



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

Evaluación de los efectos del cambio climático en
los problemas de inundación de la villa de La Almunia
de Doña Godina (Zaragoza)

Autor/es

David Mendieta Redrado

Director/es

Beniamino Russo

Escuela Universitaria Politécnica La Almunia
2015



Universidad
Zaragoza

**ESCUELA UNIVERSITARIA POLITÉCNICA
DE LA ALMUNIA DE DOÑA GODINA (ZARAGOZA)**

MEMORIA

Evaluación de los efectos del cambio
climático en los problemas de inundación
de la villa de La Almunia de Doña Godina
(Zaragoza)

423.13.90

Autor: **David Mendieta Redrado**
Director: **Beniamino Russo**
Fecha: **Diciembre 2015**

ÍNDICE DE CONTENIDO SIMPLE

1.RESUMEN	1
2.ABSTRACT.....	2
3.INTRODUCCIÓN.....	3
4.CONCEPTOS DE HIDROLOGÍA.....	7
5.ESTADÍSTICA HIDROLÓGICA	35
6.PRESENTACIÓN DE LOS DATOS DE PRECIPITACIÓN DISPONIBLES EN EL CASO DE ESTUDIO.....	42
7.ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS DE PRECIPITACIÓN DISPONIBLES.....	69
8.COEFICIENTES DE CAMBIO CLIMÁTICO EN LA VILLA DE LA ALMUNIA DE DOÑA GODINA.....	95
9.CONSTRUCCIÓN DE LA LLUVIAS DE PROYECTO.....	100
10.CREACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO EN HEC-HMS.....	108
11.MODELIZACIÓN MATEMÁTICA	153
12.CREACIÓN DEL MODELO HIDRÁULICO EN INFOWORKS RS.....	172
13.MARCO LEGISLATIVO.....	199
14.ESTADO DEL ARTE SOBRE CRITERIOS DE RIESGO A CONSIDERAR PARA EL FLUJO EN ZONA URBANA...202	
15.ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	210
16.CONCLUSIONES FINALES.....	242
17.BIBLIOGRAFÍA.....	244

ÍNDICE DE CONTENIDO COMPLETO

1.RESUMEN	1
2.ABSTRACT.....	2
3.INTRODUCCIÓN.....	3
3.1.JUSTIFICACIÓN.....	4
3.2.OBJETIVOS Y METODOLOGÍA.....	5
4.CONCEPTOS DE HIDROLOGÍA.....	7
4.1.HISTORIA DE LA HIDROLOGÍA.....	7
4.2.CICLO HIDROLÓGICO.....	9

4.2.1.Sistemas del ciclo hidrológico.....	10
4.3.PRECIPITACIÓN.....	10
4.3.1.La formación de la precipitación en las nubes.....	11
4.3.2.Tipos de lluvia.....	11
4.3.3.Registro de lluvia.....	12
4.3.4.Lluvia de proyecto.....	14
4.3.4.1.Análisis de datos de lluvia.....	14
4.3.4.2.Relaciones Intensidad-Duración-Frecuencia.....	15
4.3.4.2.1.Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia.....	16
4.3.4.2.2.Ecuaciones para las curvas IDF.....	16
4.3.4.2.3.Tormentas de proyecto usando las relaciones de las curvas IDF.....	17
4.3.4.3.Método del hietograma rectangular.....	18
4.3.4.4.Método del hietograma triangular.....	18
4.3.4.5.Tormenta Sifalda.....	19
4.3.4.6.Lluvia doble triángulo.....	19
4.3.4.7.Método de los bloques alternados.....	19
4.4.PÉRDIDAS DE PRECIPITACIÓN.....	20
4.4.1.Evaporación.....	21
4.4.2.Evapotranspiración.....	21
4.4.3.Interceptación.....	22
4.4.4.Almacenamiento en depresiones.....	22
4.4.5.Infiltración.....	22
4.5.CÁLCULO DE LAS PÉRDIDAS O ABSTRACCIONES.....	23
4.5.1.Método del SCS para abstracciones.....	23
4.6.TRANSFORMACIÓN LLUVIA-CAUDAL.....	25
4.6.1.El Hidrograma de caudal.....	25
4.6.2.El Hidrograma Unitario.....	27
4.6.2.1.Hidrograma Unitario Sintético.....	27
4.6.2.2.Hidrograma adimensional del SCS.....	28
4.7.PROPAGACIÓN DE CAUDALES.....	29
4.7.1.Propagación de sistemas agregados o hidrológicos.....	29
4.7.1.1.Método de Muskingum.....	31
4.7.2.Propagación distribuida o hidráulica.....	33
5. ESTADÍSTICA HIDROLÓGICA	35
5.1.CONCEPTOS BÁSICOS.....	35
5.2.DISTRIBUCIÓN DE LOS DATOS.....	36

5.2.1.Función de frecuencia relativa.....	36
5.2.2.Función de frecuencia acumulada.....	36
5.2.3.Función de densidad y probabilidad.....	36
5.2.4.Distribución simétricas y asimétricas.....	37
5.2.5.Distribución de probabilidad para las variables hidrológicas.....	37
5.2.5.1.Distribución de valores extremos.....	38
5.3.AJUSTES A UNA DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD.....	39
5.3.1.Método de los momentos.....	39
5.3.2.Método de la máxima verosimilitud.....	40
6.PRESENTACIÓN DE LOS DATOS DE PRECIPITACIÓN DISPONIBLES EN EL CASO DE ESTUDIO.....	42
6.1.SERIE TEMPORAL DE LLUVIA DE MÁXIMOS ANUALES EN 24 HORAS DE LA ALMUNIA DE DOÑA GODINA.....	42
6.1.1.Información pluviométrica.....	42
6.2.ESCENARIOS REGIONALIZADOS DE CAMBIO CLIMÁTICO PARA DATOS MENSUALES DE PRECIPITACIÓN.....	47
6.2.1.Escenarios-PNACC Datos mensuales.....	47
6.2.1.1.Nuevos escenarios de emisión: RCPs.....	49
6.2.1.2.Los escenarios climáticos regionalizados y el Plan Nacional de Adaptación al cambio climático.....	50
6.2.1.3.Proyecciones y escenarios climáticos.....	51
6.2.1.3.1.Modelos Globales del Clima.....	51
6.2.1.3.2.Regionalización de modelos globales: técnicas dinámicas y estadísticas.....	53
6.2.1.3.3.Consideraciones sobre la incertidumbre.....	56
6.2.1.4.Características de la colección Escenarios-PNACC Datos mensuales.....	56
6.2.1.4.1.Modelos Globales.....	56
6.2.1.4.2.Escenarios de emisión.....	57
6.2.1.4.3.Horizontes temporales de los escenarios.....	59
6.2.1.5.Catálogo de productos y proyecciones climáticas de Escenarios-PNACC Datos mensuales.....	59
6.2.1.5.1.Salida de los productos numéricos.....	60
6.2.1.5.2.Formato de los productos.....	61
6.2.2.Acceso y descarga de los datos.....	61
6.2.2.1.Fuente de los datos.....	61
6.2.2.2.Organización de la información.....	62
6.2.2.3.Nomenclatura de los ficheros.....	63
6.2.3.Proyecto fuente de datos: Proyecto Escena.....	64
7.ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS DE PRECIPITACIÓN DISPONIBLES.....	69
7.1.ANÁLISIS ESTADÍSTICO EN R.....	69
7.1.1.El entorno R.....	69
7.1.2.Ayuda incluida en programa.....	70

7.1.3.Salvar e iniciar sesiones anteriores.....	71
7.1.4.Primeras nociones: comandos, funciones y objetos.....	71
7.1.5.Permanencia de los datos y eliminación de objetos.....	72
7.1.6.Edición y ejecución de comandos desde ficheros editables: scripts.....	73
7.1.7.Librerías de R.....	73
7.1.8.Ventana de órdenes (consola).....	74
7.1.9.Interfaz gráfica (Rcommander).....	74
7.1.9.1.Instalación del paquete R-Commander.....	74
7.1.9.2.El entorno R-commander.....	78
7.1.9.3.Menús disponibles en Rcommander	79
7.1.9.4.Lectura de datos desde un fichero externo.....	81
7.2.ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA SERIE TEMPORAL DE LLUVIA DE MÁXIMOS ANUALES EN 24 HORAS DE LA ALMUNIA DE DOÑA GODINA.....	81
7.2.1.Conclusión.....	86
7.3.ANÁLISIS ESTADÍSTICO PARA LOS MÁXIMOS ANUALES DE PRECIPITACIÓN EN 24 HORAS DE LOS ESCENARIOS CLIMÁTICOS REGIONALIZADOS.....	86
7.3.1.Análisis individual de cada modelo regional del proyecto Escena.....	87
7.3.2.Análisis global de todos los modelos regionales del proyecto Escena.....	88
7.3.3.Análisis conjunto de los modelos regionales MM5 y PROMES del proyecto Escena.....	89
7.3.3.1.Escenario A2.....	89
7.3.3.2.Escenario A1B.....	91
7.3.3.3.Escenario B1.....	92
7.3.4.Conclusión.....	94
8.COEICIENTES DE CAMBIO CLIMÁTICO EN LA VILLA DE LA ALMUNIA DE DOÑA GODINA.....	95
9.CONSTRUCCIÓN DE LA LLUVIAS DE PROYECTO.....	100
9.1.LLUVIAS DE PROYECTO ACTUALES	100
9.2.LLUVIAS DE PROYECTO FUTURAS.....	102
10.CREACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO EN HEC-HMS.....	108
10.1.HERRAMIENTA PARA LA MODELIZACIÓN HIDROLÓGICA.....	108
10.1.1.Componentes de HEC-HMS.....	108
10.1.1.1.Componentes del modelo de la cuenca.....	109
10.1.1.1.1.Métodos de cálculo para subcuencas.....	110
10.1.1.2.Componentes del modelo meteorológico.....	111
10.1.1.3.Componentes de las especificaciones de control.....	111
10.1.1.4.Componentes de la entrada de datos.....	111
10.1.2.Interfaz de usuario.....	112

10.1.2.1.Explorador de cuenca.....	113
10.1.2.2.Editor de componentes.....	114
10.1.2.3.Registro de mensajes.....	114
10.1.2.4.Escritorio.....	114
10.2.DATOS DE ENTRADA DEL MODELO HIDROLÓGICO.....	115
10.2.1.Crear un proyecto nuevo en HEC-HMS.....	117
10.2.2.Crear datos de entrada.....	122
10.2.3.Modelo meteorológico	124
10.2.4.Especificaciones de control.....	126
10.2.5.CREACIÓN DE LA SIMULACIÓN.....	127
10.2.6.Resultados.....	129
10.2.6.1.Resultados correspondientes a las lluvias de proyecto actuales.....	129
10.2.6.2.Resultados correspondientes a las lluvias de proyecto futuras.....	139
11.MODELIZACIÓN MATEMÁTICA	153
11.1.INTRODUCCIÓN.....	153
11.1.1.El proceso de modelización.....	154
11.2.MODELIZACIÓN NUMÉRICA DE LA HIDRODINÁMICA DE RÍOS.....	155
11.2.1.Discretización espacial	156
11.2.1.1.Modelos unidimensionales.....	156
11.2.1.2.Modelos Cuasi-2D.....	157
11.2.1.3.Modelos bidimensionales.....	157
11.2.1.4.Modelos tridimensionales.....	157
11.3.FLUJO VARIABLE EN LÁMINA LIBRE.....	158
11.3.1.Introducción.....	158
11.3.2.Clasificación del flujo en lámina libre.....	159
11.4.ECUACIONES Y ESQUEMAS NUMÉRICOS.....	160
11.4.1.Ecuaciones de Saint Venant bidimensionales.....	160
11.4.2.Ecuaciones de Navier Stokes.....	162
11.5.INTEGRACIÓN VERTICAL DE LAS ECUACIONES DE REYNOLDS. ECUACIONES DEL FLUJO BIDIMENSIONAL EN LÁMINA LIBRE O ECUACIONES DE SAINT VENANT.....	165
11.5.1.Métodos y esquemas numéricos.....	168
11.5.1.1.Método de los volúmenes finitos.....	168
12.CREACIÓN DEL MODELO HIDRÁULICO EN INFOWORKS RS.....	172
12.1.INFORMACIÓN DE PARTIDA.....	172
12.1.1.Hidrogramas de Salida.....	172
12.1.2.Descarga de Datos.....	172

12.2.INFOWORKS RS.....	173
12.3.INTERFAZ GRÁFICA DE INFOWORKS RS.....	174
12.4.OBJETOS Y CAMPOS EN INFOWORKS RS.....	175
12.4.1.Tipos de objetos.....	176
12.4.1.1.Secciones.....	176
12.4.1.2.Nodos.....	176
12.4.1.3.Conexiones.....	177
12.4.1.4.Polígonos.....	178
12.4.1.5.Lineas de campañas de campo.....	178
12.5.METODOLOGÍA DE TRABAJO Y ESTRUCTURA DE INFOWORKS.....	179
12.6.INSERTAR MODELO DIGITAL DEL TERRENO (MDT).....	180
12.6.1.Creación de un temático para el MDT.....	181
12.7.CONTROL DE CAPAS DE LA RED.....	183
12.7.1.Ortofoto.....	184
12.7.2.Capa voids.....	184
12.8.CREACIÓN DEL POLÍGONO DE SIMULACIÓN 2D.....	185
12.8.1.Polígono de Rugosidad.....	188
12.9.CONDICIONES DE CONTORNO.....	189
12.10.CONEXIÓN 1D-2D.....	192
12.11.MALLADO BIDIMENSIONAL.....	194
12.12.VALIDACIÓN DEL MODELO.....	195
12.13.EJECUCIÓN DE LA SIMULACIÓN.....	195
13.MARCO LEGISLATIVO.....	199
14.ESTADO DEL ARTE SOBRE CRITERIOS DE RIESGO A CONSIDERAR PARA EL FLUJO EN ZONA URBANA... 202	
14.1.NIVEL DE SEGURIDAD DE UNA CALLE URBANA.....	202
14.2.ESTADO DEL ARTE RELATIVO A CRITERIOS DE RIESGO ASOCIADOS A ESCORRENTÍA EN MEDIO URBANO.....	202
14.3.CRITERIOS DE PELIGROSIDAD ADOPTADOS.....	208
15.ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	210
16.CONCLUSIONES FINALES.....	242
17.BIBLIOGRAFÍA.....	244

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

<i>Ilustración 1: Mapa topografía de la localidad de La Almunia de Doña Godina.....</i>	<i>3</i>
<i>Ilustración 2: Cuenca vertiente al núcleo urbano de La Almunia de Doña Godina, constituida por los barrancos de Fontellas y Cantalobos.....</i>	<i>4</i>
<i>Ilustración 3: Esquema del ciclo hidrológico.....</i>	<i>10</i>
<i>Ilustración 4: Frentes de aire</i>	<i>12</i>
<i>Ilustración 5: Pluviograma.....</i>	<i>13</i>
<i>Ilustración 6: Curva de masa de lluvia o pluviograma acumulado.....</i>	<i>13</i>
<i>Ilustración 7: Esquema representando el comportamiento hidrológico de una cuenca</i>	<i>14</i>
<i>Ilustración 8: Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia.....</i>	<i>16</i>
<i>Ilustración 9: Tormenta de proyecto triangular.....</i>	<i>18</i>
<i>Ilustración 10: Tormenta de proyecto tipo Sifalda.....</i>	<i>19</i>
<i>Ilustración 11: Tormenta de proyecto con lluvia en doble triángulo.....</i>	<i>19</i>
<i>Ilustración 12: Método de los bloque alternados.....</i>	<i>20</i>
<i>Ilustración 13: Variables que intervienen en el método del SCS para abstracciones. .</i>	<i>24</i>
<i>Ilustración 14: Solución del ecuación de escorrentía del SCS.....</i>	<i>24</i>
<i>Ilustración 15: Componentes de un hidrograma de tormenta.....</i>	<i>26</i>
<i>Ilustración 16: Separación de componentes en el hidrograma de tormenta.....</i>	<i>26</i>
<i>Ilustración 17: Hidrograma adimensional del SCS.....</i>	<i>28</i>
<i>Ilustración 18: Hidrograma unitario triangular del SCS.....</i>	<i>28</i>
<i>Ilustración 19: Relaciones entre caudal y almacenamiento.....</i>	<i>30</i>

<i>Ilustración 20: Tiempo de movimiento de una avenida.....</i>	<i>31</i>
<i>Ilustración 21: Almacenamiento por prisma y por cuña.....</i>	<i>32</i>
<i>Ilustración 22: Distribución asimétrica correspondiente a la ecuación de Gumbel.....</i>	<i>37</i>
<i>Ilustración 23: Modo en que el método de los momentos selecciona los valores para los parámetros de la función de densidad de probabilidad.....</i>	<i>40</i>
<i>Ilustración 24: Nuevos escenarios climáticos del AR5.....</i>	<i>49</i>
<i>Ilustración 25: Concentración de CO2 equivalente para distintos escenarios de emisión.....</i>	<i>50</i>
<i>Ilustración 26: Evoluciones de emisiones globales de CO2 a la atmósfera y evoluciones de las concentraciones globales de CO2 que resultarían de tales emisiones.....</i>	<i>52</i>
<i>Ilustración 27: Proyecciones mundiales de temperatura media para el siglo XXI según varios modelos globales del clima.....</i>	<i>53</i>
<i>Ilustración 28: Un modelo regional con tamaño de celdilla reducido</i>	<i>55</i>
<i>Ilustración 29: Emisiones de dióxido de carbono. Unidades en gigatoneladas de carbono (GtC/año).....</i>	<i>59</i>
<i>Ilustración 30: Rejilla regular de 0,2º utilizada en el proyecto Spain 02.....</i>	<i>60</i>
<i>Ilustración 31: 2.321 estaciones con datos de precipitación.....</i>	<i>61</i>
<i>Ilustración 32: Aspecto de la web de la AEMET.....</i>	<i>62</i>
<i>Ilustración 33: Acceso a los productos de Escenarios-PNACC Datos mensuales.....</i>	<i>62</i>
<i>Ilustración 34: Aspecto de Escenarios-PNACC Datos mensuales en la web de AEMET</i>	<i>63</i>
<i>Ilustración 35: grid0955 -1.4, 41.4, 659.928.....</i>	<i>64</i>

<i>Ilustración 36: Dominio espacial cubierto por cada uno de los modelos regionales de Escena.....</i>	<i>66</i>
<i>Ilustración 37: Ventana inicial de R.....</i>	<i>75</i>
<i>Ilustración 38: Instalación de paquetes en R.....</i>	<i>75</i>
<i>Ilustración 39: CRAN espejo en R.....</i>	<i>76</i>
<i>Ilustración 40: Paquete Rcmdr instalado.....</i>	<i>76</i>
<i>Ilustración 41: Cargar paquetes en R.....</i>	<i>77</i>
<i>Ilustración 42: Seleccionar paquete Rcmdr para cargar en R.....</i>	<i>77</i>
<i>Ilustración 43: Ventana de R-Commander</i>	<i>78</i>
<i>Ilustración 44: Subventanas de R-Commander.....</i>	<i>79</i>
<i>Ilustración 45: Barra de herramientas en la ventana de Rcommander.....</i>	<i>80</i>
<i>Ilustración 46: Importar datos en Rcommander.....</i>	<i>81</i>
<i>Ilustración 47: Nombrar conjunto de datos.....</i>	<i>82</i>
<i>Ilustración 48: Cargar paquete extRemes.....</i>	<i>82</i>
<i>Ilustración 49: Gráficas de la función de distribución de Valores Extremos General... </i>	<i>83</i>
<i>Ilustración 50: Gráficas de la función de distribución de Gumbel.....</i>	<i>85</i>
<i>Ilustración 51: Gráficas de la función de distribución de Valores Extremos General; Escenario A2.....</i>	<i>90</i>
<i>Ilustración 52: Gráficas de la función de distribución de Valores Extremos General; Escenario A1B.....</i>	<i>91</i>
<i>Ilustración 53: Gráficas de la función de distribución de Valores Extremos General; Escenario B1.....</i>	<i>93</i>

<i>Ilustración 54: Variación del coeficiente de cambio climático.....</i>	<i>96</i>
<i>Ilustración 55: Evolución del promedio de los Coeficientes de Cambio Climático para el horizonte 2050.....</i>	<i>99</i>
<i>Ilustración 56: Mapa para la estimación del Factor Regional.....</i>	<i>101</i>
<i>Ilustración 57: Curvas IDF Sintéticas.....</i>	<i>101</i>
<i>Ilustración 58: Lluvia de proyecto actual y futura para 1 hora ; T=10 años.....</i>	<i>103</i>
<i>Ilustración 59: Lluvia de proyecto actual y futura para 1 hora ; T=25 años.....</i>	<i>104</i>
<i>Ilustración 60: Lluvia de proyecto actual y futura para 1 hora ; T=100 años.....</i>	<i>104</i>
<i>Ilustración 61: Lluvia de proyecto actual y futura para 2 hora ; T=10 años.....</i>	<i>106</i>
<i>Ilustración 62: Lluvia de proyecto actual y futura para 2 hora ; T=25 años.....</i>	<i>106</i>
<i>Ilustración 63: Lluvia de proyecto actual y futura para 2 hora ; T=100 años.....</i>	<i>107</i>
<i>Ilustración 64: Componentes de HEC-HMS.....</i>	<i>109</i>
<i>Ilustración 65: Componentes hidrológicos.....</i>	<i>110</i>
<i>Ilustración 66: Interfaz de usuario de HEC-HMS.....</i>	<i>113</i>
<i>Ilustración 67: Explorador de cuenca.....</i>	<i>114</i>
<i>Ilustración 68: Ejemplo de editor de componente de un modelo de cuenca.....</i>	<i>114</i>
<i>Ilustración 69: Cuenca de estudio.....</i>	<i>115</i>
<i>Ilustración 70: Crear proyecto nuevo.....</i>	<i>117</i>
<i>Ilustración 71: Seleccionar los métodos de cálculo por defecto.....</i>	<i>117</i>
<i>Ilustración 72: Crear modelo de cuenca.....</i>	<i>118</i>
<i>Ilustración 73: Mapa de fondo cargado en la ventana Escritorio.....</i>	<i>118</i>

<i>Ilustración 74: Explorador de cuenca.....</i>	<i>119</i>
<i>Ilustración 75: Conexión de los elementos hidrológicos.....</i>	<i>120</i>
<i>Ilustración 76: Subbasin Area.....</i>	<i>120</i>
<i>Ilustración 77: Curve Number Loss.....</i>	<i>121</i>
<i>Ilustración 78: SCS Transform.....</i>	<i>121</i>
<i>Ilustración 79: Muskingum Routing.....</i>	<i>121</i>
<i>Ilustración 80: Time-Series Data Manager.....</i>	<i>122</i>
<i>Ilustración 81: Propiedades pluviómetro.....</i>	<i>123</i>
<i>Ilustración 82: Time Window para lluvias de proyecto de 1 hora.....</i>	<i>123</i>
<i>Ilustración 83: Time Window para lluvias de proyecto de 2 hora.....</i>	<i>124</i>
<i>Ilustración 84: Lluvia de proyecto actual para 1 hora; T= 10 años.....</i>	<i>124</i>
<i>Ilustración 85: Meteorologic Models.....</i>	<i>125</i>
<i>Ilustración 86: Pestaña Meteorology Model.....</i>	<i>125</i>
<i>Ilustración 87: Control Specifications.....</i>	<i>126</i>
<i>Ilustración 88: Control 1.....</i>	<i>126</i>
<i>Ilustración 89: Crear simulación.....</i>	<i>127</i>
<i>Ilustración 90: Simulación. Selección Step 2.....</i>	<i>127</i>
<i>Ilustración 91: Simulación. Selección Step 3.....</i>	<i>128</i>
<i>Ilustración 92: Simulación. Selección Step 4.....</i>	<i>128</i>
<i>Ilustración 93: Respuesta hidrológica Subcuenca1 para T=10.....</i>	<i>129</i>
<i>Ilustración 94: Respuesta hidrológica Subcuenca1 para T=25.....</i>	<i>130</i>

<i>Ilustración 95: Respuesta hidrológica Subcuenca1 para T=100.....</i>	<i>130</i>
<i>Ilustración 96: Respuesta hidrológica Subcuenca 2 para T=10.....</i>	<i>131</i>
<i>Ilustración 97: Respuesta hidrológica Subcuenca 2 para T=25.....</i>	<i>132</i>
<i>Ilustración 98: Respuesta hidrológica Subcuenca 2 para T=100.....</i>	<i>132</i>
<i>Ilustración 99: Respuesta hidrológica Subcuenca 3 para T=10.....</i>	<i>133</i>
<i>Ilustración 100: Respuesta hidrológica Subcuenca 3 para T=25.....</i>	<i>134</i>
<i>Ilustración 101: Respuesta hidrológica Subcuenca 3 para T=100.....</i>	<i>134</i>
<i>Ilustración 102: Respuesta hidrológica Subcuenca 4 para T=10.....</i>	<i>135</i>
<i>Ilustración 103: Respuesta hidrológica Subcuenca 4 para T=25.....</i>	<i>136</i>
<i>Ilustración 104: Respuesta hidrológica Subcuenca 4 para T=100.....</i>	<i>136</i>
<i>Ilustración 105: Respuesta hidrológica Subcuenca 5 para T=10.....</i>	<i>137</i>
<i>Ilustración 106: Respuesta hidrológica Subcuenca 5 para T=25.....</i>	<i>138</i>
<i>Ilustración 107: Respuesta hidrológica Subcuenca 5 para T=100.....</i>	<i>138</i>
<i>Ilustración 108: Respuesta hidrológica Subcuenca 1 para T=10.....</i>	<i>139</i>
<i>Ilustración 109: Respuesta hidrológica Subcuenca 1 para T=25.....</i>	<i>140</i>
<i>Ilustración 110: Respuesta hidrológica Subcuenca 1 para T=100.....</i>	<i>140</i>
<i>Ilustración 111: Respuesta hidrológica Subcuenca 2 para T=10.....</i>	<i>141</i>
<i>Ilustración 112: Respuesta hidrológica Subcuenca 2 para T=25.....</i>	<i>142</i>
<i>Ilustración 113: Respuesta hidrológica Subcuenca 2 para T=100.....</i>	<i>142</i>
<i>Ilustración 114: Respuesta hidrológica Subcuenca 3 para T=10.....</i>	<i>143</i>
<i>Ilustración 115: Respuesta hidrológica Subcuenca 3 para T=25.....</i>	<i>144</i>

<i>Ilustración 116: Respuesta hidrológica Subcuenca 3 para T=100.....</i>	<i>144</i>
<i>Ilustración 117: Respuesta hidrológica Subcuenca 4 para T=10.....</i>	<i>145</i>
<i>Ilustración 118: Respuesta hidrológica Subcuenca 4 para T=25.....</i>	<i>146</i>
<i>Ilustración 119: Respuesta hidrológica Subcuenca 4 para T=100.....</i>	<i>146</i>
<i>Ilustración 120: Respuesta hidrológica Subcuenca 5 para T=10.....</i>	<i>147</i>
<i>Ilustración 121: Respuesta hidrológica Subcuenca 5 para T=25.....</i>	<i>148</i>
<i>Ilustración 122: Respuesta hidrológica Subcuenca 5 para T=100.....</i>	<i>148</i>
<i>Ilustración 123: Respuesta hidrológica en el punto de desagüe para T=10.....</i>	<i>149</i>
<i>Ilustración 124: Respuesta hidrológica en el punto de desagüe para T=25.....</i>	<i>150</i>
<i>Ilustración 125: Respuesta hidrológica en el punto de desagüe para T=100.....</i>	<i>150</i>
<i>Ilustración 126: Respuesta hidrológica en el punto de desagüe. Hipótesis Futura, T=10</i>	<i>151</i>
<i>Ilustración 127: Respuesta hidrológica en el punto de desagüe. Hipótesis Futura, T=25</i>	<i>152</i>
<i>Ilustración 128: Respuesta hidrológica en el punto de desagüe. Hipótesis Futura, T=100.....</i>	<i>152</i>
<i>Ilustración 129: El cálculo de la velocidad promedio de un viaje particular de un automóvil es un modelo matemático.....</i>	<i>154</i>
<i>Ilustración 130: Un modelo gráfico de un proceso de modelización.....</i>	<i>155</i>
<i>Ilustración 131: Malla 2D estructurada en el cauce y no estructurada en llanuras (izqda) y 3D (dcha).....</i>	<i>158</i>

<i>Ilustración 132: Velocidad promedio en la vertical y se desprecia la componente z.</i>	166
<i>Ilustración 133: Tipos de malla: a) Malla en una dimensión, b) Malla estructurada en dos dimensiones, c) Malla no estructurada en dos dimensiones.</i>	169
<i>Ilustración 134: Generación de mallas: a) Malla triangular original, b) Volúmenes finitos tipo celda, c) Volúmenes finitos tipo vértice, d) Volúmenes finitos tipo arista.</i>	171
<i>Ilustración 135: Función base asociada a cada volumen finito.</i>	171
<i>Ilustración 136: Interfaz gráfica de InfoWorks RS.</i>	174
<i>Ilustración 137: Metodología de trabajo de InfoWorks.</i>	179
<i>Ilustración 138: Explorador de InfoWorks</i>	180
<i>Ilustración 139: Selección de Base de Datos Maestra creada y Local Root.</i>	180
<i>Ilustración 140: Importación MDT.</i>	181
<i>Ilustración 141: Parámetros MDT.</i>	181
<i>Ilustración 142: Visualización del MDT sobre el Geoplan.</i>	182
<i>Ilustración 143: Ventana Temáticos GeoPlan.</i>	182
<i>Ilustración 144: Vista tridimensional del MDT. Escala vertical 3:1.</i>	183
<i>Ilustración 145: Control de Capas.</i>	183
<i>Ilustración 146: Visualización de la Ortofoto (hoja 410 del MTN50) sobre el Geoplan.</i>	184
<i>Ilustración 147: Insertar la capa con los voids.</i>	185
<i>Ilustración 148: Visualización de la capa de Voids sobre el Geoplan.</i>	185

<i>Ilustración 149: Cración del Polígono de simulación 2D.....</i>	<i>186</i>
<i>Ilustración 150: Visualización del Polígono de simulación 2D sobre el Geoplan.....</i>	<i>186</i>
<i>Ilustración 151: Parámetros Polígono de Simulación 2D.....</i>	<i>187</i>
<i>Ilustración 152: Zona de Rugosidad para Suelo Urbano.....</i>	<i>188</i>
<i>Ilustración 153: Polígono de Rugosidad (en verde) para suelo urbano sobre el Geoplan.....</i>	<i>189</i>
<i>Ilustración 154: Contorno 2D en la sección correspondiente a la Carretera de Tenerías.</i>	<i>190</i>
<i>Ilustración 155: Ventana de propiedades de las Condiciones de Contorno 2D.....</i>	<i>190</i>
<i>Ilustración 156: Condición de Contorno correspondiente al Hidrograma Actual T=100 años.....</i>	<i>191</i>
<i>Ilustración 157: Parámetros generales de las condiciones de contorno.....</i>	<i>192</i>
<i>Ilustración 158: Parámetros de la conexión 1D-2D.....</i>	<i>193</i>
<i>Ilustración 159: Ubicación y visualización de Conexión 1D-2D sobre el Geoplan.....</i>	<i>193</i>
<i>Ilustración 160: Polígono de simulación de malla 2D.....</i>	<i>194</i>
<i>Ilustración 161: Validación de la Red.....</i>	<i>195</i>
<i>Ilustración 162: Ventana del diálogo de la simulación.....</i>	<i>196</i>
<i>Ilustración 163: Ventana del diálogo de la simulación.....</i>	<i>197</i>
<i>Ilustración 164: Información de la simulación.....</i>	<i>198</i>
<i>Ilustración 165: Representación de las condiciones hidráulicas (velocidad y calado) que han generado situaciones de peligrosidad media y alta, definición de la función de</i>	

