.

Para la zona estudiada se ha realizado la intersección de su contorno con la cartografía de usos de suelo definidos en el “Mapa de cobertura y usos del suelo de 2011” del MARN y definido su correspondencia con los usos definidos en la tabla.

5.6.2. MAPAS DE INUNDACIÓN

Para la generación de los mapas de inundaciones, teniendo en cuenta los datos disponibles, se ha optado por emplear el modelo “Stream WSE from Point Measurements” para estimar las alturas de agua en los cauces y se ha adaptado una metodología basada en el modelo “Flood fom Stream WSE” para dibujar la llanura de inundación. Ambos están confeccionados a partir de herramientas de *ArcHydroTools*, y permiten estimar la superficie de inundación a partir del modelo digital de elevación y datos de elevación de la lámina de agua de los cauces.

Para definir las llanuras de inundación mediante *ArcHydroTools*, es necesario contar con los datos de altura de la lámina de agua en el cauce. Para ello se han empleado los datos de caudales calculados según el apartado anterior para cada uno de los puntos para los cuales se cuenta con una curva de gasto.

A partir de dichas curvas de gasto, con los caudales calculados, se obtiene una altura de la lámina de agua en cada uno de los puntos.

Dichas curvas de gasto se han calculado a partir del MDE extraído de los datos del LiDAR, con lo que ya contienen el flujo base de los cauces existentes, por tanto, las alturas calculadas ya tienen en cuenta dicho flujo.

5.6.2.1. CURVAS DE GASTO

A parte de los 24 puntos definidos por el MARN con curvas de gasto, Vielca Ingenieros S.A. ha incluido 520 puntos de estudio más donde se han obtenido las curvas de gasto con la finalidad de obtener un mapa probabilístico de inundaciones de mayor precisión.

En cada uno de los 520 puntos definidos por Vielca Ingenieros en el modelo hidrológico – i.e. tramos seleccionados estratégicamente en los cauces basados en los puntos del MARN – se han planteado diferentes modelos de simulación hidráulica que permitan conocer el comportamiento de estos para distintos caudales.

En cuanto a los puntos donde el MARN ha facilitado las curvas de gasto (estaciones de medición de alturas del cauce en función del caudal), algunas de ellas no se han incluido para la realización de los mapas probabilísticos de inundaciones debido a que el grado de detalle con el que se ha calculado la hidrología del país (tamaño mínimo de cuencas hidrográficas y red de drenaje) no alcanza la suficiente precisión para que la red hidrográfica represente cauces en algunas de las estaciones como Hachadura y Jobo en río Paz o Pasaquina. Por lo tanto, como no había un cauce representado en dichas estaciones, no se han empleado.

Hec-RAS (USACE, 2016) es un modelo de simulación hidráulica unidimensional (y bidimensional en sus últimas versiones) para una red natural (o artificial) de cursos de agua que ha sido empleado para determinar la relación existente entre el caudal circulante por el río y el tirante hidráulico que alcanza el agua en cada una de las secciones.

El procedimiento de trabajo que se ha seguido es el siguiente:

- Definición de los datos geométricos del problema:
 - Construcción de un tramo de río.
 - Definición de secciones transversales.
- Entrada de datos de flujo estacionario.
- Definición de condiciones de contorno.
- Análisis del flujo estacionario.
- Consulta y evaluación de resultados

La geometría de los cauces ha sido trabajada previamente con ayuda del complemento *Q-RAS* del *software* QGIS, y una vez en Hec-RAS, se han definido 17 perfiles distintos de caudal variado entre 200 y 1000 m³/s.

5.6.2.2. SUPERFICIE DE INUNDACIÓN.

Como ya se ha mencionado anteriormente, para la generación de las superficies de inundación, teniendo en cuenta los datos disponibles, se ha optado por adatar los modelos “Stream WSE from Point Measurements” y “Flood fom Stream WSE”, confeccionados a partir de herramientas de

de drenaje calculadas y se les suma la elevación de dichos puntos, consiguiendo así la elevación total de la lámina de agua cada 250 metros a lo largo de los cauces. Dichos valores se extrapolan a toda el área de estudio y se intersectan con el DEM sin modificar, estableciendo como zonas inundadas aquellas en las que las elevaciones interpoladas tienen un valor superior al del DEM y calculando la profundidad como la diferencia entre ambas.

Como se ha indicado anteriormente, este es un método gráfico, y por lo tanto no tiene en cuanto la conservación de masa, y se ve afectado por los cambios bruscos de pendiente en el terreno.

Para realizar una calibración aproximada del modelo se emplean los datos de profundidades de inundación aproximadas en algunos puntos durante eventos históricos que también se han simulado y se comparan con las obtenidas mediante el proceso descrito, ajustando en algunos puntos las curvas de gasto empleadas.

6. MANUAL PARA LA REPLICACIÓN DE LOS ANÁLISIS REALIZADOS

6.1. CATÁLOGO DE TORMENTAS IMPORTANTES

6.1.1. ANÁLISIS DE LA CONSISTENCIA DE LOS DATOS: ANÁLISIS DE DOBLE MASA

Para analizar la consistencia de los datos de las estaciones pluviométricas se realiza en primer lugar un **diagrama de doble masa** para cada una de las estaciones meteorológicas. La metodología de trabajo es la siguiente:

- A partir de los datos diarios existentes en las estaciones principales (que presentan una mayor consistencia temporal de datos como se demostró en el Primer Informe de Avance) se obtiene la precipitación media diaria acumulada desde el 1 de enero de 1970 al 31 de diciembre de 2017. Esta precipitación media diaria acumulada se emplea de referencia comparativa en el análisis de doble masa, grafiándose en el eje de las abscisas.

- A continuación, se tomarán los datos diarios de cada una de las estaciones pluviométricas y se computará la precipitación diaria acumulada. Estos datos serán los que se compararán con la precipitación media de referencia y se graficarán en el eje de las ordenadas.

Se considera que la precipitación de la estación a comparar es consistente cuando el gráfico se ajusta a una línea con una pendiente más o menos constante.

Como ejemplo se presenta el ajuste de doble masa para la estación del Aeropuerto de Ilopango, en el que se observa perfectamente la consistencia de los datos.

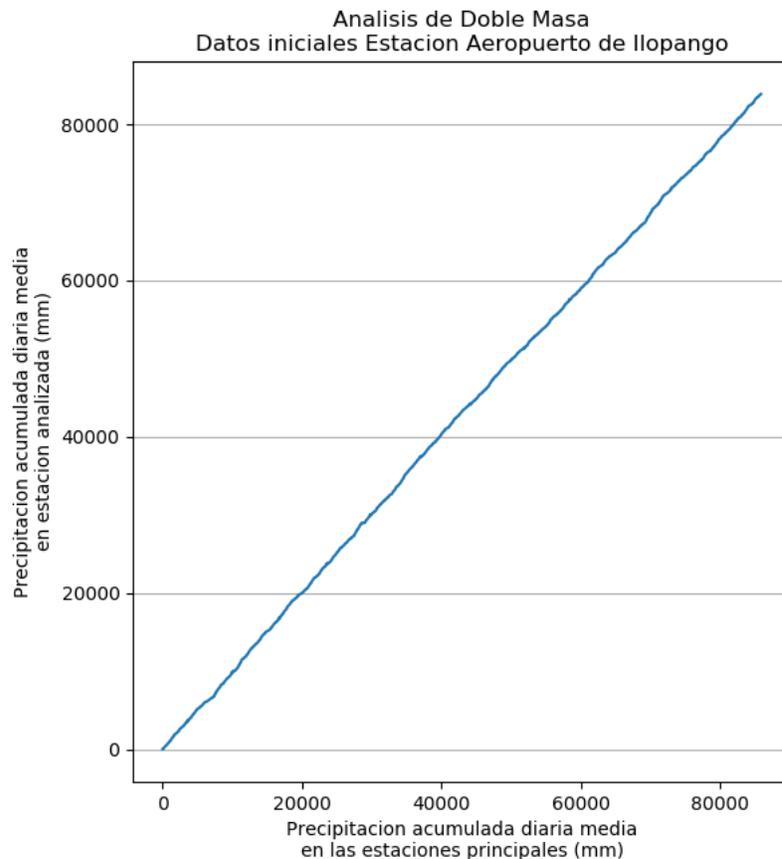


Figura 16. Diagramas de doble masa para la estación del Aeropuerto de Ilopango

Análisis de resultados de los diagramas de doble masa:

- Cuando el gráfico se desvíe de una pendiente aproximadamente constante puede ser debido a que ha habido lluvia y no se ha registrado en la estación (en este caso

la pendiente será horizontal), o porque ha habido cualquier error de medición (en este caso la pendiente será o muy superior o muy inferior a la pendiente media).

Eliminación de los datos dudosos. Para ello se emplea un algoritmo de búsqueda en el que para cada una de las estaciones se seleccionan los elementos diarios de dudosa fiabilidad, para posteriormente eliminarlos. El algoritmo sigue el siguiente procedimiento:

- Para cada estación se obtiene todo el rango de pendientes existentes entre la estación analizada y la estación de referencia. Estas pendientes se obtienen a partir de la ratio existente entre la precipitación acumulada en los últimos 10 días en la estación analizada sobre la precipitación acumulada en los últimos 10 días en la estación de referencia. Se obtiene esta ratio para cada uno de los días de la serie de registro. Al realizar este cálculo para cada uno de los días obtenemos una variable que podemos analizar estadísticamente – i.e. el rango de pendientes.
- Se consideran datos dudosos a los datos diarios cuya pendiente (utilizando los últimos 10 días) está por debajo del 25 percentil o por encima del 95 percentil del rango de pendientes.

Los datos por debajo del 25 percentil se consideran dudosos porque hay muchos tramos semi-horizontales que corresponden a días en los que ha habido lluvia, pero no se ha registrado en la estación, mientras que los datos por encima del 95 percentil se eliminan porque se consideran demasiado elevados para ser creíbles.

- Todos los datos dudosos son eliminados de la serie de datos de la estación, trabajando únicamente con los datos de los cuales no se tiene duda de su fiabilidad.

Index	avgvalue	station	rollingavg	rolling2	ind	valid	final
1973-06-02	5271.08	1828.1	73.8007	43.4	1.0694	1	1828.1
1973-06-03	5275.72	1828.1	74.8833	45.4	1.64941	1	1828.1
1973-06-04	5285.11	1828.1	75.4611	45.4	1.66214	1	1828.1
1973-06-05	5294.14	1858.1	74.2111	75.4	0.984232	1	1858.1
1973-06-06	5306.43	1878.6	85.6833	95.9	0.893465	1	1878.6
1973-06-07	5316.59	1879.2	91.8667	56.1	1.63755	1	1879.2
1973-06-08	5319.41	1879.2	77.5833	52.9	1.4666	1	1879.2
1973-06-09	5323.94	1889.7	65.5722	61.6	1.06448	1	1889.7
1973-06-10	5334	1889.7	63.05	61.6	1.02354	1	1889.7
1973-06-11	5342.55	1919.9	70.8722	91.8	0.772029	1	1919.9
1973-06-12	5384.36	1919.9	112.683	91.8	1.22749	1	1919.9
1973-06-13	5394.79	1919.9	119.072	91.8	1.29708	1	1919.9
1973-06-14	5411.4	1919.9	126.283	91.8	1.37564	1	1919.9
1973-06-15	5429.51	1919.9	135.367	61.8	2.1904	nan	nan
1973-06-16	5448.94	1919.9	142.517	41.3	3.45077	nan	nan
1973-06-17	5465.6	1919.9	149.011	40.7	3.66121	nan	nan
1973-06-18	5468.8	1939.9	149.389	60.7	2.4611	nan	nan
1973-06-19	5482	1960.2	158.061	70.5	2.242	nan	nan
1973-06-20	5494.61	1980.6	160.617	90.9	1.76696	1	1980.6
1973-06-21	5522.19	2030.8	179.644	110.9	1.61988	1	2030.8
1973-06-22	5538.22	2030.8	153.861	110.9	1.38739	1	2030.8
1973-06-23	5546.83	2030.8	152.033	110.9	1.3709	1	2030.8

Tabla 6. Análisis estadístico¹ de los resultados del diagrama de doble masa

¹ El análisis se ha realizado para cada una de las estaciones en la que se incluye la precipitación acumulada promedio de las estaciones principales (avgvalue), la precipitación acumulada de la estación de estudio (station), la media móvil de los últimos 10 días de la pendiente resultante del promedio de precipitación acumulada las estaciones principales (rollingavg), la media móvil de los últimos 10 días de la pendiente resultante de la precipitación acumulada en la estación de referencia (rolling2), el ratio entre estas dos medias móviles (ind), el indicador de si el ratio está entre los percentiles 25 y 95 (valid), y el valor final corregido (final). Obsérvese que el valor final corregido es nan cuando el indicador valid es nan (como por ejemplo entre el 15 de junio de 1973 y el 19 de junio de 1973)

En los casos en que en el análisis de doble masa se observa claramente que los datos son consistentes – como en el ejemplo de la estación del Aeropuerto de Illopango – no se realiza corrección alguna.

A continuación, se refiere la casuística de correcciones realizadas con los datos de la consultoría de referencia, puesto que son representativas de las distintas tipologías que pueden aparecer:

- Estaciones en las que mayormente los datos son consistentes, pero en los que temporalmente la estación se ha encontrado fuera de servicio, aunque se registraron valores de 0 por temporadas. Este caso se identificó con los datos de la estación principal La Unión CORSAIN.
- Estaciones en los que los datos se descartan en su totalidad por la poca fiabilidad de los datos. Ver como ejemplo lo sucedido con la estación Cantón El Carpintero – Poloros.
- Estaciones que se han descartado datos que parecen no consistentes con las precipitaciones medias acumuladas en las estaciones principales. Ver como ejemplo lo sucedido con la estación Aeropuerto El Salvador.

Como se puede observar en los gráficos originales de los problemas referidos como ejemplo (en la izquierda de las imágenes siguientes), cuando no hay datos se observa una discontinuidad en la curva, mientras que cuando la curva es continua significa que existen datos para todos los días mientras se mantenga la continuidad.