ÍNDICES

<i>seguridad ($V \cdot Y \leq 0.2$) y representación del criterio de seguridad habitual para personas ($V \cdot Y \leq 0.5$).....</i>	<i>206</i>
<i>Ilustración 166: Criterios de riesgo para flujo en calles.....</i>	<i>207</i>
<i>Ilustración 167: Superficie inundable para hipótesis actual y futura; T=10 años.....</i>	<i>211</i>
<i>Ilustración 168: Superficie inundable para hipótesis actual y futura; T=25 años.....</i>	<i>212</i>
<i>Ilustración 169: Superficie inundable para hipótesis actual y futura; T=100 años..</i>	<i>213</i>
<i>Ilustración 170: Mapa de peligrosidad de calado para la hipótesis Actual; T=10 años.</i>	<i>214</i>
<i>Ilustración 171: Mapa de peligrosidad de calado para la hipótesis Futura; T=10 años.</i>	<i>215</i>
<i>Ilustración 172: Mapa de peligrosidad de calado para la hipótesis Actual; T=25 años.</i>	<i>216</i>
<i>Ilustración 173: Mapa de peligrosidad de calado para la hipótesis Futura; T=25 años.</i>	<i>217</i>
<i>Ilustración 174: Mapa de peligrosidad de calado para la hipótesis Actual; T=100 años.</i>	<i>218</i>
<i>Ilustración 175: Mapa de peligrosidad de calado para la hipótesis Futura; T=100 años.</i>	<i>219</i>
<i>Ilustración 176: Rango de valores en m/s para la temática de velocidad.....</i>	<i>221</i>
<i>Ilustración 177: Mapa de peligrosidad de velocidad para la hipótesis Actual; T=10 años.....</i>	<i>222</i>
<i>Ilustración 178: Mapa de peligrosidad de velocidad para la hipótesis Futura; T=10 años.....</i>	<i>223</i>

<i>Ilustración 179: Mapa de peligrosidad de velocidad para la hipótesis Actual; T=25 años.....</i>	<i>224</i>
<i>Ilustración 180: Mapa de peligrosidad de velocidad para la hipótesis Futura; T=25 años.....</i>	<i>225</i>
<i>Ilustración 181: Mapa de peligrosidad de velocidad para la hipótesis Actual; T=100 años.....</i>	<i>226</i>
<i>Ilustración 182: Mapa de peligrosidad de velocidad para la hipótesis Futura; T=100 años.....</i>	<i>227</i>
<i>Ilustración 183: Mapa de peligrosidad del producto Calado-Velocidad para la hipótesis Actual; T=25 años.....</i>	<i>229</i>
<i>Ilustración 184: Mapa de peligrosidad del producto Calado-Velocidad para la hipótesis Futura; T=25 años.....</i>	<i>230</i>
<i>Ilustración 185: Mapa de peligrosidad del producto Calado-Velocidad para la hipótesis Actual; T=100 años.....</i>	<i>231</i>
<i>Ilustración 186: Mapa de peligrosidad del producto Calado-Velocidad para la hipótesis Futura; T=100 años.....</i>	<i>232</i>
<i>Ilustración 187: Puntos de análisis.....</i>	<i>234</i>
<i>Ilustración 188: Representación de las condiciones hidráulicas (velocidad y calado) de los puntos de análisis para T=10 años.....</i>	<i>237</i>
<i>Ilustración 189: Representación de las condiciones hidráulicas (velocidad y calado) de los puntos de análisis para T=25 años.....</i>	<i>237</i>
<i>Ilustración 190: Representación de las condiciones hidráulicas (velocidad y calado) de los puntos de análisis para T=100 años.....</i>	<i>238</i>

ÍNDICES

<i>Ilustración 191: Punto de Análisis 2 para T=10 años. (Actual Izqda. y Futura Dcha.)</i>	239
<i>Ilustración 192: Punto de Análisis 2 para T=25 años. (Actual Izqda. y Futura Dcha.)</i>	239
<i>Ilustración 193: Punto de Análisis 2 para T=100 años. (Actual Izqda. y Futura Dcha.)</i>	240
<i>Ilustración 194: Punto de Análisis 15 para T=10 años. (Actual Izqda. y Futura Dcha.)</i>	240
<i>Ilustración 195: Punto de Análisis 15 para T=25 años. (Actual Izqda. y Futura Dcha.)</i>	241
<i>Ilustración 196: Punto de Análisis 15 para T=100 años. (Actual Izqda. y Futura Dcha.)</i>	241

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1: Datos pluviométricos registrados en la estación meteorológica de la Almunia de Doña Godina para el año 2014.</i>	45
<i>Tabla 2: Máxima precipitación anual en 24 horas.</i>	46
<i>Tabla 3: Ventajas y desventajas de los métodos de regionalización.</i>	55
<i>Tabla 4: Características de los modelos globales.</i>	57
<i>Tabla 5: Matriz de proyecciones de Escena con las distintas combinaciones GCM/RCM</i>	65

<i>Tabla 6: Características de los modelos regionales de ESCENA</i>	<i>67</i>
<i>Tabla 7: Precipitación máxima en 24 h estimada para la serie de lluvias registradas. 86</i>	
<i>Tabla 8: Máxima precipitación estimada en 24 horas considerando el RCM: PROMES 87</i>	
<i>Tabla 9: Máxima precipitación estimada en 24 horas considerando el RCM: MM5.....87</i>	
<i>Tabla 10: Máxima precipitación estimada en 24 horas considerando el RCM: REMO.. 88</i>	
<i>Tabla 11: Máxima precipitación estimada en 24 horas considerando el RCM: WRF-A. 88</i>	
<i>Tabla 12: Máxima precipitación estimada en 24 horas considerando el RCM: WRF-B. 88</i>	
<i>Tabla 13: Máxima precipitación estimada en 24 horas considerando de forma global los RCMs.....89</i>	
<i>Tabla 14: Máxima precipitación estimada en 24 horas considerando los RCM: MM5 y PROMES de forma conjunta.....94</i>	
<i>Tabla 15: Precipitación máxima anual en 24 h estimada para los escenarios climáticos.94</i>	
<i>Tabla 16: Intensidad media diaria estimada para la serie de lluvias registradas.....95</i>	
<i>Tabla 17: Intensidad media diaria estimada para los escenarios climáticos.....95</i>	
<i>Tabla 18: Coeficiente de cambio climático96</i>	
<i>Tabla 19: Porcentaje de variación de intensidad media diaria.....96</i>	
<i>Tabla 20: Porcentaje de variación de intensidad media diaria para el análisis global de RCMs.....97</i>	
<i>Tabla 21: Porcentaje de variación de intensidad media diaria para el RCM: PROMES. 97</i>	
<i>Tabla 22: Porcentaje de variación de intensidad media diaria para el RCM: MM5.....97</i>	
<i>Tabla 23: Porcentaje de variación de intensidad media diaria para el RCM: REMO.....97</i>	

<i>Tabla 24: Porcentaje de variación de intensidad media diaria para el RCM: WRF-A..</i>	<i>98</i>
<i>Tabla 25: Porcentaje de variación de intensidad media diaria para el RCM: WRF-B..</i>	<i>98</i>
<i>Tabla 26: Promedio de los Coeficientes de Cambio Climático para cada caso de estudio analizado.....</i>	<i>98</i>
<i>Tabla 27: Datos de entrada para la elaboración de las Curvas IDF Sintéticas.....</i>	<i>100</i>
<i>Tabla 28: Método bloques alternados para las lluvias de proyecto actuales y futuras de duración 1 hora.....</i>	<i>103</i>
<i>Tabla 29: Método bloques alternados para las lluvias de proyecto actuales y futuras de duración 2 hora.....</i>	<i>105</i>
<i>Tabla 30: Componentes de los datos de entrada.....</i>	<i>112</i>
<i>Tabla 31: Parámetros topográficos e hidrológicos de cada subcuenca.....</i>	<i>116</i>
<i>Tabla 32: Datos característicos de los tramos de cauce donde se realiza la propagación.....</i>	<i>116</i>
<i>Tabla 33: Resultados Subcuenca 1.....</i>	<i>129</i>
<i>Tabla 34: Resultados Subcuenca 2.....</i>	<i>131</i>
<i>Tabla 35: Resultados Subcuenca 3.....</i>	<i>133</i>
<i>Tabla 36: Resultados Subcuenca 4.....</i>	<i>135</i>
<i>Tabla 37: Resultados Subcuenca 5.....</i>	<i>137</i>
<i>Tabla 38: Resultados Subcuenca 1.....</i>	<i>139</i>
<i>Tabla 39: Resultados Subcuenca 2.....</i>	<i>141</i>
<i>Tabla 40: Resultados Subcuenca 3.....</i>	<i>143</i>
<i>Tabla 41: Resultados Subcuenca 4.....</i>	<i>145</i>

<i>Tabla 42: Resultados Subcuenca 5.....</i>	<i>147</i>
<i>Tabla 43: Resultados Punto de desagüe.....</i>	<i>149</i>
<i>Tabla 44: Resultados Punto de desagüe</i>	<i>151</i>
<i>Tabla 45: Criterio de riesgo de calado máximo: referencias a nivel mundial.....</i>	<i>203</i>
<i>Tabla 46: Criterio de riesgo de velocidad máxima: referencias a nivel mundial.....</i>	<i>204</i>
<i>Tabla 47: Criterios de riesgo basados en la consideración conjunta de calados y velocidades.....</i>	<i>205</i>
<i>Tabla 48: Superficie inundada para las hipótesis Actual y Futura para cada período de retorno.</i>	<i>213</i>
<i>Tabla 49: Resultados de los Puntos de Análisis; T=10 años.....</i>	<i>235</i>
<i>Tabla 50: Resultados de los Puntos de Análisis; T=25 años.....</i>	<i>235</i>
<i>Tabla 51: Resultados de los Puntos de Análisis; T=100 años.....</i>	<i>236</i>
<i>Tabla 52: Evaluación (%) de los efectos del cambio climático.....</i>	<i>243</i>

1. RESUMEN

Las inundaciones en España constituyen el riesgo natural que a lo largo del tiempo ha producido los mayores daños tanto materiales como en pérdida de vidas humanas. La *Directiva 2007/60/CE* relativa a la evaluación y gestión de los riesgos de inundación considera que las inundaciones son fenómenos naturales que no pueden evitarse. No obstante, algunas actividades humanas y el cambio climático están contribuyendo a aumentar las probabilidades de que ocurran, así como su impacto negativo.

Las emisiones mundiales del GEI por efecto de actividades humanas han aumentado, en un 70% entre 1970 y 2004 y las concentraciones atmosféricas mundiales del CO₂, metano y óxido nitroso han aumentado desde 1750. En un contexto de alta incertidumbre acerca de las variables hidro-climáticas, se ha decidido evaluar el efecto del cambio climático en los problemas de inundación de la villa de La Almunia de Doña Godina (Zaragoza) en el marco del proyecto *Escena* para el horizonte 2050.

La ocurrencia de eventos extremos de lluvia, en ocasiones provoca que el sistema de drenaje sea incapaz de evacuar la escorrentía superficial. El resultado es una inundación de la zona urbana, causando problemas de circulación para vehículos y personas, daños materiales, e incluso la pérdida de vidas humanas. En este contexto, es clara la necesidad de contar con herramientas numéricas para reproducir eventos extremos de lluvia y analizar el comportamiento hidrológico e hidráulico.

Por ello el objetivo del presente Trabajo Fin de Grado es crear en primer lugar el modelo hidrológico a través del software HEC-HMS de los barrancos de Fontellas y Cantalobos causantes de los problemas de inundación en la villa y posteriormente un modelo bidimensional en InfoWorks RS para analizar el comportamiento hidráulico en el Casco Antiguo de La Almunia de Doña Godina para los periodos de retorno 10, 25 y 100 años.

Palabras clave: *escenario climático regionalizado - modelización hidrológica - modelización hidráulico en 2D - inundación - peligrosidad por un inundación*

2. ABSTRACT

Floods in Spain are the natural risk that over time has produced the highest both material damage and loss of lives. Directive 2007/60 / EC on the assessment and management of flood hazards considers that floods are a natural phenomena that can not be avoided. However, some human activities and climate change contribute to increase the odds of their occurrence and their negative impact.

Global GHG emissions due to human activities have grown by 70% between 1970 and 2004 and global atmospheric concentrations of CO₂, methane and nitrous oxide have increased since 1750. In a context of high uncertainty about hydroclimatic variables, it has been decided to evaluate the effect of climate change on flooding problems in the town of La Almunia de Doña Godina (Zaragoza) for the Scene project for 2050.

The occurrence of extreme rainfall events, sometimes causes the incapacity of drainage systems to evacuate surface runoff. The result are floodings in urban areas, that cause traffic problems for vehicles and people, property damage and even the loss of human lives. In this context, it is clear the need for numerical tools to render extreme rainfall events and analyze the hydrologic and hydraulic behavior.

Therefore the objective of this Final Project is to create in the first place the hydrological models of the Fontellas and Cantalobos ravines that cause flooding problems in the village with the HEC-HMS software and then a two-dimensional model with InfoWorks RS to analyze the hydraulic behavior in the Old Town of La Almunia de Doña Godina referred to the return periods of 10, 25 and 100 years.

Keywords: *regional climate model - hydrologic modeling - 2D hydraulic modeling - flood - flood hazard*

3. INTRODUCCIÓN

El término municipal de La Almunia de Doña Godina es la capital de la comarca del Valdejalón, en la provincia de Zaragoza, y forma parte de la Cuenca Hidrográfica del Ebro. Tiene una población cercana a los 8000 habitantes.

La mayor parte de la ocupación del suelo del municipio se debe a usos agrícolas, correspondiendo a la ocupación de suelo urbano, tanto de uso residencial como industrial, una parte inferior.

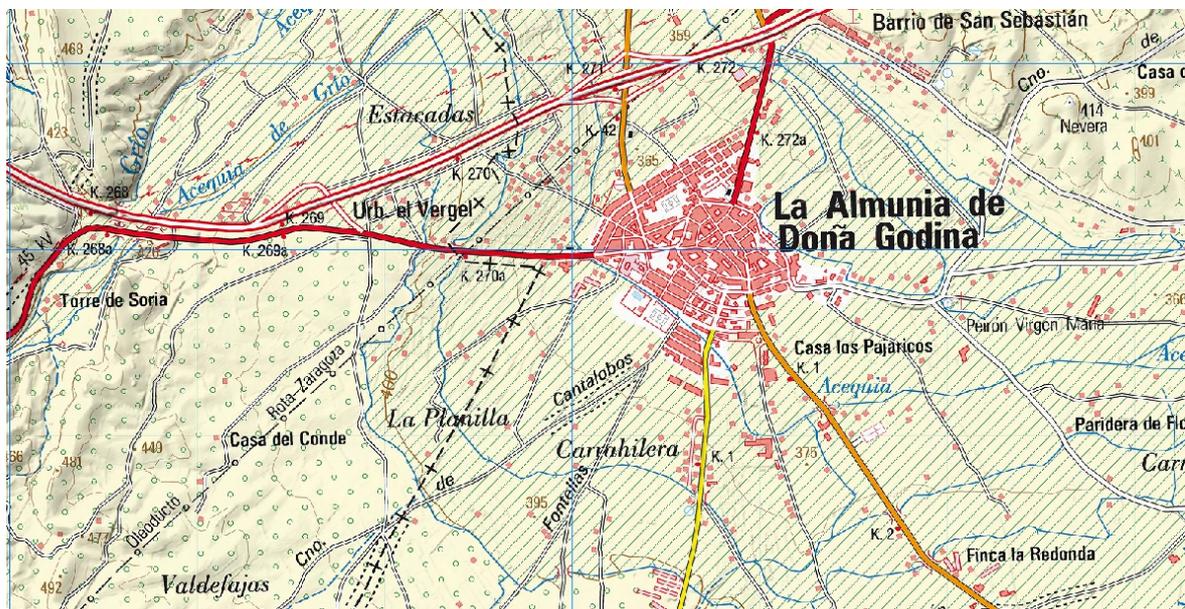


Ilustración 1: Mapa topografía de la localidad de La Almunia de Doña Godina

A la hora de estudiar los problemas de inundación se hace énfasis en el casco urbano de la localidad, donde vierte la cuenca formada por los barrancos de Fontellas y Cantalobos (ver Ilustración 2), cuyo punto de desagüe se encuentra en la Carretera de Tenerías. Se trata de una cuenca efímera que produce escorrentía superficial únicamente en eventos extremos de lluvia. Los factores causantes de los problemas de inundación de la villa son la cercanía del punto de desagüe de los barrancos, el inadecuado dimensionamiento de la red de drenaje, y la inexistencia de infraestructuras que permitan la regulación. Uno de los eventos con mayores consecuencias que se recuerda es el ocurrido el día 18 de julio de 1999, en el que se vieron afectadas las infraestructuras municipales, así como numerosas calles donde se inundaron viviendas, locales y garajes. Según diversas fuentes el agua alcanzó en

algunos puntos más de 1 metro de agua y se produjeron daños graves en cultivos e infraestructura agraria.

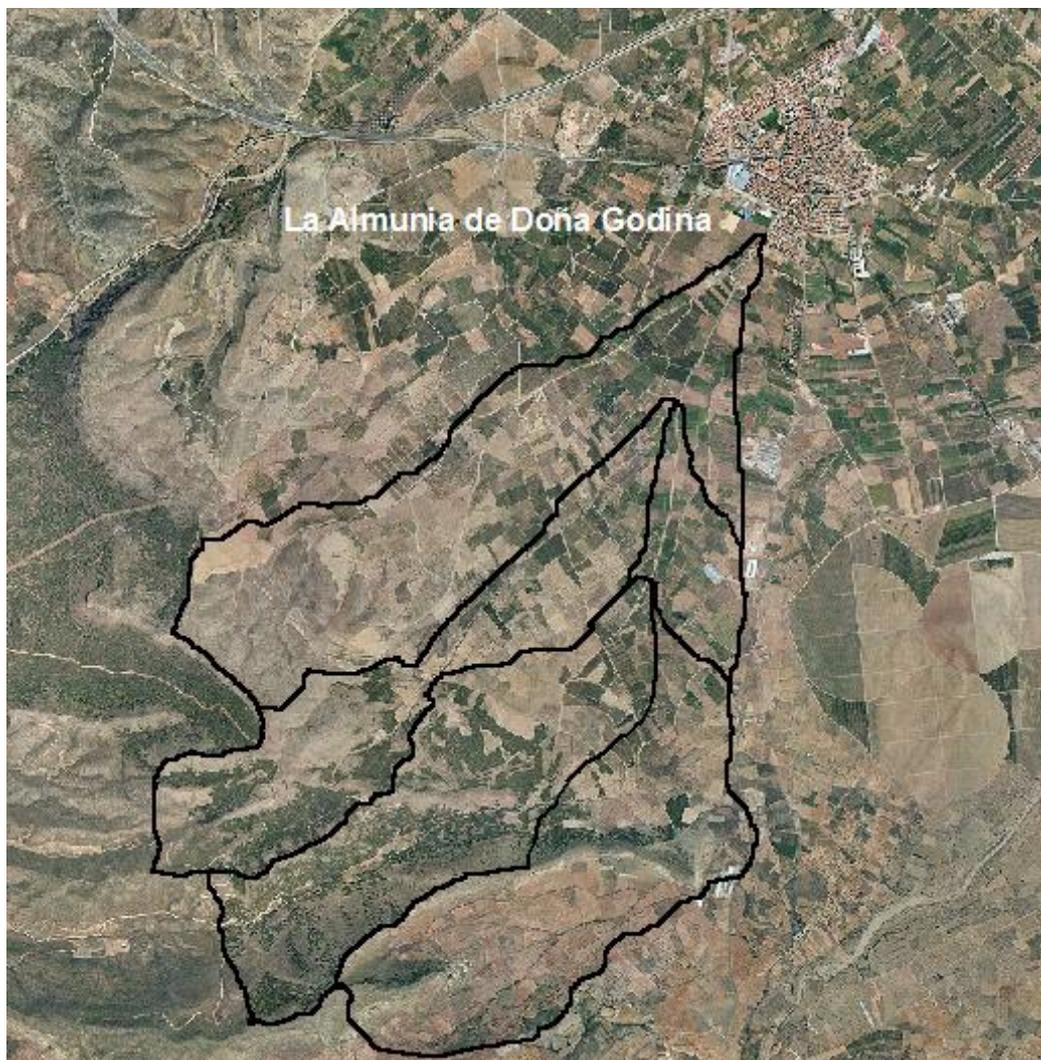


Ilustración 2: Cuenca vertiente al núcleo urbano de La Almunia de Doña Godina, constituida por los barrancos de Fontellas y Cantalobos.

3.1. JUSTIFICACIÓN

El clima constituye unos de los recursos naturales de la Tierra que posee la propiedad de restablecer los elementos climáticos. Cualquier cambio del clima repercute sobre la naturaleza y la sociedad. Por ello el cambio climático está referido a la alteración del clima con respecto al historial climático mundial o regional e involucra a diversos parámetros meteorológicos como temperatura, precipitación, presión

atmosférica, nubosidad, aumento en el nivel del mar y variaciones en la ocurrencia de eventos extremos del clima como sequías, inundaciones y tormentas tropicales. El cambio climático se debe tanto a causas naturales como antropogénicas, aunque en la actualidad el término cambio climático se suele referir al cambio por causa humanas. Las emisiones mundiales de GEI por efecto de actividades humanas han aumentado, desde la era preindustrial, en un 70% entre 1970 y 2004 y las concentraciones atmosféricas mundiales del CO₂, metano y óxido nitroso han aumentado desde 1750 (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, 2007).

En este contexto, se ha decidido evaluar los efectos del cambio climático sobre eventos extremos de lluvia a nivel regional en la villa de La Almunia de Doña Godina. Para evaluar esta alteración del clima a nivel regional se han empleado los resultados de la regionalización dinámica de escenarios del AR4 llevados a cabo en el marco del proyecto *Escena* (Fernández et al., s. f.) para el horizonte 2050. Los escenarios regionalizados de cambio climático cubren tres escenarios de emisiones *A1B*, *A2* y *B1* (Intergovernmental Panel on Climate Change, Intergovernmental Panel on Climate Change, & Working Group III, 2000).

Como resultado se obtienen los *Coefficientes de Cambio Climático* para la villa de La Almunia de Doña Godina para los períodos de retorno de 10, 25 y 100 años. Los coeficientes se emplearán para realizar y actualizar la evaluación de los riesgos de inundación de la villa de acuerdo con los requerimientos de la *Directiva 2007/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo*, relativa a la evaluación y gestión de los riesgos de inundación, hoy en día transpuesta por el *Real Decreto 903/2010*, de evaluación y gestión de riesgos de inundación.

Por lo tanto el objetivo principal del proyecto es analizar el comportamiento hidrológico e hidráulico para los escenarios actuales y los escenarios futuros derivados del cambio climático en los problemas de inundación de la villa de La Almunia de Doña Godina.

3.2. OBJETIVOS Y METODOLOGÍA

El primer paso del Trabajo Fin de Grado es realizar el análisis estadístico de valores extremos de las proyecciones de precipitación del clima futuro sobre el dominio de estudio para el horizonte 2050. Para ello se utiliza el software estadístico *R*, estimando así las máximas precipitaciones en 24 horas para los escenarios actuales

y futuros para los periodos de retorno 10, 25 y 100 años.

Una vez realizado el análisis estadístico ya se pueden obtener los *Coefficientes de Cambio Climático* aplicando la siguiente expresión (Arnbjerg-Nielsen, 2012):

$$c_f = \frac{I(T, d)_{Futuro}}{I(T, d)_{Presente}}$$

A continuación se actualizan las Curvas IDF con la expresión propuesta por la Dirección General de Carreteras y se construyen las lluvias de proyecto para el escenario Actual con el método de los bloques alternados. Aplicando los *Coefficientes de Cambio Climático* sobre las intensidades de la lluvia de proyecto del escenario Actual se obtienen las lluvias de proyecto para el escenario Futuro.

Las lluvias de proyecto de los escenarios Actual y Futuro serán los datos de entrada para el modelo hidrológico que se definirá con el software *HEC-HMS*; dando como resultado del análisis hidrológico los Hidrogramas de Salida (para los periodos de retorno 10, 25 y 100 años) de la cuenca formada por los barrancos de Fontellas y Cantalobos que vierten en el núcleo urbano de La Almunia de Doña Godina (en la Carretera de Tenerías).

Los Hidrogramas de Salida de la cuenca son los datos de entrada del modelo hidráulico bidimensional que se define con el software *InfoWorks RS* desarrollado por Wallingford Software (MWH Soft). *InfoWorks RS* utiliza el método de volúmenes finitos para resolver las ecuaciones de Saint Venant bidimensionales en régimen variable.

A continuación se adoptarán los criterios de peligrosidad que se aplican a la hora de elaborar los Mapas de Peligrosidad para los escenarios Actual y Futuro con el software *GvSIG*. Las variables hidráulicas que se analizan son el *Calado*, *Velocidad* y el producto de estas dos.

Por último, en el análisis de las variables hidráulicas, se determinan las zonas de riesgo para la estabilidad de las personas en flujos de agua para los escenarios Actual y Futuro.

4. CONCEPTOS DE HIDROLOGÍA

4.1. HISTORIA DE LA HIDROLOGÍA

La idea del *Ciclo Hidrológico*, que parece tan intuitiva, durante siglos no fue comprendida por filósofos y científicos, creyendo que el ciclo se realizaba al revés: el agua penetraba en la corteza desde el fondo de los océanos, se almacenaba en la profundidad, en grandes cavernas, y ascendía después por el calor de la Tierra hasta las partes altas de las montañas, surgiendo en las zonas de nacimiento de los ríos.

- **En la antigüedad:**

Muchos pensadores especularon acerca de la circulación del agua, ya que no tenían bases científicas, sin embargo el filósofo griego *Anaxágoras de Clazomene* (500-428 a. C.) ideó una versión primitiva del ciclo hidrológico. Un avance con respecto a esta teoría fue la realizada por el filósofo griego, *Teofrasto* (372-287 a. C.), quien describió el ciclo hidrológico en la atmósfera de forma correcta.

Las civilizaciones asiáticas desarrollaron un pensamiento independiente, los chinos registraron observaciones de lluvia, nieve y viento en el oráculo de huesos de Anyang hacia el año 1200 a. C. En la India, las primeras mediciones cuantitativas de lluvia datan de la segunda parte del siglo IV a. C. El concepto de ciclo hidrológico dinámico pudo haber surgido en China hacia el año 900 a. C., en la India hacia el año 400 a. C. , y en Persia sobre el siglo X.

- **En el siglo XVI y mediados del XVII:**

En el Renacimiento, *Tales*, *Platón*, *Aristóteles* (1571-1630) y *Descartes* (1644) aceptaron la idea del Ciclo al revés, y dedicaron obras completas a la descripción de esta hipótesis errónea. Sin embargo hubo excepciones, como el arquitecto romano *Vitruvio* o *Leonardo da Vinci* que hablaron del ciclo tal como se conoce hoy en día.

- **En la segunda mitad del siglo XVII:**

La Hidrología moderna nace con las experiencias de *Perrault*, *Mariotte* y *Halley*. Fueron los primeros hidrólogos empíricos que basaron sus ideas en medidas.

En 1674 *Pierre Perrault* en una publicación mide las precipitaciones de la cuenca alta del Sena y los afluentes del río, concluyendo que el volumen de las precipitaciones era superior a las aportaciones del río. *Mariotte*, estudiando además la infiltración del agua, comprobó que el caudal de ciertos manantiales variaba de acuerdo con la

oscilación de las precipitaciones.

Para cuantificar la otra mitad del Ciclo el astrónomo *Halley* (1656 – 1742) se interesó por el fenómeno de la evaporación. Concluyendo que el volumen de agua evaporado un día de verano del Mediterráneo era superior al volumen de agua que recibe de todos los ríos que llegan a él.

- **Durante el siglo XVIII:**

Se descubren principios hidráulicos como la ecuación de Bernoulli y la de Chezy y se desarrollaron mejores instrumentos, entre los que destacan el pluviógrafo de cubeta basculante.

- **En el siglo XIX:**

La hidrología avanzó de forma más rápida durante el siglo XIX.

- *Dalton* (1802) teorizó un principio para la evaporación.
- La ecuación *Hagen-Poiseuille* (1839) describe la teoría del flujo capilar.
- *Mulvaney* (1850) propone el método racional para determinar caudales máximos.
- *Rippl* (1883) presentó su diagrama para determinar los requerimientos de almacenamiento.
- *Manning* (1891) propuso su ecuación para el flujo en canales abiertos.

Destacar que en 1857 la *Hidrología Subterránea* comienza con la primera ecuación que explica el flujo a través de un medio poroso, conocido como Ley de Darcy y la ecuación fundamental que cuantifica el comportamiento de las aguas subterráneas ante el bombeo en 1935 (Theis).

- **A principios del siglo XX:**

La hidrología cuantitativa no estaba consolidada y se empleaban principios empíricos para resolver los problemas hidrológicos. Con el paso del tiempo, los principios empíricos fueron sustituidos por el análisis racional de información observada.

- *Green Ampt* (1911) desarrollaron un modelo basado físicamente para infiltración.
- *Hazen* (1914) introdujo el análisis de frecuencia para los máximos de caudales y los requerimientos de almacenamiento de agua.
- *Richards* (1931) determinó la ecuación para el flujo no saturado.
- *Sherman* (1932) ideó el método de diagrama unitario para transformar la precipitación efectiva en escorrentía directa.
- *Horton* (1933) desarrolló una teoría de infiltración y una descripción de la

forma de una cuenca de drenaje (1945).

- *Gumbel* (1941) propuso la ley del valor extremo para los estudios hidrológicos.
- *Hurst* (1951) demostró que las observaciones hidrológicas pueden exhibir patrones, que persisten durante muchos años.
- **Durante mediados del siglo XX:**

La hidrología se reconoció como una disciplina independiente, alrededor de 1965, cuando la *United States Civil Services Commission* reconoció el hidrólogo como una clasificación de trabajo.

La llegada de los ordenadores revolucionó la hidrología empleando simulaciones y aplicando la estadística hidrológica para un certero análisis hidrológico.

- **En la actualidad:**

Los avances electrónicos y la transmisión de datos hacen posible el envío instantáneo de información. Un ejemplo de ello, son los programas en "tiempo real" para la prevención de inundaciones y otras operaciones de recursos hidráulicos, como el *SHAID* de la Confederación Hidrográfica del Ebro (*CHE*).

4.2. CICLO HIDROLÓGICO

El ciclo hidrológico es aquel que describe la circulación del agua en la atmósfera, suelo y subsuelo. el ciclo hidrológico es el foco principal de la hidrología, no tiene ni principio ni fin y sus procesos ocurren en forma continua.

El agua se evapora desde los océanos y desde la superficie terrestre para volverse parte de la atmósfera; el vapor de agua se transporta y se eleva en la atmósfera hasta que se condensa y precipita sobre la superficie terrestre o los océanos. El agua precipitada puede ser interceptada por la vegetación, convertirse en flujo superficial sobre el suelo, infiltrarse en él, correr a través del suelo como flujo subsuperficial y descargar en los ríos como escorrentía superficial. La mayor parte del agua interceptada y de escorrentía superficial regresa a la atmósfera mediante la evaporación. El agua infiltrada puede percolar para recargar el agua subterránea donde recarga manantiales o se desliza hacia los ríos para formar la escorrentía superficial, y por ultimo fluye hacia el mar o se evapora en la atmósfera a medida que el ciclo continúa.

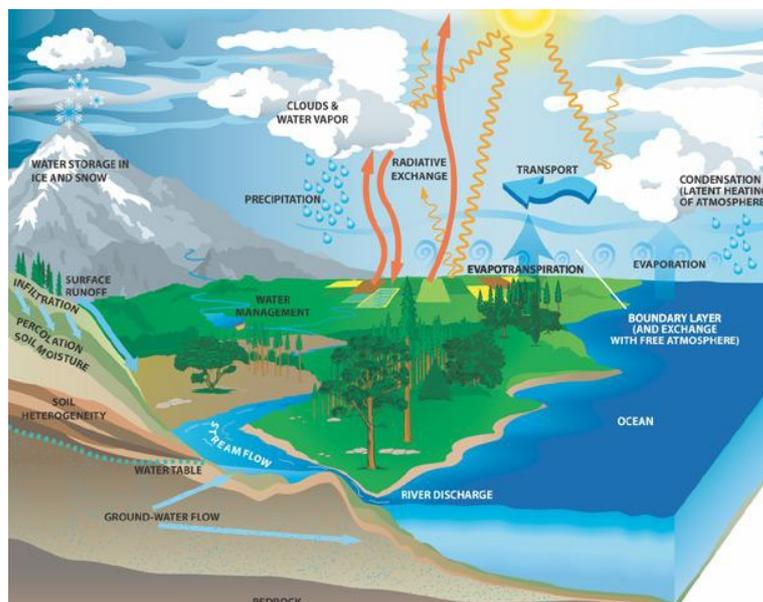


Ilustración 3: Esquema del ciclo hidrológico

4.2.1. Sistemas del ciclo hidrológico

El ciclo hidrológico se puede tratar como un sistema cuyos componentes son precipitación, evaporación, escorrentía y otras fases.

Se va a dividir el ciclo hidrológico en tres subsistemas:

El **sistema de agua atmosférica** que contiene los procesos de precipitación, evaporación, interceptación y transpiración.

El **sistema de agua superficial** que contiene los procesos de flujo superficial, escorrentía superficial, nacimiento de agua subsuperficial y subterránea, y escorrentía hacia ríos y océanos.

El **sistema de agua subsuperficial** contiene los procesos de infiltración, recarga de acuífero, flujo subsuperficial y flujo de agua subterránea.

4.3. PRECIPITACIÓN

La precipitación incluye la lluvia, la nieve y otros procesos mediante los cuales el agua cae a la superficie terrestre, tales como granizo y nevisca. La formación de precipitación requiere la elevación de una masa de agua en la atmósfera de tal manera que se enfríe y parte de su humedad se condense. Los tres mecanismos principales



para la elevación de masas de aire son la *elevación frontal*, donde el aire caliente es elevado sobre aire frío, la *elevación orográfica*, mediante la cual una masa de aire se eleva para pasar por encima de una cadena montañosa, y la *elevación convectiva*, donde el aire se arrastra hacia arriba por una acción convectiva, como ocurre en el centro de una celda de una tormenta eléctrica.

4.3.1. La formación de la precipitación en las nubes

A medida que el aire sube y se enfría, el agua se condensa pasando de un estado de vapor a un estado líquido. Si la temperatura se encuentra por debajo de los 0º, se forman cristales de hielo. La condensación requiere de lo que se denomina núcleo de condensación alrededor del cual las moléculas del agua se pueden unir o nuclear. Algunas partículas de polvo, partículas que contienen iones pueden funcionar como núcleos. Las pequeñas gotas de agua crecen mediante la condensación e impacto con las más cercanas a medida que se mueven por la turbulencia del aire, hasta que son lo suficientemente grandes para que la fuerza de gravedad sobrepase la fuerza de fricción y empiezan a caer, incrementando su tamaño cuando golpean con otras gotas en su descenso. Por contra, a medida que la gota cae, el agua se evapora de su superficie y su tamaño disminuye, de tal manera que en algunos casos pueda desplazarse hacia arriba en la nube debido a la turbulencia.

El ciclo de *condensación, caída, evaporación y elevación* se repite un promedio unas diez veces antes de que la gota alcance un tamaño crítico de alrededor de 1 mm, pero empiezan a aplanarse en el fondo cuando aumentan su tamaño, y dejan de ser estables en su caída dividiéndose en pequeñas gotas de lluvia. Las gotas de lluvia normales que caen a través de la base de una nube tienen de 0,1 a 3 mm de diámetro.

4.3.2. Tipos de lluvia

Precipitaciones convectivas: Se da cuando las masas de aire bajas se calientan acompañadas de vientos fríos superiores. Esto ocasiona una descompensación muy grande de fuerzas de empuje y de flotación, generando corrientes ascendentes de aire húmedo que al ir ascendiendo llegan a la presión de saturación y el vapor se condensa rápidamente. Los movimientos generados en este fenómeno dan lugar a una rápida coalescencia de las gotas de agua. Las tormentas generadas de esta forma son las culpables del denominado *flash flood*.

Precipitaciones orográficas: Cuando corrientes de aire húmedo que circulan por los valles y chocan contra las montañas. Este aire húmedo se ve forzado a ascender hacia estratos más altos. Es en ese momento que pueden chocar con estratos más fríos y secos ocasionando la condensación súbita del vapor de agua.

Precipitación por convergencia: Cuando dos masas de aire en movimiento y a diferente temperatura se chocan entre sí. Si una masa de aire frío se encuentra una masa de aire caliente, este tiende a ser desplazado hacia arriba formando un *frente frío*. Si en cambio es la masa de aire caliente en movimiento quien se encuentra con una masa de aire frío, este tiende a moverse en una superficie inclinada formando un *frente cálido*.



Ilustración 4: Frentes de aire

4.3.3. Registro de lluvia

La medida de la lluvia se efectúa a través de unos dispositivos de medida, como son los pluviómetros y pluviógrafos.

Pluviómetros: es un recipiente que se coloca bajo un embudo de medidas normalizadas (el más usado es de 200 cm²) y en el que se acumula el agua de lluvia. Estos dispositivos suelen necesitar de un observador que registre el volumen de lluvia caída en un cierto intervalo de tiempo, generalmente 24 horas.

Pluviógrafos: a diferencia de los pluviómetros los pluviógrafos cuentan con un dispositivo que permite registrar la evolución del volumen de lluvia caída a través del tiempo, es decir, un registro continuo de la precipitación.

Hay diferentes tipos de pluviógrafos entre los que destacan:

- *Pluviógrafo registrador de flotador:* un flotador dentro de un recipiente donde cae el agua, transmite su movimiento vertical a una pluma
- *Pluviógrafo registrador de cazoletas:* en todos bajo el embudo normalizado,

existen unas cazoletas basculantes que reciben el agua, estas cazoletas que suelen tener una capacidad a 1,1 ó 0,2 mm de lluvia, y un mecanismo transforma el movimiento de vaivén de las cazoletas al bascular por uno lineal de la pluma. En otros el recipiente que recibe el agua se mueve por su peso en forma vertical, transmitiendo su movimiento a la pluma.

En los pluviógrafos la pluma realiza un registro sobre papel colocado en un tambor con un mecanismo de relojería. Hoy en día, existe un dispositivo electrónico denominado *datalogger* que ha sustituido al tambor y la pluma. La unidad de medida para el registro de la lluvia es el *mm*, que corresponde a 1 l/m².

Los registro de lluvia de los pluviógrafos se pueden representar *gráfica* y *numéricamente*:

- **Gráficamente**

Un registro de pluviógrafos se compone de un conjunto de volúmenes de lluvia que se registra para incrementos de tiempo sucesivos, dicho registro se denomina ***pluviograma***.

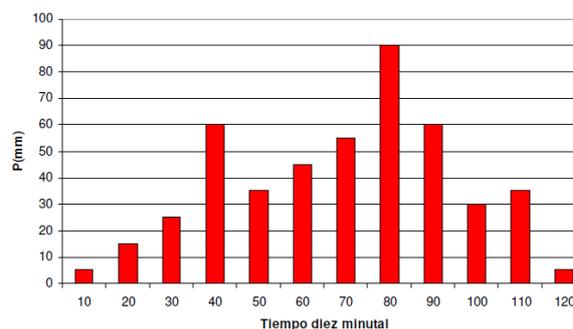


Ilustración 5: Pluviograma

Sumando los incrementos de lluvia de los sucesivos intervalos de tiempo, se obtiene un pluviograma acumulado o ***curva de masa de lluvia***.

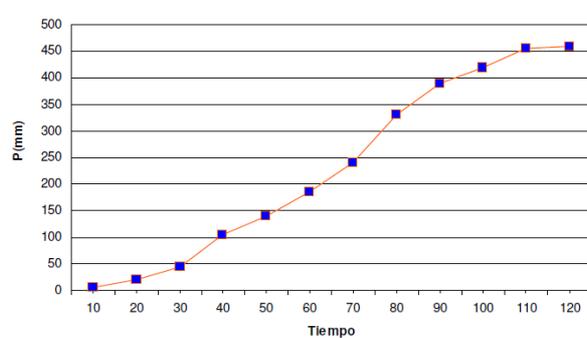


Ilustración 6: Curva de masa de lluvia o pluviograma acumulado

La intensidad de lluvia (volúmenes por unidad de tiempo) en función del tiempo, se denomina **histograma**.

- **Numéricamente**

Se puede calcular el máximo volumen e intensidad de lluvia en distintos intervalos de tiempo, 5 min, 15 min, 30 min, 1 hora y 2 horas.

Los pluviógrafos también son útiles para conocer el comportamiento de la lluvia en un lugar determinado. Combinando los registros de una red de pluviógrafos distribuidos sobre un área determinada puede conocerse la estructura espacial de la lluvia representada por **mapas de isoyetas**. Una isoyeta es una curva que une los puntos con igual volumen de precipitación y se construye interpolando los datos de precipitación registrados en muchos pluviómetros o pluviógrafos.

4.3.4. Lluvia de proyecto

4.3.4.1. Análisis de datos de lluvia

Si consideramos la cuenca hidrológica objeto de estudio como un sistema dinámico, el proceso que produce en ella desde el enfoque de la dinámica del sistema sería la acción de una señal de entrada, la *lluvia*, que sufre una modificación debida a las características de la cuenca, proceso *lluvia-escorrentía*, para transformarse en una señal de salida como es el *caudal*.

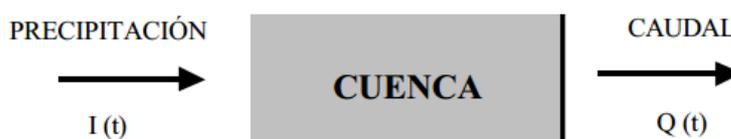


Ilustración 7: Esquema representando el comportamiento hidrológico de una cuenca

La primera información de entrada en el ciclo hidrológico debe ser la lluvia. Esta debería proceder de medidas reales de eventos de lluvia registrados sobre la cuenca objeto de estudio. Cuando se está interesado en la comprobación de la situación de una cuenca o un tramo de cauce concreto ante eventos de lluvias extremas, se habla de sucesos de lluvias aislados.

Para este tipo de análisis se puede emplear tres tipos de información pluviométrica:

1. Lluvias históricas registradas y que produjeron serias consecuencias desde el

- punto de vista de inundación en la cuenca, y que dejaron además secuelas en la memoria histórica de la población. Este criterio no está basado en consideraciones estadísticas de riesgo, sino que se asocia a un suceso concreto.
2. Series temporales de lluvias, registradas en observatorios dentro de la zona de estudio o incluso series sintéticas generadas a partir de métodos estadísticos. Con estos datos de precipitación, se aplica un modelo de transformación lluvia-escorrentía y así se obtienen los hidrogramas de caudal, sobre los que se realiza un análisis estadístico para determinar el valor del flujo asociado a un periodo de retorno determinado. Otra manera de emplear estos datos sería establecer un análisis de comportamiento de la cuenca en el dominio de la frecuencia de inundación y no en el de la probabilidad. Se aceptaría que que en el futuro seguirá lloviendo como hasta ahora. Este enfoque da como resultado el poder decir que la obra diseñada se verá superada un número de X veces en N años (el mismo número de los que se disponen datos pluviométricos). No se trata de un concepto estadístico, ni de periodo de retorno, se trata de un análisis de frecuencia de inundación. El inconveniente de este procedimiento es que no se disponen de series temporales largas, sino que tan solo disponemos de series de 20, 30 años. Este procedimiento es adecuado para obras con periodos de retorno de diseño bajo, del orden de 10 a 20 años.
 3. Lluvias de proyecto, obtenidas a partir de información globalizada en forma de curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF). Se puede definir a esta lluvia de proyecto como una lluvia sintética que se puede asociar a un cierto periodo de retorno, y se admite que el caudal de escorrentía calculado a partir de esta lluvia de proyecto tiene el mismo periodo de retorno. Esta idea introduce un concepto de seguridad/riesgo, al asociar una noción de periodo de retorno al hietograma de lluvia a utilizar, y por consiguiente al caudal de diseño.

4.3.4.2. Relaciones Intensidad-Duración-Frecuencia

La tormenta de diseño o evento de lluvia se debe relacionar entre la variables intensidad de lluvia, la duración y la frecuencia o periodos de retorno. Existen curvas estándar de intensidad-duración-frecuencia (IDF) disponibles para el caso de estudio. Los datos se presentan en forma gráfica, con la duración en el eje horizontal y la intensidad en el eje vertical, mostrando una serie de curvas, para cada uno de los periodos de retorno de diseño.

Se suele emplear la intensidad media sobre la duración de la lluvia, que se

expresa como:

$$i = \frac{P}{T_d} [mm/h]$$

La frecuencia se expresa en función del periodo de retorno, T , que es el intervalo de tiempo promedio entre eventos de precipitación que igualen o excedan la precipitación considerada de diseño.

4.3.4.2.1. Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia

Cuando los datos pluviométricos están disponibles, las curvas IDF pueden desarrollarse utilizando el análisis de frecuencia. Una distribución utilizada en el análisis de frecuencia de eventos de lluvia es la distribución de valores extremos tipo I o también llamada Gumbel.

Para cada una de las duraciones seleccionadas, las precipitaciones de lluvias máximas anuales se extraen de los registros históricos de lluvias y luego se aplica el análisis de frecuencia a la información pluviométrica anual. Las líneas de las curvas IDF unen las precipitaciones para varias duraciones correspondientes al mismo evento de tormenta.

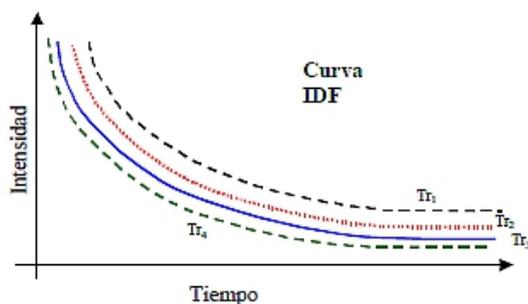


Ilustración 8: Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia

4.3.4.2.2. Ecuaciones para las curvas IDF

Las curvas intensidad-duración-frecuencia pueden expresarse como ecuaciones.

- *Wenzel* (1982) dedujo:

$$i = \frac{c}{T_d^e + f}$$

Donde:

i , es la intensidad de lluvia de diseño

T_d , es la duración



c, e, f , son coeficientes que varían con el lugar y el periodo de retorno

En España, existe un mapa de isoyetas para precipitaciones en 24 horas y pueden usarse las curvas IDF sintéticas propuestas por la Dirección General de Carreteras (MOPU, 1990).

- Ecuación propuesta por la DGC:

$$I_D = I_{24} \left(\frac{I_1}{I_{24}} \right)^{\left(\frac{28^{0.1} - D^{0.1}}{28^{0.1} - 1^{0.1}} \right)}$$

Donde:

I_D , intensidad media máxima [mm/h]

D , duración de la lluvia [h]

I_{24} , intensidad media diaria de precipitación [mm/h]

I_1 , intensidad horaria de precipitación correspondiente al periodo de retorno [mm/h]

I_1/I_{24} , es un factor regional, que representa la relación entre la intensidad horaria y la diaria.

4.3.4.2.3. Tormentas de proyecto usando las relaciones de las curvas IDF

En un estudio hidrológico es necesario conocer el volumen de lluvia asociada a una tormenta de frecuencia y duración determinadas, y la distribución en el tiempo de la intensidad de lluvia en el trascurso de la tormenta.

Para ello se utilizan las curvas IDF, éstas nos dan una información global del comportamiento pluviométrico de la zona a estudiar. Debido a que las curvas IDF recogen la información histórica de la pluviometría de la cuenca de estudio, se utilizan para la construcción de las lluvias de proyecto para el estudio hidrológico.

Para elaborar la distribución en el tiempo de la intensidad de lluvia existen varios métodos que se enumeran a continuación:

- *Método del hietograma rectangular*
- *Método del hietograma triangular*
- *Tormenta Sifalda*
- *Lluvia doble triangular*
- *Tormentas de proyecto usando las relaciones de las curvas IDF*

4.3.4.3. Método del hietograma rectangular

La lluvia de proyecto más fácil de construir que se caracteriza por una intensidad constante durante el tiempo de lluvia.

Este método (Gómez Valentín, 2007) encuentra su aplicación en las precipitaciones causantes de inundaciones, aquellas que se caracterizan por intensidades muy elevadas y duraciones muy cortas. Para el diseño de cuencas pequeñas se considera que el caudal pico se produce cuando toda la cuenca está aportando en el proceso de esorrentía, así el tiempo de concentración de la cuenca será igual a la duración de la tormenta representada por el hietograma rectangular. El método racional utiliza esta hipótesis descrita anteriormente.

4.3.4.4. Método del hietograma triangular

Si la tormenta de proyecto considera la hipótesis de que la lluvia es constante, es válido para cuencas de tamaño reducido, cuando la superficie aumenta y aumentan los tiempo de concentración, no es recomendable utilizar este método. Por ello, se plantea una forma muy sencilla para no considerar la intensidad de lluvia constante, se incluye un patrón temporal, donde la intensidad de precipitación sigue una distribución triangular (Gómez Valentín, 2007). La intensidad máxima puede obtener de una lluvia diaria en 24 horas, como los datos de una curva IDF.

- *Precipitación diaria en 24 horas.* P_{24}

$$P = \frac{i_{max} \cdot T_D}{2}, \text{ siendo } i_{max} \text{ intensidad máxima del hietograma.}$$

- *Datos de la curva IDF*

La intensidad máxima del hietograma será: $i_{max} = 2 * i$

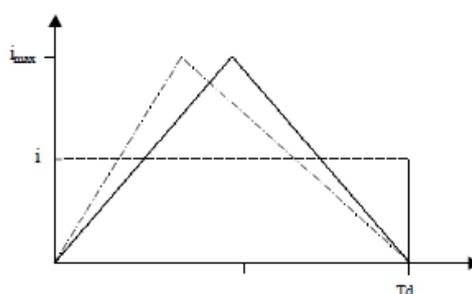


Ilustración 9: Tormenta de proyecto triangular

4.3.4.5. Tormenta Sifalda

Sifalda (1973) propuso una modificación de la tormenta de proyecto con lluvia constante, para incluir una cierta variabilidad temporal, propone modificar el patrón de lluvia (Gómez Valentín, 2007). Consiste en incluir dos bloques en forma de trapecio antes y después de una parte central con intensidad de lluvia constante.

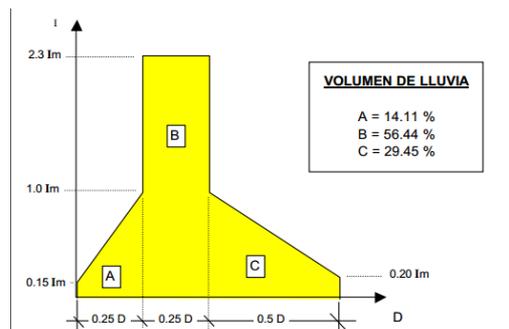


Ilustración 10: Tormenta de proyecto tipo *Sifalda*

4.3.4.6. Lluvia doble triángulo

en Francia se han desarrollado lluvias de proyecto en zonas donde el clima presenta lluvias de tipo convectivo. Una de las más utilizadas es la desarrollada por *M. Desbordes* (Gómez Valentín, 2007) que propone para la lluvia de proyecto una estructura en forma de doble triángulo.

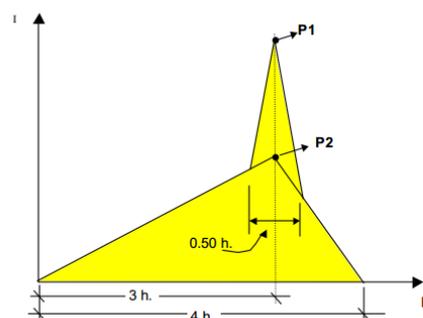


Ilustración 11: Tormenta de proyecto con lluvia en doble triángulo

4.3.4.7. Método de los bloques alternados

Se trata de uno de los métodos (Nanía & Gómez Valentín, 2006) más empleado para construir lluvias de proyecto a partir de la curva IDF.

El pluviograma de proyecto producido por este método especifica el volumen de

precipitación que ocurre en n intervalos de tiempo sucesivos de duración Δt , sobre una duración total especificada previamente, $T_d = n\Delta t$. La metodología a seguir es:

1. Se selecciona el periodo de retorno de diseño.
2. Se calcula la intensidad utilizando la curva IDF para $\Delta t, 2\Delta t, \dots, n\Delta t$.
3. Se calcula el volumen de precipitación multiplicando la intensidad por la duración.
4. Se calcula la cantidad de precipitación correspondiente a cada intervalo de tiempo tomando diferencias entre valores sucesivos de volumen.
5. Se reordenan los bloques de modo que la intensidad máxima ocurra en el centro de la duración requerida T_d y que los demás bloques quedan en orden descendente alternativamente hacia la derecha y hacia la izquierda del bloque central para formar el pluviograma de diseño.

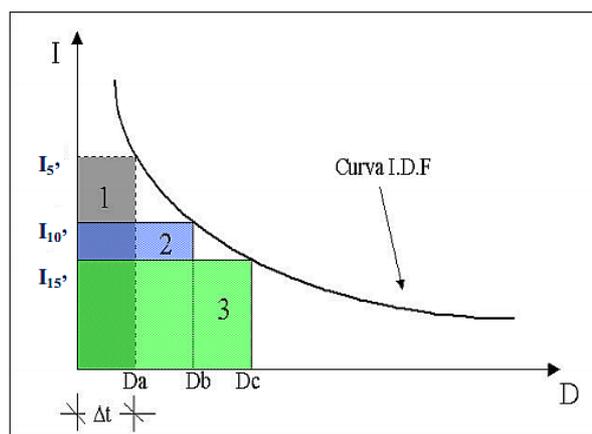


Ilustración 12: Método de los bloques alternados

El pluviograma obtenido no es simétrico, pero se puede construir simétrico si así se desea.

4.4. PÉRDIDAS DE PRECIPITACIÓN

El agua proveniente de la precipitación que no se transforma en escorrentía directa se denomina pérdida de la precipitación. El agua que constituye las pérdidas, lo hace mediante la participación de varios fenómenos: la *evaporación*, la *evapotranspiración*, la *intercepción*, el *almacenamiento en depresiones* y la *infiltración*.

4.4.1. Evaporación

Los dos factores que influyen en la evaporación son el suministro de energía y el gradiente de humedad específica del aire. Ahora se considerarán los dos factores por separado y para terminar combinándolos a través de varios métodos, aplicando las ecuaciones de continuidad y de conservación de la energía en un volumen de control.

- *Método del balance de energía*

Este método se usa cuando el transporte de vapor no es limitante, es decir, que la evaporación viene gobernada por la radiación.

- *Método aerodinámico*

Este método se usa cuando el suministro de energía no es limitante, es decir que la evaporación viene gobernada por la habilidad para transportar el vapor fuera de la superficie donde se produce.

- *Método de combinación*

El fenómeno de la evaporación responde a un suministro de energía a un cuerpo de agua conjuntamente con el transporte de vapor en la superficie de agua, por lo que lo más lógico es usar un método que sea una combinación de los dos métodos anteriores.

La ecuación es la siguiente: $E = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} E_r + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} E_a$ [mm/día]

4.4.2. Evapotranspiración

Son los procesos de evaporación producida en la superficie del suelo y de transpiración producida desde los estomas de las hojas. Los factores que influyen en la evapotranspiración son los mismos que los de la evaporación más uno adicional que es el suministro de humedad hacia la superficie de evaporación.

El cálculo de la evapotranspiración se realiza con los mismo métodos descritos anteriormente en la evaporación. Para el cálculo de dicha pérdida de precipitación se utiliza la fórmula de *Penman* (1948) y se calcula la evapotranspiración potencial, ET_0 .

$$ET_0 = \frac{\Delta \cdot E_r + \gamma \cdot E_a}{\Delta + \gamma} \text{ [mm/día]}$$

4.4.3. *Interceptación*

La interceptación es un fenómeno muy mal conocido y difícil de estudiar. Es producida por la cubierta vegetal y sus efectos son el de retener un cierto volumen de agua, que luego se transforma en evaporación y el de modificar la intensidad de precipitación en función del tiempo. Los factores que influyen en la interceptación son las características de la cubierta vegetal. Las características de la superficie vegetal, el tipo de tormenta.

4.4.4. *Almacenamiento en depresiones*

El volumen almacenado en las depresiones del terreno finalmente se convierte en pérdidas, ya que el volumen de agua se infiltra o si la depresión es impermeable, se evapora.

4.4.5. *Infiltración*

Es el proceso mediante el cual el agua penetra desde la superficie del terreno hacia el suelo. Los factores que influyen en la tasa de infiltración son:

- El estado de la superficie del suelo.
- El estado de la cubierta vegetal.
- Las propiedades del suelo: porosidad y conductividad hidráulica.
- El contenido de humedad presente en el suelo.

La infiltración es un proceso muy complejo debido a la variabilidad espacial y a la variación de las propiedades de los suelos, producidas por las diferentes humedades que presentan, por ello para describir este fenómeno hay que utilizar ecuaciones matemáticas.

Existen varias ecuaciones para describir la infiltración, entre las que destacan:

- *Ecuación de Horton*
- *Ecuación de Philip*
- *Modelo de Green Ampt*



4.5. CÁLCULO DE LAS PÉRDIDAS O ABSTRACCIONES

Para el cálculo de las pérdidas de precipitación se nos pueden presentar dos casos. Que tengamos información de precipitación y caudales, o por el contrario, que tengamos información sólo de precipitación.

Para el *primer caso*, se suelen utilizar los métodos de programación no lineal, un método más sencillo es el del *índice ϕ* .

En el *segundo caso*, se suelen emplear los métodos basados en las ecuaciones de infiltración, o el del Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos (SCS), que se empleará para el estudio hidrológico en el presente Trabajo Fin de Grado.

4.5.1. Método del SCS para abstracciones

Este método ha sido desarrollado por el SCS (1972). El *método del SCS* considera que la precipitación efectiva, P_e , es siempre menor o igual que la precipitación total, P . La retención acumulada, F_a , es siempre menor o igual que la retención potencial máxima, S , y que la escorrentía potencial, definida como el máximo volumen de agua que puede convertirse en escorrentía es igual a $P - I_a$, siendo I_a la abstracción inicial, definida como el volumen de agua que infiltra en el suelo antes de que dé comienzo la escorrentía directa.

La hipótesis en la que se basa el método es la relación entre los parámetros descritos anteriormente:

$$\frac{F_a}{S} = \frac{P_e}{P - I_a}$$

Por continuidad se sabe que $P = P_e + I_a + F_a$. Combinando las dos ecuaciones anteriores se obtiene:

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S}$$

Con la información de ecuaciones experimentales, el SCS, encontró que $I_a = 0,2S$, con lo que la ecuación definida anteriormente resulta:

$$P_e = \frac{(P - 0,2S)^2}{P + 0,8S}$$

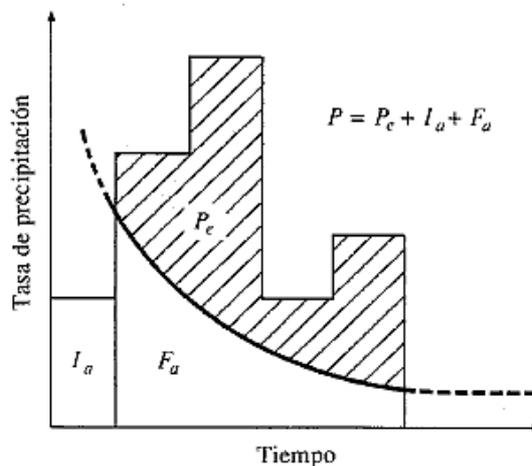


Ilustración 13: Variables que intervienen en el método del SCS para abstracciones

El SCS analizó la relación entre P y P_e para un gran número de cuencas y encontró curvas que son función del tipo de superficie de las cuencas. Para regularlas y normalizarlas, se definió lo que se conoce como **número de curva**, CN , tal que $0 \leq CN \leq 100$.

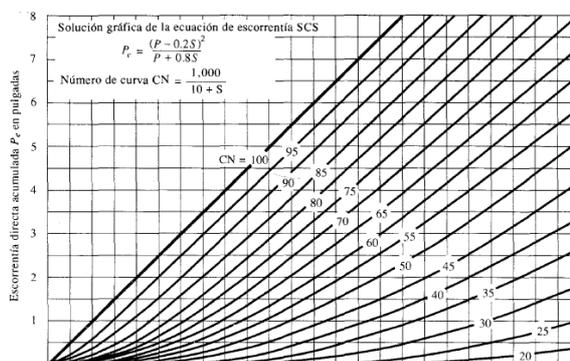


Ilustración 14: Solución del ecuación de escorrentía del SCS

A las superficies impermeables y superficies de agua les corresponde un CN igual a 100, debido a que toda la precipitación se convierte en escorrentía, es decir, se consideran nulas las abstracciones. Para superficies naturales, permeables, el CN será menor de 100.

Se definirán tres tipos de CN diferente en función de las condiciones



antecedentes de humedad del suelo:

- **CN**: condiciones antecedentes de humedad normales (AMC II)
- **CN (I)**: condiciones antecedentes de humedad secas (AMC I)
- **CN (III)**: condiciones antecedentes de humedad húmedas (AMC III)

Los *CN* han sido tabulados por el SCS en función del tipo de suelo y el uso de la tierra. El SCS clasifica los suelos en cuatro grupos hidrológicos de suelo:

- *Grupo A*: arena profunda, suelos profundos depositados por el viento, limos agregados.
- *Grupo B*: suelos poco profundos depositados por el viento, marga arenosa.
- *Grupo C*: margas arcillosas, margas arenosas poco profundas, suelos con alto contenido de arcilla.
- *Grupo D*: suelos expansivos, arcillas altamente plásticas.

4.6. TRANSFORMACIÓN LLUVIA-CAUDAL

Cuando se realiza un estudio hidrológico el objetivo es estimar un hidrograma de caudal, asociado a un periodo de retorno. Para ello necesitaremos conocer la meteorología de la zona y sus características físicas.

El conocimiento de las características meteorológicas de la cuenca permitirá la determinación del pluviograma, hietograma o tormenta de proyecto. Definidas la lluvia de proyecto y el modelo de pérdidas, la transformación de lluvia neta o efectiva a caudal puede realizarse por diferentes métodos.

Los diferentes métodos disponibles para la transformación de *Lluvia-Caudal* difieren entre sí en su complejidad. Entre los que destacan:

- Método Racional
- Hidrograma Unitario
- Modelo de Depósito
- Modelo de la Onda Cinemática

4.6.1. El Hidrograma de caudal

El *hidrograma de caudal* es una gráfica o tabla que describe el caudal de agua en función del tiempo en un lugar dado de la corriente.

El *hidrograma anual* es un balance a largo plazo de la precipitación, evaporación y caudal en una cuenca. Se define como capacidad de la cuenca al volumen total de

agua bajo el hidrograma anual.

El *hidrograma de tormenta* es el hidrograma producido por un solo evento de lluvia.

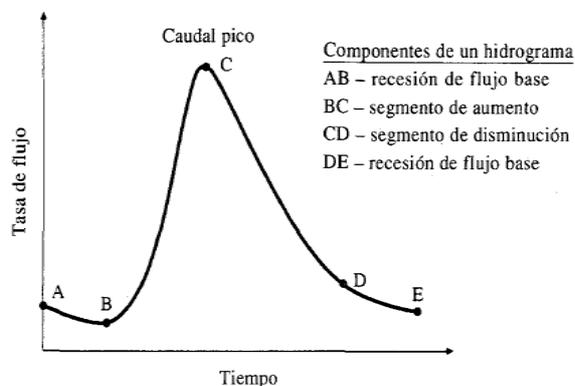


Ilustración 15: Componentes de un hidrograma de tormenta

Las partes del hidrograma son las siguientes:

- *Recesión del flujo base* (AB)
- *Escorrentía directa*
 - Rama ascendente o de concentración (BC)
 - Pico o punta (C)
 - Rama descendente o de descarga (CD)
- *Recesión del flujo base* (DE)

En todo hidrograma de tormenta, existe lo que se conoce como flujo base o escorrentía básica, que es el flujo de agua que proviene del almacenamiento en el terreno, de respuesta más lenta que la parte de hidrograma por encima de él, que es la escorrentía superficial y la que forma el pico de la avenida.