En la parte de la derecha se muestran los datos corregidos, en donde se han eliminado los datos que se consideran dudosos. Las correcciones se denotan en las discontinuidades existentes en la parte derecha de los gráficos siguientes que en la parte de la derecha eran continuos.

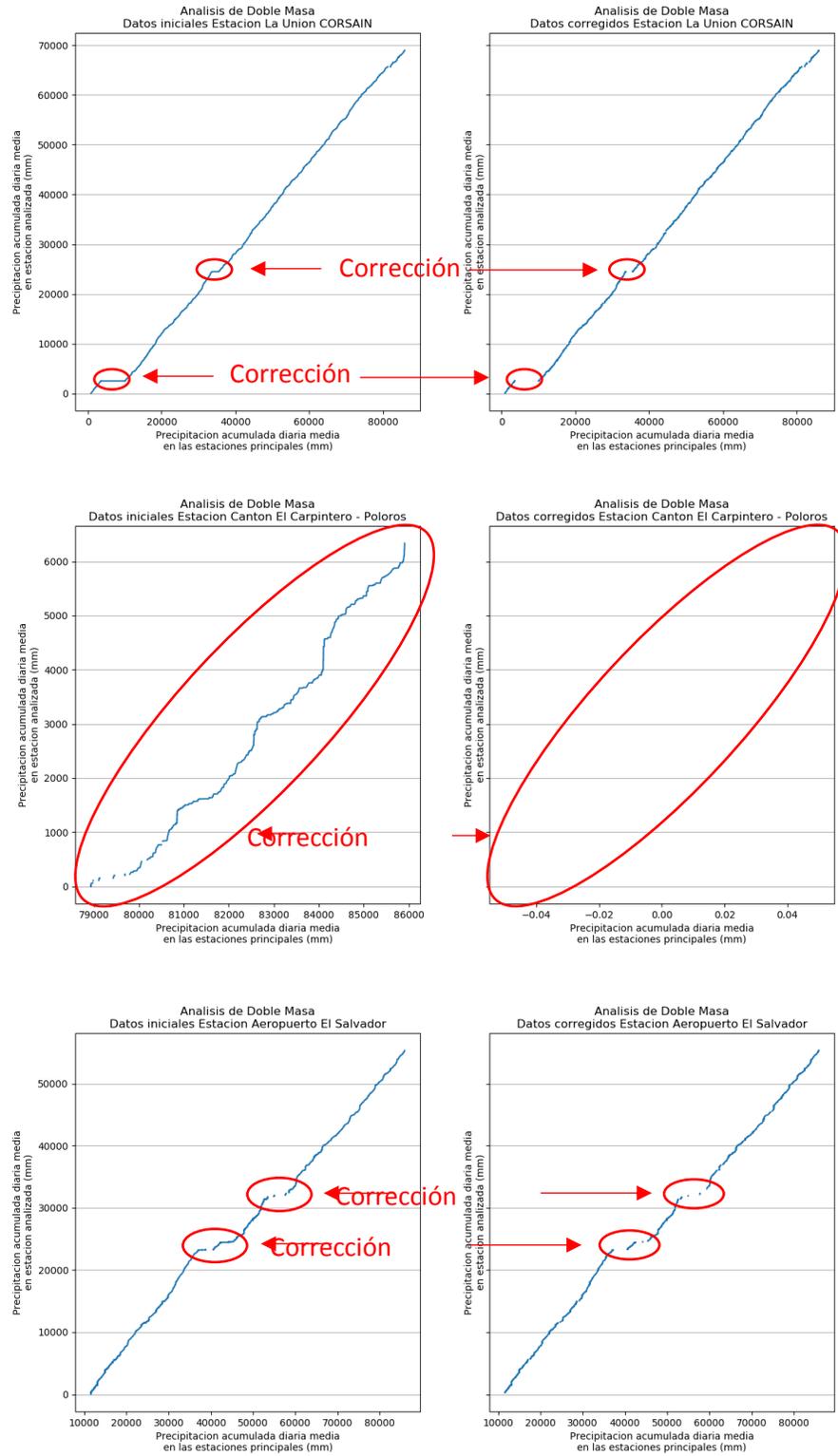


Figura 17. Ejemplos de correcciones realizadas a partir de los análisis de doble masa

6.1.2. INTERPOLACIÓN ESPACIAL

Una vez llevado a cabo la limpieza y corrección de los datos de precipitación, se realiza una interpolación espacial – mediante Distancia Inversa Ponderada (o *Inverse Distance Weighted*, conocido por sus siglas IDW) – con los datos válidos de las estaciones existentes a lo largo de todo el periodo de estudio – e.g. en el caso de la consultoría de referencia, desde el 1 de enero de 1970 hasta el 31 de diciembre de 2017.

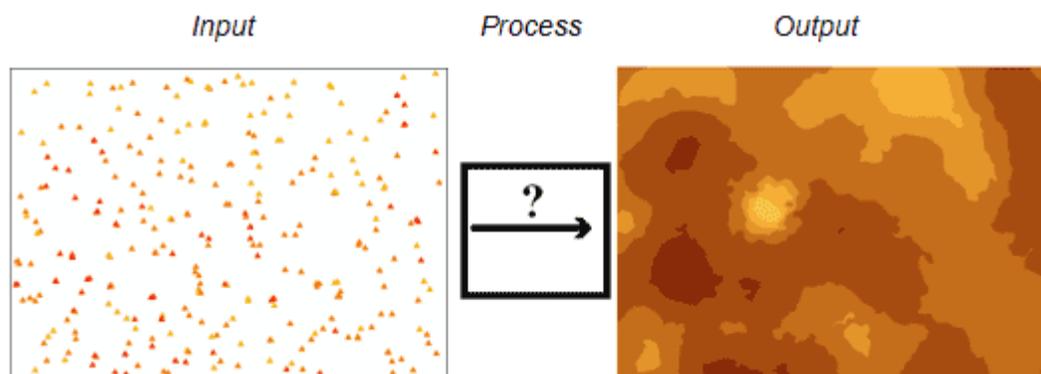


Figura 18. Ejemplo del proceso de interpolación espacial seguido a partir de los datos diarios obtenidos

Nótese que con este proceso se consigue “rellenar” no sólo los datos no consistentes en las estaciones pluviométricas que se eliminaron con el análisis de doble masa, sino también en el resto de puntos del territorio de referencia.

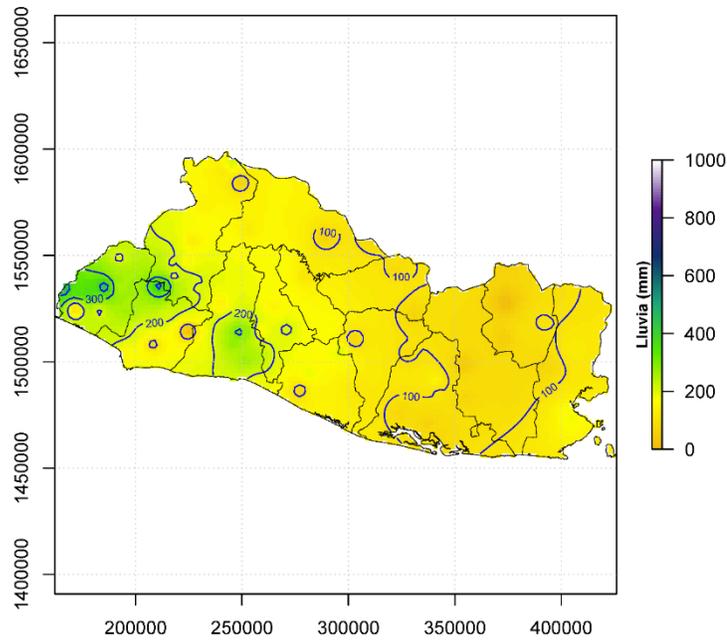


Figura 19. Como ejemplo se muestra la interpolación obtenida en la consultoría para el 30 de mayo de 2010

6.1.3. SELECCIÓN DE EVENTOS

Suma de la precipitación interpolada diaria en todo el ámbito para cada uno de los días de registro, para obtener las siguientes series de distinta duración temporal:

- La serie de 24 horas de duración: directamente la obtenida a partir de la suma de la precipitación interpolada diaria para cada uno de los días de registro.
- La serie de 48 horas posteriores al de la fecha de registro (eventos de 2 días de duración): obtenida a partir de la suma de dos días consecutivos de la precipitación interpolada diaria para cada uno de los días de registro (exceptuando el 31 de diciembre de 2017 en el caso de referencia).
- La serie de 5 días de duración (o 120 horas posteriores al de la fecha de registro): obtenida a partir de la suma de cinco días consecutivos de la precipitación interpolada diaria para cada uno de los días de registro (exceptuando los días 28,29,30 y 31 de diciembre de 2017 en el caso de referencia).

Obtención de los máximos anuales: uno para cada año para las series de 1 y 2 días, y más de 1 por año para la serie de 5 días si los eventos se encuentran en meses distintos.

Fecha	1D	2D	5D
1/1/1970	0	0	0
1/2/1970	0	0	0
1/3/1970	0	0	0
1/4/1970	0	0	0
1/5/1970	0	0	0
1/6/1970	0	0	0
1/7/1970	0	0	0
1/8/1970	0	0	0
1/9/1970	0	0	0
1/10/1970	0	0	0
1/11/1970	0	0	0
1/12/1970	0	0	0
1/13/1970	0	0	0
1/14/1970	0	0	0
1/15/1970	0	0	0
1/16/1970	0	0	0
1/17/1970	0	0	0
1/18/1970	0	0	0
1/19/1970	0	0	0
1/20/1970	0	0	16218.11
1/21/1970	0	0	16218.11
1/22/1970	0	0	16218.11
1/23/1970	0	16218.11	20369.47
1/24/1970	16218.11	16218.11	20369.47
1/25/1970	0	0	4151.353
1/26/1970	0	4151.353	6798.6
1/27/1970	4151.353	4151.353	6798.6
1/28/1970	0	0	2647.247
1/29/1970	0	2647.247	2647.247
1/30/1970	2647.247	2647.247	2647.247
1/31/1970	0	0	0

Tabla 7. Ejemplo del resultado de precipitación acumulada en todo El Salvador para los eventos de 1, 2 y 5 días

Determinación de la **jerarquía de los eventos en función de sus acumulados de precipitación.**

6.1.4. CATÁLOGO DE TORMENTAS IMPORTANTES

Así pues, el catálogo de tormentas importantes lo componen 30 tormentas: 10 de 1 día de duración, 10 de 2 días de duración, y 10 de 5 días de duración.

Estas tormentas, en la consultoría de referencia, son las 10 mayores acaecidas desde 1970 hasta 2017 para cada uno de las duraciones consideradas.

Fecha	ID	Short date	Rank	Fecha	2D	Short date	Rank	Fecha	5D	Short date	Rank
5/30/2010	371055.7	May-10	1	9/20/1974	514240.8	Sep-74	1	10/12/2011	975067.5	Oct-11	1
9/19/1982	324522.6	Sep-82	2	10/16/2011	499232.5	Oct-11	2	10/13/2011	970304.9		
9/20/1974	312887.3	Sep-74	3	9/19/1982	492892.7	Sep-82	3	10/15/2011	919137.2		
10/16/2011	276190.4	Oct-11	4	10/15/2011	481887.3			10/14/2011	897581.5		
11/1/1998	232340.5	Nov-98	5	5/29/2010	478866.1	May-10	4	10/16/2011	808480.8		
5/20/2005	232233.6	May-05	6	5/30/2010	476965			5/27/2010	801575.2	May-10	2
10/12/2011	227804.6			9/18/1982	443018.9			5/26/2010	767686.9		
10/17/2011	223042			10/12/2011	410306.8			10/11/2011	759346.2		
5/31/2002	216879	May-02	7	10/31/1998	401345.5	Oct-98	5	5/28/2010	710192.2		
7/29/1996	214309.2	Jul-96	8	9/19/1974	345543.1			9/16/1982	687701.9	Sep-82	3
10/15/2011	205696.8			10/17/2011	332820.9			9/17/1982	664563.6		
6/13/1976	203699.6	Jun-76	9	9/15/1988	306152.9	Sep-88	6	9/18/1982	648976.2		
9/21/1974	201353.5			11/1/1998	301712.9			10/10/2011	607676.4		
11/8/2009	192421.5	Nov-09	10	10/4/2005	292580.7	Oct-05	7	9/17/1974	596062.1	Sep-74	4
9/16/1988	186724.8			10/14/2011	288570.2			5/29/2010	588803.8		
6/21/1988	184290.5			10/11/2011	288273.8			9/18/1974	588705.5		
10/13/2011	182502.2			9/26/2010	284208.8	Sep-10	8	9/26/2010	585247.7	Sep-10	5
10/31/1998	169005			11/7/2009	281093.9	Nov-09	9	9/19/1974	572502.3		
9/20/1982	168370			6/12/1976	280772	Jun-76	10	10/2/2005	556584.9	Oct-05	6
10/5/2005	167186.4			10/21/2007	280563.8			9/20/1974	556514.1		
10/24/1988	163362.4			5/19/2005	278936.2			10/9/2011	556090.8		
6/27/2010	161921.8			8/27/1988	277805.9			9/15/1982	555373		
3/10/2005	156730.5			7/28/1996	274004.6			9/19/1982	553621.1		
9/27/2010	152421.3			5/30/2002	265864			10/31/1998	548443.4	Oct-98	7
11/2/1985	151813.2			10/13/2011	265375.6			10/30/1998	540579		
8/28/1988	151305.4			10/17/2015	260997.1			10/17/2011	533878.1		
9/16/1989	148648.6			7/29/1996	260020.6			10/3/2005	530738.9		
12/10/2011	146396.8			10/3/2005	257665.3			9/25/2010	522482.7		
9/18/1993	146017			5/31/2002	252312			10/29/1998	515381.6		
5/20/1996	141834.6			9/18/1993	251386.2			10/1/2005	496838.9	Oct-05	
10/22/2007	141467.6			10/5/2005	250720.8			5/30/2010	492470.7		
5/5/1981	140450.6			6/20/1988	250253.3			9/24/2010	476292.2		
10/21/2007	139096.2			5/20/2005	249508.3			5/25/2010	471192.1		
10/17/2015	137726.9			9/16/1989	242853.7			10/28/1998	468914.3		
5/10/2005	136650.3			9/15/1989	241606			9/27/2010	468437.8		
10/3/2005	132271			9/27/2010	237647.9			8/24/1988	466226	Aug-88	8
9/26/2010	131787.5			8/30/1973	233785.8			5/27/2002	454733.7		
9/27/1999	131488.3			5/28/2010	231293.9			10/15/2015	451612.4	Oct-15	9
6/13/1993	131464.4			10/18/2015	231287.7			8/25/1988	445034.3		
9/29/1992	129726.6			11/8/2009	227358			10/16/2015	443921.4		
5/31/1977	127133.8			9/27/1999	222885.7			8/27/1973	443038.1	Aug-73	10

Tabla 8. Catálogo de tormentas importantes. Téngase en cuenta que los datos que están incluidos en otras tormentas (por ejemplo, los valores de la tormenta de octubre de 2011 en las tormentas de 5 días) no se han tenido en cuenta

6.2. CURVAS PRECIPITACIÓN-ÁREA-DURACIÓN-FRECUENCIA

6.2.1. PRECIPITACIÓN AREAL MÁXIMA PARA CADA UNA DE LAS DURACIONES DE EVENTOS

Para la obtención de la precipitación areal máxima para cada una de las duraciones de los eventos considerados se parte de nuevo de los datos de interpolación diaria (mapas diarios de precipitación interpolada a partir de los datos de las estaciones pluviométricas con datos consistentes).

Se ha desarrollado un algoritmo que se detalla a continuación:

- En primer lugar, se definen diferentes valores de área: 7 valores diferentes de superficies, desde un mínimo de 10 km² hasta 21,041 km² (este último valor se corresponde con la superficie del territorio de El Salvador). Las áreas de paso son 10, 25, 100, 500, 1,000, 5,000 y 21,041 km². Se obtiene el radio del círculo que corresponde a cada una de estas superficies.
- Para cada una de las duraciones de eventos (1, 2 y 5 días) se obtiene los archivos de precipitación para cada uno de los días de la serie de registro: Se obtiene un archivo *raster* con las precipitaciones acumuladas durante la duración del evento para cada uno de los días en la serie de datos. Para los eventos de un día de duración es simplemente el archivo raster de cada uno de los días en la serie de datos, mientras que para los eventos de duración 2 días se obtiene sumando para cada uno de los días de registro el archivo raster del día posterior, e igualmente para los eventos de 5 días se obtiene sumando para cada uno de los días de registro los 4 archivos raster de los 4 días posteriores.
- En cada uno de estos días (o archivos) se realiza un análisis focal. En este análisis focal se obtiene en primer lugar para cada una de las celdas del raster el valor de precipitación areal para cada uno de los círculos de áreas 10, 25, 100, 500, 1,000, 5,000 y 21,041 km² de las celdas adyacentes. Un análisis focal es una función especial que computa el valor en cada celda a partir de los valores en las celdas adyacentes de acuerdo a una función predefinida, a partir de una ventana móvil. En nuestro caso, el “foco” se define como un círculo de área 10, 25, 100, 500, 1,000, 5,000 y 21,041km², y se obtiene el valor promedio de las celdas adyacentes en cada una de las celdas del nuevo *raster*. Esto nos da un total de 21 nuevos archivos raster, que contienen la precipitación areal en cada celda para cada una de las 7 superficies definidas, y para cada una de las 3 duraciones de eventos.

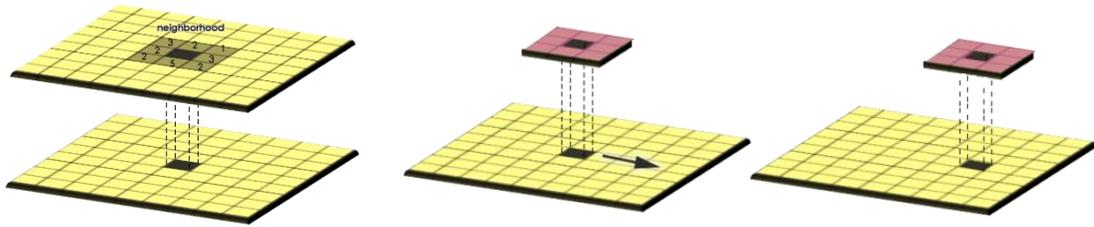


Figura 20. Ejemplo de análisis focal²

- A partir del nuevo archivo *raster* con los valores de precipitación areal, se obtiene el valor máximo para cada uno de los días y se guarda también la posición de este máximo. Evidentemente este paso se realiza para cada una de las duraciones y las superficies definidas. Con ello se consigue obtener el máximo diario de precipitación areal para cada una de las superficies y duraciones de evento.

² La figura de la izquierda se observa el cálculo de una función en las celdas adyacentes o “foco” (capa superior) y se obtiene el valor que se computa en el nuevo raster (capa inferior). En las dos figuras de la derecha se muestra como el foco se mueve a través de una ventana móvil. Fuente: <https://gisgeography.com/map-algebra-global-zonal-focal-local/>

	Max 10 km2	x	y
5/1/1970	6.793823525	191020.3	1543893
5/2/1970	31.90592285	253020.3	1561893
5/3/1970	12.99750221	375020.3	1485893
5/4/1970	1.898576669	341020.3	1491893
5/5/1970	0		
5/6/1970	0		
5/7/1970	0		
5/8/1970	0		
5/9/1970	0		
5/10/1970	0		
5/11/1970	60.56390328	233020.3	1573893
5/12/1970	28.27545012	191020.3	1543893
5/13/1970	67.11775232	271020.3	1515893
5/14/1970	29.67173514	195020.3	1501893
5/15/1970	20.03298797	223020.3	1593893
5/16/1970	61.10969863	383020.3	1513893
5/17/1970	69.11305087	383020.3	1513893
5/18/1970	70.16429247	167020.3	1533893
5/19/1970	0		
5/20/1970	0		
5/21/1970	0		
5/22/1970	0		
5/23/1970	1.49903027	271020.3	1515893
5/24/1970	9.991842428	311020.3	1547893
5/25/1970	9.095969318	341020.3	1491893
5/26/1970	37.86761652	195020.3	1501893
5/27/1970	49.23223447	383020.3	1513893
5/28/1970	44.89771178	225020.3	1547893
5/29/1970	40.36634799	341020.3	1491893
5/30/1970	70.19692374	167020.3	1533893
5/31/1970	17.43734555	239020.3	1527893

Tabla 9. A modo de ejemplo se presenta el valor focal máximo y la localización para las precipitaciones de 1 día de duración y radio 10 km²

- Con estos datos se realiza un análisis de extremos tal como se desarrolla en el siguiente apartado.

6.2.2. ANÁLISIS DE EXTREMOS DE LAS PRECIPITACIONES AREALES MÁXIMAS

A partir de los datos de precipitación areal máxima para cada una de las duraciones de evento y áreas definidas, obtenidas a partir de las precipitaciones interpoladas diarias, se realiza un análisis de extremos para obtener la probabilidad de ocurrencia de los eventos caracterizados.

En primer lugar, se seleccionan los valores máximos anuales para cada una de las superficies y duraciones de eventos. A partir de estos datos se realiza un ajuste utilizando dos de las funciones de distribución de extremos más utilizadas en la literatura: la función de distribución Gumbel, y la función de distribución Generalized Extreme Value (o GEV, por sus siglas en inglés).

El ajuste de ambas funciones de distribución se ha realizado utilizando el paquete extRemes del software R, remitiendo al lector a la siguiente publicación para conocer el funcionamiento y alcance del paquete referido, así como para la descarga (<https://www.jstatsoft.org/article/view/v072i08>).

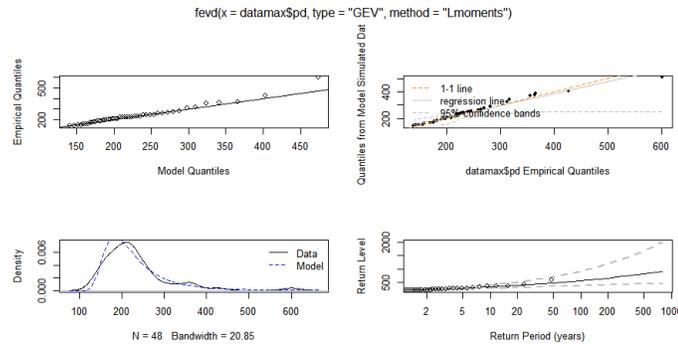


Figura 21³. Diagnósticos del ajuste de la función GEV para los máximos anuales de los eventos de duración 5 días y un área de 500 km²

En las siguientes tablas se presentan los datos de los ajustes de extremos obtenidos en la consultoría de referencia utilizando las funciones de distribución Gumbel y GEV para las diferentes duraciones de evento y áreas consideradas.

³ En la figura superior izquierda se observa el gráfico cuantil observado-cuantil modelado. En la figura superior derecha el ajuste con las bandas representado el 95% de intervalo de confianza. En la figura inferior izquierda la distribución de densidad empírica y modelada. En la imagen inferior derecha se incluye el periodo de retorno modelada para la precipitación observada, incluyendo las bandas del 95% del intervalo de confianza.

Generalized Extreme Value

Duración (días)	Area (km ²)	Período de retorno						
		2 años	5 años	10 años	25 años	50 años	100 años	500 años
1	10	198.7	262.8	316.1	398.7	473.5	561.3	831.0
1	25	181.9	240.1	287.7	360.7	425.9	501.7	730.4
1	100	157.0	207.9	249.7	313.9	371.4	438.4	641.2
1	500	112.5	155.0	189.2	241.1	286.8	339.4	495.3
1	1000	95.8	133.7	164.9	213.1	256.4	307.1	461.4
1	5000	63.5	89.4	111.2	145.5	176.9	214.3	331.5
1	21041	44.9	62.5	78.9	107.1	135.2	171.2	299.2
Duración (días)	Area (km ²)	Período de retorno						
		2 años	5 años	10 años	25 años	50 años	100 años	500 años
2	10	252.5	335.6	403.6	507.6	600.4	708.2	1032.9
2	25	232.5	308.3	370.1	464.1	547.7	644.5	934.3
2	100	200.2	266.8	322.5	409.5	488.8	582.4	872.8
2	500	147.6	201.5	246.2	315.2	377.4	450.4	673.6
2	1000	131.1	178.4	218.0	280.0	336.5	403.3	610.9
2	5000	95.1	130.3	159.4	204.2	244.5	291.7	435.3
2	21041	71.7	98.9	123.1	163.2	201.6	249.2	408.7
Duración (días)	Area (km ²)	Período de retorno						
		2 años	5 años	10 años	25 años	50 años	100 años	500 años
5	10	357.3	471.3	556.1	674.9	772.5	878.2	1160.0
5	25	329.2	431.0	505.7	609.2	693.2	783.3	1019.6
5	100	287.5	373.7	437.7	527.3	600.8	680.2	891.8
5	500	217.1	283.4	337.0	418.2	489.9	572.6	817.8
5	1000	194.9	252.8	301.5	378.1	448.2	531.4	791.5
5	5000	148.8	192.0	230.2	293.0	352.9	426.8	672.4
5	21041	122.9	160.3	194.1	251.0	306.5	376.3	616.2

Gumbel

Duración (días)	Area (km ²)	Período de retorno						
		2 años	5 años	10 años	25 años	50 años	100 años	500 años
1	10	207.1	265.0	303.2	351.6	387.5	423.2	505.5
1	25	189.1	241.5	276.2	320.1	352.6	384.9	459.5
1	100	163.3	209.1	239.5	277.8	306.2	334.5	399.7
1	500	117.2	155.3	180.6	212.5	236.1	259.6	313.8
1	1000	100.6	134.4	156.8	185.1	206.1	226.9	275.0
1	5000	67.1	90.2	105.5	124.9	139.2	153.5	186.4
1	21041	48.4	64.5	75.2	88.7	98.7	108.6	131.6
Duración (días)	Area (km ²)	Período de retorno						
		2 años	5 años	10 años	25 años	50 años	100 años	500 años
2	10	207.1	265.0	303.2	351.6	387.5	423.2	505.5
2	25	189.1	241.5	276.2	320.1	352.6	384.9	459.5
2	100	163.3	209.1	239.5	277.8	306.2	334.5	399.7
2	500	117.2	155.3	180.6	212.5	236.1	259.6	313.8
2	1000	100.6	134.4	156.8	185.1	206.1	226.9	275.0
2	5000	67.1	90.2	105.5	124.9	139.2	153.5	186.4
2	21041	48.4	64.5	75.2	88.7	98.7	108.6	131.6
Duración (días)	Area (km ²)	Período de retorno						
		2 años	5 años	10 años	25 años	50 años	100 años	500 años
5	10	365.0	469.4	538.5	625.9	690.7	755.1	903.7
5	25	334.9	428.0	489.6	567.5	625.2	682.6	815.1
5	100	293.1	372.1	424.3	490.4	539.4	588.0	700.5
5	500	224.8	285.3	325.4	376.1	413.6	450.9	537.1
5	1000	203.1	255.5	290.3	334.2	366.7	399.0	473.7
5	5000	156.1	194.9	220.6	253.1	277.2	301.1	356.3
5	21041	129.9	163.6	185.9	214.1	235.0	255.8	303.7

Tabla 10. Resultado del ajuste de extremos de la precipitación máxima areal para diferentes áreas, duraciones de evento, y períodos de retorno según las funciones de distribución GEV y Gumbel

Se puede observar en los datos de los ajustes de la tabla anterior, que los valores de los ajustes a la función de distribución GEV son generalmente mayores (especialmente para altos períodos de retorno) que los ajustes a la función de distribución Gumbel, con lo que se decidió emplear la función GEV en la consultoría por estar en el lado de la seguridad.

6.2.3. CONSTRUCCIÓN DE CURVAS PRECIPITACIÓN-ÁREA-DURACIÓN-FRECUENCIA

A partir de los datos obtenidos en la *Tabla 10. Resultado del ajuste de extremos de la precipitación máxima areal para diferentes áreas, duraciones de evento, y períodos de retorno según las funciones de distribución GEV y Gumbel* de la sección anterior es inmediata la construcción de las curvas de precipitación-área-duración-frecuencia de manera gráfica para El Salvador.