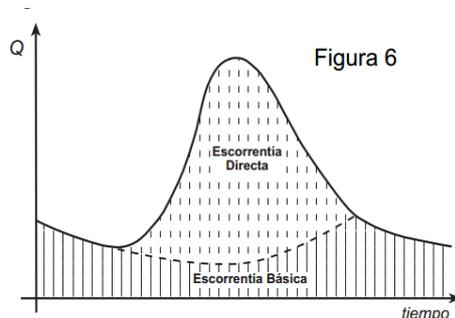


Ilustración 16: Separación de componentes en el hidrograma de tormenta

A continuación se va a explicar el método de transformación *Lluvia-Caudal*

empleado en el estudio hidrológico realizado.

4.6.2. El Hidrograma Unitario

El método del *Hidrograma Unitario* (H.U) (Nanía & Gómez Valentín, 2006) tiene en cuenta, la superficie de la cuenca, la intensidad de lluvia, y la forma, pendiente y características fisiográficas de la cuenca de estudio de forma implícita.

El H.U es el hidrograma de escorrentía directa causado por una lluvia efectiva unitaria (1 cm ó 1 mm) de intensidad constante a lo largo de duración efectiva y distribuida de manera uniforme sobre la superficie de drenaje de la cuenca.

El método se basa en dos hipótesis:

1. La respuesta de la cuenca ante la escorrentía sigue un comportamiento lineal. Quiere decir que son aplicables los *principios de proporcionalidad y superposición*.
2. *No hay variabilidad temporal* de las características de la cuenca durante el suceso de lluvia, una misma lluvia efectiva produce el mismo hidrograma de escorrentía directa.

Para cumplirse estas hipótesis deben cumplirse unas condiciones:

- La lluvia efectiva tiene una intensidad constante dentro de la duración efectiva.
- La lluvia efectiva está uniformemente distribuida en toda la superficie de drenaje.
- El tiempo base del hidrograma de escorrentía directa producido por una lluvia efectiva de una duración dada es constante.
- El hidrograma unitario de una duración determinada es único para una cuenca y no varía en el tiempo.

4.6.2.1. Hidrograma Unitario Sintético

El hidrograma unitario calculado a partir de la información de lluvia y caudal de una cuenca se aplica solamente a la cuenca y al punto del cauce donde se midieron los caudales. Los Hidrogramas Unitarios Sintéticos se utilizan para calcular hidrogramas unitarios en otros puntos del cauce dentro de la misma cuenca.

Existen tres tipos de hidrogramas unitarios sintéticos

- *H.U sintético de Snyder*
- *Hidrograma adimensional del SCS*
- *H.U de Clark*

4.6.2.2. Hidrograma adimensional del SCS

El *hidrograma adimensional del SCS* es un hidrograma unitario sintético en el cual se expresan los caudales en función del caudal pico q_p y los tiempos en función del tiempo al pico T_p . Los valores de q_p y T_p se estiman en el hidrograma unitario triangular del SCS.

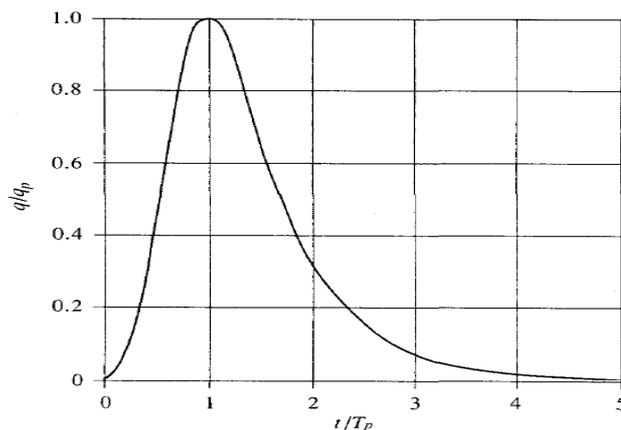


Ilustración 17: Hidrograma adimensional del SCS

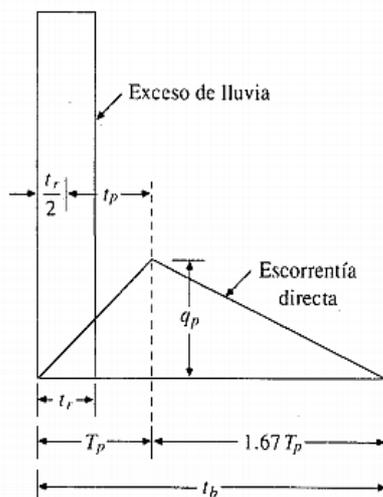


Ilustración 18: Hidrograma unitario triangular del SCS

Tomando como base el estudio de una gran cantidad de hidrogramas unitarios, el SCS sugiere que el tiempo de recesión puede aproximarse a $1,67 T_p$. Como el hidrograma unitario es la respuesta de la cuenca a una unidad, en este caso 1 cm de lluvia neta generada de manera uniforme en toda la superficie de la cuenca A , se

demuestra que:

$$q_p = \frac{2,08 A}{T_p}$$

Donde:

q_p es el caudal pico [m^3/s]

A es la superficie de drenaje de la cuenca [km^2]

T_p es el tiempo al pico [h]

4.7. PROPAGACIÓN DE CAUDALES

Se denomina *propagación de caudales* al procedimiento a través del cuál se puede determinar el hidrograma de caudal en un punto de un curso de agua utilizando hidrogramas conocidos en uno o más puntos aguas arriba.

La propagación de caudales se puede aplicar a *sistemas agregados* o *distribuidos*. Si se aplica a sistemas agregados, el flujo se calcula como función del tiempo en un lugar en particular, lo que se conoce como **propagación hidrológica**.

Si se aplica a sistemas distribuidos, el flujo se calcula como función del espacio y del tiempo, lo que se conoce como **propagación hidráulica**.

4.7.1. Propagación de sistemas agregados o hidrológicos

En un sistema hidrológico la entrada, $I(t)$, la salida, $Q(t)$ y el almacenamiento $S(t)$ se relacionan por la ecuación de continuidad:

$$\frac{dS}{dt} = I(t) - Q(t)$$

Conociendo el hidrograma de caudal de entrada $I(t)$, no se puede calcular $Q(t)$ si no se conoce una segunda relación denominada *función de almacenamiento* (Chow, Maidment, & Mays, 1994):

$$S = f\left(I, \frac{dI}{dt}, \frac{d^2I}{dt^2}, \dots, Q, \frac{dQ}{dt}, \frac{d^2Q}{dt^2}, \dots\right)$$

Estas dos ecuaciones proporcionan una combinación de dos ecuaciones con dos incógnitas. La ecuación de almacenamiento depende de la naturaleza del sistema analizado. Existen varios métodos que se diferencian entre sí en la manera de

considerar la función de almacenamiento:

- *Método de Puls modificado*: almacenamiento es función no lineal de Q .
- *Método de Muskingum*: el almacenamiento es función lineal de I y Q .
- *Método de depósitos o embalses lineales*: el almacenamiento es función lineal de Q .

La relación entre el almacenamiento, S y el caudal de salida, Q , es invariable cuando se tiene un embalse con superficie de agua horizontal.

La relación entre S y Q suele ser variable cuando se trata de embalses largos y angostos y de canales o cauces de ríos, ya que la superficie del agua suele tener una pendiente debido a los efectos de remanso.

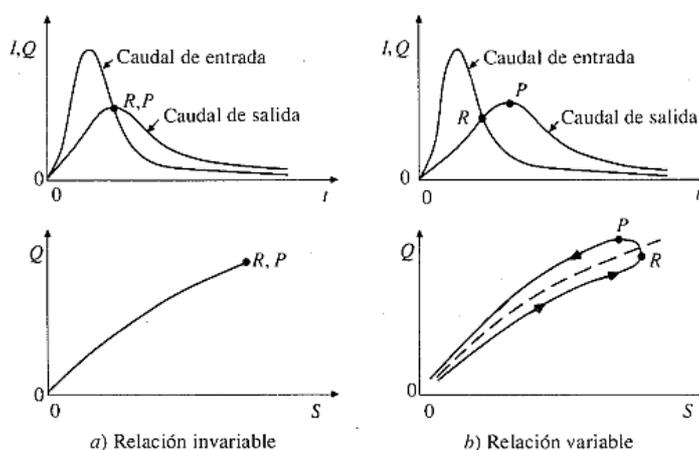


Ilustración 19: Relaciones entre caudal y almacenamiento

El efecto del almacenamiento sobre el hidrograma de salida es, el de modificar la forma del hidrograma, retrasando el tiempo al pico, aumentando el tiempo base y disminuyendo el caudal punta y, por otro lado, el de retrasar el comienzo del hidrograma, sobre todo si se trata de cauces largos.

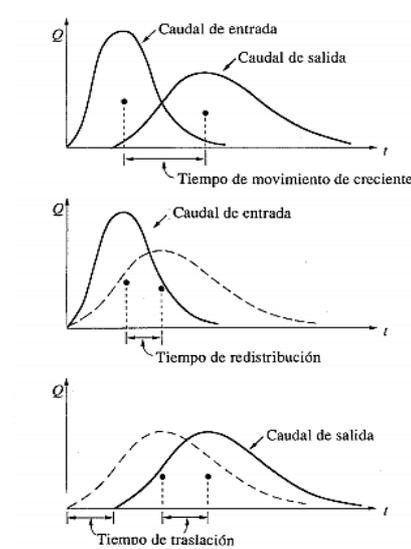


Ilustración 20: Tiempo de movimiento de una avenida

Se va a explicar más en profundidad el método de propagación hidrológica empleado en el presente estudio.

4.7.1.1. Método de Muskingum

Fue presentado por *McCarthy* (1938) y maneja relaciones caudal-almacenamiento variable. En este método pueden darse dos casos de almacenamiento:

- **Almacenamiento prismático**, formado por un volumen de sección transversal constante a lo largo del cauce prismático.
- **Almacenamiento en cuña**, formado por la diferencia entre los caudales de entrada y salida, o por la pendiente de la lámina de agua en el tramo considerado.

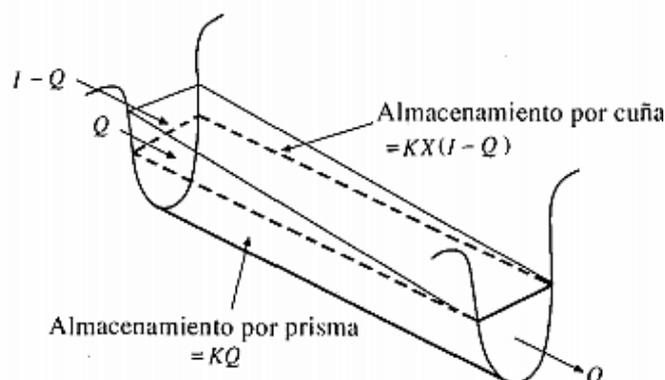


Ilustración 21: Almacenamiento por prisma y por cuña

En el avance de la avenida el caudal de entrada es mayor que el de salida y se forma la *cuña positiva*, durante la recesión de la avenida el caudal de entrada es menor que el de salida, formándose una *cuña negativa*.

- Volumen de almacenamiento *prismático*: $S_p = KQ$
- Volumen de almacenamiento por *cuña*: $S_c = KX(I-Q)$

Donde X es un factor de ponderación que puede tomar valores entre 0 y 0,5, en función de la forma de almacenamiento en cuña. En cauces naturales muy caudalosos y de baja pendiente, X suele ser próximo a 0 y será más cercano a 0,5 cuanto más pendiente y menos caudal tenga el cauce. En España, los ríos se consideran poco caudalosos, y se toman valores entre 0,3 y 0,35.

La variación en el almacenamiento a través del tramo es la diferencia entre ambos almacenamientos:

$$S_2 - S_1 = K \{ [XI_2 + (1-X)Q_2] - [XI_1 + (1-X)Q_1] \}$$

Utilizando la ecuación de continuidad, la variación en el almacenamiento es igual a:

$$S_2 - S_1 = \frac{I_1 + I_2}{2} \Delta t - \frac{Q_1 + Q_2}{2} \Delta t$$

Sustituyendo se obtiene:

$$K [X(I_2 - I_1) + (1-X)(Q_2 - Q_1)] = \frac{I_1 + I_2}{2} \Delta t - \frac{Q_1 + Q_2}{2} \Delta t$$



4.7.2. Propagación distribuida o hidráulica

La propagación de un hidrograma a lo largo de un cauce natural se puede considerar como un movimiento unidimensional no permanente.

Su descripción matemática, se realiza mediante las ecuaciones de Saint Venant. Constituyen un sistema de dos ecuaciones diferenciales, en derivadas parciales, no lineales y de tipo hiperbólico.

Las dos ecuaciones de Saint Venant están constituidas por la ecuación de conservación de la masa o de continuidad, y la ecuación que expresa la conservación de la cantidad de movimiento.

Ecuación de conservación de la masa o continuidad, en su forma no conservativa y para ancho unitario:

$$\frac{\partial y}{\partial t} + V \frac{\partial y}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial x} = 0$$

Ecuación de la conservación de la cantidad de movimiento, en su forma no conservativa:

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + g \frac{\partial y}{\partial x} - g(S_0 - S_f) = 0$$

Las hipótesis que se tienen en cuenta para la validez de las ecuaciones de Saint Venant son:

1. El flujo es unidimensional.
2. El flujo varía gradualmente a lo largo del canal, lo que implica que la distribución de presiones es hidrostática.
3. El eje del cauce es una línea recta.
4. La pendiente del fondo es pequeña y el lecho es fijo, implica que no hay ni erosión ni sedimentación.
5. Los coeficientes de resistencia para flujo uniforme permanente turbulento son aplicables.
6. El fluido es incompresible y de densidad constante.

Cada uno de los términos de la ecuación de cantidad de movimiento tiene en cuenta alguno de los procesos físicos que gobiernan el movimiento del fluido:

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + g \frac{\partial y}{\partial x} - gS_0 + gS_f = 0$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} \quad \text{Aceleración local}$$

$$V \frac{\partial V}{\partial x} \text{ Aceleración convectiva}$$

$$g \frac{\partial y}{\partial x} \text{ Fuerza de presión}$$

$$gS_0 \text{ Fuerza de gravedad}$$

$$gS_f \text{ Fuerza de fricción}$$

La clasificación de los modelos de propagación hidráulica se realiza en función del número de términos de la ecuación de la cantidad de movimiento que se utilizan:

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + g \frac{\partial y}{\partial x} - g(S_0 - S_f) = 0$$

┌──────────────────────────────────┐ Onda cinemática
 ┌──────────────────────────────────┐ Onda de difusión
 ┌──────────────────────────────────┐ Onda dinámica

La ecuación de la conservación de cantidad de movimiento puede expresarse en formas que tienen en cuenta si el flujo es permanente o no permanente y uniforme o variable.

$$-\frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} - \frac{V}{g} \frac{\partial V}{\partial x} - \frac{\partial y}{\partial x} + S_0 = S_f \quad (9.2.1b)$$

┌──────────────────────────────────┐ Flujo uniforme, permanente
 ┌──────────────────────────────────┐ Flujo no-uniforme, permanente
 ┌──────────────────────────────────┐ Flujo no-uniforme, no-permanente



5. ESTADÍSTICA HIDROLÓGICA

Si se quiere extraer conclusiones estadísticas a partir de series de datos de precipitación o aforos, es necesario disponer de series históricas de más de 20 ó 30 valores, cuanto mayor sea la serie de datos, mayor será la fiabilidad de las deducciones extraídas.

En tratamiento estadístico que se aplican a las variables hidrológicas está encaminado a solucionar dos tipos de cuestiones:

- **Valor-probabilidad:** evaluar la probabilidad de que se presente en el futuro una precipitación u otra variable hidrológica mayor o menor que un determinado valor.
- **Probabilidad-valor:** evaluar qué variable hidrológica se superará un determinado % de los años.

En función del tipo de datos que se utilice se realizará un tratamiento diferente:

- *Valores medios de variables hidrológicas* de una serie de años el dato conocido de la variable hidrológica será su valor medio.
- *Valores extremos de variables hidrológicas* de una serie de años se extrae el máximo o mínimo valor de la variable hidrológica.

5.1. CONCEPTOS BÁSICOS

A continuación, se van a definir dos conceptos básicos como son la *población* y la *muestra* que se aplican en los cálculos estadísticos en hidrología.

- **Población**

Es el conjunto total de individuos, sucesos que queremos estudiar. En el caso concreto de estudio que se presenta, la población corresponderá a las series temporales de precipitación. A veces se dispone de medidas de toda la población estudiada, pero generalmente esto es muy difícil. En estos casos se debe medir un parte de la población, lo que es denominado como *muestra*. A partir de la muestra, se intentan extraer estimaciones válidas para toda la población.

- **Muestra**

Es una pequeña parte de la *población* que debería ser representativa del total.

5.2. DISTRIBUCIÓN DE LOS DATOS

Al observar una serie de datos numéricos se comprueba que los valores intermedios son más frecuentes, mientras que los valores máximo o mínimos se presentan con menor frecuencia.

Si las observaciones de una muestra están idénticamente distribuidas (cada valor de la muestra extraído de la misma distribución de probabilidad), éstas pueden ordenarse par formar un histograma de frecuencia.

5.2.1. Función de frecuencia relativa

Si el número de observaciones n_i , en el intervalo i , que cubre un rango Δx , se divide por el número total de observaciones n , el resultado se conoce como la *función de frecuencia relativa* $f_s(x_i)$:

$$f_s(x_i) = \frac{n_i}{n}$$

5.2.2. Función de frecuencia acumulada

La suma de los valores de las frecuencias relativas hasta un punto dado es la *función de frecuencia acumulada* $F_s(x_i)$:

$$F_s(x_i) = \sum_{j=1}^i f_s(x_j)$$

5.2.3. Función de densidad y probabilidad

En el límite la función de frecuencia relativa dividida por el intervalo de longitud se convierte en la función de densidad de probabilidad $f(x)$:

$$f(x) = \lim_{n \rightarrow \infty; \Delta x \rightarrow 0} \left(\frac{f_s(x)}{\Delta x} \right)$$

La función de frecuencia acumulada se convierte en la *función de distribución de probabilidad* $F(x)$.

$$F(x) = \lim_{n \rightarrow \infty; \Delta x \rightarrow 0} F_s(x)$$

Cuya derivada es la *función de densidad de probabilidad*:

$$f(x) = \frac{dF(x)}{dx}$$

5.2.4. Distribución simétricas y asimétricas

Muchas variables naturales se ajustan a la distribución simétrica normal o de Gauss, pero no todas. En ocasiones no hay la misma proporción de valores pequeños que de grandes, eso dará a lugar a una distribución asimétrica.

En Hidrología, los valores medios suelen ajustar a la distribución simétrica de Gauss, pero los valores extremo, ya sean máximo o mínimos, no se ajustarán a la distribución normal, sino a la campana asimétrica.

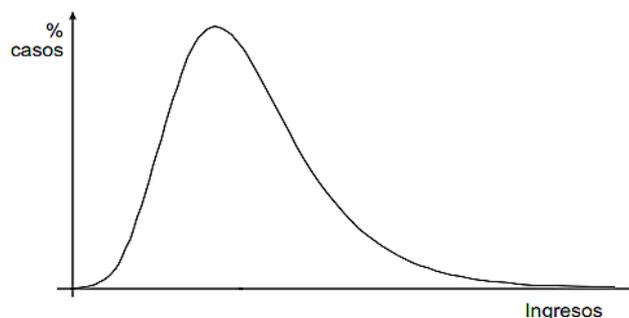


Ilustración 22: Distribución asimétrica correspondiente a la ecuación de Gumbel

5.2.5. Distribución de probabilidad para las variables hidrológicas

Existen diferentes funciones de probabilidad para las variables hidrológicas entre las que destacan:

- *Distribución normal*
- *Distribución lognormal*
- *Distribución exponencial*
- *Distribución gamma*
- *Distribución Pearson III*
- ***Distribución de valores extremos***
- *Distribución SQRT-ET máx*

Para el estudio hidrológico que se realiza en el presente Trabajo Fin de Grado se va a emplear la *distribución de valores extremos*, debido a que es la más adecuada para el objetivo del estudio, que no es otro que el estudio de eventos extremos de lluvia.

5.2.5.1. Distribución de valores extremos

El estudio de eventos hidrológicos extremos incluye la selección de una secuencia de observaciones máximas o mínimas de un conjunto de datos. Por ejemplo, si se realiza el estudio de caudales máximos de una estación de aforo, se empleará únicamente el máximo caudal registrado cada año. Si en esa estación, se han registrado caudales cada 15 minutos, se obtienen más de 35.000 datos anuales del caudal registrado en la estación, pero se utilizará únicamente 1 dato de entre el total de los datos registrados, es decir, 1 de entre 35.000. Este dato sería el mayor del conjunto de los datos registrados en la estación. Como estos datos pertenecen al extremo de la distribución de todas las observaciones realizadas (población), no es extraño que la distribución acumulada de los datos extremos sea diferente a aquella de la población completa.

Los valores extremos son los valores máximos o mínimos seleccionados de un conjunto de datos, en este caso el conjunto de datos pertenecerá a valores de precipitación, la variable hidrológica de estudio. Las funciones de distribución de valores extremos tienen tres formas básicas llamadas:

- *EVI o de Gumbel*
- *EVII o de Frechet*
- *EVIII o de Weibull*

Se demuestra que estas tres formas, son casos especiales de una distribución de Valores Extremos General (GEV), cuya función de distribución acumulada es:

$$F(x) = \exp\left[-\left(1 - k \frac{x-u}{\alpha}\right)^{(1/k)}\right]$$

Donde k , u y α son parámetros a determinar que dependen de x y σ .

En la EVI, $k=0$ y x no tiene límites, mientras que en la EVII, $k<0$ y x está acotada por abajo en $(u + \alpha / k)$ y en la EVIII, $k>0$ y está acotada por arriba en $(u + \alpha / k)$.

La función de distribución acumulada de Valor Extremo Tipo I (EVI) o de Gumbel es:

$$F(x) = \exp\left[-\exp\left(\frac{-(x-u)}{\alpha}\right)\right]; -\infty \leq x \leq \infty$$

Los parámetros se pueden estimar como:

$$\alpha = \frac{\sqrt{6} \cdot s}{\pi}$$

$$u = \bar{x} - 0,5772 \alpha$$

5.3. AJUSTES A UNA DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD

Mediante el ajuste a una distribución de un conjunto de datos hidrológicos, una gran cantidad de información probabilística en la muestra puede resumirse en forma compacta en la función y en sus parámetros asociados. El ajuste de distribuciones puede llevarse a cabo por el método de los momentos o por el método de la máxima verosimilitud.

5.3.1. Método de los momentos

Fue desarrollado por primera vez por Karl Pearson (1902). Pearson consideró que unos buenos estimativos de los parámetros de una función de probabilidad son aquellos para los cuales los momentos de la función de densidad de probabilidad alrededor del origen son iguales a los correspondientes de la información de la muestra.

Si a cada uno de los valores de la muestras se le asigna una masa hipotética igual a su frecuencia relativa de ocurrencia ($1/n$), y se imagina que este sistema rota alrededor del origen $x=0$, como se aprecia en la figura, se obtiene el momento de cada observación. Si sumamos los momentos producidos para cada uno de los datos conocidos, el resultado obtenido es equivalente a calcular el centroide de un cuerpo, y corresponde con la media de la muestra:

$$\sum_n \left(\frac{x_i}{n}\right) = \frac{1}{n} \sum_n x_i = \bar{x}$$

El centroide correspondiente de la función de probabilidad:

$$\mu = \int_{-\infty}^{\infty} x f(x) dx$$

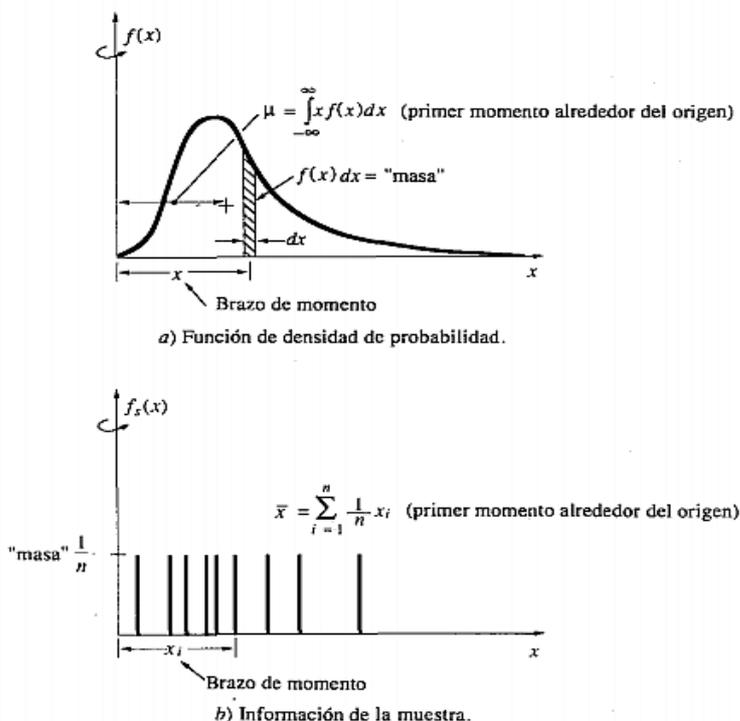


Ilustración 23: Modo en que el método de los momentos selecciona los valores para los parámetros de la función de densidad de probabilidad

Las ventajas de este método es que es fácil de aplicar y que es más apropiado para análisis prácticos en hidrología. El inconveniente es que no es el método teóricamente más correcto.

5.3.2. Método de la máxima verosimilitud

Este método fue desarrollado por primera vez por Fischer (1922). Fischer llegó a la conclusión de que el mejor valor de un parámetro de una distribución de probabilidad debería ser el valor que maximizara la verosimilitud o probabilidad conjunta de ocurrencia de la muestra observada.

Si el espacio muestral se divide en intervalos de longitud dx y se toma una muestra de observaciones independientes e idénticamente distribuidas x_1, x_2, \dots, x_n . El valor de la densidad de probabilidad para $X=x_i$ es $f(x_i)$ y la probabilidad de que la variable aleatoria ocurra en el intervalo de x_i es $f(x_i)dx$.

De las hipótesis anteriormente citadas, se llegan a las fórmulas siguientes:



- *Función de verosimilitud*

$$L = \prod_{i=1}^n f(x_i)$$

- *Función logarítmica de la verosimilitud*

$$\ln L = \sum_{i=1}^n \ln [f(x_i)]$$

La ventaja de este método es que es el más correcto para ajustar distribuciones de probabilidad a una determinada información, ya que produce los estimativos de parámetros más eficientes, es decir, los parámetros de población con los menores errores promedios. Sin embargo, por la naturaleza de los datos hidrológicos, no es necesario aplicar este método de tanta complejidad.

6. PRESENTACIÓN DE LOS DATOS DE PRECIPITACIÓN DISPONIBLES EN EL CASO DE ESTUDIO

6.1. SERIE TEMPORAL DE LLUVIA DE MÁXIMOS ANUALES EN 24 HORAS DE LA ALMUNIA DE DOÑA GODINA

Una serie temporal lluvia, son datos pluviométricos registrados en observatorios , en este caso los pertenecientes a la estación de la localidad de La Almunia de Doña Godina.

6.1.1. Información pluviométrica

La información pluviométrica para el presente estudio se ha obtenido de los datos registrados en la estación meteorológica de La Almunia de Doña Godina. La estación meteorológica pertenece al grupo de estaciones del centro territorial de AEMET de Aragón, La Rioja y Navarra.

La primera ubicación de la estación de tipo analógica fue en el edificio de la Escuela Universitaria Politécnica de La Almunia (EUPLA), estuvo en funcionamiento desde enero de 1980 a 2010 y fue gestionada y mantenida por el personal de la escuela. Posteriormente, en diciembre de 2010, se puso en funcionamiento la nueva estación meteorológica digital mantenida y gestionada hasta la actualidad por AEMET.

A continuación se explican los dos tipos de estaciones pluviométricas que ha habido en la localidad de La Almunia de Doña Godina:

- ***Estación pluviométrica analógica***

En dicha estación era necesario realizar el registro de las variables meteorológicas de manera manual, rellenando un estadillo proporcionado por AEMET.

Las variables meteorológicas que se registraban eran las siguientes:

- *Temperaturas máximas y mínimas*
- *Humedad*
- *Horas de sol*
- *Precipitación*

La precipitación era registrada con pluviógrafo de sifón. Este pluviógrafo consta de un tambor giratorio a velocidad constante. Este tambor arrastra un papel graduado (describiendo una gráfica precipitación-tiempo) que registra a través de una pluma, accionada por un flotador, la precipitación. Si no hay ningún evento de lluvia, el nivel del agua en el recipiente se mantiene constante y por lo tanto la pluma marca un línea recta horizontal.

Cuando empieza a llover, el agua que cae al pluviómetro, acciona la pluma a través del flotador, provocando una elevación vertical en el papel. Cuando la pluma alcanza el borde superior del papel, significa que el pluviómetro se encuentra lleno, se activa un dispositivo para vaciar el recipiente haciendo bajar el flotador rápidamente, lo que corresponde a una línea vertical en el gráfico descrito por la pluma. El registro de los datos meteorológicos se realizó semanalmente de forma manual desde enero de 1980 hasta noviembre de 2010.

- ***Estación pluviométrica digital***

A partir de diciembre de 2010, AEMET colocó una estación meteorológica automática. Esta estación recoge los datos digitalmente y los envía directamente a un servidor de AEMET. De esta forma, se puede conocer a través de la web de AEMET, los datos meteorológicos registrados en la estación.

Si se precisa de datos más precisos, la web no los proporciona, y es necesario pedirlos, estos datos meteorológicos no son gratuitos, a no ser, que seas entidad colaboradora como es el caso de la EUPLA.

Datos más precisos que puede proporcionar AEMET pueden ser los siguientes:

- Intensidad de lluvia máxima en un día en 10 minutos
- Intensidad de lluvia máxima en un día en 20 minutos
- Intensidad de lluvia máxima en un día en 30 minutos
- Intensidad de lluvia máxima en un día en 60 minutos
- Intensidad de lluvia máxima en un día en 2 horas
- Intensidad de lluvia máxima en un día en 6 horas
- Intensidad de lluvia máxima en un día en 12 horas

Se va a realizar el análisis estadístico sobre los eventos extremos de lluvia, a partir de la serie temporal de lluvia de máximos anuales en 24 horas registrados en la estación meteorológica de La Almunia de Doña Godina durante el período comprendido entre 1980 y 2014. Destacar que los datos pertenecen durante el periodo de 1980 a 2010 a la estación pluviométrica analógica y al periodo de 2010 a 2014 pertenecen a la estación pluviométrica digital.

Por ello el análisis estadístico para el presente estudio sólo se ha podido realizar sobre la variable hidrológica de la precipitación máxima en 24 horas.

Para el pasado año 2014, se han tenido que analizar los datos para obtener la precipitación máxima anual en 24 horas. En la Tabla 1 se muestra los datos proporcionados por AEMET para poder determinar la precipitación máxima anual en 24 horas.

Presentación de los datos de precipitación disponibles en el caso de estudio

Días	enero	febrero	marzo	abril	mayo	junio	julio	agosto	septiembre	octubre	noviembre	diciembre	
1	0	0	54	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8
2	2	0	8	50	0	0	0	82	8	0	0	0	0
3	0	0	2	42	0	0	0	198	0	0	0	0	0
4	72	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	104	0
5	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	4	0	0	0	0	14	76	0	0	0	0	0
7	0	10	0	0	0	0	0	8	0	16	0	0	0
8	0	4	0	0	0	0	0	0	0	26	0	0	10
9	0	36	0	0	0	0	174	0	0	0	8	10	4
10	0	10	0	44	0	0	98	0	0	0	22	0	0
11	8	0	0	0	0	0	46	0	0	0	54	26	0
12	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	76	0	0
13	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0	2
14	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	172
15	0	0	0	6	0	0	0	0	0	0	4	2	38
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	112	0
18	16	12	0	0	0	0	0	0	40	0	0	0	0
19	0	0	0	22	10	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	22	2	2	4	0	0	0	0	0	0
21	0	0	16	52	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	56	0	10	0	4	30	0	2	0	196	0	0	0
23	0	0	0	0	10	92	0	0	0	0	0	8	0
24	0	4	40	14	42	72	0	0	0	0	0	0	0
25	0	10	44	0	94	2	0	0	0	0	0	0	0
26	0	0	2	92	26	20	0	0	0	0	0	12	0
27	0	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20	0
28	10	18	0	0	38	0	0	0	0	6	0	34	24
29	0	0	0	0	0	2	0	0	0	6	0	288	0
30	0	0	4	0	54	0	0	0	0	0	0	57	0
31	4	0	0	0	0	0	6	0	0	0	0	0	0
2014	72	36	54	92	94	174	198	40	196	76	288	172	P24 288

Tabla 1: Datos pluviométricos registrados en la estación meteorológica de la Almunia de Doña Godina para el año 2014

Precipitación en décimas de milímetro¹

1 Precipitación en décimas de milímetro: 1 décima de milímetro equivale a 0,1 mm

Presentación de los datos de precipitación disponibles en el caso de estudio

Se determina que la máxima precipitación anual en 24 horas para el año 2014 es 28,8 mm.