6.3. MALLAS DE PRECIPITACIÓN

6.3.1. MALLAS PAÍS

En este caso se realiza la siguiente secuencia de procesos:

- Ajuste de la función GEV a la serie de máximos anuales de precipitación para cada una de las estaciones.

Estacion	2y	5y	10y	25y	50y	100y	500y	lon	lat	typest
Acajutla Puerto Nuevo	139.4599	265.8133	340.7535	426.5452	484.345	537.224	644.1665	-89.8333	13.57333	Principal
Aeropuerto de Ilopango	104.2683	187.4917	240.5882	305.4751	352.0738	397.0719	496.452	-89.1183	13.69833	Principal
Aeropuerto El Salvador	105.6673	150.559	179.7038	215.8834	242.2659	268.0744	326.2986	-89.055	13.44	Resto
Agua Caliente	94.82705	116.874	131.503	150.0232	163.789	177.4754	209.1876	-89.2282	14.18555	Resto
Ahuachapan	102.57	183.4926	233.5334	292.9969	334.5485	373.7545	457.1247	-89.86	13.94333	Principal
Apopa INSINCA	93.64415	116.4727	133.1425	156.16	174.7688	194.6413	246.4991	-89.1759	13.79256	Resto
Arcatao	98.88592	119.2385	129.4337	139.4863	145.3309	150.054	157.8885	-88.7484	14.09308	Resto
Asunción Mita	77.17527	122.5287	143.3236	162.3037	172.5211	180.2624	191.872	-89.7058	14.33444	Guatemala y Honduras
Ataco, Bfcio. El Molino	108.6835	144.8517	174.1924	218.8034	258.3681	304.0964	440.4859	-89.8397	13.87336	Resto
Beneficio Acahuapa	88.66147	108.151	121.2657	138.0804	150.7332	163.445	193.4116	-88.8272	13.65761	Resto
Beneficio Entre Ríos	121.0706	146.8826	159.9298	172.8967	180.4951	186.6761	197.0361	-88.9383	13.59667	Resto
Bfcio. La Carrera	139.8996	191.468	228.6811	279.5135	320.184	363.2332	473.9163	-88.5016	13.3065	Resto
Bfcio. Montealegre	102.1972	126.3116	148.6945	187.254	225.7687	275.0669	450.3642	-89.6244	13.97514	Resto
Bfcio. San Mauricio	133.0623	168.316	188.02	209.4177	223.1052	235.0912	257.6809	-88.4874	13.43914	Resto
Cacerio El Junquillo	95.40188	121.3139	136.9052	154.9851	167.3203	178.7261	202.1948	-89.8493	13.991	Resto
Candelaria de la Frontera	83.15602	127.2968	146.5271	163.3186	171.9651	178.2779	187.2178	-89.6517	14.12	Principal
Cantón El Nispero	108.7935	141.6315	164.3196	194.1112	217.0539	240.5618	297.8155	-89.9122	13.86847	Resto
Cantón El Tablón (Cerro Ocotepeque)	152.192	211.7373	252.8915	306.9475	348.5888	391.2665	495.252	-88.009	13.73442	Resto
Cara Sucia	156.5956	198.4358	217.5586	234.9644	244.3083	251.3714	261.9259	-90.0345	13.77525	Resto
Cerro Cacahuatique(Fca. Las Nubes)	115.1508	148.2791	171.6472	202.9142	227.4355	252.9529	316.7224	-88.24	13.77078	Resto
Cerron Grande	90.05373	133.8131	153.8468	172.1082	181.9258	189.3561	200.4802	-88.785	13.93833	Principal
Chalchuapa,Bfcio.Tazumal	96.49606	120.109	140.8288	174.7038	206.9006	246.3895	376.7917	-89.6812	13.97706	Resto
Chiltiupan	78.00745	157.7099	216.6226	298.8753	366.0882	438.5229	630.4549	-89.4817	13.595	Principal
Chorrera del Guayabo	95.92209	150.8968	178.5982	206.0539	222.0988	235.1211	256.8693	-88.7567	13.99667	Principal
Ciudad Barrios	113.6837	133.9546	148.9782	170.005	187.2276	205.8255	255.2711	-88.2651	13.76458	Resto
Cojutepeque	84.145	156.523	206.3638	271.6134	321.7166	372.927	497.139	-88.9267	13.72	Principal
Cololaca	88.28768	132.5381	151.5205	167.8755	176.1851	182.1843	190.5352	-88.8819	14.30556	Guatemala y Honduras
Comasagua, Fca.El Rosario	147.8687	198.6128	236.9304	291.4818	336.9036	386.6445	522.0435	-89.3487	13.63539	Resto
Concepción Quezaltepeque	104.7139	136.6892	156.171	179.0162	194.774	209.48	240.1976	-88.9544	14.08919	Resto
Erandique	83.52256	116.8397	132.9571	148.3716	157.0655	163.9146	174.8306	-88.4667	14.23222	Guatemala y Honduras
Esquipulas	80.52575	125.7788	147.6199	168.4662	180.2001	189.4287	204.0981	-89.3419	14.55889	Guatemala y Honduras
Finca El Triunfo	130.3907	170.006	196.7523	231.1478	257.1054	283.249	345.1323	-89.5464	13.68589	Resto
Finca Lorena	120.4643	145.7572	157.0953	167.2431	172.5997	176.5923	182.4298	-89.6359	13.90136	Resto
Finca Los Andes	114.6369	228.9435	317.324	445.9021	555.213	677.0647	1018.855	-89.645	13.875	Principal
Finca Los Cedros	120.1402	151.945	174.3524	204.301	227.7633	252.1566	313.0248	-89.3245	13.68444	Resto
Finca Novi	115.2339	126.2488	131.0361	135.2077	137.3513	138.9137	141.1203	-89.6126	13.91628	Resto

Tabla 11. Resultados del ajuste de extremos obtenido para cada una de las estaciones

- Obtención de los valores para los diferentes períodos de retorno y las duraciones de evento considerados – i.e. 2, 5, 10, 25, 50, 100 y 500 años y duraciones de 1, 2 y 5 días.
- Interpolación espacial de resultados a partir de un *kriging* ordinario (tal como se ha desarrollado anteriormente), obteniendo el mallado para todo el país.

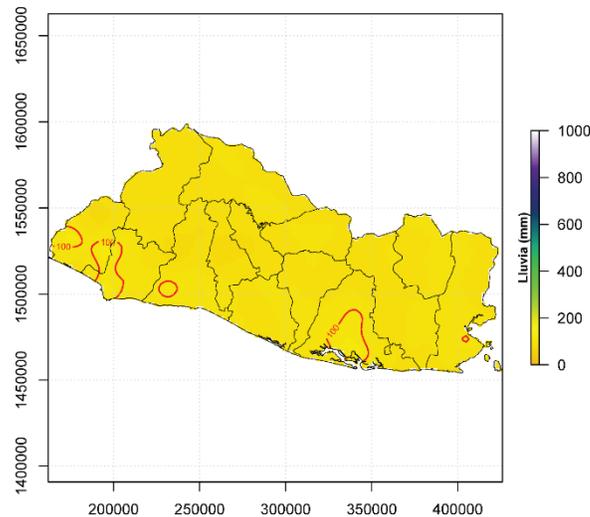


Figura 22. Ejemplo de la malla interpolada a partir de los datos del ajuste de extremos para cada una de las estaciones para la duración de 1 día y periodo de retorno de 2 años

6.3.2. MALLAS EVENTO

Para la construcción de las mallas evento se parte de la información obtenida en las curvas precipitación-área-duración-frecuencia. El objetivo es la construcción de mallas de precipitación máxima de manera estocástica, mediante parámetros característicos morfológicos que se ajusten para que la precipitación y área cumplan con los parámetros obtenidos en las curvas PADF.

También se debe determinar la ubicación, forma y tamaño del patrón de precipitación atendiendo al riesgo.

Las mallas evento se construyen en base a los resultados obtenidos con las series históricas de precipitación a nivel nacional. Dado que los valores obtenidos y la metodología desarrollada se ajusta al tamaño del país y al rango de mediciones, carece de sentido generalizar la descripción de los procesos en el manual, por ello seguidamente se describe el procedimiento establecido para el caso de referencia, pudiendo inferir de ello la toma de decisiones y los pasos a seguir en caso de tener que replicar la metodología en un ámbito diferente al actual.

En primer lugar, para la obtención de los parámetros de las mallas, se parte de la consideración de que los eventos se realizarán con morfología elíptica. Dado que se cuenta con áreas concéntricas y diferentes intensidades de precipitación obtenidas a partir de las curvas PADF, se debe tener en cuenta que la precipitación en la superficie menor (en nuestro caso 10 km²) será directamente la obtenida en las curvas PADF, pero el valor de intensidad de precipitación (o precipitación acumulada en la duración del evento) de la segunda elipse concéntrica deberá corregirse para tener en cuenta que hay una zona (el área concéntrica menor) que tiene una intensidad mucho mayor, y así sucesivamente.

La relación de corrección se establece de manera proporcional a las áreas de las elipses. En la Tabla siguiente se muestra la precipitación obtenida de la curva PADF (se muestra el ejemplo en base a los resultados de la curva PADF de 1 día de duración y 100 años de período de retorno), y la precipitación corregida que se obtiene en cada una de las áreas concéntricas que se muestran en la *Figura 23. Esquema elíptico conceptual considerado.*

La corrección para las áreas A2 a A7 se obtiene utilizando la siguiente expresión (se utiliza la región A2* como ejemplo):

$$Precipitación\ en\ A2^* = \frac{(Prec_{PADF\ A2} \cdot A2) - (Prec_{PADF\ A1} \cdot A1)}{(A2 - A1)}$$

Nota: El * en A2 denota que el área no incluye a A1. Es decir, A1 = 10 km², A2 = 25 km², mientras que A2* = 15 km².

Region	Área (km ²)	Precipitación según PADF (mm)	Precipitación para el intervalo de elipse concéntrico (mm)
A1	10	561.3	561.3
A2	25	501.7	462.0
A3	100	438.4	430.6
A4	500	339.4	316.6
A5	1000	307.1	297.5
A6	5000	214.3	193.6
A7	21041	171.2	164.3

Tabla 12. Ejemplo de la corrección realizada para la construcción de las mallas para los eventos de 1 día de duración y 100 años de período de retorno

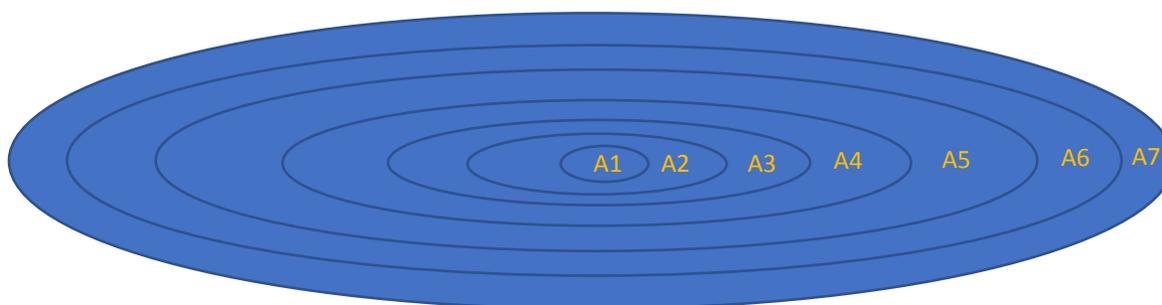


Figura 23. Esquema elíptico conceptual considerado

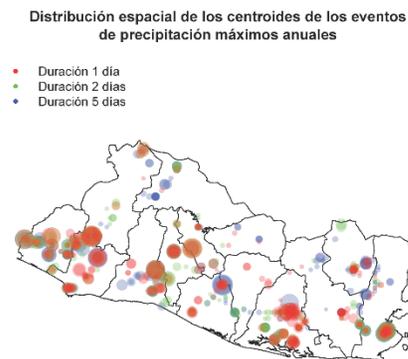
Finalmente, para suavizar los “escalones” entre las diferentes áreas obtenidas a partir de la curva PADF, se ha realizado una interpolación de los resultados obtenidos en las elipses.

La segunda parte para la obtención de las mallas de evento es la localización y orientación de las elipses. Para ello se han obtenido las posiciones de los centroides de los eventos de precipitación máximos anuales. En la figura también se observa la magnitud de los eventos (tamaño del círculo) y la duración del evento (color).

De este análisis gráfico se desprende que existen 4 centroides que acumulan la mayoría de eventos importantes:

- La zona sudoeste, específicamente centrado cerca del Volcán de Santa Ana (y el municipio de Los Naranjos).
- Los alrededores de San Salvador.
- Los alrededores de Santiago de María.
- La zona sudeste, específicamente centrados en el municipio de La Unión.

Es por ello que se han decidido realizar mallas de precipitación centradas en estas cuatro localizaciones.



Nota: El tamaño del círculo está representado a proporción de la precipitación registrada

Figura 24. Distribución espacial de los centroides de los eventos de precipitación anual máxima

Se ha planteado que la alineación de las elipses de las mallas sea:

- Orientación semieje mayor -15° .
- Dado que morfológicamente, las tormentas se alinean de manera semiparalela a la línea de costa (decayendo rápidamente en intensidad en dirección norte-noreste, hacia el interior de El Salvador), se decide que el semieje mayor de las elipses sea del doble de longitud que el semieje menor.

En base a ello se define un evento de precipitación de forma elíptica de 21,041 km² de área, con semieje mayor de 115.7 km de longitud y orientado con un ángulo de -15° , y un semieje menor de longitud 57.9 km.