Una vez se ha determinado la máxima precipitación para el año 2014, se puede realizar el análisis estadístico para los valores extremos de precipitación en 24 horas registrados en la localidad de la La Almunia de Doña Godina para el periodo comprendido entre 1980 y 2014.

En la Tabla 2 se pueden ver los valores extremos registrados, pertenecientes a la máxima precipitación anual en 24 horas.

Año	P ₂₄
1980	25,2
1981	40,4
1982	36
1983	28,2
1984	49,9
1985	15,1
1986	53,5
1987	44,8
1988	36,5
1989	33,2
1990	37
1991	30,3
1992	26,2
1993	33,2
1994	17,6
1995	22,6
1996	21,5
1997	48,1
1998	21
1999	85
2000	57,5
2001	20,3
2002	42
2003	59,5
2004	47,3
2005	22
2006	52,5
2007	37
2008	38,3
2009	12,2
2010	24,5
2011	23,8
2012	27,6
2013	56,4
2014	28,8

Tabla 2: Máxima precipitación anual en 24 horas

Precipitación en mm.

6.2. ESCENARIOS REGIONALIZADOS DE CAMBIO

CLIMÁTICO PARA DATOS MENSUALES DE PRECIPITACIÓN

Para evaluar el efecto del climático sobre la variable climatológica de estudio, la precipitación; se ha utilizado como referencia el proyecto *Escena*. El proyecto *Escena* genera escenarios regionalizados de cambio climático para los escenarios de emisiones del AR4 con modelos de alta resolución considerando la primera mitad del siglo XXI (período comprendido de 2001 a 2050).

Si bien es cierto que los datos empleados son los proporcionados por la colección de *Escenarios-PNACC Datos mensuales*, en él se incluyen los escenarios del proyecto *Escena*.

A continuación se presenta el proyecto *Escenarios-PNACC* y *Escena* con más detalle.

6.2.1. *Escenarios-PNACC Datos mensuales*

Escenarios-PNACC Datos mensuales presenta y documenta la nueva colección de escenarios climáticos regionalizados del Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático; recogiendo los progresos de la comunidad científica y empleando los escenarios globales del Cuarto Informe de Evaluación (AR4) del IPCC. Proporciona una completa colección de productos procesados que se han elaborado con el objetivo de facilitar al usuario especializado su uso y aplicación en los distintos ámbitos del PNACC, principalmente en las evaluaciones sectoriales de impactos, vulnerabilidad y adaptación. También tienen como objetivo, servir a usuarios menos especializados y a un público sin un perfil técnico específico.

Los modelos globales del clima, por su baja resolución espacial, no son adecuados para llevar a cabo estudios detallados de evaluación de los impactos del cambio climático. Con el objeto de aumentar dicha resolución, se han aplicado diversas técnicas de regionalización tanto estadísticas como dinámicas.

La colección de *Escenarios-PNACC Datos mensuales* incluye proyecciones regionalizadas pertenecientes a ambas categorías, resultado de los proyectos:

- Dos proyectos financiados por el antiguo MAGRAMA en el marco del Plan Nacional de I+D+i 2008-11:
 - *ESCENA*: regionalización dinámica

Presentación de los datos de precipitación disponibles en el caso de estudio

- *ESTCENA*: regionalización estadística
- Proyectos de regionalización de *AEMET*
- *Proyecto ENSEMBLES, del 6º Programa Marco de I+D de la UE.*

Los productos de *Escenarios-PNACC Datos mensuales* han sido convenientemente procesados para homogeneizarlos en términos de georeferenciación, formato y resolución, de manera que constituyen una completa fuente de información sobre las proyecciones futuras del clima en España.

Las incertidumbres asociadas a las emisiones de gases de efecto invernadero, los modelos globales y las técnicas de regionalización pueden explorarse con la utilización de los distintos escenarios de emisión considerados, los distintos modelos globales y las distintas técnicas de regionalización.

Los datos y productos de *Escenarios-PNACC Datos mensuales* se han puesto a libre disposición pública en el Servidor de Servicios Climáticos de *AEMET*, para que se encuentren al alcance de todos los usuarios interesados.

Como se ha indicado anteriormente las proyecciones climáticas del proyecto Escenariso-PNACC utilizan como referencia los escenarios del IV Informe de Evaluación del ICCP (AR4). Sin embargo en la actualidad se trabajo con el Nuevo V Informe de Evaluación del IPCC (AR5), siendo las aportaciones más importantes las siguientes:

- Mejor tratamiento de la información regional mediante la evaluación específica de fenómenos climáticos clave (monzones, ciclones, etc.).
- Evaluación de los procesos relacionados con las nubes y los aerosoles.
- Evaluación total del cambio en el nivel del mar.
- Evaluación total del ciclo del carbono.
- Proyecciones de cambio climático para el corto y largo plazo.
- Atlas de proyecciones climáticas regionales.

Se puede decir que, en lo referente a las bases físicas, el AR5 confirma y refuerza, los resultados del anterior informe (AR4). Se basa en nuevas evidencias extraídas de un mayor número de observaciones, modelos climáticos mejorados, una mejor comprensión de los procesos y retroalimentaciones del sistema climático, y un mayor número de proyecciones de cambio climático.

El nivel de certeza a la hora de atribuir el cambio del clima a causas antropogénicas ha ido aumentando en los sucesivos informes de evaluación: en el AR3 se estimaba una

probabilidad superior al 66%, en el AR4 superior al 90% y en el AR5 superior al 95%.

6.2.1.1. Nuevos escenarios de emisión: RCPs

En el AR5 se han definido cuatro nuevos escenarios de emisión, las denominadas Sendas Representativas de Concentración (RCP, de sus siglas en inglés). Éstas se identifican por su FR total para el año 2100 que varía desde 2,6 a 8,5 W/m. Los escenarios de emisión utilizados en el AR4 (denominados SRES) no contemplaban los efectos de las posibles políticas o acuerdos internacionales tendentes a mitigar las emisiones, representando posibles evoluciones socio-económicas sin restricciones en las emisiones. Por el contrario, algunos de los nuevos RCP pueden contemplar los efectos de las políticas orientadas a limitar el cambio climático del siglo XXI.

	FR	Tendencia del FR	[CO ₂] en 2100
RCP2.6	2,6 W/m ²	decreciente en 2100	421 ppm
RCP4.5	4,5 W/m ²	estable en 2100	538 ppm
RCP6.0	6,0 W/m ²	creciente	670 ppm
RCP8.5	8,5 W/m ²	creciente	936 ppm

Ilustración 24: Nuevos escenarios climáticos del AR5.

Cada RCP tiene asociada una base de datos de alta resolución espacial de emisiones de sustancias contaminantes (clasificadas por sectores), de emisiones y concentraciones de gases de efecto invernadero y de usos de suelo hasta el año 2100, basada en una combinación de modelos de distinta complejidad de la química atmosférica y del ciclo del carbono.

Los escenarios de emisión evaluados en el AR5 predicen proyecciones con un mayor aumento de temperatura (alrededor de 4-5 °C), coincidiendo con la proyección más alta del AR4. Sin embargo, en el otro extremo están aquellas proyecciones que predicen los rangos de aumento de temperatura más pequeños muestran valores significativamente más bajos en el AR5 que en el AR4. La explicación es que en el AR5 se han incorporado escenarios con menores emisiones que los contemplados en el AR4.

Presentación de los datos de precipitación disponibles en el caso de estudio

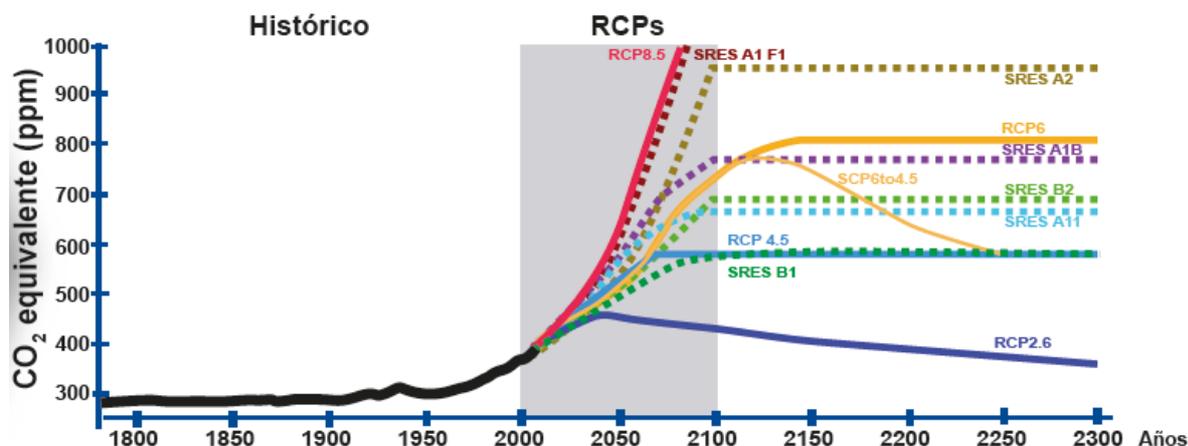


Ilustración 25: Concentración de CO₂ equivalente para distintos escenarios de emisión.

Las proyecciones proporcionadas por el AR4 y el AR5 no son directamente comparables, ya que se basan en distintas colecciones de escenarios, pero ambas son consistentes entre sí y permiten cierta comparación solo entre los escenarios que son próximos en cuanto a volumen y ritmo de las emisiones.

No se han empleado los escenarios de AR5 debido a que las referencias bibliográficas son escasas y no están disponibles las proyecciones regionalizadas de precipitación en el proyecto Escenarios-PNACC. Por otra parte AEMET, en su página web tiene disponibles los resultados gráficos para los escenarios de cambio climático del AR5.

6.2.1.2. Los escenarios climáticos regionalizados y el Plan Nacional de Adaptación al cambio climático

El Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PNACC) es el marco de referencia para las actividades de adaptación al cambio climático en España. El conocimiento de las condiciones actuales del clima y la estimación del clima futuro de nuestro país, a través de modelos climáticos regionalizados, constituyen uno de los elementos imprescindibles para evaluar los impactos y vulnerabilidades de los sectores y sistemas que puedan verse afectados por el cambio climático. Por ello la estructura del PNACC se ha construido alrededor de la información climática presente y futura facilitada por los escenarios.

Los escenarios regionalizados de cambio climático son proyecciones del clima futuro sobre una región geográfica o territorio determinado, elaboradas con una resolución espacial lo más aproximada posible. Estas proyecciones del clima se obtienen a partir de modelos globales de circulación general los llamados GCM (*Global*

Climate Model), donde interactúan los diferentes componentes del sistema climático. El inconveniente de los GCM es su escala espacial, que impide evaluar los impactos y vulnerabilidades frente al cambio climático de regiones geográficas o territorios determinados, en los que es necesario una escala más detallada.

El objetivo principal del *PNACC* es generar escenarios para el territorio español de mayor resolución espacial que los modelos globales de los que derivan. El segundo objetivo del *PNACC* se puede decir que es poner a disposición los escenarios de cambio climático regionalizados a los distintos expertos, agentes y actores sectoriales, de las administraciones públicas y privadas, y de la sociedad en general.

El *PNACC* identifica a la Agencia Estatal de Meteorología (*AEMET*) como la institución responsable de garantizar el desarrollo de los escenarios climáticos regionalizados, con coordinación de los grupos de investigación climáticos españoles, para así poder ofrecer una colección unificada de escenarios de cambio climático para España, de forma ordenada y documentada.

Por ello, esta colección se considera, la referencia para la descripción y la evaluación de impactos y la vulnerabilidad del cambio climático en España.

6.2.1.3. Proyecciones y escenarios climáticos

6.2.1.3.1. Modelos Globales del Clima

Los modelos globales del clima son representaciones matemáticas de los procesos físicos (atmósfera, hidrosfera, criosfera, litosfera y biosfera) que tienen lugar en los distintos componentes del sistema climático, teniendo también en cuenta las interacciones que se producen entre ellos y los forzamientos naturales (por ejemplo la radiación solar) y antropogénicos (por ejemplo las emisiones de gases de efecto invernadero) a los que está sometido el sistema. Esos modelos son las mejores herramientas disponibles para hacer proyecciones del clima futuro, y por tanto de estimar el cambio climático y su magnitud.

El dominio de los modelos globales es todo el planeta y sus cálculos se realizan de forma tridimensional. Los modelos globales simulan de forma fiable los principales rasgos del clima global en el planeta y producen resultados válidos a escala hemisférica y continental.

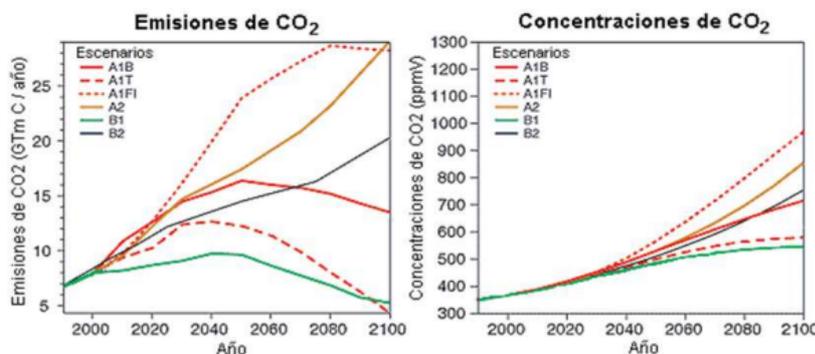


Ilustración 26: Evoluciones de emisiones globales de CO₂ a la atmósfera y evoluciones de las concentraciones globales de CO₂ que resultarían de tales emisiones

Los modelos globales, contrastados, calibrados y validados con datos reales observados, se emplean para hacer proyecciones del clima futuro. Para ello, los modelos son forzados con hipotéticas concentraciones atmosféricas de los gases de efecto invernadero a lo largo del siglo XXI que resultan de diferentes escenarios de emisiones (A2, A1B, B1). Estos escenarios son un conjunto de estimaciones alternativas que representan posibles líneas de evolución en diferentes ámbitos y sectores de la vida.

Los detalles sobre los diferentes escenarios de emisión se encuentran en el Informe especial sobre escenarios de emisiones (SRES, IPCC 2001), siendo los escenarios de emisión B1, A1B y A2, en orden creciente de emisión, para cubrir la incertidumbre de las estimaciones.

Las distintas proyecciones del clima futuro generadas por medio de modelos globales, forzadas en función de los distintos escenarios de emisión, proporcionará una horquilla de valores estimados de los distintos parámetros climáticos a lo largo del siglo XXI. La comparación de un período climático futuro frente a un periodo de referencia o control, ofrece estimaciones proyectadas de la dirección y la intensidad del cambio climático, para cada una de las variables.

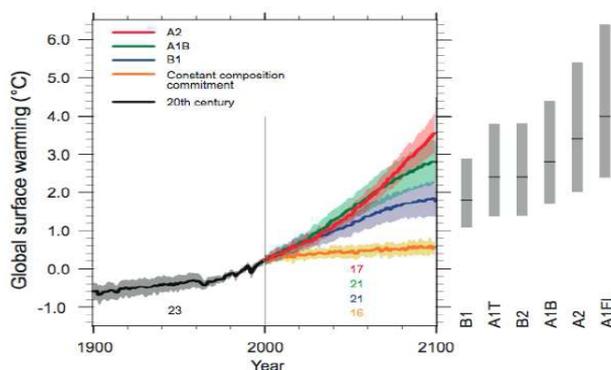


Ilustración 27: Proyecciones mundiales de temperatura media para el siglo XXI según varios modelos globales del clima

6.2.1.3.2. Regionalización de modelos globales: técnicas dinámicas y estadísticas

Como se ha comentado en apartados anteriores, los modelos globales del clima, por su baja resolución espacial, no se pueden utilizar para realizar estudios regionalizados de evaluación de impactos del cambio climático, debido a que es necesario una resolución del orden de kilómetros o de localizaciones específicas.

Para resolver este problema se han desarrollado diversas técnicas cuyo objetivo es aumentar la resolución de los modelos globales, para conseguir una escala de regionalización más detallada.

Una técnica muy empleada es la denominada *downscaling* (regionalización) de los modelos globales, para reelaborar una descripción de las variables climáticas a escalas de mayor detalle. Sus resultados son los llamados *escenarios de cambio climático*.

Todas las técnicas de regionalización parten de los resultados de los modelos climáticos globales para obtener representaciones del clima más detalladas y mejor ajustadas a las características locales. Quiere decir que estas proyecciones regionalizadas heredan las fortalezas y las debilidades de los modelos globales originarios.

Los métodos de regionalización (*downscaling*) se clasifican en dos grupos:

1. **Método estadístico** (*downscaling estadístico*)

Se basan en la construcción de modelos estadísticos a partir de la relación que se establece entre las variables a gran escala proporcionadas por los modelos globales y las variables observadas en los observatorios meteorológicos en superficie, durante un periodo de control (por ejemplo período de 30 años). El modelo una vez ha sido ajustado y calibrado se aplica para proyectar regionalmente los escenarios de cambio climático.

Estas proyecciones pueden realizarse sobre *localidades puntuales* (donde se ubican las estaciones de observación) o bien sobre *rejillas regulares*, que cubren todo el territorio español (se generan pro métodos geoestadísticos).

Estos métodos ofrecen la capacidad de proyectar un número de variables limitado (generalmente precipitación y temperatura). Las técnicas de regionalización estadística asumen que las relaciones entre las variables climáticas de gran escala y las observadas se mantienen invariables, es decir, las relaciones establecidas en el periodo de control con datos históricos observados no se verán modificados en el futuro en un contexto de cambio climático.

2. **Método dinámico o modelos regionales** (*RCM, Regional Climate Model*):

Parten de una concepción similar a la de los modelos globales, pero se resuelven sobre un dominio y a una escala limitada y con un tamaño de celda mucho menor que en los modelos globales. Para su desarrollo, los modelos regionales se anidan en los modelos globales, proporcionando resultados a una resolución entre 10 y 50 km, e incorporando en muchos casos procesos climáticos que los modelos globales no tienen en cuenta ni consideran.

Los modelos dinámicos también recogen con más detalle la variabilidad espacial de parámetros como topografía, usos de suelo, líneas de costa, etc. Generan proyecciones regionales de cambio climático para un gran número de variables climáticas, y permite evaluar impactos del cambio climático asociados a extremos climáticos (olas de calor, periodos de sequía, lluvias torrenciales, etc).

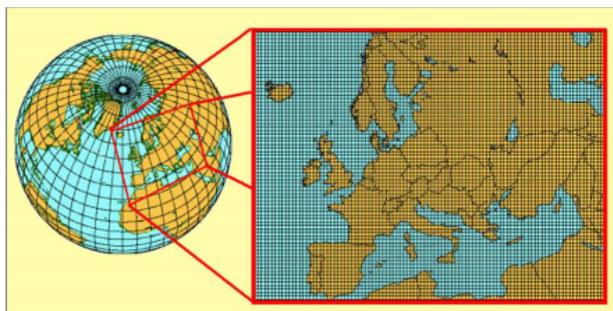


Ilustración 28: Un modelo regional con tamaño de celdilla reducido

La colección de *Escenarios-PNAC Datos mensuales* incluye modelos de regionalización de ambas categorías, tanto estadísticas como dinámicas.

A continuación se presentan las ventajas y desventajas de los dos métodos de regionalización.

Método	Ventajas	Desventajas
Regionalización Dinámica	<ul style="list-style-type: none"> Modelo físico con incorporación de realimentaciones entre las variables del sistema climático. Alta resolución espacial en rejilla y temporal Modeliza un gran número de variables Capacidad de análisis del cambio en los extremos climáticos 	<ul style="list-style-type: none"> Elevado coste computacional Valores de las variables climáticas representativos de los promedios de cada celdilla, no de localidades puntuales
Regionalización Estadística	<ul style="list-style-type: none"> Utilizan la climatología real observada para obtener los valores proyectados de las variables climáticas Bajo coste computacional Resolución espacial muy alta, en localidades puntuales o rejillas regulares No requieren calibración de los resultados 	<ul style="list-style-type: none"> Modelo estadístico que supone estacionariedad (las relaciones predictor-predictando se mantienen invariables) Necesidad de observaciones diarias de calidad para un período representativo Número de variables proyectado limitado a las variables observadas

Tabla 3: Ventajas y desventajas de los métodos de regionalización

La colección *Escenarios-Datos mensuales* proporciona las mayores resoluciones que hay disponibles en la actualidad.

6.2.1.3.3. Consideraciones sobre la incertidumbre

El proceso para obtener los escenarios de cambio climático regionalizados está sujeto a alguna fuente de incertidumbre, que hay que tener en cuenta cuando se empleen para evaluar impactos del cambio climático.

Las fuentes de incertidumbre pueden ser las siguientes:

1. **Futuros escenarios de emisión de gases de efecto invernadero.** A medida que se proyecta su evolución a lo largo del siglo, la incertidumbre aumenta.
2. **Sensibilidad climática global.** La falta de conocimiento de la respuesta del clima frente a cambios en el forzamiento externo y por las simplificaciones que incorporan los modelos globales del clima.
3. **Incertidumbre que aportan los métodos de regionalización de los modelos globales.** Las técnicas estadísticas consideran que las variables climáticas a gran escala y locales se mantienen invariables en un contexto de cambio climático. Por otra parte, las técnicas dinámicas consideran las mismas incertidumbre que los modelos globales del clima.

Las fuentes de incertidumbres en el proyecto *Escenarios-PNACC Datos mensuales* se recogen en:

- La consideración de distintos modelos globales.
- El forzamiento por distintos escenarios de emisión.
- El empleo de varias técnicas de regionalización, tanto dinámicas como estadísticas.

La coincidencia de resultados y tendencias obtenidas por los diferentes escenarios, modelos y regionalizaciones se considera un indicador de la fiabilidad de las proyecciones. Por el contrario, la falta de coincidencia se asocia con alta incertidumbre.

6.2.1.4. Características de la colección Escenarios-PNACC Datos mensuales

6.2.1.4.1. Modelos Globales

En el proyecto *Escenarios-PNACC Datos mensuales* se han utilizado simulaciones de tres GCM diferentes:

- *ECHAM*

- *HadCM3*
- *CNRM-CM3*

Los escenarios estadísticos incorporan un modelo adicional: *BCM2*, también se utiliza algún modelo dinámico de *ENSEMBLES*.

Acrónimo	Atmósfera	Resolución	Niv.	Océano	Resolución	Niv.
ECHAM5	ECHAM5	1.875°	31	MPI-OM	1.5°	40
CNCR-CM3	ARPEGE V3	2.8°	45	OPA8.1	0.5x2°	31
HadCM3Q3 HadCM3Q0 HadCM3Q16	HadAM3	2.75x3.75°	19	HadGOM1	1.25°	20
BCM2	ARPEGE V3	2.8°	31	MICOM 2.8	2.4°	35
HadGEM2	HadGAM1	1.25x1.875°	38	HadGOM1	0.33x1°	40

Tabla 4: Características de los modelos globales

6.2.1.4.2. Escenarios de emisión

Escenarios-PNACC Datos mensuales ofrece regionalizaciones del clima futuro en España para el siglo XXI bajo tres escenarios de emisiones considerados en el SRES (*A2, A1B y B1*).

Los escenarios de emisiones representan tres situaciones:

- **A2**: considera un futuro de uso más intensivo de combustibles fósiles
- **B1**: considera un futuro de uso más moderado de combustibles fósiles
- **A1B**: considera un futuro de uso intermedio de combustibles fósiles

Los escenarios abarcan un gran número de las principales fuerzas determinantes demográficas, económicas y tecnológicas de las emisiones de GEI y de dióxido de azufre. Las principales fuerzas determinantes de las futuras trayectorias de los gases de efecto invernadero seguirán siendo el cambio demográfico, el desarrollo social y económico, y la rapidez y dirección del cambio tecnológico.

Cada escenario representa una interpretación cuantitativa específica de una de las cuatro líneas evolutivas. El conjunto de escenarios basados en una misma línea evolutiva constituye una familia de escenarios.

Cuatro líneas evolutivas cualitativas que dan lugar a cuatro conjuntos de

escenarios denominados "familias": A1, A2, B1 y B2.

Cada línea evolutiva está basada en una dirección de los acontecimientos futuros, cada uno diferente, de tal forma que las cuatro líneas evolutivas difieren con un grado de irreversibilidad creciente. En su conjunto describen futuros divergentes que cubren una parte considerable de las incertidumbres de las principales fuerzas determinantes.

- **La línea evolutiva y familia de escenarios A1** describe un mundo futuro con un rápido crecimiento económico, una población mundial que alcanza su valor máximo hacia mediados del siglo y disminuye posteriormente, y una rápida introducción de tecnologías nuevas y más eficientes. Sus características distintivas más importantes son la convergencia entre regiones, la creación de capacidad y el aumento de las interacciones culturales y sociales. La familia de escenarios A1 se diferencian en su orientación tecnológica, para el caso del escenario A1B, utiliza de forma equilibrada todo tipo de fuentes de energía.
- **La familia de líneas evolutivas y escenarios A2** describe un mundo muy heterogéneo. Sus características más distintivas son la autosuficiencia y la conservación de las identidades locales. Las pautas de fertilidad en el conjunto de las regiones convergen muy lentamente, con lo que se obtiene una población mundial en continuo crecimiento. El desarrollo económico está orientado a las regiones, y el crecimiento económico por habitante así como el cambio tecnológico están más fragmentados y son más lentos que en otras líneas evolutivas.
- **La familia de líneas evolutivas y escenarios B1** describe un mundo convergente con una misma población mundial que alcanza un máximo hacia mediados del siglo y desciende posteriormente, pero con rápidos cambios de las estructuras económicas orientadas a una economía de servicios y de información, acompañados de una utilización menos intensiva de los materiales y de la introducción de tecnologías limpias con un aprovechamiento eficaz de los recursos. Se da prioridad a las soluciones a nivel mundial encaminadas a la sostenibilidad económica, social y medioambiental.
- **La familia de líneas evolutivas y escenarios B2** describe el que predominan las soluciones locales a la sostenibilidad económica, social y medioambiental. Es un mundo cuya población aumenta progresivamente a un ritmo menor que en A2, con unos niveles de desarrollo económico intermedios, y con un cambio tecnológicos menos rápido y más diverso que en las líneas

evolutivas B1 y A1.

Hay un alto nivel de coincidencia y evidencia respecto a que con las políticas actuales de mitigación respecto a los efectos del cambio climático y con las prácticas de desarrollo sostenible, las emisiones mundiales de GEI seguirán aumentando en los próximos decenios.

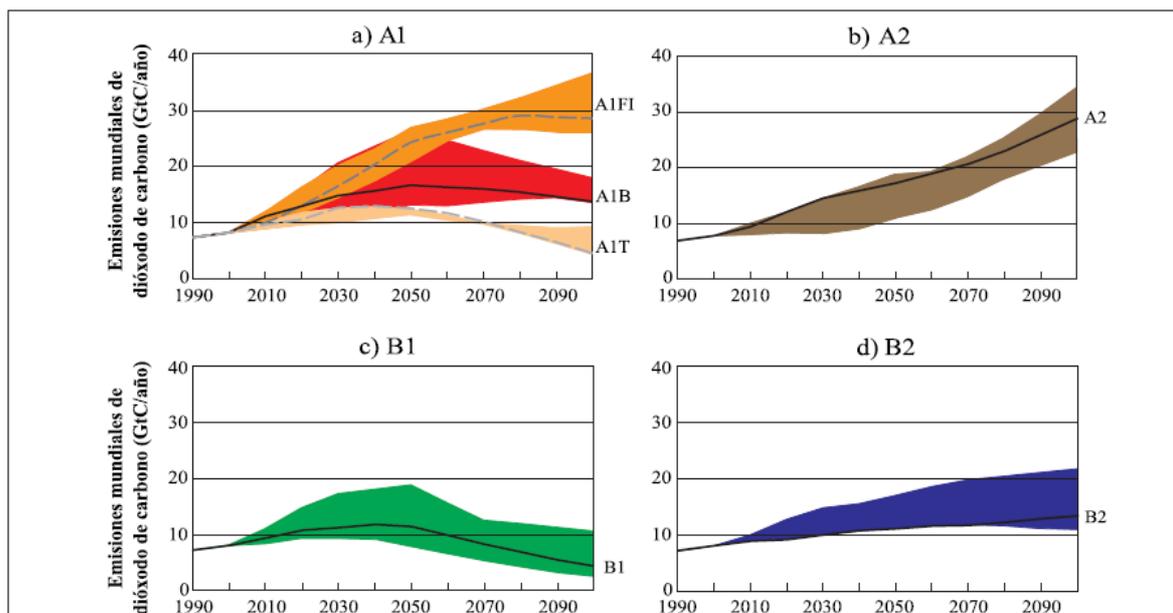


Ilustración 29: Emisiones de dióxido de carbono. Unidades en gigatoneladas de carbono (GtC/año)

6.2.1.4.3. Horizontes temporales de los escenarios

Escenarios-PNACC Datos mensuales ofrece simulaciones del clima futuro que abarcan períodos diferentes, en función del proyecto de origen.

Se cuentan con proyecciones que abarcan la primera mitad del siglo XXI, en las modelizaciones dinámicas procedentes del proyecto *ESCENA*, y alguno de *ENSEMBLES*. Los modelos dinámico de *AEMET* y la mayoría de *ENSEMBLES* ofrecen proyecciones hasta final del siglo XXI, y los modelos estadístico de *ESTCENA* y *AEMET* también cubren el siglo XXI.

6.2.1.5. Catálogo de productos y proyecciones climáticas de Escenarios-PNACC Datos mensuales

Se han identificado tres tipologías de usuarios con demandas diferenciadas de productos.

Usuario General: El producto que demanda este tipo de usuario es

Presentación de los datos de precipitación disponibles en el caso de estudio

principalmente de tipo gráfico o descriptivo.

Usuario Sectorial: Los productos que demanda este tipo de usuarios son los datos numéricos de los escenarios de cambio climático, desagregados espacialmente y agregados a escala temporales mensuales o anual.

Usuario Especializado: Los productos que demanda este tipo de usuario son los datos brutos e información original procedente de los proyectos de regionalización.

6.2.1.5.1. Salida de los productos numéricos

Los productos numéricos se presentan en forma de rejillas regulares y en forma de un conjunto de datos puntuales, dependiendo del método empleado en la regionalización. Los *métodos dinámicos* proporcionan productos en rejilla y los *estadísticos* en rejilla y en localidades puntuales.

- **Productos en rejilla**

Los productos en rejilla ofrecidos en *Escenarios-PNACC Datos mensuales* usan una cuadrícula común y homogénea de una resolución de 0,2° (aproximadamente 20 km), que cubre la España peninsular y Baleares.

Esta rejilla corresponde a la utilizada en el desarrollo de la base de datos denominada *Spain 02*, proyecto que ha generado capas en rejillas de análisis de precipitación diaria y temperaturas máximas y mínimas diarias en dicha cuadrícula, partiendo de una red de 2500 estaciones de *AEMET*, para el período entre 1950 y 2008.