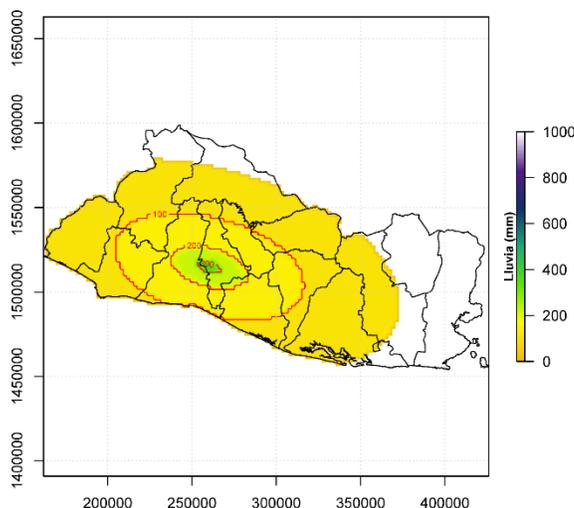


Figura 25. Ejemplo de la malla para el evento elíptico centrado en San Salvador de duración 1 día y período de retorno de 25 años

La siguiente tabla muestra las relaciones entre las distintas dimensiones de semiejes mayor y menor asociadas a las distintas áreas de las elipses que han sido definidas:

S (Km ²)	10	25	100	500	1,000	5,000	21,041
Semieje mayor (Km)	2.5	4.0	8.0	17.8	25.2	56.4	115.7
Semieje menor (Km)	1.3	2.0	4.0	8.9	12.6	28.2	57.9

Figura 26. Relación existente entre las superficies de elipses y los semiejes de las mismas

6.4. MODELACIÓN DEL ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL

Para el cálculo, tanto de los caudales como posteriormente de las superficies de inundación, se ha empleado la extensión de ArcGIS denominada *ArchHydroTools*. La cual se compone de un conjunto de herramientas y modelos de datos que operan desde ArcGIS para la elaboración de análisis de datos geoespaciales y temporales.

Mediante estas herramientas se han definido las cuencas y escorrentías superficiales, generando un modelo capaz de representar el escurrimiento superficial de toda la zona.

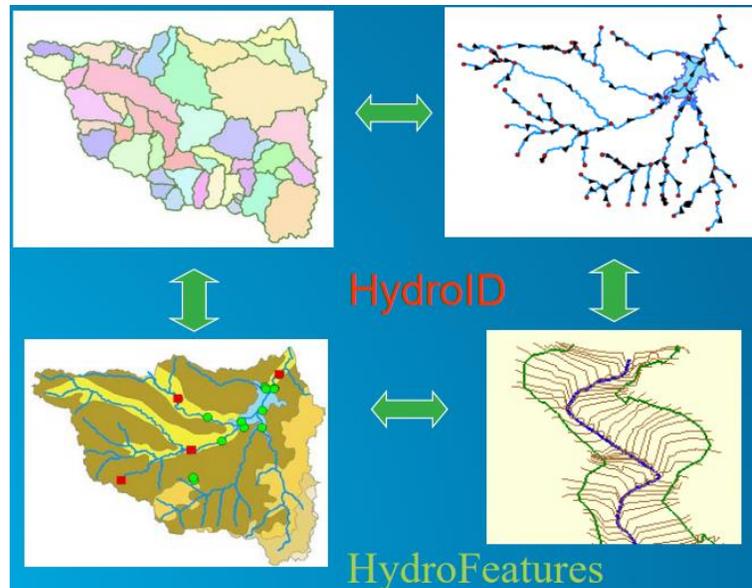


Figura 27. Modelo de escoorrentía

Este sistema incluye dos componentes clave:

- Modelo de datos Arc Hydro.
- Herramientas de Arc Hydro.

Los cuales proporcionan un modelo de base de datos básico y una serie de herramientas que permiten los análisis más habituales en el ámbito de los recursos hídricos, y que se han empleado con el objetivo de, finalmente, generar una serie áreas de inundación que serán representadas en mapas.

Dentro de dicho modelo, todos los elementos que se generan compartirán un ID común dentro de la Geodatabase generada en lugar de ser único para cada elemento de cada capa, Este ID se denominará HydroID y permite relacionar todos los elementos de diferentes capas del modelo.

6.4.1. PROPROCESAMIENTO Y CAUDALES

Preprocesamiento

La herramienta *ArchydroTools* proporciona una serie de utilidades de preprocesamiento que permiten depurar un Modelo Digital de Elevación (DEM) antes de emplearlo para definir el modelo de escoorrentía.

Dichas herramientas permiten, entre otras cosas, asignar pendientes en los cauces, definir y evaluar sumideros, construir muros a partir de capas vectoriales, e incluso reacondicionar el DEM mediante “DEM Reconditioning”, lo cual permite corregir fallos en el DEM mediante el método AGREE desarrollado en la Universidad de Austin Texas.

Este método permite, a partir de una capa de líneas con un valor de altura, modificar la superficie de un DEM, y suavizar las transiciones entre los valores del DEM y los fijados mediante la capa vectorial definiendo una serie de parámetros. Esto permitiría corregir el trazado de los ríos y quebradas que un análisis realizado con el DEM disponible, situara de manera errónea.

Además, estas herramientas de preprocesamiento permiten eliminar los sumideros del DEM de manera selectiva, manteniendo los existentes en caso de darse alguno en la zona.

Una vez depurado el DEM, puede emplearse para definir todo el modelo de escorrentía. En este caso se ha empleado el DEM de tamaño de celda de 10x10 de todo el país.

Mediante las herramientas de procesamiento del terreno se calculand tanto la dirección del flujo mediante la herramienta “Flow Direction”, que genera una capa ráster con un valor para cada celda que indica en qué dirección sale de ella el agua, como la acumulación de flujo “Flow Accumulation”, que indica que cantidad de celdas hay aguas arriba de cada una de las celdas.

Empleando estos dos rasters como base, *ArchHydoTools* cuenta con las herramientas “Stream Definition”, “Stream Segmentation” y “Flow Direction With Streams”, para definir, segmentar y finalmente convertir en líneas de drenaje los cauces existentes en la zona.

Esta línea de drenaje se define estableciendo el umbral de acumulación de flujo necesaria para ser considerado un río de tal forma que cada uno de los 24 puntos en los que se contaba con una curva de gasto proveniente de una estación de aforo, quede dentro de un cauce.

A partir de dichas líneas de drenaje y el ráster de dirección de flujo, se pueden calcular las cuencas hidrográficas de la zona mediante las herramientas “Catchment grid delineation” y “Catchment Polygon Processing”, tanto en formato ráster como vectorial.

Una vez definidas dichas cuencas, para acelerar el posterior cálculo de las longitudes de los cauces, para el cálculo de los caudales, se calcula el “Longest Flow Path” tanto para las subcuencas como

para las cuencas totales de toda la zona mediante las herramientas “Longest Flow Path for Catchments” y “Longest Flow Path for Adjoint Catchments”. Y finalmente se establece un modelo mediante la herramienta “Hydro Network Generation”.

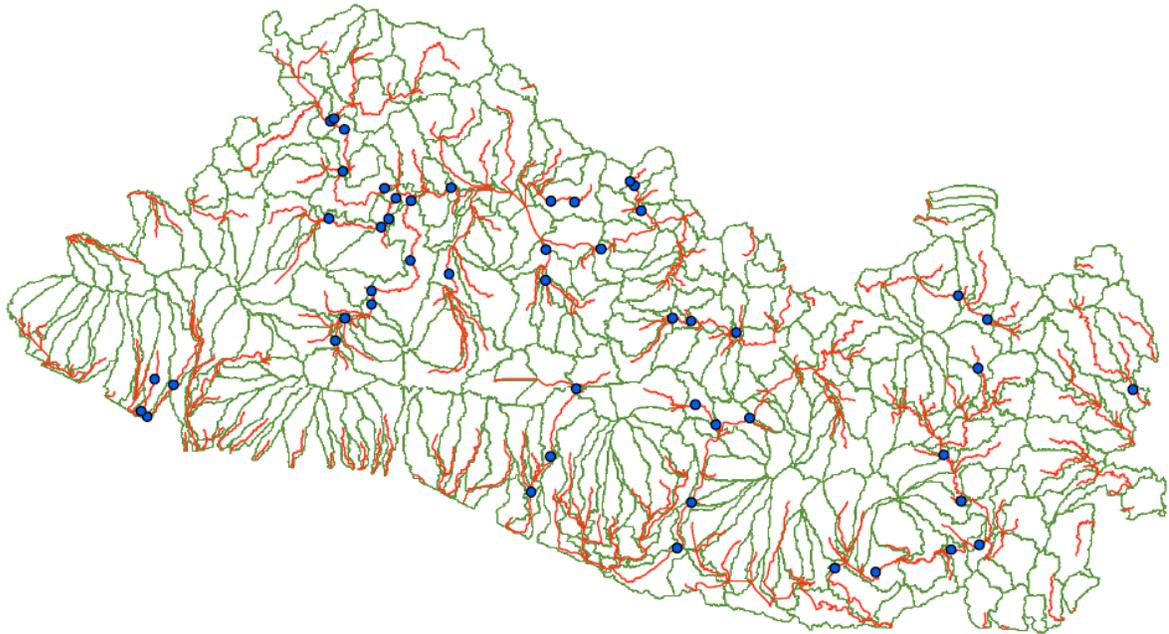


Figura 28. Modelo de escorrentía

Una vez generado el modelo, mediante las herramientas “Batch Watershed Delineation” y “Longest Flow Path for Watersheds” se generan las cuencas vertientes para cada uno de los puntos y sus respectivos cauces, cuyas áreas y longitudes se han empleado en el cálculo de los caudales mediante el método racional expuesto en el apartado anterior.

El método racional modificado del profesor D. José Ramón Témez que se ha empleado para la obtención de caudales a partir de los distintos eventos de precipitación, fue publicado en la *serie de Ingeniería Civil del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas del Ministerio de Fomento de España (serie: Ingeniería Civil, Nº 82, ISSN: 0213-8468. Edición: 1991)* donde se justifica su aplicabilidad para cuencas naturales hasta 3.000 km² de superficie y tiempos de concentración de hasta 24 h.

Umbral de Escorrentía

Para el cálculo del P0 necesario para la estimación de los caudales mediante el método racional, se emplea una metodología que usa el formato ráster y las peculiaridades de los números primos, para generar un ráster de toda la zona con valores de P0 para cada píxel.

La metodología consiste en generar tres capas ráster, una del tipo de suelo según la permeabilidad, otra con los usos del suelo y finalmente un ráster de pendientes reclasificado en zonas con pendientes mayores y menores al 3%.

Cruzando dichos rastres se obtienen valores para P0 según la siguiente tabla.

Usos del suelo 2011	Pendiente (%)	Tipo de suelo según permeabilidad			
		A	B	C	D
Bosque Avanzado	>3	90	47	31	23
Bosque Avanzado	<3	90	47	31	23
Bosque Secundario	>3	90	47	31	23
Bosque Secundario	<3	90	47	31	23
Bosque Caducifolio	>3	90	47	31	23
Bosque Caducifolio	<3	90	47	31	23
Bosque de Coniferas	>3	90	47	31	23
Bosque de Coniferas	<3	90	47	31	23
Bosque Salado Alto	>3	2	2	2	2
Bosque Salado Alto	<3	2	2	2	2
Bosque Salado Bajo	>3	2	2	2	2
Bosque Salado Bajo	<3	2	2	2	2
Matorral	>3	75	34	22	16
Matorral	<3	75	34	22	16
Agricola	>3	37	20	12	9
Agricola	<3	42	23	14	11
Suelo Desnudo	>3	24	14	8	6
Suelo Desnudo	<3	24	14	8	6
Agua	>3	0	0	0	0
Agua	<3	0	0	0	0
Granos Basico	>3	29	17	10	8
Granos Basico	<3	34	21	14	12
Arroz, Agricultura bajo riego	>3	47	25	16	13
Arroz, Agricultura bajo riego	<3	47	25	16	13
Cultivos Frutales	>3	80	34	19	14
Cultivos Frutales	<3	95	42	22	15
Pastos Nat y Cultivado	>3	53	23	14	9
Pastos Nat y Cultivado	<3	80	35	17	10
Caña de Azucar	>3	80	34	19	14
Caña de Azucar	<3	95	42	22	15
Hortalizas	>3	23	13	8	6
Hortalizas	<3	29	19	14	11
Café	>3	80	34	19	14
Café	<3	95	42	22	15
Veg. Costera	>3	70	33	18	13
Veg. Costera	<3	120	55	22	14
Arenales y Dunas	>3	152	152	152	152
Arenales y Dunas	<3	152	152	152	152
Cultivos de Coco	>3	62	28	15	10
Cultivos de Coco	<3	75	34	19	14
Cafe bajo Sombra	>3	53	23	14	9
Cafe bajo Sombra	<3	80	35	17	10
Otros Cultivos	>3	42	23	14	11
Otros Cultivos	<3	47	25	16	3
Camaroneras y Salineras	>3	5	5	5	5
Camaroneras y Salineras	<3	5	5	5	5
Colada Volcanicas	>3	3	3	3	3
Colada Volcanicas	<3	5	5	5	5
Humedales	>3	2	2	2	2
Humedales	<3	2	2	2	2

Tabla 13. Valores de P0

Para poder automatizar la obtención de los valores para cada punto, se asignará un numero primo a cada uno de los valores representados en cada uno de los tres rásters, y debido a las características

de este tipo de números, la multiplicación de tres de ellos dará siempre un numero diferente a cualquier otra combinación, por lo cual, obtendremos un identificador único para cada combinación posible de las tres variables.

Para esto se empleará la calculadora ráster, y posteriormente se reclasificará el ráster obtenido asignando a cada valor obtenido de la multiplicación de los números primos, el valor correspondiente de P0.

Dicho valor se puede transformar de manera inmediata mediante la propia calculadora ráster en valores de Numero de Curva, obteniéndose así un ráster con los números de curva para toda la superficie del país. Este cálculo se ha realizado considerando la condición II de humedad precedente según el método del número de curva.

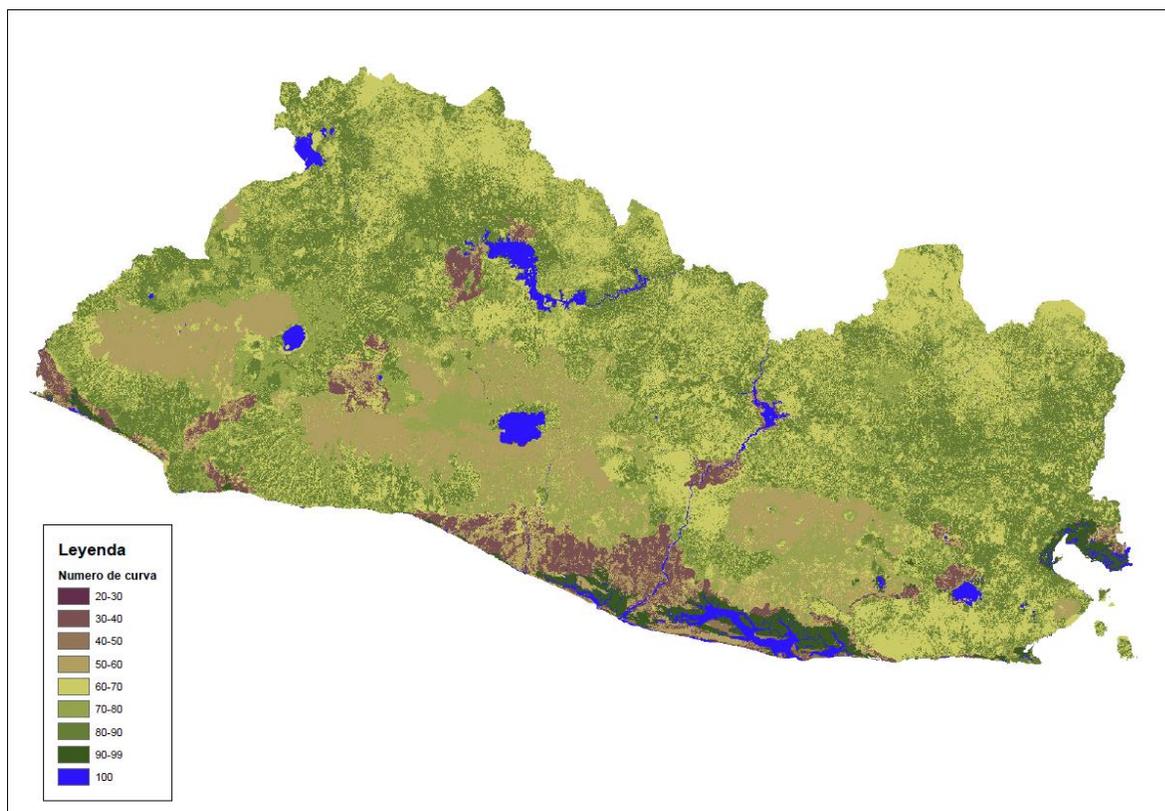


Figura 29. Números de curva

Una vez obtenido el P0 para cada píxel, empleando la herramienta “Zonal Statistics by Table” se puede obtener la media del P0 para cada una de las cuencas calculadas para los puntos, y debido a

que cada píxel tiene un valor, la media obtenida será la media ponderada por el área de los diferentes PO existentes en cada cuenca.

Debido a que las cuencas generadas para cada uno de los puntos se solapan en la mayoría de los casos, ya que estos se encuentran en los mismos cauces, para poder extraer dichos valores se ha empleado una herramienta denominada “Zonal Stat WOverlap”, que lanza el proceso de obtención de los valores y elimina los polígonos que han obtenido valores después de guardarlos, e itera dicho proceso hasta que todos los polígonos obtienen un valor.

Pendiente a lo largo del cauce

Para obtener la pendiente a lo largo del cauce, en primer lugar, se genera un ráster de pendientes en porcentaje a partir de DEM de 5x5 y después se emplea la misma herramienta de iteración que para extraer los valores de PO para los polígonos solapados, pero para los cauces de mayor recorrido calculados para cada una de las cuencas.

Obteniéndose de esa manera las pendientes medias para cada cauce necesarias para el cálculo de los caudales.

Precipitación diaria

Para la obtención de la precipitación diaria en las cuencas vertientes de cada uno de los puntos para los que se ha calculado el caudal, se emplea el mismo procedimiento que para la obtención de PO.

La distribución de la precipitación para los diferentes eventos, tanto históricos como simulados, se encuentra en formato ráster, con lo cual para extraer la información para cada una de las cuencas se emplea nuevamente la herramienta “Zonal Stat WOverlap”, para obtener la media de la precipitación en cada cuenca.

Antes de esto, se le dio un tratamiento a cada uno de los rústers para eliminar los valores negativos y, en el caso de las tormentas con centroides en las que no llovía simultáneamente en todo el país, añadir valores de precipitación 0 a lo largo de toda la extensión de la zona de estudio.

Calculo de caudales

Una vez obtenidos todos los datos, se calcula el método racional modificado de Temez mediante una hoja de cálculo para la obtención de los caudales para cada uno de los puntos existentes, en la que posteriormente se añaden las curvas de gasto para obtener alturas de agua a partir de dichos caudales.

6.4.2. CALCULO DE LAS CURVAS DE GASTO

Para el cálculo de las curvas de gasto se emplea Hec-RAS (USACE, 2016). Un modelo de simulación hidráulica unidimensional (y bidimensional en sus últimas versiones) para una red natural (o artificial) de cursos de agua que ha sido empleado para determinar la relación existente entre el caudal circulante por el río y el tirante hidráulico que alcanza el agua en cada una de las secciones.

El procedimiento de trabajo que se ha seguido es el siguiente:

- Definición de los datos geométricos del problema:
 - Construcción de un tramo de río.
 - Definición de secciones transversales.
- Entrada de datos de flujo estacionario.
- Definición de condiciones de contorno.
- Análisis del flujo estacionario.
- Consulta y evaluación de resultados.

La geometría de los cauces ha sido trabajada previamente con ayuda del complemento *Q-RAS* del *software* QGIS, en el que, dado un eje longitudinal del cauce y unas secciones transversales al mismo, se obtienen los perfiles transversales del cauce – gráfico de *Station-Elevation* – a partir del MDE de referencia – en este caso, el obtenido a partir de los levantamientos LiDAR proporcionados por el MARN como insumo a la consultoría.

El complemento *Q-RAS* permite generar de manera automática las entradas a Hec-RAS a través de un archivo *.sdf de geometría. La siguiente figura muestra un ejemplo de introducción de Red de drenaje y secciones transversales en formato vectorial, que interactúan con el MDE en formato ráster y generan un archivo de salida en el formato objetivo:

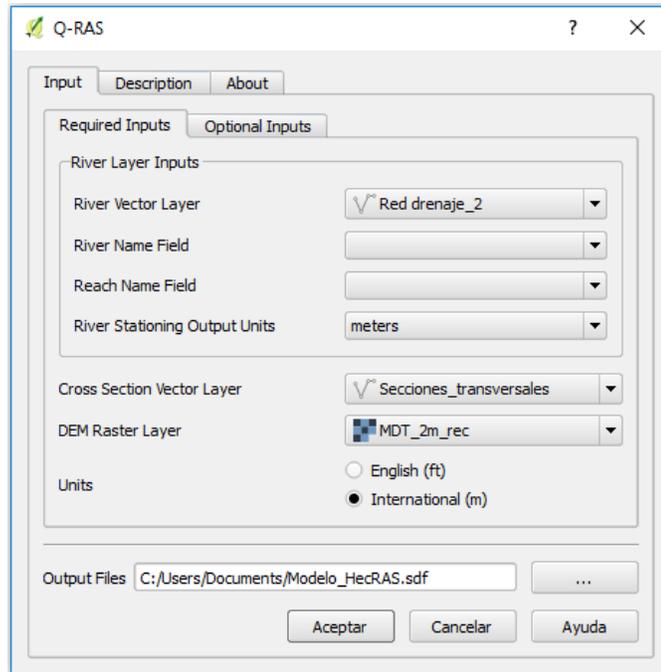


Figura 30. Ejemplo de generación de geometría para Hec-RAS en QGIS con el complemento Q-RAS

Una vez importada la geometría en Hec-RAS se cuenta con la siguiente información de partida para el modelo:

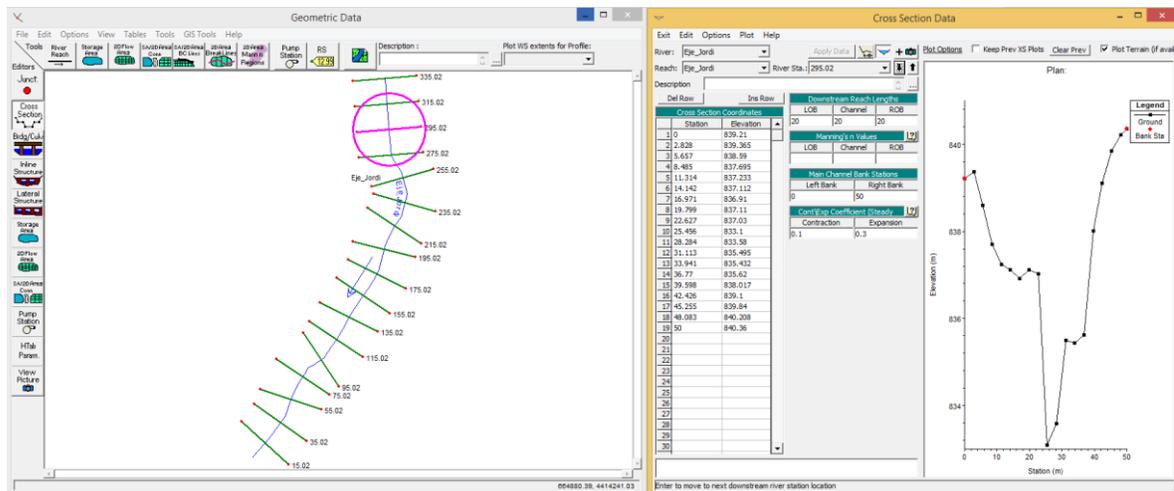


Figura 31. Información extraída del MDE con Q-RAS e importada en Hec-RAS

Este procedimiento de trabajo facilita en gran medida la generación de modelos hidráulicos 1D, puesto que la geometría de partida ya queda definida.

Por su parte, la elaboración de las curvas de gasto requiere de la definición de condiciones variadas de caudal a las que poder asociar las distintas alturas de inundación. El cálculo se realiza en modo

estacionario y se definen 17 perfiles distintos de caudal variando entre 200 m³/s y 1000 m³/s con incrementos de 50 m³/s.

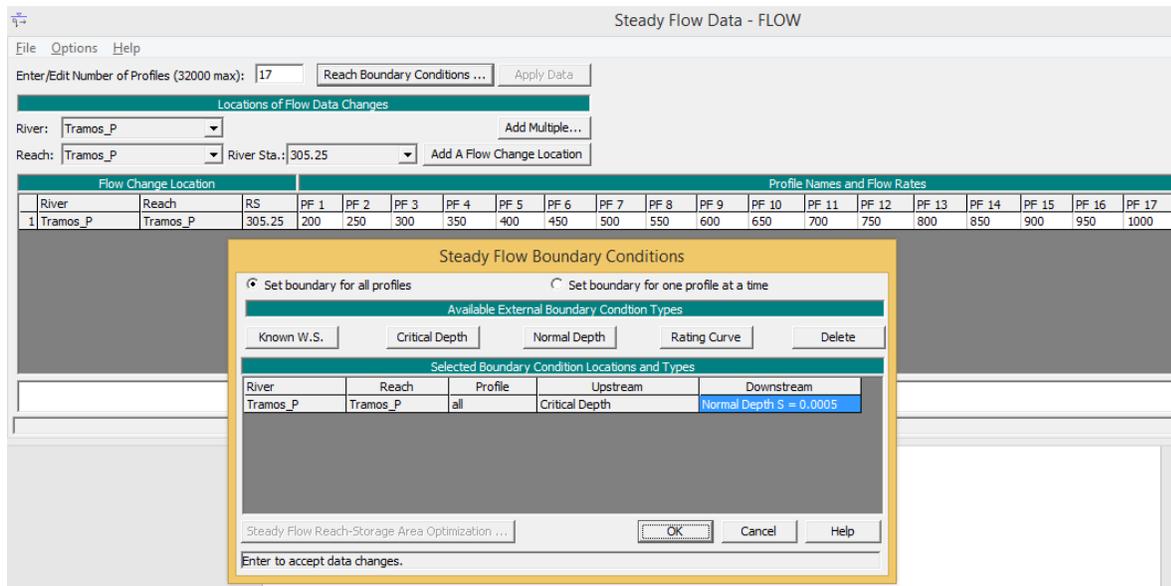


Figura 32. Vista de la definición de perfiles de caudal estacionario y las condiciones de contorno del modelo

Tal y como muestra la figura anterior, se definen condiciones de contorno de calado crítico aguas arriba del modelo y la convergencia de la curva de remanso con un calado normal asociado a una pendiente hidráulica casi horizontal aguas abajo.

En estas condiciones se pudo definir el cálculo con condiciones de flujo mixto – i.e. variable entre subcrítico y supercrítico.

Se analizan los resultados seleccionando secciones suficientemente alejadas de los contornos del modelo, de manera que sus resultados se puedan considerar lo más aproximados posibles al comportamiento real de los cauces en esos entornos.

En los apéndices del Tercer Informe de Avance se presenta las distintas curvas de gasto determinadas en la presente consultoría, reflejando en el gráfico de manera adicional la curva de ajuste del tipo potencial obtenida – $h = A \cdot Q^B$.