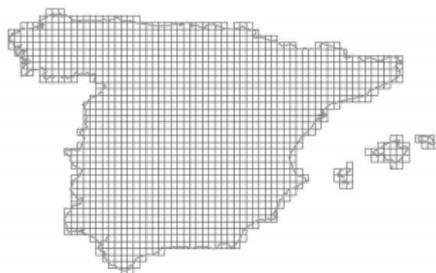


Ilustración 30: Rejilla regular de 0,2° utilizada en el proyecto Spain 02

- **Productos en localidades puntuales**

Los productos para precipitación en localidades puntuales ofrecidos en *Escenarios-PNACC Datos mensuales* se refieren a 2.321 puntos que se distribuyen por la geografía de España.



Ilustración 31: 2.321 estaciones con datos de precipitación

6.2.1.5.2. Formato de los productos

Los datos que se encuentran en **rejilla** en los productos de *Escenarios-PNACC*

Datos mensuales se ofrecen en dos formatos diferentes:

- *Formato ASCII*
- *Formato SIG*

Los datos en **localizaciones puntuales** se presentaran únicamente en formato *ASCII*.

- *Formato ASCII*: la información se codifica en un único fichero ASCII con extensión *.csv* (*comma separated value*, columnas separadas por comas), en el que cada fila corresponde a una fecha y cada columna a un punto de rejilla o localidad.
- *Formato SIG*: información almacenada de forma desagregada, con un fichero para cada mes y año en formato "ASCII grid ARCGIS".

Para usuarios especializados, estos productos pueden obtenerse en formato *NetCDF*, tanto en **rejilla**, como para **localidades puntuales**.

6.2.2. Acceso y descarga de los datos

6.2.2.1. Fuente de los datos

Los productos de *Escenarios-PNACC Datos mensuales* dirigidos a usuarios de tipo general y sectorial se encuentran en la web de la *Agencia Estatal de Meteorología* (www.aemet.es).

Para acceder al catálogo de productos de *Escenarios-PNACC Datos mensuales*, hay que acceder en *Servicios climáticos > Proyecciones climáticas para el siglo XXI*.

Evaluación de los efectos del cambio climático en los problemas de inundación de la villa de La Almunia de Doña Godina (Zaragoza)
 Presentación de los datos de precipitación disponibles en el caso de estudio

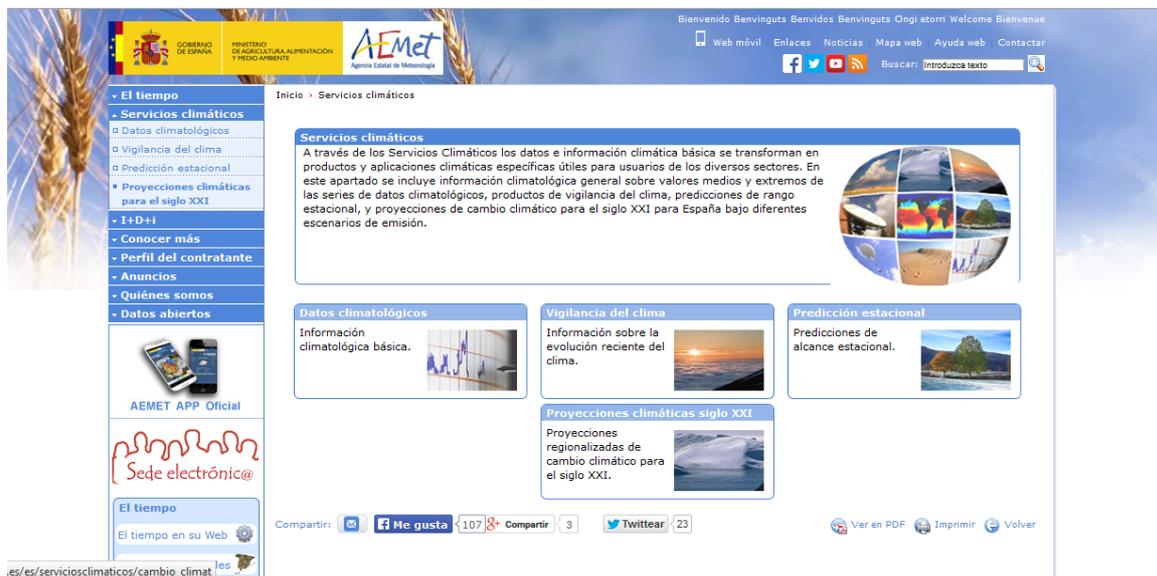


Ilustración 32: Aspecto de la web de la AEMET



Ilustración 33: Acceso a los productos de Escenarios-PNACC Datos mensuales

6.2.2.2. Organización de la información

Dentro de la ventana de *Escenarios PNACC Datos mensuales*, el usuario debe realizar los siguientes pasos para que tenga acceso a los diferentes paquetes de información sobre las variables de su interés:

1. Seleccionar la pestaña de datos en *rejilla* o *puntuales*. Para el caso de estudio al que se hace referencia en este Trabajo Fin de Grado se utilizan los datos en

rejilla.

2. Seleccionar Variable-Escenario-Proyecto-Formato:

En el caso de estudio que se presenta:

- **Variable:** se selecciona la variable de interés, en este caso, Precipitación máxima en 24h.
- **Escenario:** los escenarios de emisiones que se evaluarán serán *B1*, *A1B*, *A2*.
- **Proyecto:** el proyecto fuente de los datos utilizado es Escena.
- **Formato:** el formato utilizado es *.txt* con extensión "csv", anteriormente explicado.

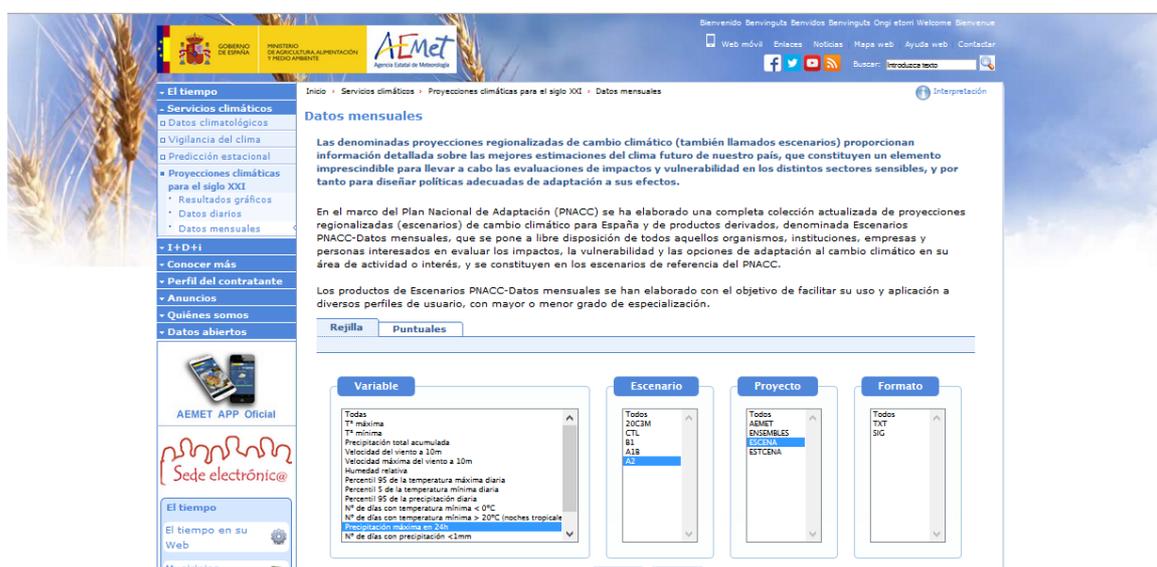


Ilustración 34: Aspecto de Escenarios-PNACC Datos mensuales en la web de AEMET

6.2.2.3. Nomenclatura de los ficheros

Los ficheros comprimidos con los datos de la variable climática, se han codificado de manera que proporcione toda la información posible sobre su contenido, para el estudio sería:

- Datos en rejilla o puntuales: *R* o *P*
- Código de la variable: *RX1* (Máxima precipitación mensual en 24 horas)
- Escenarios de emisiones (*B1*, *A1B*, *A2*)
- Proyecto fuente (*ESC*, del proyecto *ESCENA*)
- Formato (*TXT*)

Ejemplo: *R_RX1day_A2_ESC_TXT.zip*, se refiere a datos en rejilla (*R*), sobre la variable de máxima precipitación mensual en 24 horas (*RX1*), para el escenario *A2*,

Presentación de los datos de precipitación disponibles en el caso de estudio

generados en el proyecto *Escena* (regionalización dinámica) y en formato *TXT*.

Los archivos comprimidos (.zip) se componen, a su vez, de varios archivos de datos, que están codificados siguiendo el esquema siguiente:

En el caso concreto de **datos en formato texto** (el formato que se ha empleado en el presente estudio) la información se codifica en un único fichero *ASCII* con extensión "csv", en el que cada fila corresponde a una fecha y cada columna a un punto de rejilla o a una localidad. La primera columna indica la fecha particular (en formato YYYYMM) y el resto de columnas indican los valores correspondientes a los puntos o localidades, según el orden en el que aparecen en el fichero "Master.txt". Este fichero maestro proporciona el código (el código de *AEMET* para las localidades), nombre (para punto de rejilla), longitud, latitud y altura de cada uno de los puntos o localidades.

En el caso de estudio que se presenta, la información estaba disponible en rejilla, se selecciona el punto del fichero "Master.txt" más próximo a la localidad de La Almunia de Doña Godina. A continuación en la Ilustración 35 se presentan el nombre del punto de rejilla y su longitud, latitud y altura.



Ilustración 35: grid0955 -1.4, 41.4, 659.928

6.2.3. Proyecto fuente de datos: Proyecto Escena

Ahora se va a describir los resultados de la regionalización dinámica de

escenarios del AR4 realizada en el marco del proyecto *Escena*. Destacar, que los resultados se han empleado para evaluar los efectos del cambio climático sobre la variable climática de estudio, en este caso la precipitación, en la villa de La Almunia de Doña Godina.

Las proyecciones futuras abarcan tres escenarios de emisión (*A1B*, *A2*, *B1*) y tres modelos globales (*ECHAM5*, *HadCM3*, *CNRM*), regionalizados por 4 modelos regionales diferentes (*PROMES*, *WRF*, *MM5* y *REMO*) durante la primera mitad del siglo XXI (2001-2050).

GCM	Escenarios	PROMES	MM5	REMO	WRF-A	WRF-B
ECHAM5	A1B	+	+	+	+	+
	A2	+	+		+	
	B1	+	+	+		
CNRM3	A1B	+	+			
	B1	+	+			
HadCM3Q0	A1B	+	+			
HadCM3Q16	A1B	+	+			

Tabla 5: Matriz de proyecciones de *Escena* con las distintas combinaciones GCM/RCM

El proyecto *Escena* aglutina los esfuerzos de regionalización dinámicos de las proyecciones globales del AR4 por parte de 4 grupos de investigación que vienen colaborando en este proyecto desde 2009. Cada grupo aporta su experiencia en la simulación numérica con un modelo climático regional diferente. Las instituciones participantes son la Universidad de Castilla-La Mancha (modelo *PROMES*), que actúa como coordinador del proyecto, la Universidad de Murcia (modelo *MM5*), la Universidad de Alcalá de Henares (modelo *REMO*) y la Universidad de Cantabria (modelo *WRF*).

Las simulaciones realizadas comparten un dominio mínimo que cubre todo el territorio español, incluidas las Islas Canarias, aunque cada modelo ha utilizado un dominio diferente. La resolución horizontal es de aproximadamente 25 km, por lo que la representación de regiones pequeñas como las Islas Canarias sigue siendo limitada.

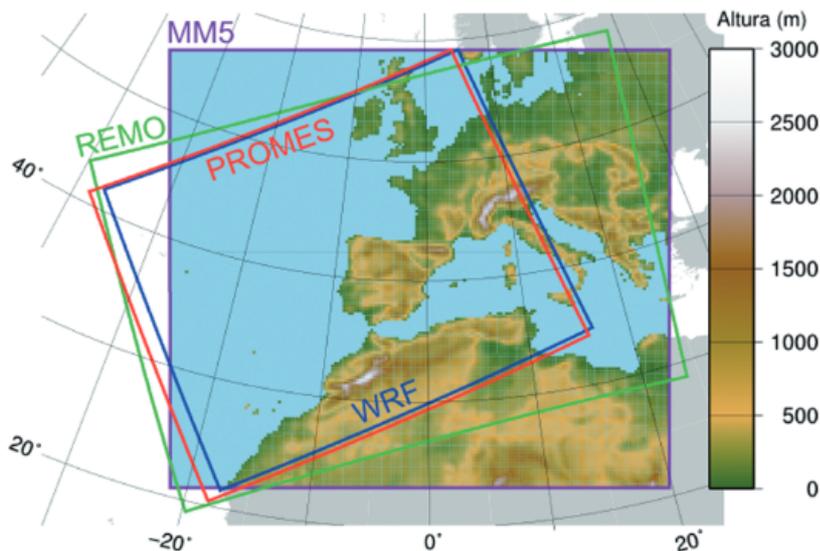


Ilustración 36: Dominio espacial cubierto por cada uno de los modelos regionales de Escena

Las simulaciones regionales se han anidado a simulaciones globales del AR4 con resoluciones horizontales del orden de 200-300 km, por lo que se ha aumentado la resolución de éstas en un orden de magnitud.

Escena persigue la producción de escenarios de cambio climático para la primera mitad del siglo XXI complementarios a los producidos en el marco de proyectos anteriores como *ENSEMBLES*. En este sentido, comparte con éste resolución espacial, aunque el dominio de simulación se ha centrado sobre la Península Ibérica y se ha extendido para cubrir las Islas Canarias. También se comparten dos de los modelos regionales de *ENSEMBLES* (*PROMES* y *REMO*), aunque con diversas mejoras.

Por último, se han utilizado los mismos modelos globales que forzaron las simulaciones de *ENSEMBLES*. Por otro lado, *Escena* añade dos modelos regionales que no estaban presentes en proyectos europeos anteriores (*MM5* y *WRF*) y explora los escenarios *A2* y *B1*, además del *A1B* utilizado en *ENSEMBLES*. Además de estas fuentes de incertidumbre, se explora la incertidumbre asociada a las parametrizaciones físicas mediante la inclusión de dos configuraciones del modelo *WRF*.

- **Modelos Regionales utilizados en ESCENA**

En *Escena* se han utilizado 4 modelos regionales diferentes, la Tabla 6 resume los detalles técnicos relacionados con la resolución y proyección geográfica de los modelos.

RCM	Proyección	Resolución Horizontal	Resolución Vertical
PROMES	Lambert	25 km	37
MM5	Lambert	25 km	30
REMO	Rot. lat-lon	0.22°	31
WRF	Lambert	25 km	33

Tabla 6: Características de los modelos regionales de ESCENA

Una de las tareas iniciales del proyecto ha sido el estudio y adaptación de los modelos a la zona de interés.

Los RCMs suelen mostrar sesgos respecto a la realidad observada. Esto es debido a que utilizan principios físicos para obtener las variables climáticas a partir de unas condiciones de frontera distantes y el conocimiento de otras variables no climáticas que, a menudo, se conocen con poca precisión. La representación de fenómenos de pequeña escala se aborda mediante modelos físicos simplificados que dependen de parámetros no observables que tienen que ser calibrados empíricamente. Por lo tanto, los datos proporcionados por un RCM deben ser interpretados y utilizados a la luz de estos sesgos. A cambio, estos modelos proporcionan multitud de variables climáticas consistentes dinámicamente entre sí y con los forzamientos, tanto los de gran escala como los que modulan el clima regional.

Las primeras simulaciones disponibles en *Escena* constituyen simulaciones con condiciones de frontera perfectas, que permiten establecer los sesgos de cada modelo y entrenar modelos estadísticos para corregirlos, si este paso fuera necesario. Las condiciones de frontera se tomaron del reanálisis ERA-Interim que es la última generación de reanálisis; estas simulaciones cubren el período 1989-2008.

- **Conclusiones del proyecto ESCENA**

El proyecto *ESCENA* proporciona proyecciones climáticas que cubren el período 2001-2050 obtenidas mediante la regionalización dinámica de proyecciones globales del 4º informe de evaluación del IPCC. Estas proyecciones cubren las incertidumbres asociadas a los escenarios de emisiones, a la formulación de los GCMs, a los parámetros de un GCM, a la formulación de los RCMs y a la elección de parametrizaciones en el RCM. A pesar de que su elevado coste computacional impide

la simulación de todas las combinaciones posibles, este conjunto de datos sin precedentes sobre la Península Ibérica posibilita un elevado número de estudios tanto en climatología como en los diversos sectores de impactos.

Los resultados del proyecto son especialmente útiles en estudios que involucran variables difícilmente medibles y de las que no se dispone de observaciones con la suficiente densidad espacial o continuidad temporal.

Como cualquier otro modelo, los RCMs poseen sesgos respecto a la realidad observada. En parte heredados de los GCMs y en parte generados por las propias aproximaciones de los RCMs. Estos sesgos deben ser evaluados y tenidos en cuenta a la hora de aplicar las salidas de este proyecto.

Los datos de cada proyección se han incluido en el **Anexo I: Datos mensuales de precipitación de los escenarios de cambio climático regionalizados**. En el anexo se puede ver cada proyección climática para los diferentes GCM, asociados con las técnicas de regionalización dinámica utilizadas.

7. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS DE PRECIPITACIÓN DISPONIBLES

Se realiza el análisis estadístico hidrológico aplicando la función de distribución de *Valores Extremos General* y de *Tipo I* o de *Gumbel*, para estimar la máxima precipitación en 24 horas (las unidades de la precipitación son en *mm* en este apartado) para los períodos de retorno de 10, 25 y 100 años.

A cada función de valores extremos se le ha aplicado un método de ajuste diferente, como se indica a continuación.

- Para la función de distribución de *Valores Extremos General* (GEV), el ajuste de la distribución de probabilidad se realizará mediante el **método de los momentos** (ver el apartado *Estadística hidrológica*).
- Para la función de distribución de *Tipo I* (EVI) o de *Gumbel*, el ajuste de la distribución de probabilidad se realizará mediante el **método de la máxima verosimilitud** (ver el apartado *Estadística hidrológica*).

Una vez estimadas la máxima precipitación en 24 horas correspondientes a cada función de valores extremos, se analizan los resultados obtenidos y se determinan las máximas precipitaciones en 24 horas de cálculo.

7.1. ANÁLISIS ESTADÍSTICO EN R

En el análisis estadístico hidrológico se ha empleado la herramienta informática R, un software de libre distribución.

A continuación se presenta el software y sus características más importantes.

7.1.1. El entorno R

R, es un lenguaje que permite implementar técnicas estadísticas. Es, a la vez:

- Un entorno interactivo para el análisis estadístico y gráfico.
- Un lenguaje de programación interpretado de alto nivel con funciones orientadas a objetos.

El diseño de R vino muy influenciado por dos lenguajes existentes: S (Becker, Chambers and Wilks) y Scheme (Sussman). El resultado es un lenguaje de apariencia

similar a S, pero en el que la implementación y semántica subyacente se derivan de Scheme. R es un lenguaje interpretado (como Java) y no compila (como C, Fortran, Pascal, etc), es decir, los comandos escritos son ejecutados directamente sin necesidad de construir ejecutables. Además la sintaxis es simple e intuitiva.

La estructura y facilidad de usar R permite implementar funciones propias y rutinas a medida que aparecen necesidades. Además, también puede utilizarse para realizar gráficos de alta calidad de gran utilidad en trabajos de investigación como es el caso de estudio.

Para instalar R hay que descargar un fichero ejecutable de la página web del proyecto R: <http://www.r-project.org/>. En esta página debemos hacer clic en download CRAN, escoger uno de los servidores y posteriormente seguir los pasos según el sistema operativo del usuario.

R se utiliza como un sistema estadístico en el que se han implementado muchas técnicas estadísticas, tanto clásicas como modernas. Algunas están incluidas en el entorno base de R y otras se acompañan en forma de bibliotecas (packages). Junto con R se incluyen algunas bibliotecas, las denominadas estándar, pero otras muchas están disponibles a través de Internet en CRAN.

7.1.2. Ayuda incluida en programa

R dispone de una ayuda muy completa sobre todas las funciones, procedimientos y elementos que configuran el lenguaje.

Además de las opciones de menú propias de R, desde la ventana de comandos se puede acceder a información específica sobre las funciones de R con el comando *help* o mediante *?*.

Por ejemplo con la función *solve*. La orden es:

```
> help(solve)
> ?solve
```

Cuando no se sepa el nombre exacto del comando o de la función que se necesita, pero sí que se sabe el tema sobre el que se quiere ayuda (en inglés), se utiliza la función:

```
> help.search()
```

También es posible acceder a manuales vía el menú Ayuda-Manuales (en PDF) o vía CRAN: <http://cran.r-project.org/>

Los manuales disponibles son:

- *An introduction to R*: introduce el lenguaje, presenta cómo utilizar R como



herramienta para el análisis estadístico y gráfico.

- *R Language Definition*: de gran utilidad cuando se va a programar funciones.
- *Writing R Extensions*: explica cómo crear tus propias librerías, cómo escribir los archivos de ayuda y cómo utilizar y conectar con lenguajes externos (C, C++, Fortran, etc.).
- *R Data Import/Export*: describe las utilidades para importar y exportar datos en R incluyendo librerías disponibles en CRAN.
- *R Installation and Administration*
- *The R Reference Index*: contiene todos los ficheros de ayuda de la versión estándar de R junto con los de las librerías recomendadas.
- *R Internals*: es una guía para las estructuras internas de R.

7.1.3. Salvar e iniciar sesiones anteriores

Desde el menú *Archivo > Guardar área de trabajo* se puede guardar una imagen del espacio de trabajo realizado hasta ese momento. La extensión para estos archivos es *.RData*.

Para salir de R podemos seleccionar *Salir* del menú *Archivo*, ejecutar la orden *q()* o cerrar directamente la ventana del programa (o la consola).

En ese momento, R pregunta si el usuario quiere guardar el actual espacio de trabajo (si se ha hecho anteriormente no es necesario).

Podemos retomar el espacio de trabajo de otro día abriendo desde el menú *Archivo > Cargar área de trabajo* la imagen anteriormente guardada, para restaurar los objetos creados en otras sesiones; también es posible haciendo doble click sobre el fichero *.Rdata*.

También es posible guardar todos los comandos de la sesión desde el menú *Archivo > Guardar Histórico*. La extensión de estos ficheros es *.RHistory*. Se pueden editar (ver *Scripts*).

7.1.4. Primeras nociones: comandos, funciones y objetos

R es un lenguaje orientado a Objetos, mientras que otros programas muestran los resultados de un análisis, R almacena los resultados en objetos, para ser observados o analizados posteriormente.

Clases de objetos en *R*:

- **Vectores:** son el tipo básico de objeto en *R*
- **Matrices:** o también denominadas variables indexadas, son generalizaciones multidimensionales de los vectores.
- **Factores:** sirven para representar datos categóricos.
- **Listas:** son una forma generalizada de vector en las cuales los elementos no tienen por qué ser del mismo tipo y a menudo son a su vez vectores o listas. Las listas permiten devolver los resultados de los cálculos estadísticos de un modo conveniente.
- **Hojas de datos (*data frame*):** son estructuras similares a una matriz. Es una lista cuyas componentes deben ser vectores (numéricos, carácter, lógicos), factores, matrices numéricas, listas u otros *data.frames*. Si son vectores, deben ser todos de igual longitud, y si son matrices, con el mismo número de filas. Es frecuente estructurar un *data.frame* como un conjunto de vectores columna de igual longitud. Podemos imaginar el *data.frame* como una matriz rectangular, cuyas columnas son las variables del *data.frame*, que pueden ser de diferente tipo, numéricas, factores, lógicas. Para construir una variable de tipo *data.frame* se puede utilizar la función `data.frame()`.
- **Funciones**

R distingue entre mayúsculas y minúsculas, de tal modo que *A* y *a* son símbolos distintos y se referirán, a objetos distintos. Los nombres de los objetos pueden contener sólo letras mayúsculas o minúsculas, junto con números y puntos.

Durante una sesión de trabajo con *R* los objetos que se crean se van almacenando por su nombre.

Las función `objects()` se puede utilizar para obtener los nombres de los objetos almacenados en *R*. Es equivalente a la función `ls()`.

Edición y ejecución de comandos desde ficheros editables: scripts

7.1.5. Permanencia de los datos y eliminación de objetos

Así, a la colección de objetos almacenados en cada momento se denomina espacio de trabajo (workspace). Los objetos creados durante una sesión en *R* se pueden almacenar en un archivo los denominados anteriormente *.RData*.

Por otra parte, es posible eliminar alguno de los objetos creados con el comando

rm(). Para eliminar todos los objetos a la vez desde el menú *Misc > Remover todos los objetos*.

7.1.6. Edición y ejecución de comandos desde ficheros editables: scripts

Las operaciones que requieren varias instrucciones consecutivas, resulta especialmente útil el trabajar con un fichero de comandos editables (script).

R proporciona la posibilidad de trabajar con scripts como ventanas del propio programa. Se puede abrir un script nuevo desde el menú *Archivo > Nuevo script*. Podemos ejecutar los comandos del script pulsando CTRL+r.

- Existen diferentes editores que pueden facilitar el trabajo con *R*: colores de sintaxis, completa paréntesis, etc:
- Rstudio, TinnR
- Notepad, (x)Emacs
- RWinEdt, word

7.1.7. Librerías de *R*

R consta de un sistema base (donde se incluyen técnicas estadísticas y numéricas) y de paquetes (packages) adicionales que extienden su funcionalidad.

La Instalación de librerías en *R* se realiza desde el menú *Paquetes > Instalar paquete(S)...*

1. Seleccionar el "CRAN mirror", elegir preferentemente el de tu país.
2. Seleccionar la librería que se desee.

También, se puede utilizar la función *install.packages()*.

La instalación no implica que los paquetes puedan ser utilizados. Es necesario cargar las librerías antes de empezar a usarlas. Lo mismo ocurre con las librerías existentes en la versión local de *R*.

Incorporar las librerías en la sesión de *R*

Existen dos formas de realizarlo:

1. Desde el menú *Paquetes > Cargar paquete...* seleccionamos la librería que se necesite.
2. Desde la línea de comandos utilizando la función *library()*

Ejemplo: *library(foreign)*

La función `library(foreign)` abre una ventana con información sobre las librerías cargadas en R.

Para obtener información y ayuda sobre las librerías instaladas en R, se puede utilizar las funciones `library` y `help` conjuntamente:

Ejemplo: `library (help="foreign")`

7.1.8. Ventana de órdenes (consola)

Por debajo del título, esta ventana contiene una barra con los siguientes menús, cuyas opciones principales destacamos:

- **Archivo**
- **Operaciones básicas con los ficheros.** Sólo usaremos: Salir. Para salir del programa.
- **Editar.** Típico menú con opciones de edición (copiar, pegar, ...)
- **Misc**
- **Opciones avanzadas**
- **Paquetes.** Permite gestionar los paquetes adicionales de R. Nos interesará la opción: `Cargar paquete`, para activar un paquete en concreto.
- **Ayuda.** Información sobre R

7.1.9. Interfaz gráfica (Rcommander)

Antes de profundizar en el conocimiento del lenguaje R, es útil comenzar con una interfaz que ofrece la realización de las tareas más sencillas. Para ello, *R-Commander* es una interfaz ideal que, además de permitirnos interactuar con R para realizar análisis estadísticos básicos, presenta el código en lenguaje R que corresponde a las acciones solicitadas.

7.1.9.1. Instalación del paquete *R-Commander*

Una vez terminada la instalación del programa R, se ejecuta el programa. Se abrirá con una ventana parecida a la de la figura

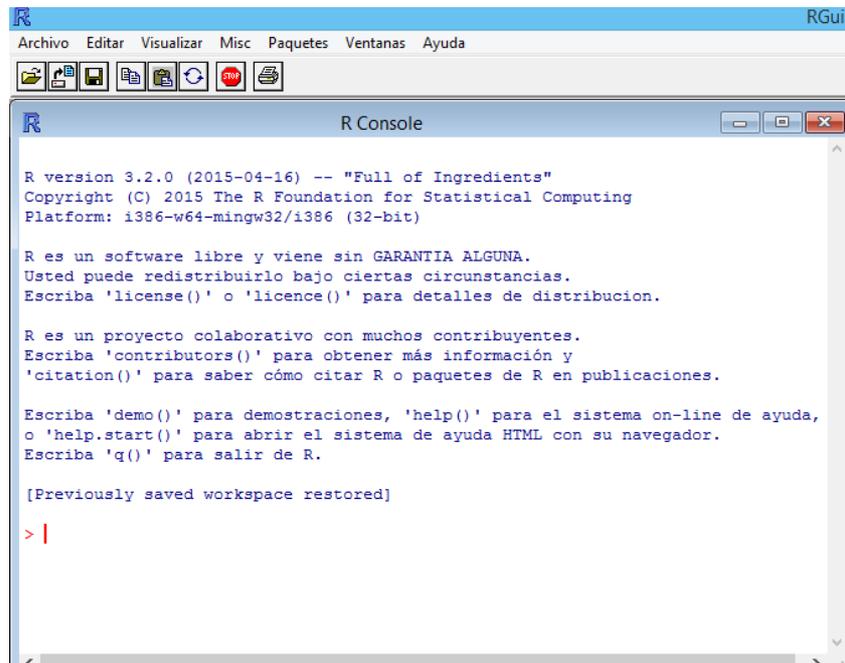


Ilustración 37: Ventana inicial de R

Para instalar el paquete *R-Commander*, seleccionar en la barra de menús: *Paquetes*> *Instalar paquete(s)...*

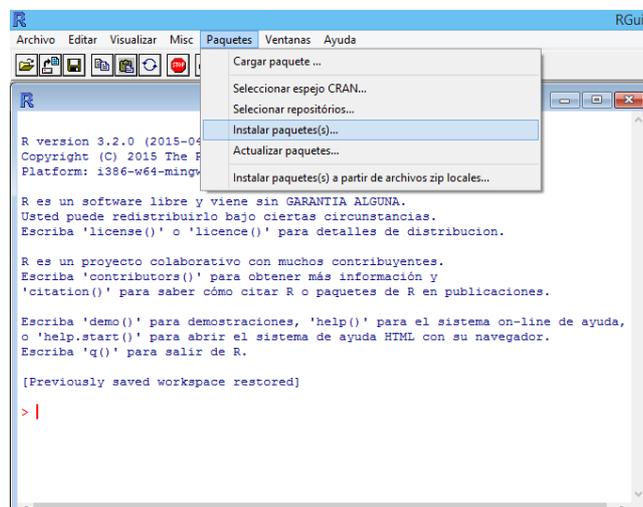


Ilustración 38: Instalación de paquetes en R

Tendría que abrirse entonces una ventana con todos los posibles espejos, donde selecciona el espejo Spain (Madrid) o Spain (A Coruña).

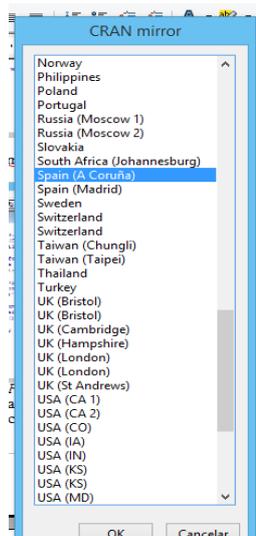


Ilustración 39: CRAN espejo en R

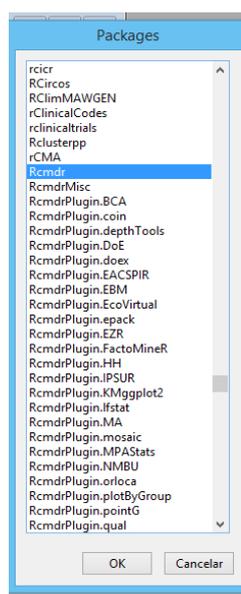


Ilustración 40: Paquete Rcmdr instalado

Una vez elegido el espejo español, se abrirá otra ventana con los paquetes descargables desde el mismo. Desplazándose hacia abajo se encontrarán los paquetes de interés, en este caso *Rcmdr*.