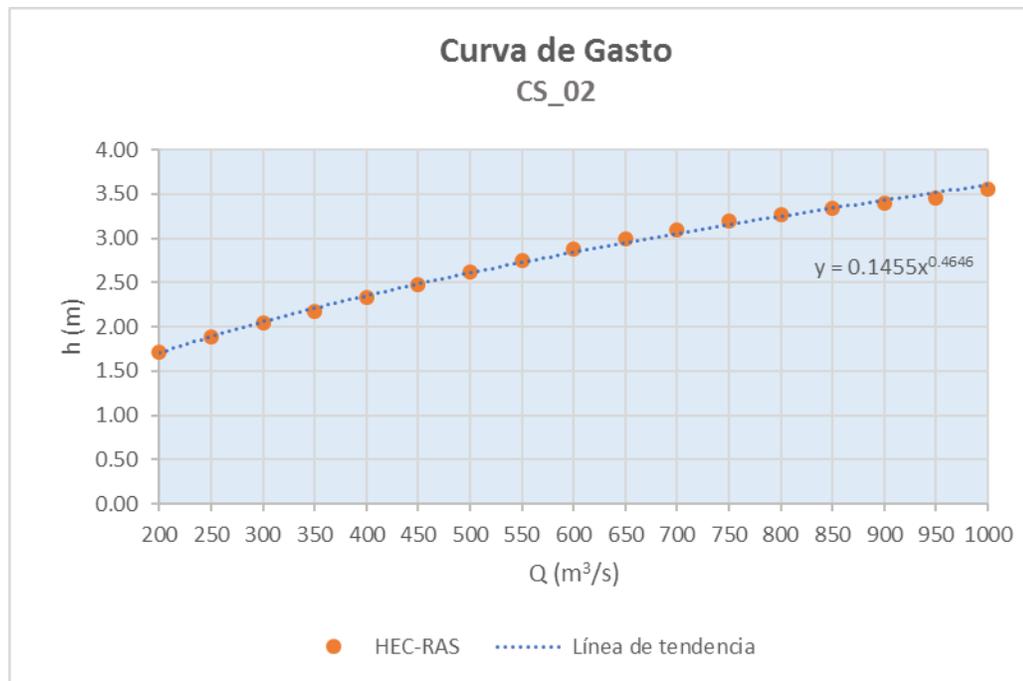


Figura 33. Ejemplo de curva de gasto obtenida en el punto CS_02

6.4.3. CÁLCULO DE LAS SUPERFICIES DE INUNDACIÓN

Para la generación de los mapas de inundaciones, teniendo en cuenta los datos disponibles, se ha optado por emplear una modificación de los modelos “Stream WSE from Point Measurements” y “Flood fom Stream WSE”, confeccionados a partir de herramientas de *ArchHydroTools*, y que permiten estimar la superficie de inundación a partir del modelo digital de elevación y datos de elevación de la lámina de agua de los cauces.

Datos necesarios

Para definir las llanuras de inundación mediante *ArchHydroTools*, es necesario contar con los datos de altura de la lámina de agua en el cauce. Para ello se emplean los datos de caudales calculados según el apartado anterior para cada uno de los puntos para los cuales se cuenta con una curva de gasto.

A partir de dichas curvas de gasto, con los caudales calculados, se obtiene una altura de la lámina de agua en cada uno de los puntos.

Dichas curvas de gasto se han calculado a partir del MDE extraído de los datos del LiDAR, con lo que ya contienen el flujo base de los cauces existentes, por tanto, las alturas calculadas ya tienen en cuenta dicho flujo.

Preprocesamiento

Para la aplicación de los modelos de cálculo de la superficie de inundación, en primer lugar, hay que realizar un preprocesado de los datos iniciales tal como se explica en apartados anteriores.

En primer lugar, es necesario asignar un “HydroID” a los puntos que van a emplearse, para poder relacionar dichos puntos con los valores calculados de altura de la superficie de agua.

En cuanto dichos datos de altura, se calculan mediante las curvas de gasto y se convierten en series de tiempo de la siguiente manera.

En primer lugar, se programan todas las curvas de gasto en una tabla de Excel, asociadas a un nombre de punto que hace las veces de identificador único de los puntos cuando se trabaja con ellos fuera de ArcMap.

Se genera una tabla de Excel por cada evento con el objetivo de poder iterar entre ellas y lanzar un modelo que genere todas las capas de superficies de inundación para cada uno de los eventos tanto históricos como simulados.

Dichas tablas se exportan a una geodatabase (.gdb) y una vez en dicho formato, se generan los campos en formato “Date” necesarios para que el modelo las considere tablas de tiempo.

Dicho campo se emplea generalmente para diferenciar valores en distintos momentos para un mismo punto, pero al estar en este caso cada evento en una tabla propia, solo actúa como identificador por lo que cada tabla solo tendrá una fecha única.

Finalmente, los campos que ha de tener la tabla para cada evento, para que el modelo las considere “series de tiempo” y sea capaz de operar con ellas son los siguientes:

TSValue	TSTime dbf	VarID	FeatureID	TSTime
4,272808	01/12/2018	3	10508	01/12/2018
4,725797	01/12/2018	3	10509	01/12/2018
3,260775	01/12/2018	3	10510	01/12/2018
6,130122	01/12/2018	3	10511	01/12/2018

Figura 34. Serie de tiempo. Campos generados

Donde “TSValue”, “VarID” y “FeatureID” tienen formato “Double” y son respectivamente el valor de la elevación a sustituir en cada punto para cada evento, el identificador de la variable según la tabla VAR del modelo, y el HydroID de cada punto al que se asocia el valor de la variable. En cuanto al campo “TSTime” tiene formato “Date” y en este caso, como se ha explicado anteriormente, solo se emplea como identificador ya que es único para cada tabla.

Para que el modelo sea capaz de identificar la variable empleada, en la propia geodatabase del proyecto hay que generar otra tabla con el siguiente formato.

OBJECTID	HidroID	VarName	VarUnits	DataType	IsRegular	TimeStep	TimeUnits
1	3	Altura	Meters	Average	True	1	Days

Figura 35. Tabla de variables (VAR)

LA cual ha de tener el nombre VAR.

Modelado

Para la obtención de la llanura de inundación a partir de los datos ya preprocesados, el modelo consiste, como ya se ha indicado anteriormente, en una modificación de dos herramientas que agrupaban 18 procesos.

La primera de ellas es “Stream WSE from point WSE Measurements” y genera una línea 3D del cauce dentro de la geodatabase en la que se almacena todo el modelo.

En primer lugar, la genera en formato vectorial dando valores de elevación a la capa de drenaje empleada a partir de los valores de elevación sustituidos en la capa de puntos para cada una de las tablas de los eventos calculados.

Posteriormente la convierte a formato ráster para que el siguiente modelo pueda realizar los cálculos pertinentes con dichos datos, empleando el MDE de referencia para asignar un tamaño de celda y un “Extent” al proceso.

En este caso se emplea esta herramienta para generar una línea 3D solo de alturas, sin tener en cuenta la elevación del terreno, y después se genera igualmente la línea ráster con dichos valores, para posteriormente extraerlos a una red de puntos densificada con puntos cada 250 metros a lo largo del cauce, a los cuales si que se les suma la elevación de cada punto.

Siguiendo este procedimiento se evita uno de los problemas que presenta el método para cauces de una longitud considerable, ya que la herramienta interpola las alturas linealmente entre puntos conocidos, y, por tanto, si entre dos puntos se da un cambio de pendiente brusco, la lámina de agua interpolada queda muy por encima del terreno en dichas zonas.

Interpolando solo alturas y no elevaciones y extrayendo las elevaciones cada 250 metros a lo largo del cauce se evita que la lámina de agua se “despegue” del terreno debido a dichos cambios bruscos de pendiente.

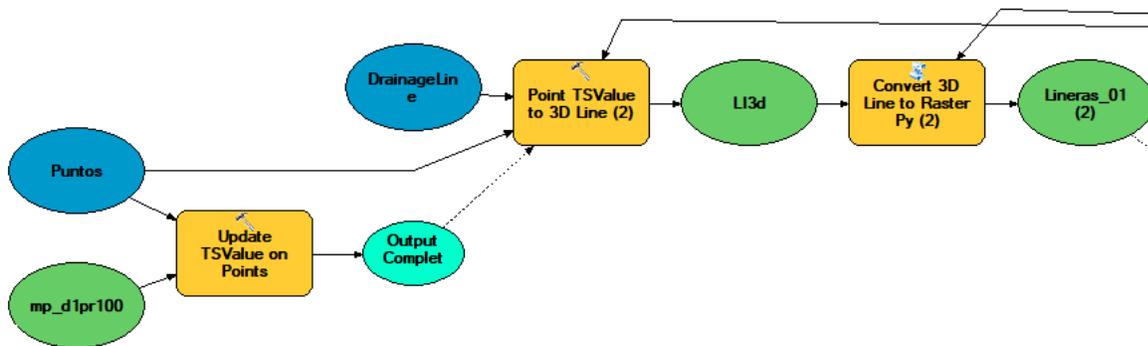


Figura 36. generación de línea 3D y línea ráster

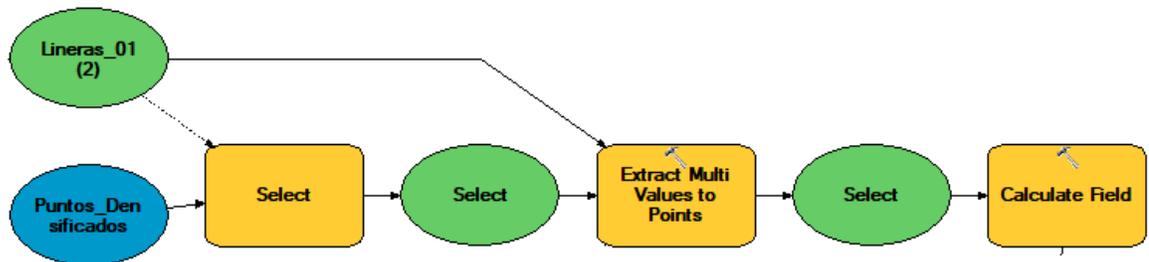


Figura 37. Extracción de valores de altura a red de puntos densificada y cálculo de elevaciones

La herramienta “Select” hace una selección desde una capa de puntos que contiene todos los empleados en dicho procedimiento. En este caso solo selecciona aquellos situados cada 250 metros a lo largo del cauce.

La herramienta “Calculate Field” calcula la elevación total de la lámina de agua sumando a las alturas extraídas de la línea ráster, las elevaciones de los puntos empleados según el MDE, que ya están contenidas en la capa de puntos ya que serán iguales para todos los eventos.

Seguidamente, para la delineación de la llanura de inundación, la herramienta de ArcHydro Tools emplea la herramienta de ArcGis “Nibble” para dar valores a las celdas sin datos del ráster de línea anterior según en procedimiento de “Nearest Neighbor”. Esto genera cortes en las zonas entre cauces y en los meandros muy pronunciados, así como entre los tramos de río y las confluencias.

Para evitar dichos problemas en una zona tan amplia como el país entero, se ha buscado una manera alternativa de interpolar una superficie con las elevaciones a lo largo del cauce hacia los márgenes de este, y que además tuviera una continuidad entre cauces situados cerca y en las confluencias.

Se ha optado por generar un TIN con las elevaciones de los puntos situados cada 250 metros en los cauces, pasar dicho TIN a ráster, e intersectarlo con el MDE para generar la llanura de inundación, tal y como hace la herramienta de ArcHydro Tools.

Este método plantea la problemática de que el TIN generado solo con los puntos a lo largo de los cauces se extendería y dibujaría como llanura de inundación cualquier endorreísmo situado entre cauces, y podría darse el caso de que el TIN interpole valores entre puntos de distintos cauces situados a alturas muy diferentes y genere una superficie inundada irreal.

Para solucionar dicho problema se genera un buffer alrededor de la red de drenaje con puntos cada 500 metros a los que se asignará la altura del punto del cauce más cercano. Generando entre el cauce y este buffer una superficie plana cuya altura variará igual que la calculada justo en la línea del cauce.

En las zonas muy llanas consideradas inundables en el mapa de susceptibilidad, se emplea dicho mapa para ampliar el buffer de la red de drenaje, ya que limitar la extensión de inundación en dichas zonas podía llevar a resultados poco realistas.

Para dar a los puntos situados a lo largo del buffer el mismo valor de elevación de lámina de agua que el punto más cercano situado sobre la línea de cauce se genera una capa de polígonos de Thiessen, los cuales contienen todos los valores de los puntos a partir de los cuales se generan. Posteriormente se convierte en ráster con el valor de elevación de la lámina de agua y se extrae dicho valor del ráster en los puntos situados en el buffer.

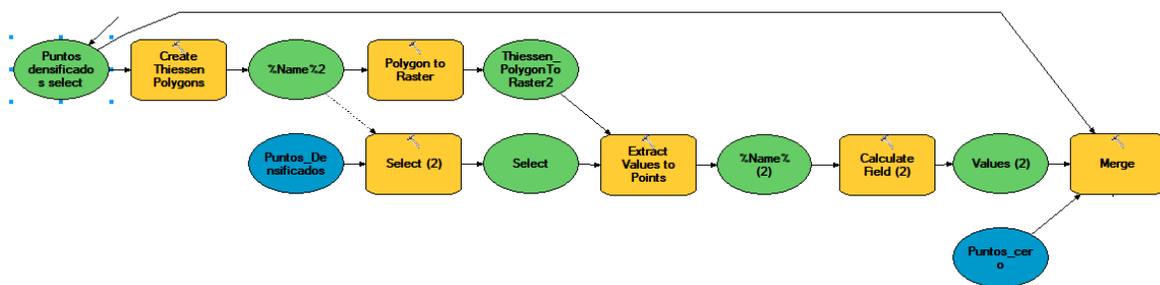


Figura 38. Asignación de valores a los puntos del buffer y unión de todos los puntos

Para evitar que el modelo interpole también entre puntos de buffer pertenecientes a distintos cauces y con una gran diferencia de elevación, en las zonas en las que no se produce inundación o por las que no pasa ningún cauce se introducen puntos con un valor de 0 para rebajar la altura de la lámina de agua siempre por debajo del terreno y que no se represente.