El programa *R* empezará la instalación de los paquetes y, una vez detenido, volverá a mostrar la pantalla de la consola. Para arrancar el *R-Commander*, desde la consola de *R*, seleccione otra vez el menú *Paquetes* y después *Cargar paquete...*



Ilustración 41: Cargar paquetes en R

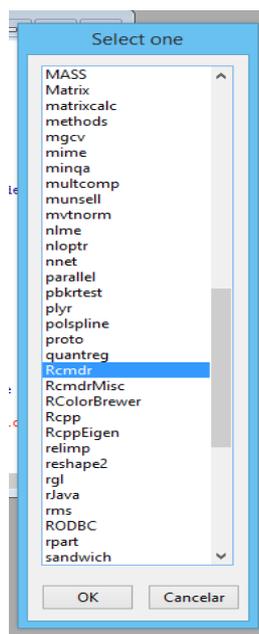


Ilustración 42: Seleccionar paquete Rcmdr para cargar en R

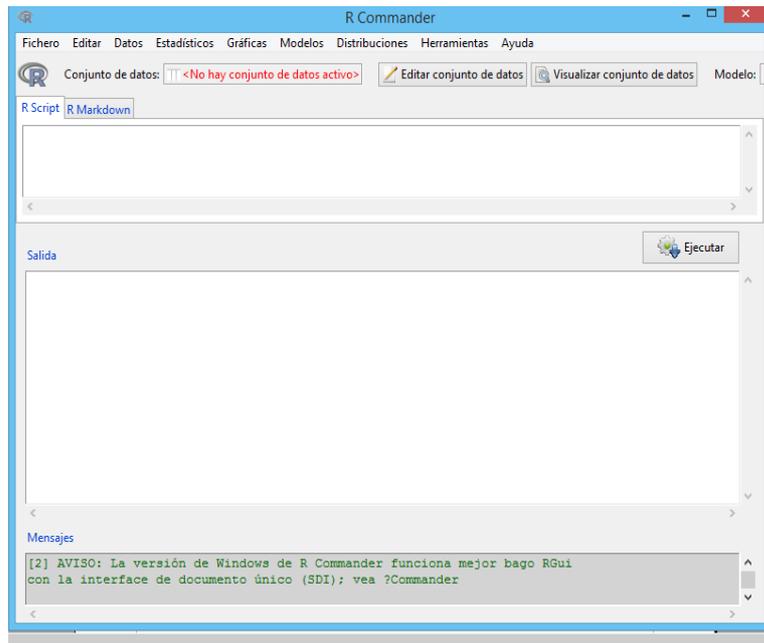


Ilustración 43: Ventana de R-Commander

7.1.9.2. El entorno *R-commander*

R-Commander es una Interfaz Gráfica de Usuario (GUI), creada por John Fox, que permite acceder a muchas capacidades del entorno estadístico *R* sin que el usuario tenga que conocer el lenguaje de comandos propio de este entorno.

La ventana de la imagen corresponde al entorno de *R-commander*, que evita tener que usar dicho lenguaje de comandos, al menos para las tareas que se encuentran implementadas dentro de dicho entorno.

No obstante, *R-Commander* no pretende ocultar el lenguaje *R*.

Si observamos de cerca la ventana de *R-Commander*, vemos que se divide en tres subventanas:

- *Script*
- *Salida*
- *Mensajes*

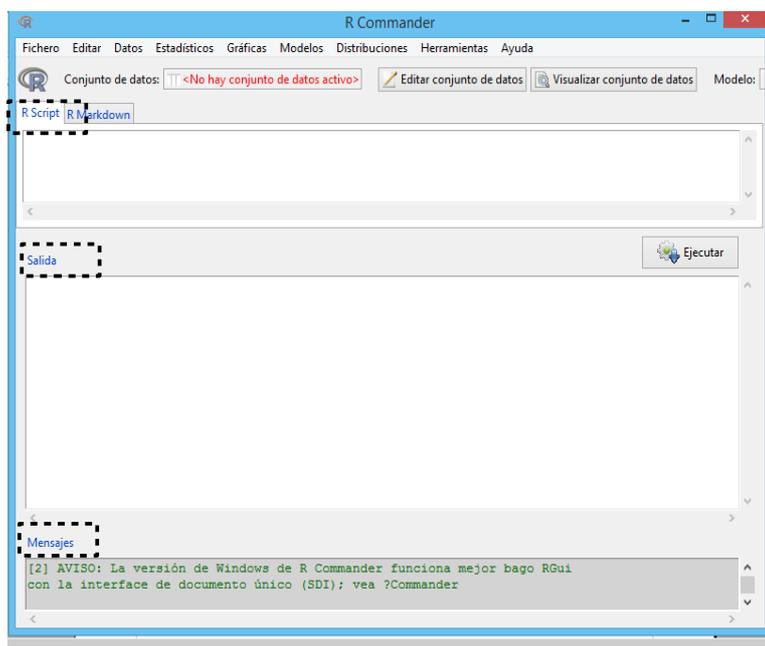


Ilustración 44: Subventanas de R-Commander

Cada vez que, a través de los menús de *R-commander* accedamos a las capacidades de *R* (gráficos, procedimientos estadísticos, modelos, etc.), en la ventana script se mostrará el comando *R*.

Presionando el botón *Ejecutar*, que está a la derecha debajo de la ventana de instrucciones (o, alternativamente, la combinación de teclas Ctrl-r para ejecutar), la línea contenida en el cursor ejecuta la función para su resolución. Si seleccionamos varias líneas, el presionar *Ejecutar* se ejecutan todas ellas.

Bajo la ventana de instrucciones hay una ventana grande para los resultados de los comandos ejecutados. Las instrucciones escritas en esta ventana aparecen en rojo y los resultados en azul oscuro (como en la consola de *R*).

Al final hay una pequeña ventana de texto gris para mensajes. Los mensajes de error se muestran en rojo, los avisos en verde y otros mensajes en azul oscuro.

El script puede guardarse y volver a ser ejecutado directamente otras veces con otros conjuntos de datos diferentes. La combinación de teclas Ctrl-a selecciona todo el texto de la ventana de instrucciones y Ctrl-s abre una ventana de diálogo para guardar los contenidos de la ventana.

7.1.9.3. Menús disponibles en *Rcommander*

El acceso a las funciones implementadas en *R-commander* es muy simple, en el Menú de la ventana de *Rcommander* aparece el acceso a las siguientes utilidades:

- **Fichero:** para abrir ficheros con instrucciones a ejecutar, o para guardar datos, resultados, sintaxis, Salir, etc.
- **Editar:** Limpiar ventana, Cortar, Copiar, Pegar, Borrar, Buscar, Seleccionar todo.
- **Datos:** Nuevo conjunto de datos, Cargar conjunto de datos, Importar datos, Conjunto de datos en paquetes, Conjunto de datos activo, Modificar variables del conjunto de datos activo.
- **Estadísticos:** ejecución de procedimientos propiamente estadísticos. Resúmenes, Tablas de contingencia, Medias, Proporciones, Varianzas, Tests no paramétricos, Análisis dimensional, Ajuste de modelos.
- **Gráficos:** diversos gráficos univariantes, bivariantes y 3D, Guardar gráfico en fichero
- **Modelos:** definición y uso de modelos específicos para el análisis de datos. Selecciona el modelo activo, Resumir el modelo, Añadir las estadísticas de las observaciones a los datos, Intervalos de confianza, AIC, BIC, Test de hipótesis, Diagnósticos numéricos, Gráficas.
- **Distribuciones:** probabilidades, cuantiles y gráficos de las distribuciones de probabilidad más habituales (Normal, t de Student, F de Fisher, binomial, etc.)
- **Herramientas:** carga de librerías y definición del entorno. *Cargar paquete(s)*, Cargar plugins de *Rcmdr*, *Opciones*.
- **Ayuda:** Ayuda de *R Commander*, Introducción de *R Commander*, Ayuda conjunto de datos activo (si existe), Información sobre *Rcmdr*.

Bajo los menús hay una barra de herramientas con una fila de botones.



Ilustración 45: Barra de herramientas en la ventana de Rcommander

El botón horizontal que se encuentra más a la izquierda muestra el nombre de la serie de datos activa. Inicialmente no hay ninguna serie de datos activa. Al presionar este botón, se puede elegir entre las series de datos que están actualmente en la memoria (si hay más de una). La mayoría de los menús y diálogos en *R Commander* se refieren a la serie de datos activa (los menús Fichero, Editar y Distribuciones son excepciones).

Los dos botones contiguos nos permiten abrir el editor de datos de *R* para modificar la serie de datos activa o el visor para examinarla. El visor de la serie de datos puede permanecer abierto mientras se realizan otras operaciones.

Un botón horizontal indica el nombre del modelo estadístico activo, un modelo lineal (como el modelo de regresión lineal), un modelo lineal generalizado, un modelo logit multinominal o un modelo lineal de regresión. Inicialmente no hay ningún modelo activo. Si hay más de un modelo en la memoria, puede elegir entre ellos pulsando sobre el botón.

7.1.9.4. Lectura de datos desde un fichero externo

Se supone que se han creado los datos con EXCEL (o equivalente), y que se han guardado desde EXCEL en formato CSV (Comma Separated Values) o diferente con extensión *.xls*. Para que *R* (y cualquier otro paquete estadístico) pueda utilizar los datos, éstos deben introducirse de modo que cada variable figure en una columna, y cada fila represente un caso. Asimismo, es conveniente que cada columna esté encabezada con el nombre de la variable.

Para leer estos datos con *Rcommander*, una vez situados en la ventana de este programa en el menú seleccionar *Datos > Importar datos* y elegir la opción en función del formato del archivo que contiene los datos.

7.2. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA SERIE TEMPORAL DE LLUVIA DE MÁXIMOS ANUALES EN 24 HORAS DE LA ALMUNIA DE DOÑA GODINA

En la interfaz gráfica de *Rcommander*, se ejecutarán los siguientes comandos:

En primer lugar, se importarán los datos a *Rcommander* desde una hoja excel, *Datos > Importar datos > Desde conjunto de datos Excel, Access o dBase...*

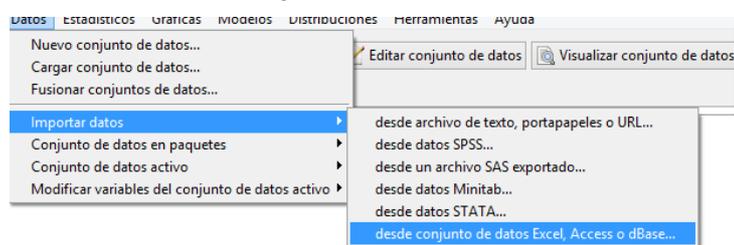


Ilustración 46: Importar datos en Rcommander

Se nombra al conjunto de datos importados:

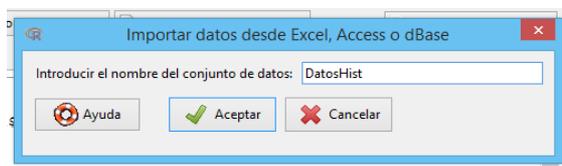


Ilustración 47: Nombrar conjunto de datos

```
> DatosHist <- sqlQuery(channel = 2, select * from [Hoja1$])
```

A continuación se cargan los paquetes para aplicar las funciones de distribución de valores extremos y los métodos de ajustes de las distribuciones.

Para ello cargaremos el paquete o librería *extRemes*:

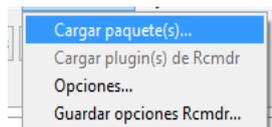


Ilustración 48: Cargar paquete *extRemes*

Los comandos del paquete *extRemes* son:

```
> library(Lmoments, pos=15)
> library(distillery, pos=15)
> library(extRemes, pos=15)
```

A continuación, se ejecuta la función de distribución de *Valores Extremos General* (GEV), con el método de ajuste de los *momentos*:

```
> fevd(x =Escenario, method = "Lmoments", time.units = "months")
[1] "GEV Fitted to Escenario using L-moments estimation."
      location      scale      shape
29.03717137 12.74518710 -0.01800638
```

Se ejecutan las gráficas de cuantiles, de probabilidad, de densidad y de niveles de retorno de la función de distribución de *Valores Extremos General* (GEV):

```
> plot(fevd(x =Escenario, method = "Lmoments", time.units =
"months"))
```

fevd(x = Escenario, method = "Lmoments", time.units = "months")

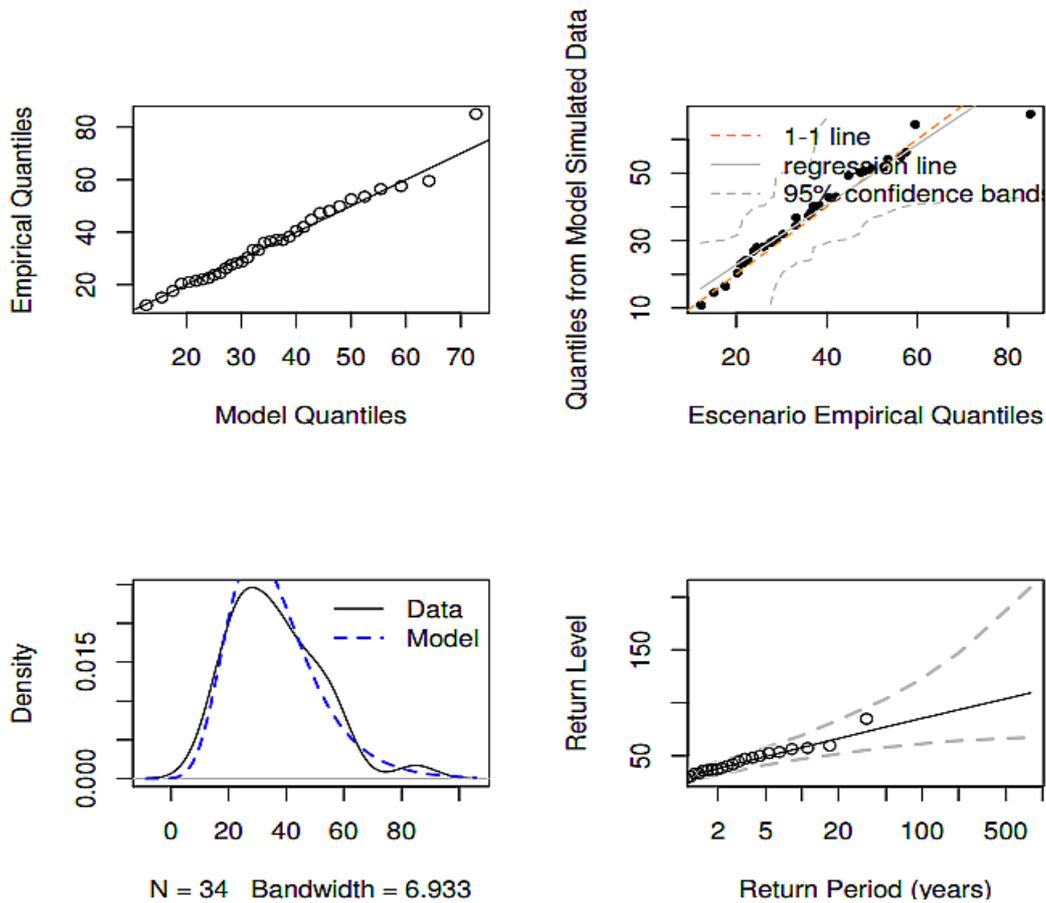


Ilustración 49: Gráficas de la función de distribución de Valores Extremos General

Se calcula precipitación máxima en 24 horas estimada para los períodos de retorno de 10, 25 y 100 años para la función de distribución de *Valores Extremos General* (GEV):

```
> return.level(fevd(x =Escenario, method = "Lmoments", time.units =
"months"), return.period = c(10, 25, 100),do.ci=TRUE)
fevd(x = Escenario, method = "Lmoments", time.units = "months")
[1] "Parametric Bootstrap"
502 iterations

      2.5% Estimate      97.5%
10-year 47.67501 57.14520 67.84930
25-year 54.68488 68.65137 86.80506
100-year 62.08677 85.30440 127.26504
```

Se repite el proceso ejecutando la función de distribución de *Valores Extremos de Tipo I* (EVI) o de *Gumbel*, con el método de ajuste de la *máxima verosimilitud*:

```
> fevd(x =Escenario, type = "Gumbel", method = "MLE", time.units = "months")
```

```
[1] "Estimation Method used: MLE"
Negative Log-Likelihood Value: 138.5049
Estimated parameters:
location    scale
29.13522 12.07243
Standard Error Estimates:
location    scale
2.180609 1.640379
Estimated parameter covariance matrix.
              location    scale
location 4.755056 1.122701
scale    1.122701 2.690842
AIC = 281.0099
BIC = 284.0626
```

Se ejecutan las gráficas de cuantiles, de probabilidad, de densidad y de niveles de retorno de la función de distribución de *Gumbel*:

```
> plot(fevd(x =Escenario, method = "Lmoments", time.units = "months"))
```

```
fevd(x = Escenario, type = "Gumbel", method = "MLE", time.units = "months")
```

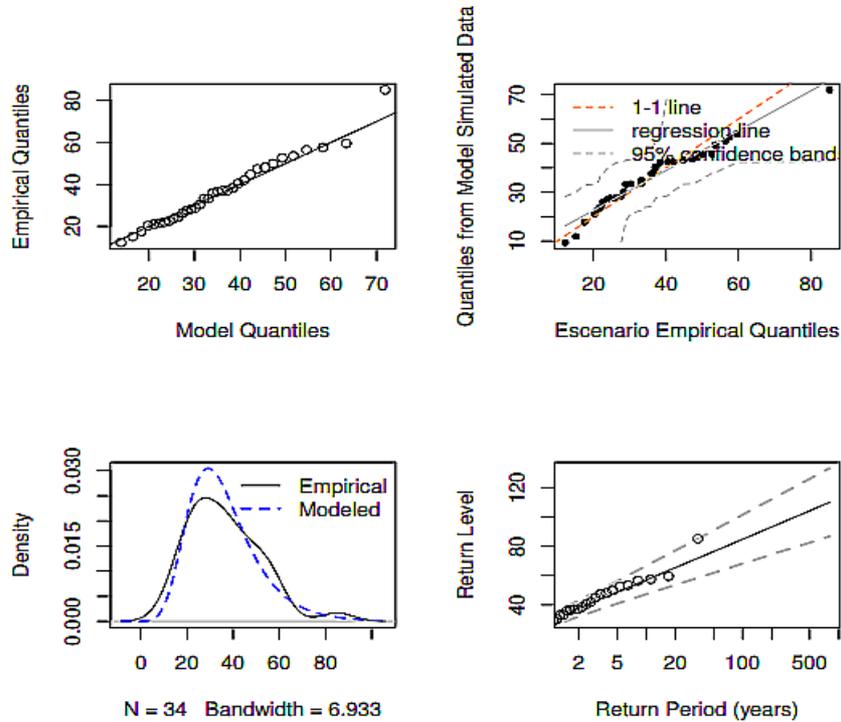


Ilustración 50: Gráficas de la función de distribución de Gumbel

Se calcula precipitación máxima en 24 horas estimada para los períodos de retorno de 10, 25 y 100 años para la función de distribución de *Gumbel*:

```
> return.level(feve(x = Escenario, type = "Gumbel", method = "MLE",
time.units = "months"), return.period = c(10, 25, 100), do.ci=TRUE)
```

```
[1] "Normal Approx."
```

	95% lower CI	Estimate	95% upper CI
10-year return level	46.81452	56.30263	65.79073
25-year return level	55.43642	67.74931	80.06219
100-year return level	68.03634	84.67021	101.30408

7.2.1. Conclusión

Se comparan los resultados numéricos y gráficos de las dos funciones de valores extremos utilizadas en el análisis estadístico, llegando a la conclusión que el ajuste con el *método de los momentos* para la función de distribución de *Valores Extremos General* (ver gráficas del apartado anterior) es más preciso, siendo la hipótesis más desfavorable para el diseño de las lluvias de proyecto.

En la tabla se presentan las precipitaciones máximas en 24 horas estimadas (las unidades de la precipitación son en mm) para los diferentes períodos de retorno.

P24	10	25	100
1980-2014	57,15	68,65	85,30

Tabla 7: Precipitación máxima en 24 h estimada para la serie de lluvias registradas

7.3. ANÁLISIS ESTADÍSTICO PARA LOS MÁXIMOS ANUALES DE PRECIPITACIÓN EN 24 HORAS DE LOS ESCENARIOS CLIMÁTICOS REGIONALIZADOS

Para realizar el análisis estadístico de los diferentes escenarios climáticos regionalizados del proyecto *Escena*, se ha utilizado la misma metodología empleada y explicada anteriormente para la serie temporal de lluvia de máximos anuales en 24 horas registradas en la estación meteorológica de La Almunia de Doña Godina. Los resultados obtenidos de las funciones de distribución de valores extremos se han analizado para determinar la máxima precipitación en 24 horas para los escenarios climáticos (A2, A1B y B1) y períodos de retorno (10, 25 y 100 años) considerados.

A la hora de realizar el análisis estadístico de valores extremos de los escenarios climáticos regionalizados se han considerado varias hipótesis teniendo en cuenta la *Matriz de proyecciones de Escena con las distintas combinaciones GCM/RCM* (Tabla 5). Se han considerado tres casos diferentes.

- Análisis individual de cada modelo regional del proyecto Escena.
- Análisis global de todos los modelos regionales del proyecto Escena.

- Análisis conjunto de los modelos regionales MM5 y PROMES del proyecto Escena.

7.3.1. Análisis individual de cada modelo regional del proyecto Escena.

Se ha estimado la máxima precipitación en 24 horas para cada modelo regional disponible.

Los resultados obtenidos de aplicar las funciones de distribución de valores extremos han sido los siguientes:

- **PROMES**

	P24	10	25	100
A2	Gumbel, MLE	61,79	73,55	90,93
	GEV, Lmoments	62,04	75,01	95,28
A1B	Gumbel, MLE	61,85	74,26	92,60
	GEV, Lmoments	62,12	73,89	90,57
B1	Gumbel, MLE	58,98	70,60	87,78
	GEV, Lmoments	59,90	72,80	92,73

Tabla 8: Máxima precipitación estimada en 24 horas considerando el RCM: PROMES

- **MM5**

	P24	10	25	100
A2	Gumbel, MLE	59,29	71,10	88,56
	GEV, Lmoments	58,57	69,04	83,61
A1B	Gumbel, MLE	57,34	69,25	86,85
	GEV, Lmoments	58,94	73,28	96,34
B1	Gumbel, MLE	51,18	61,63	77,07
	GEV, Lmoments	52,44	65,30	86,35

Tabla 9: Máxima precipitación estimada en 24 horas considerando el RCM: MM5

• **REMO**

	P24	10	25	100
A1B	Gumbel, MLE	58,44	69,26	85,24
	GEV, Lmoments	61,35	78,55	110,72
B1	Gumbel, MLE	64,45	77,78	97,49
	GEV, Lmoments	67,72	90,49	135,51

Tabla 10: Máxima precipitación estimada en 24 horas considerando el RCM: REMO.

• **WRF-A**

	P24	10	25	100
A2	Gumbel, MLE	42,09	50,42	62,73
	GEV, Lmoments	43,52	53,85	70,59
A1B	Gumbel, MLE	45,95	55,40	69,38
	GEV, Lmoments	47,65	62,37	90,22

Tabla 11: Máxima precipitación estimada en 24 horas considerando el RCM: WRF-A.

• **WRF-B**

	P24	10	25	100
B1	Gumbel, MLE	48,17	57,93	72,36
	GEV, Lmoments	49,13	59,97	76,62

Tabla 12: Máxima precipitación estimada en 24 horas considerando el RCM: WRF-B.

7.3.2. Análisis global de todos los modelos regionales del proyecto Escena.

Se ha estimado la máxima precipitación en 24 horas considerando de forma global todos los modelos climáticos regionalizados (PROMES, MM5, REMO, WRF-A y WRF-B).

Los resultados obtenidos de aplicar las funciones de distribución de valores extremos han sido los siguientes:

	P24	10	25	100
A2	Gumbel, MLE	55,91	67,42	84,43
	GEV, Lmoments	56,25	67,65	84,24
A1B	Gumbel, MLE	57,81	69,72	72,97
	GEV, Lmoments	59,04	72,70	94,15
B1	Gumbel, MLE	57,33	69,05	86,37
	GEV, Lmoments	58,91	73,99	99,35

Tabla 13: Máxima precipitación estimada en 24 horas considerando de forma global los RCMs.

7.3.3. Análisis conjunto de los modelos regionales MM5 y PROMES del proyecto Escena.

A continuación se presentan los resultados de la hipótesis elegida para determinar los coeficientes de cambio climático de cálculo. Destacar que únicamente se han presentado los resultados pertenecientes a la función de distribución de *Valores Extremos General* (GEV); debido a que el ajuste de la función de distribución con el método de los *momentos* es mucho más precisa. Además es la hipótesis más desfavorable a la hora de estimar la precipitación máxima en 24 horas.

La importación de datos y como se nombran en *Rcommander* se realiza siguiendo los pasos del anterior apartado. Por ello, se presentan directamente los resultados para cada escenario climático.

7.3.3.1. Escenario A2

A continuación, se ejecuta la función de distribución de *Valores Extremos General* (GEV), con el método de ajuste de los *momentos*:

```
> fevd(x =EscenarioA2, method = "Lmoments", time.units = "months")
[1] "GEV Fitted to EscenarioA2 using L-moments estimation."
      location      scale      shape
32.591798439 12.365623957 -0.005310504
```

Se ejecutan las gráficas de cuantiles, de probabilidad, de densidad y de niveles de retorno de la función de distribución de *Valores Extremos General* (GEV):

```
> plot(fevd(x =EscenarioA2, method = "Lmoments", time.units =
"months"))
```

fevd(x = EscenarioA2, method = "Lmoments", time.units = "months")

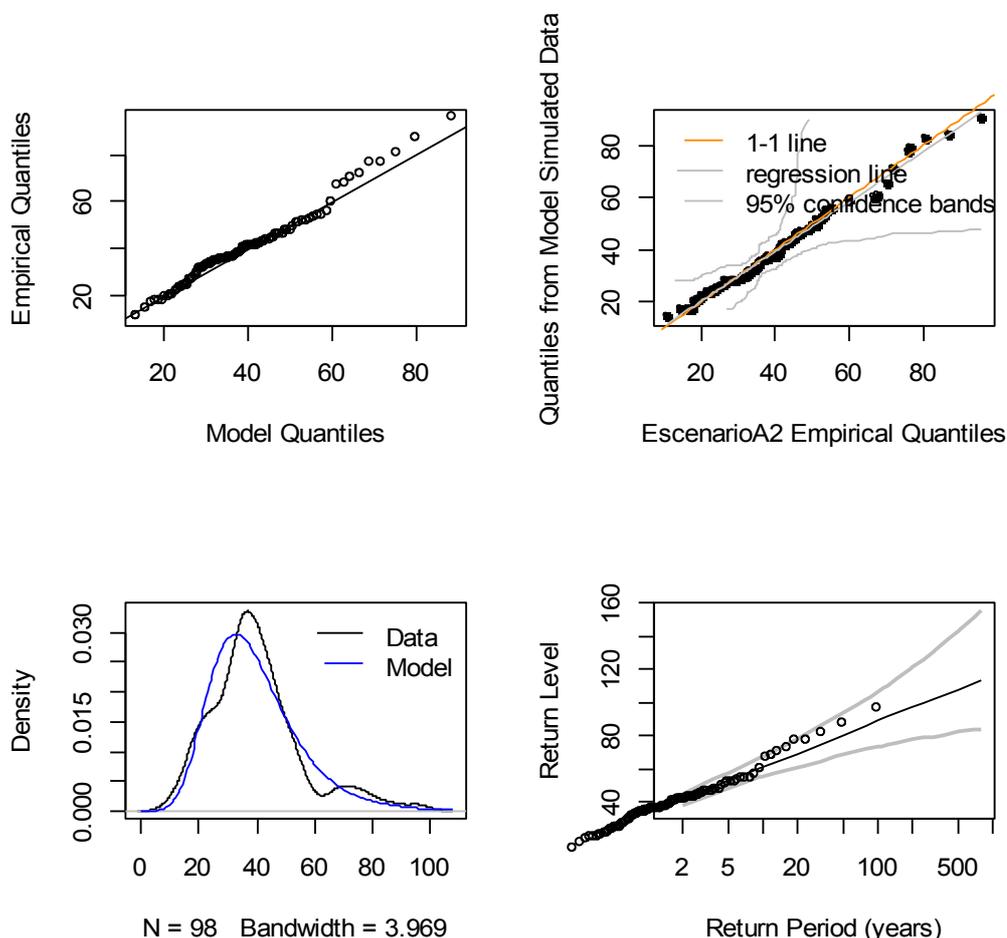


Ilustración 51: Gráficas de la función de distribución de Valores Extremos General; Escenario A2

Se calcula precipitación máxima en 24 horas estimada para los períodos de retorno de 10, 25 y 100 años para la función de distribución de *Valores Extremos Genreal* (GEV):

```
> return.level(fevd(x =EscenarioA2, method = "Lmoments", time.units = "months"), return.period = c(10, 25, 100),do.ci=TRUE)
```

```
[1] "Parametric Bootstrap"
502 iterations
          2.5% Estimate    97.5%
10-year  54.09168 60.25338 66.43334
25-year  63.07844 71.80965 81.55486
100-year 73.63446 88.78633 108.93141
```

7.3.3.2. Escenario A1B

A continuación, se ejecuta la función de distribución de *Valores Extremos General* (GEV), con el método de ajuste de los *momentos*:

```
> fevd(x =EscenarioA1B, method = "Lmoments", time.units = "months")
[1] "GEV Fitted to EscenarioA1B using L-moments estimation."
      location      scale      shape
29.1502113 12.5343099 0.0510927
```

Se ejecutan las gráficas de cuantiles, de probabilidad, de densidad y de niveles de retorno de la función de distribución de *Valores Extremos General* (GEV):

```
> plot(fevd(x =EscenarioA1B, method = "Lmoments", time.units = "months"))
```

```
fevd(x = EscenarioA1B, method = "Lmoments", time.units = "months")
```

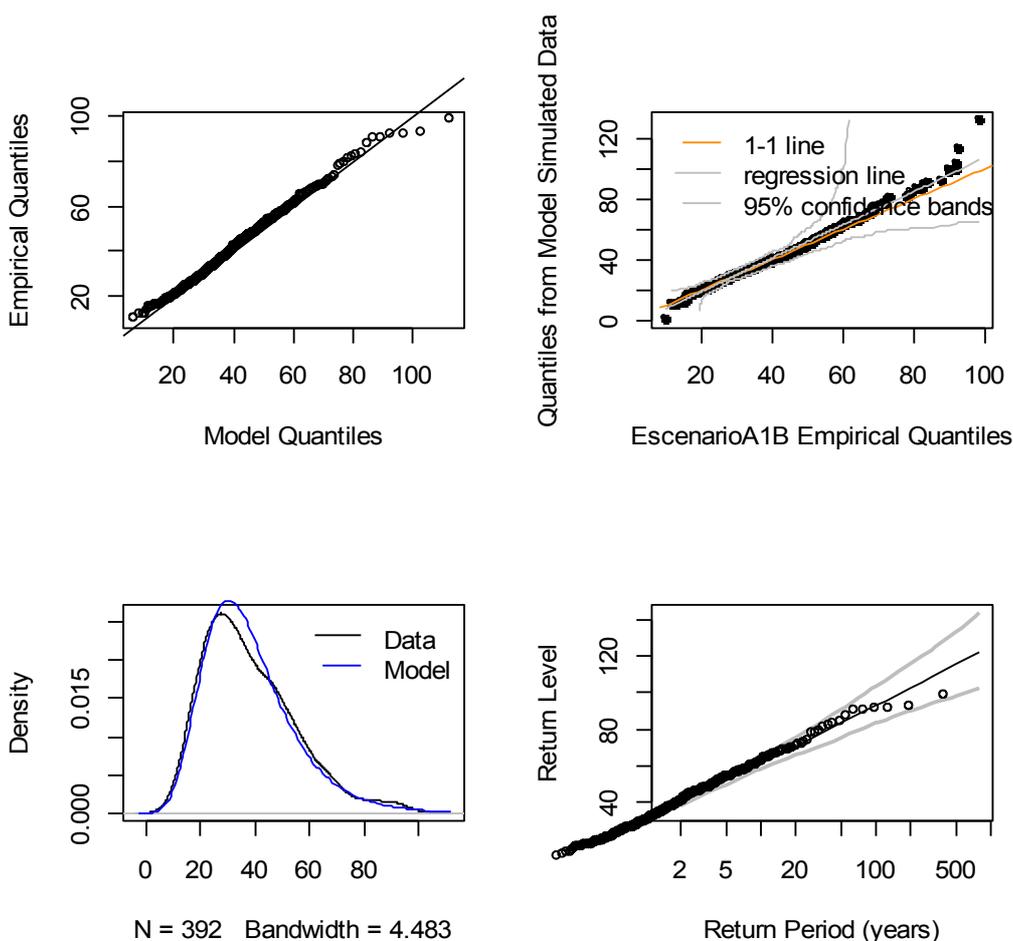


Ilustración 52: Gráficas de la función de distribución de *Valores Extremos General*; Escenario A1B