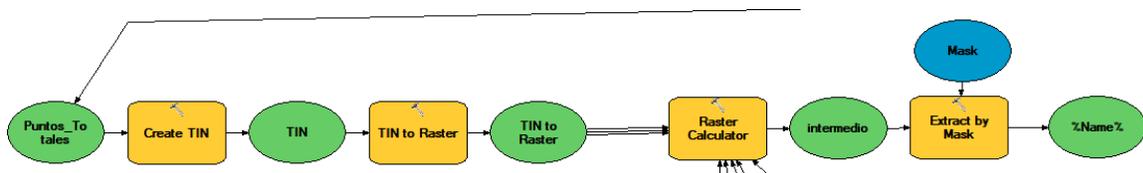


Figura 39. Parte final del modelo, creación de la capa de superficie de elevación de la lámina de agua e intersección con el terreno

El TIN generado tiene la apariencia siguiente:

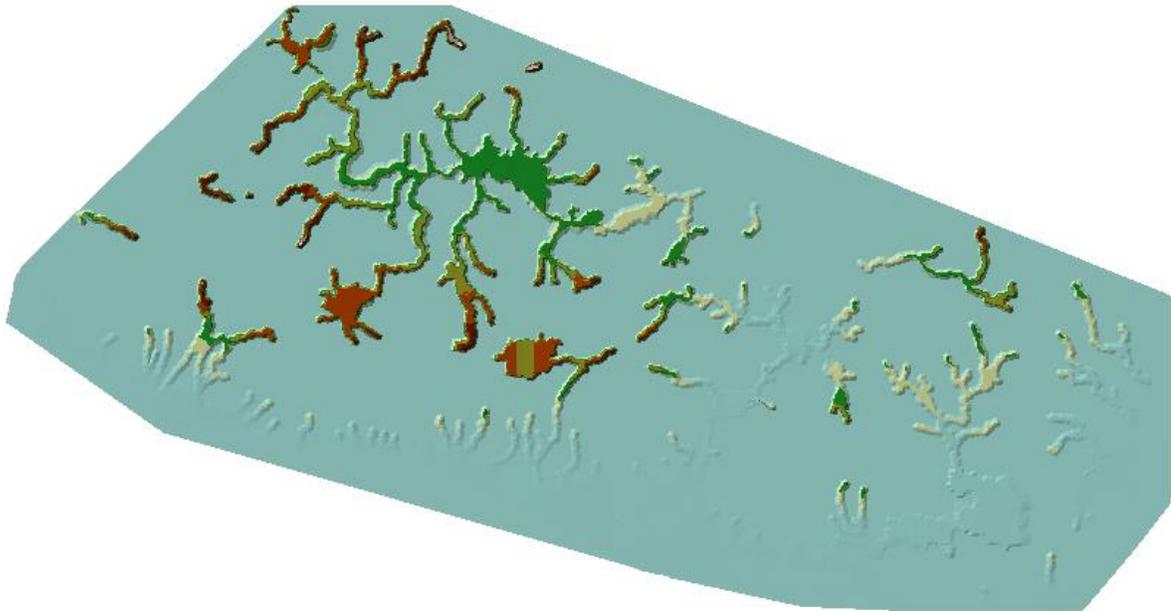


Figura 40. TIN de elevaciones de lámina de agua

Finalmente, la intersección de la lámina de agua con el terreno se realiza mediante la calculadora ráster mediante la siguiente fórmula, que además de intersecar con el terreno, elimina los valores menores que cero y los datos anómalos que pueden surgir de posibles imperfecciones en el MDE.

```
Con("TIN to raster"-"rawdem_c">0,SetNull("TIN to raster"-"rawdem_c","TIN to raster"-"rawdem_c", "Value>22"),SetNull("TIN to raster"-"rawdem_c","TIN to raster"-"rawdem_c"
```

Figura 41. Fórmula calculadora ráster

Como resultado de aplicar este proceso a los datos obtenidos para las precipitaciones generadas para diferentes eventos estudiados, se obtienen mapas de las zonas de inundación asociadas a cada uno de estos eventos.

El método también permite calibrar la mancha de inundación a partir de datos conocidos para eventos históricos simulados, modificando los valores de las curvas de gasto o limitando la inundación desplazando los puntos con un valor 0 que se emplean para generar el TIN.

En este caso se han representado puntos conocidos con datos registrados tras los eventos históricos evaluados – e.g. DT12E, MITCH, AGATHA, IDA – y se ha comprobado que la profundidad de la

inundación en dichos puntos se encuentra dentro de la misma categoría de resultados una vez hecha la reclasificación de estos.

Las siguientes figuras muestran resultados en dos puntos y eventos distintos.

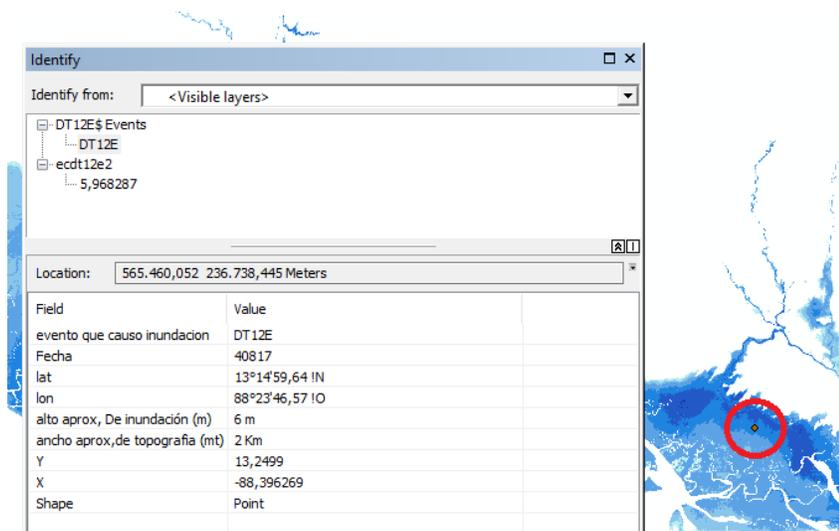


Figura 42. Punto de calibración DT12E

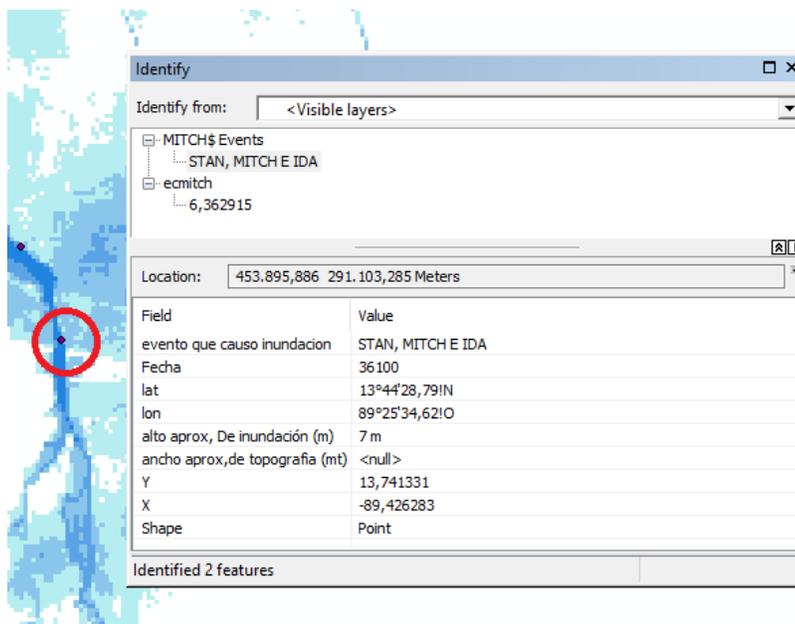


Figura 43. Punto de calibración MITCH

7. ATLAS DE MAPAS PROBABILÍSTICOS DE INUNDACIONES

En el Apéndice 1 del presente documento se recogen los mapas probabilísticos de inundaciones.

Para poder asociar los resultados gráficos con su correspondiente evento generador, se ha elaborado la siguiente tabla relacional de referencia:

Codigo (Raster)	Nombre (Raster Precipitaciones)
agatha	eventoscatalogadosAgatha
mitch	eventoscatalogadosMitch
fifi	eventoscatalogadosFIFI
ida	eventoscatalogadosIda
stan	eventoscatalogadosStan
dt12e	eventoscatalogadosDT12E
mp_d1pr2	mallapais_duración1pdret2
mp_d1pr25	mallapais_duración1pdret25
mp_d1pr50	mallapais_duración1pdret50
mp_d1pr100	mallapais_duración1pdret100
mp_d2pr2	mallapais_duración2pdret2
mp_d2pr25	mallapais_duración2pdret25
mp_d2pr50	mallapais_duración2pdret50
mp_d2pr100	mallapais_duración2pdret100
mp_d2pr2	mallapais_duración5pdret2
mp_d2pr25	mallapais_duración5pdret25
mp_d2pr50	mallapais_duración5pdret50
mp_d2pr100	mallapais_duración5pdret100

Tabla 14. Relación entre códigos de mapa y evento generador

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El presente documento constituye el INFORME FINAL correspondiente a la ‘*Consultoría para la elaboración de mapa probabilístico de inundaciones*’.

En los apartados anteriores se expone el trabajo realizado y se dan por alcanzados los objetivos que se demandan por el MARN y los que se incluyeron en la oferta de Vielca Ingenieros. Específicamente:

- Un resumen ejecutivo de los alcances más importantes y procedimientos de trabajo de la consultoría, incluyendo tanto las estrategias de tratamiento de datos y completado de series de precipitación, como los procedimientos de mapeo, clasificación de series temporales, construcción de curvas PADF y generación de mallas de precipitación.

De igual modo, el referido resumen presenta el procedimiento para la modelación del escurrimiento superficial y el mapeo de inundaciones.

- Resultados consolidados de los distintos informes de avance y su interpretación, introduciendo la tipología de resultados obtenidos para cada uno de los productos requeridos a lo largo de la consultoría y refiriendo a los documentos correspondientes para obtener los resultados completos para los distintos escenarios contemplados.

Los ejemplos presentados en el apartado correspondiente van acompañados de los criterios necesarios para la interpretación de los mismos, de manera que se facilite el contexto y visionado de los diversos productos.

- Descripción de los modelos utilizados, presentando las principales hipótesis de cálculo y referencias empleadas para el desarrollo de los distintos productos de la consultoría.
- Elaboración de un manual para la replicación de los resultados, en donde se presentan los procedimientos seguidos, paso a paso, para la determinación de los cálculos necesarios para la determinación de los principales productos requeridos, a saber:
 - Catálogo de tormentas importantes del periodo comprendido entre el 1 de enero de 1970 y el 31 de diciembre de 2017. En donde se ha establecido un ranking de las tormentas con mayores registros de

precipitación acumulada a escala nacional para 1 día, 2 días y 5 días de duración.

- Curvas PADF, construidas en base a un ajuste de las series de precipitación mediante las funciones de distribución de probabilidad de Gumbel y GEV y obteniendo resultados para las 3 duraciones consideradas y distintas superficies circulares concéntricas, en función de la probabilidad de ocurrencia de los eventos (representada mediante el periodo de retorno).
- Mallas de precipitación, distinguiendo entre malla país para la representación de los distintos eventos históricos registrados en las series temporales; y las mallas eventos para el caso de las tormentas estocásticas de forma elíptica generadas a partir de un análisis específico de extremos y un estudio focal y morfológico para definir respectivamente, la ubicación de las tormentas más desfavorables y el tamaño y orientación de los ejes de las elipses de cálculo.
- Modelación del escurrimiento, a partir de un método gráfico en ArcGIS con el complemento Arc-HydroTools en el que a partir de un mapa de elevaciones se representa la superficie de inundación.

Para llegar al mapa de elevaciones se recurre a la selección de más de puntos espacialmente distribuidos en zonas estratégicas de los cauces principales y se determinan, con ayuda de Hec-RAS y en base a un MDE de tamaño 2x2 proveniente de la información del vuelo LiDAR (2014), las curvas de gasto que relacionan la altura de inundación y el caudal circulante.

Para cada evento de precipitación se aplica el Método Racional – basado en la generalización de Témez-Peláez (1991) para cuencas de hasta 3,000 Km² – y se establece el caudal circulante en los distintos puntos de curva de gasto calculada asociado a cada uno de los eventos de precipitación determinadas en la primera parte de la consultoría.

Cabe destacar que el modelo empleado es eminentemente gráfico y entre sus limitaciones está la no consideración de las infraestructuras hidráulicas – e.g. bóvedas, puentes, alcantarillas, etc. –, la regulación producida en embalses – como los existentes en la cuenca del río Lempa

–, el almacenaje por propagación de caudales del propio cauce, la existencia de muros y obstáculos, entre otros.

La presente consultoría plantea un trabajo hidrológico-hidráulico a escala nacional de amplio recorrido y objetivos bien estructurados en el apartado hidrológico, resultando menos específica en la definición de alcances de la componente hidráulica.

En este sentido se recomendaría profundizar en la generalización y automatización de la herramienta para el mapeo de inundaciones propuesta por Vielca Ingenieros, S.A. a partir de mapas raster de eventos de precipitación, pudiendo constituir una metodología ágil que, tras un proceso de calibración y adaptación – requerido para adaptar sus resultados a la resolución y detalle necesarios para la activación de sistemas de alerta temprana; i.e. resolución del MDE que se pueda emplear (pudiendo definir distintos tamaños en función de las necesidades de alerta), consideración de obras de paso, determinación de rugosidades de Manning del terreno (tanto del cauce como de las áreas de inundación), etc. –, llegara incluso a representar en tiempo real – tan sólo con un tiempo de desfase entre el registro de la precipitación y el mapeo de la inundación debido al proceso de cálculo – los mapas de inundaciones asociados a los mapas de precipitación registrados por las redes de monitoreo del Observatorio Ambiental (y otras fuentes de diversa índole que se pudieran considerar).

Vielca Ingenieros queda a disposición del Director del Contrato, D. José Rodolfo Valles León, para cuantas correcciones y mejoras pudieran aparecer en la revisión de este documento.

En San Salvador, a 7 de febrero de 2019.

9. BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

TÉMEZ-PELÁEZ, J.R., 1991. *Generalización y mejora del método racional. Versión de la Dirección General de Carreteras de España*. Revista de Ingeniería Civil, No 82. ISSN: 213-8468. pp. 51-56.

GIS GEOGRAPHY, 2018. <https://gisgeography.com/map-algebra-global-zonal-focal-local/>. Consultado el 10 de noviembre de 2018.

GILLELAND, E. y KATZ, R. W., 2016. *extRemes 2.0: An Extreme Value Analysis Package in R*. Journal of Statistical Software, 72(8). pp. 1-39. doi:10.18637/jss.v072.i08. Consultado el 10 de noviembre de 2018.



APÉNDICE 1: MAPAS DE INUNDACIONES