Se calcula precipitación máxima en 24 horas estimada para los períodos de retorno de 10, 25 y 100 años para la función de distribución de *Valores Extremos General* (GEV):

```
> return.level(fevd(x =EscenarioA1B, method = "Lmoments", time.units
= "months"), return.period = c(10, 25, 100),do.ci=TRUE)
[1] "Parametric Bootstrap"
502 iterations
          2.5% Estimate      97.5%
10-year  57.55886 60.70012  63.69002
25-year  68.27698 73.67999  78.47893
100-year 83.77673 93.16505 102.91926
```

7.3.3.3. Escenario B1

A continuación, se ejecuta la función de distribución de *Valores Extremos General* (GEV), con el método de ajuste de los *momentos*:

```
> fevd(x =EscenarioB1, method = "Lmoments", time.units = "months")
[1] "GEV Fitted to EscenarioB1 using L-moments estimation."
  location      scale      shape
28.7912943 11.8047525  0.1092884
```

Se ejecutan las gráficas de cuantiles, de probabilidad, de densidad y de niveles de retorno de la función de distribución de *Valores Extremos General* (GEV):

```
> plot(fevd(x =EscenarioB1, method = "Lmoments", time.units =
"months"))
```

fevd(x = EscenarioB1, method = "Lmoments", time.units = "months")

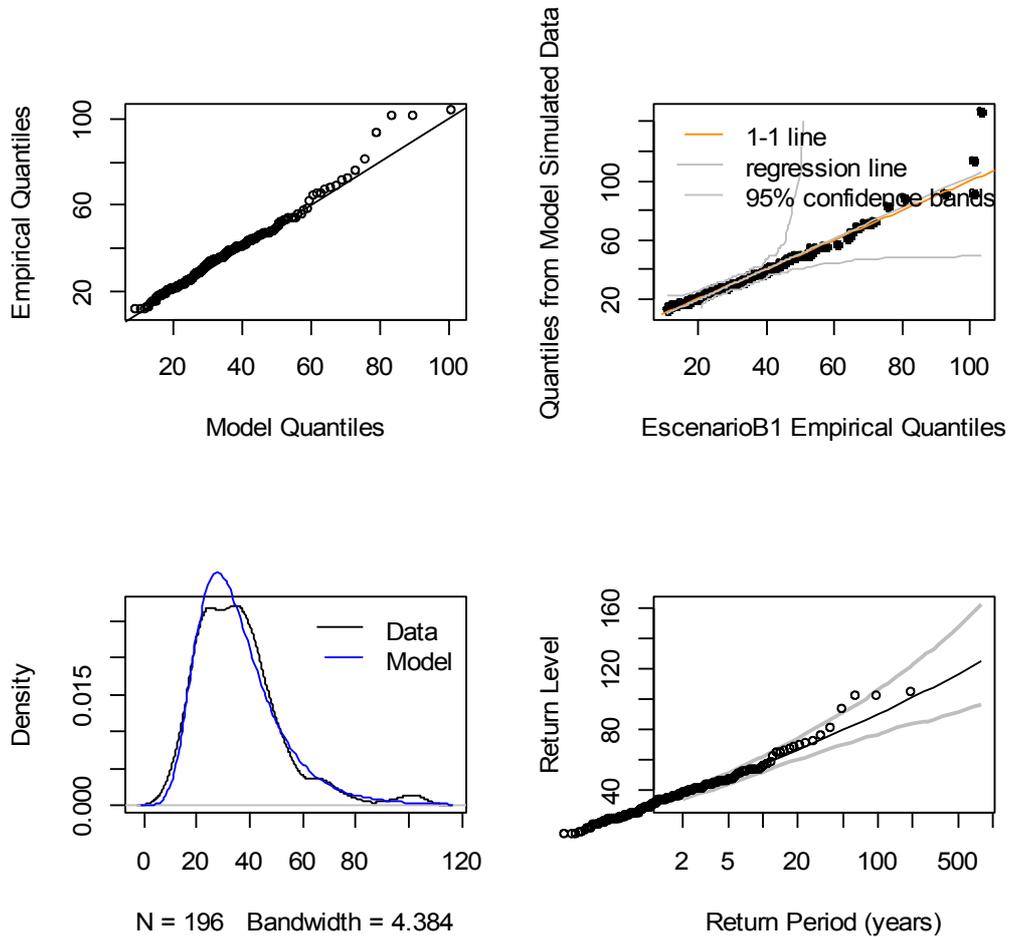


Ilustración 53: Gráficas de la función de distribución de Valores Extremos General; Escenario B1

Se calcula precipitación máxima en 24 horas estimada para los períodos de retorno de 10, 25 y 100 años para la función de distribución de *Valores Extremos Genreal* (GEV):

```
> return.level(fevd(x =EscenarioB1, method = "Lmoments", time.units
= "months"), return.period = c(10, 25, 100),do.ci=TRUE)
```

```
[1] "Parametric Bootstrap"
502 iterations
      2.5% Estimate    97.5%
10-year 52.44120 56.49547 61.47028
25-year 62.03254 69.58475 77.61749
100-year 74.74673 90.39423 107.98446
```

Los resultados obtenidos de aplicar las funciones de distribución de valores extremos han sido los siguientes:

	P24	10	25	100
A2	Gumbel, MLE	60,70	72,57	90,12
	GEV, Lmoments	60,25	71,81	88,79
A1B	Gumbel, MLE	59,77	72,03	90,14
	GEV, Lmoments	60,00	73,68	93,17
B1	Gumbel, MLE	55,46	66,71	83,34
	GEV, Lmoments	56,50	69,58	90,39

Tabla 14: Máxima precipitación estimada en 24 horas considerando los RCM: MM5 y PROMES de forma conjunta.

Comparando los resultados se aprecia que la hipótesis más desfavorable para estimar la máxima precipitación en 24 horas para los períodos de retorno 10, 25 y 100 años; es aplicando la función de distribución de *Valores Extremos General* ajustada con el *método de los momentos*.

P24	10	25	100
A2	60,25	71,81	88,79
A1B	60,00	73,68	93,17
B1	56,50	69,58	90,39

Tabla 15: Precipitación máxima anual en 24 h estimada para los escenarios climáticos.

7.3.4. Conclusión

Del análisis estadístico de los escenarios climáticos regionalizados se llega a la conclusión analizando los resultados gráficos de las funciones de distribución de valores extremos que el ajuste con el método de los momentos para la función de distribución de *Valores Extremos General* (GEV) ajustada con el método de los *momentos* es más precisa en la gran mayoría de los casos para la estimación de la máxima precipitación en 24 horas para los periodos de retorno 10, 25 y 100 años.

8. COEFICIENTES DE CAMBIO CLIMÁTICO EN LA VILLA DE LA ALMUNIA DE DOÑA GODINA

El objetivo del estudio, es evaluar y cuantificar el impacto que producen los escenarios climáticos regionalizados del proyecto *Escena* en el municipio de La Almunia de Doña Godina para el horizonte 2050. Por ello se obtienen los coeficientes de variación de cambio climático (Arnbjerg-Nielsen, 2012), a través de la siguiente expresión:

$$c_f = \frac{I(T, d)_{Futuro}}{I(T, d)_{Presente}}$$

Para calcular el coeficiente de cambio climático se relacionan las intensidades medias diarias estimadas para los escenarios climáticos futuros (A2, A1B y B1) con las intensidades medias estimadas para la serie temporal de lluvias registradas, para los periodos de retorno 10, 25 y 100 años.

Las intensidad media diaria se calcula dividiendo por 24 horas la máxima precipitación en 24 horas estimada en el análisis estadístico con la función de distribución de *Valores Extremos General* (GEV).

I24	10	25	100
1980-2014	2,38	2,86	3,55

Tabla 16: Intensidad media diaria estimada para la serie de lluvias registradas

A continuación se presentan los resultados correspondientes al **7.3.3. Análisis conjunto de los modelos regionales MM5 y PROMES del proyecto Escena.**, la hipótesis elegida para calcular los coeficientes de variación del cambio climático.

I24	10	25	100
A2	2,51	2,99	3,70
A1B	2,50	3,07	3,88
B1	2,35	2,90	3,77

Tabla 17: Intensidad media diaria estimada para los escenarios climáticos

En la Ilustración 54 se puede apreciar la evolución del coeficiente de cambio

climático para el horizonte 2050 (proyecto *Escena*), considerando los diferentes escenarios climáticos y periodos de retorno. El coeficiente de cambio climático para el escenario B1 tiene una tendencia ascendente y se produce una variación considerable para el período de retorno de 100 años. Por el contrario, el escenario A2 tiene una tendencia descendente muy suave.

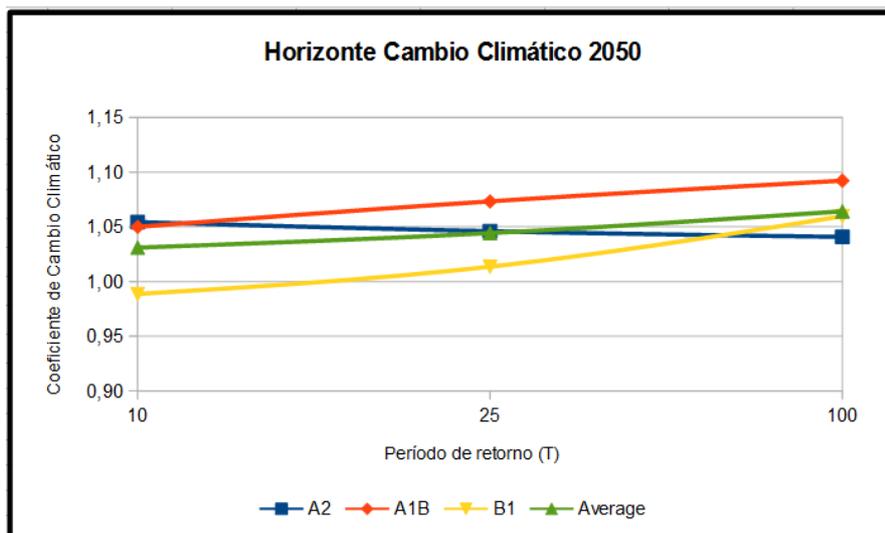


Ilustración 54: Variación del coeficiente de cambio climático

C_f	10	25	100
A2	1,05	1,05	1,04
A1B	1,05	1,07	1,09
B1	0,99	1,01	1,06
Average	1,03	1,04	1,06

Tabla 18: Coeficiente de cambio climático

El escenario menos conservador para el horizonte 2050 es el A2, por el contrario el escenario más conservador y que produce un mayor impacto para el horizonte 2050 es el A1B. Se produce un incremento de intensidad del 9,21% para el periodo de retorno de 100 años y un incremento del 7,32% para el periodo de retorno de 25 años. Para el periodo de retorno de 10 años el escenario que produce mayor incremento de intensidad es el A2, produciendo un incremento de 5,44%.

%	10	25	100
A2	5,44%	4,60%	4,08%
A1B	5,00%	7,32%	9,21%
B1	-1,14%	1,36%	5,97%

Tabla 19: Porcentaje de variación de intensidad media diaria

Para construir la lluvia de proyecto futura se multiplica el coeficiente de cambio climático de cálculo para cada uno de los bloques de la lluvia del escenario Actual. A continuación, se explica la metodología empleada para el diseño de las lluvias de proyecto para el escenario Actual y Futuro.

Los resultados obtenidos de el reto de hipótesis del análisis estadístico de valores extremos son los siguientes:

- **Análisis global de todos los modelos regionales del proyecto Escena.**

%	10	25	100
A2	-1,56%	-1,46%	-1,25%
A1B	3,32%	5,90%	10,37%
B1	3,08%	7,78%	16,47%

Tabla 20: Porcentaje de variación de intensidad media diaria para el análisis global de RCMs.

- **Análisis individual de cada modelo regional del proyecto Escena.**

- PROMES

%	10	25	100
A2	3,21%	9,26%	11,70%
A1B	8,71%	7,62%	6,18%
B1	4,82%	6,04%	8,71%

Tabla 21: Porcentaje de variación de intensidad media diaria para el RCM: PROMES.

- MM5

%	10	25	100
A2	2,49%	0,56%	-1,99%
A1B	3,14%	6,74%	12,93%
B1	-8,24%	-4,89%	1,22%

Tabla 22: Porcentaje de variación de intensidad media diaria para el RCM: MM5.

- REMO

%	10	25	100
A1B	7,36%	14,42%	29,79%
B1	18,51%	31,80%	58,85%

Tabla 23: Porcentaje de variación de intensidad media diaria para el RCM: REMO.

○ WRF-A

%	10	25	100
A2	-23,85%	-21,56%	-17,25%
A1B	-16,62%	-9,15%	5,76%

Tabla 24: Porcentaje de variación de intensidad media diaria para el RCM: WRF-A.

○ WRF-B

%	10	25	100
B1	-14,02%	-12,64%	-10,18%

Tabla 25: Porcentaje de variación de intensidad media diaria para el RCM: WRF-B.

A continuación se presenta una comparación de la media (*Average*) de los coeficientes de cambio climático referentes a cada hipótesis estudiada. En la hipótesis del análisis individual de los RCMs, se han considerado únicamente los modelos regionales MM5 y PROMES debido a que son los únicos que tienen disponible las proyecciones climáticas para los escenarios A2, A1B y B1.

c_f	10	25	100
Average MM5	0,99	1,01	1,04
Average PROMES	1,06	1,08	1,09
Average MM5&PROMES	1,03	1,04	1,06
Average Global RCMs	1,02	1,04	1,09

Tabla 26: Promedio de los Coeficientes de Cambio Climático para cada caso de estudio analizado.

En la se ve la evolución para el horizonte 2050 de los coeficientes del cambio climático y la incertidumbre de los resultados obtenidos para cada hipótesis analizada.

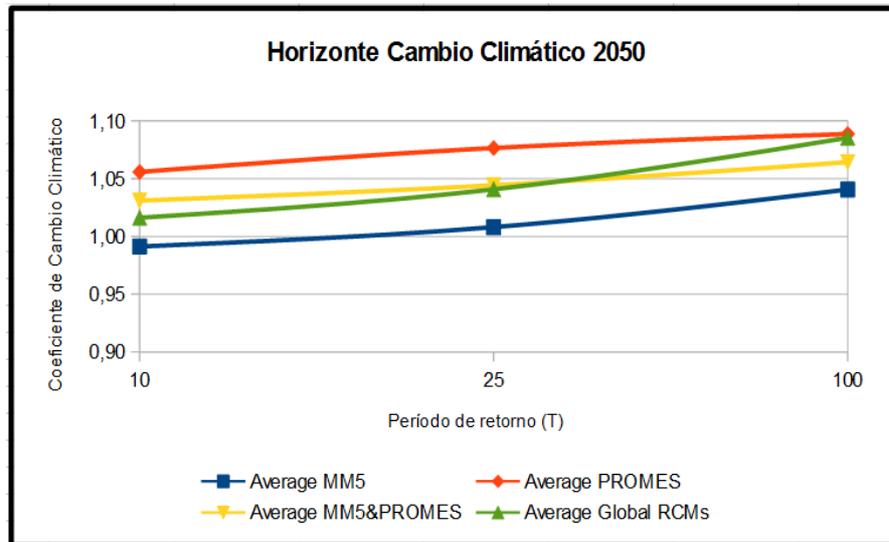


Ilustración 55: Evolución del promedio de los Coeficientes de Cambio Climático para el horizonte 2050.

Los resultados obtenidos en las tres hipótesis planteadas han mostrado una gran variabilidad, se ha elegido la hipótesis del **Análisis conjunto de los modelos regionales MM5 y PROMES del proyecto Escena** por ser la opción que mejor representa las características de las líneas evolutivas de la familia de escenarios climáticos estudiados (A2, A1B y B1).

Por otra parte la variabilidad de los resultados obtenidos para cada escenario en las diferentes hipótesis es debido al modelo de circulación general utilizado para cada caso en particular (Pouget et al., s. f.).

9. CONSTRUCCIÓN DE LA LLUVIAS DE PROYECTO

9.1. LLUVIAS DE PROYECTO ACTUALES

Para el diseño de las lluvias de proyecto actuales se deben realizar los siguientes cálculos:

En primer lugar, se determina la precipitación máxima anual en 24 horas estimada para los períodos de retorno 10, 25 y 100 años; a través de un análisis estadístico de la serie temporal de lluvia registrada en la localidad de La Almunia de Doña Godina, realizado en el apartado.

Posteriormente, la precipitación máxima anual en 24 horas estimada para los períodos de retorno, se ha empleado para la construcción de la Curva IDF Sintética, utilizando el método propuesto por la Dirección General de Carreteras (MOPU, 1990).

En el diseño de la lluvia de proyecto se han realizado dos hipótesis, con duraciones diferentes:

- D=1 hora, considerando el intervalo de cada bloque $\Delta t=5min$
- D=2 hora, considerando el intervalo de cada bloque $\Delta t=5min$

Se aplica la expresión propuesta por la Dirección General de Carreteras para la construcción de la Curva IDF Sintética para la localidad de La Almunia de Doña Godina:

$$I_D = I_{24} \left(\frac{I_1}{I_{24}} \right)^{\left(\frac{28^{0.1} - D^{0.1}}{28^{0.1} - 1^{0.1}} \right)}$$

Período Retorno (T)	10	25	100
P24 (T)	57,15	68,65	85,30
I24 (T)	2,38	2,86	3,55
FR (Factor Regional)	10	10	10

Tabla 27: Datos de entrada para la elaboración de las Curvas IDF Sintéticas

Para el dato de entrada correspondiente al *Factor Regional*, se utiliza el mapa de isoyetas que proporciona la Dirección General de Carreteras. En el caso de estudio, se utiliza la isoyeta más cercana a la localidad de La Almunia de Doña Godina, que en este caso es muy próxima a la isoyeta con *Factor Regional* 10. En los casos donde el municipio o localidad se encuentre entre dos isoyetas; el *Factor Regional* se podría

determinar por interpolación lineal.

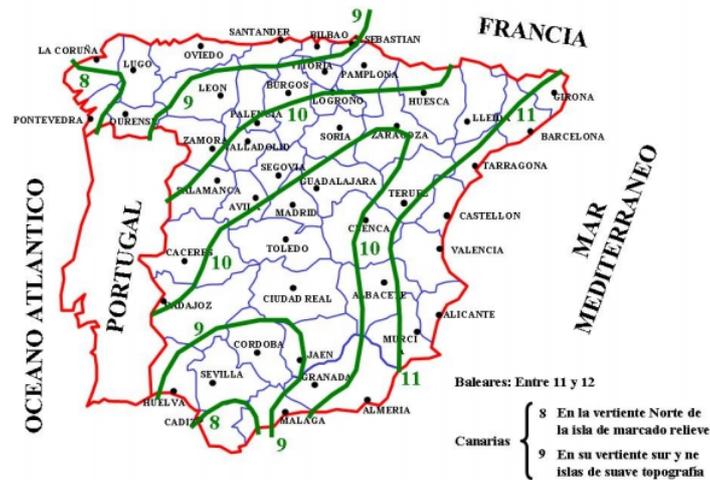


Ilustración 56: Mapa para la estimación del Factor Regional

Se representa gráficamente las Curvas IDF Sintéticas calculadas para la localidad de La Almunia de Doña Godina para una duración de 2 horas (Ilustración 57).

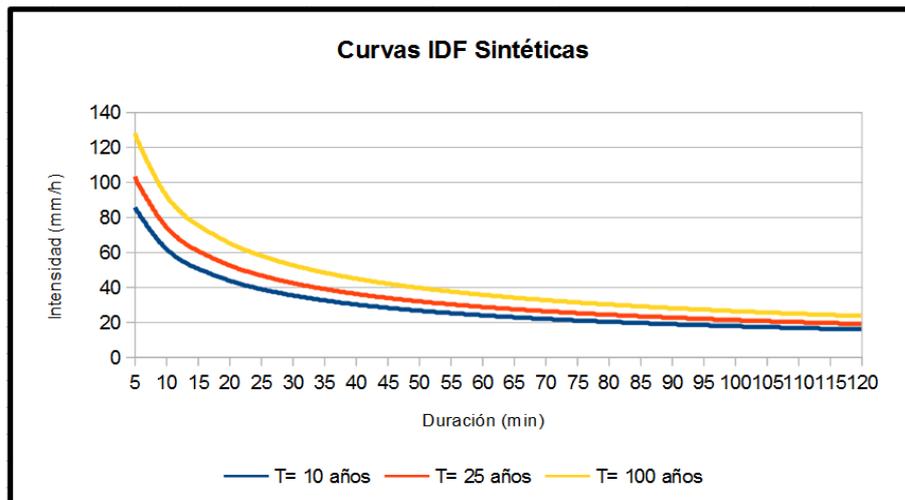


Ilustración 57: Curvas IDF Sintéticas

Por último una vez determinadas las Curvas IDF Sintéticas para los periodos de retorno 10, 25 y 100 años, se aplica el método de los bloques alternados (explicado en el apartado 4.3.4.7. Método de los bloques alternados) para finalmente definir las tormentas de proyecto actuales.

9.2. LLUVIAS DE PROYECTO FUTURAS

Conocidas las lluvias de proyecto actuales, se procede a diseñar las lluvias de proyecto futuras para el horizonte 2050.

Para ello, anteriormente se ha evaluado el impacto del cambio climático sobre las intensidades de lluvia para los diferentes escenarios climáticas; determinando los denominados *coeficientes de cambio climático* para los periodos de retorno estudiados (10, 25 y 100 años).

Como se ha comentado en apartados anteriores, se han empleado los coeficientes de cambio climático correspondientes al **Análisis conjunto de los modelos regionales MM5 y PROMES del proyecto Escena.**

Para el diseño de las tormentas de proyecto futuras se debe multiplicar el coeficiente de CC para cada período de retorno por cada uno de los bloques de intensidad de lluvia de las lluvias de proyecto actuales.

En las imágenes se comparan las lluvias de proyecto actuales con las futuras, indicando el coeficiente de CC que se ha aplicado a cada lluvia de proyecto.

A continuación se presentan los resultado numéricos y gráficos de las lluvias de proyecto para el escenario Actual y Futuro para una duración de 1 hora y 2 horas.

MÉTODO DE LOS BLOQUES ALTERNADOS					LLUVIA DE PROYECTO ACTUAL	LLUVIA DE PROYECTO FUTURA	LLUVIA DE PROYECTO ACTUAL	LLUVIA DE PROYECTO FUTURA
Duración (min)	I (D,T) (mm/h) I (D,10)	Lluvia Acum (mm)	Δ lluvia (mm)	Intensidad bloque (mm/h)	Hietograma Sintético (mm/h)	Hietograma Sintético c 5,44% (mm/h)	Pluviograma Sintético (mm)	Pluviograma Sintético c 5,44% (mm)
5	85,73	7,14	7,14	85,73	10,95	11,54	0,91	0,96
10	61,88	10,31	3,17	38,04	12,70	13,39	1,06	1,12
15	50,60	12,65	2,33	28,02	15,24	16,07	1,27	1,34
20	43,64	14,55	1,90	22,76	19,41	20,46	1,62	1,71
25	38,79	16,16	1,62	19,41	28,02	29,54	2,33	2,46
30	35,16	17,58	1,42	17,03	85,73	90,40	7,14	7,53
35	32,32	18,85	1,27	15,24	38,04	40,11	3,17	3,34
40	30,01	20,01	1,15	13,84	22,76	24,00	1,90	2,00
45	28,09	21,06	1,06	12,70	17,03	17,96	1,42	1,50
50	26,45	22,04	0,98	11,75	13,84	14,59	1,15	1,22
55	25,04	22,96	0,91	10,95	11,75	12,39	0,98	1,03
60	23,81	23,81	0,85	10,26	10,26	10,82	0,85	0,90
Duración (min)	I (D,T) (mm/h) I (D,25)	Lluvia Acum (mm)	Δ lluvia (mm)	Intensidad bloque (mm/h)	Hietograma Sintético (mm/h)	Hietograma Sintético c 7,32% (mm/h)	Pluviograma Sintético (mm)	Pluviograma Sintético c 7,32% (mm)
5	103,00	8,58	8,58	103,00	13,15	14,12	1,10	1,18
10	74,35	12,39	3,81	45,70	15,25	16,37	1,27	1,36
15	60,78	15,20	2,80	33,66	18,31	19,65	1,53	1,64
20	52,42	17,47	2,28	27,35	23,31	25,02	1,94	2,09
25	46,60	19,42	1,94	23,31	33,66	36,12	2,80	3,01
30	42,25	21,12	1,71	20,46	103,00	110,54	8,58	9,21
35	38,83	22,65	1,53	18,31	45,70	49,04	3,81	4,09
40	36,05	24,03	1,39	16,62	27,35	29,35	2,28	2,45
45	33,74	25,31	1,27	15,25	20,46	21,96	1,71	1,83
50	31,78	26,48	1,18	14,12	16,62	17,84	1,39	1,49
55	30,08	27,58	1,10	13,15	14,12	15,15	1,18	1,26
60	28,60	28,60	1,03	12,33	12,33	13,23	1,03	1,10
Duración (min)	I (D,T) (mm/h) I (D,100)	Lluvia Acum (mm)	Δ lluvia (mm)	Intensidad bloque (mm/h)	Hietograma Sintético (mm/h)	Hietograma Sintético c 9,21% (mm/h)	Pluviograma Sintético (mm)	Pluviograma Sintético c 9,21% (mm)
5	127,98	10,66	10,66	127,98	16,34	17,85	1,36	1,49
10	92,38	15,40	4,73	56,78	18,95	20,70	1,58	1,73
15	75,53	18,88	3,49	41,82	22,75	24,85	1,90	2,07
20	65,14	21,71	2,83	33,98	28,97	31,64	2,41	2,64
25	57,91	24,13	2,41	28,97	41,82	45,68	3,49	3,81
30	52,49	26,25	2,12	25,42	127,98	139,77	10,66	11,65
35	48,24	28,14	1,90	22,75	56,78	62,01	4,73	5,17
40	44,80	29,86	1,72	20,66	33,98	37,11	2,83	3,09
45	41,92	31,44	1,58	18,95	25,42	27,77	2,12	2,31
50	39,49	32,91	1,46	17,54	20,66	22,56	1,72	1,88
55	37,38	34,27	1,36	16,34	17,54	19,16	1,46	1,60
60	35,54	35,54	1,28	15,32	15,32	16,73	1,28	1,39

Tabla 28: Método bloques alternados para las lluvias de proyecto actuales y futuras de duración 1 hora

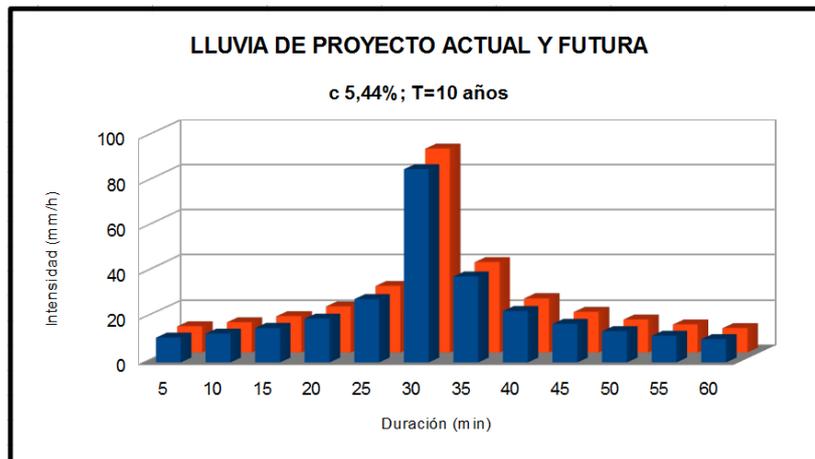


Ilustración 58: Lluvia de proyecto actual y futura para 1 hora ; T=10 años

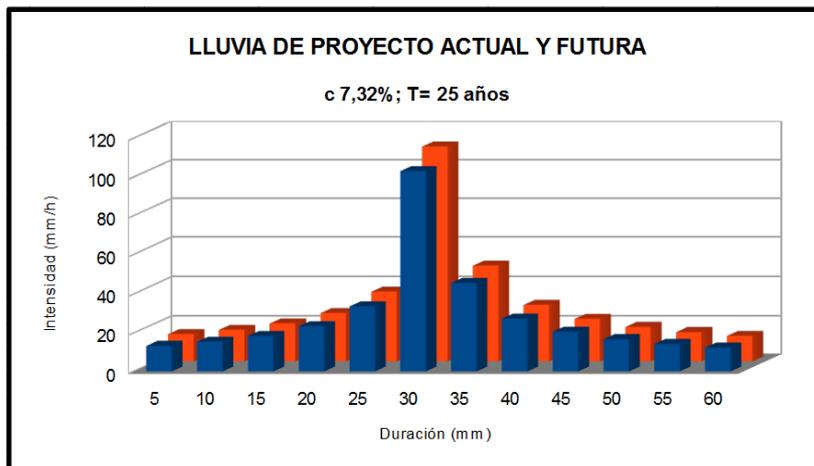


Ilustración 59: Lluvia de proyecto actual y futura para 1 hora ; T=25 años

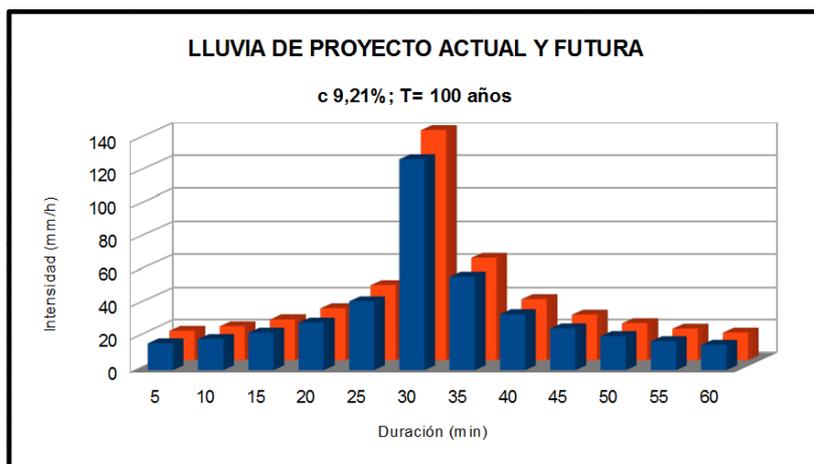


Ilustración 60: Lluvia de proyecto actual y futura para 1 hora ; T=100 años

MÉTODO DE LOS BLOQUES ALTERNADOS					LLUVIA DE PROYECTO	LLUVIA DE PROYECTO FUTURA	LLUVIA DE PROYECTO	LLUVIA DE PROYECTO FUTURA
Duración (min)	I (D,T) (mm/h)	Lluvia Acum (mm)	Δ lluvia (mm)	Intensidad bloque (mm/h)	Hietograma Sintético (mm/h)	Hietograma Sintético c 5,44% (mm/h)	Pluviograma Sintético (mm)	Pluviograma Sintético c 5,44% (mm)
5	85,73	7,14	7,14	85,73	6,20	6,54	0,52	0,54
10	61,88	10,31	3,17	38,04	6,67	7,03	0,56	0,59
15	50,60	12,65	2,33	28,02	7,21	7,61	0,60	0,63
20	43,64	14,55	1,90	22,76	7,87	8,30	0,66	0,69
25	38,79	16,16	1,62	19,41	8,66	9,14	0,72	0,76
30	35,16	17,58	1,42	17,03	9,66	10,19	0,81	0,85
35	32,32	18,85	1,27	15,24	10,95	11,54	0,91	0,96
40	30,01	20,01	1,15	13,84	12,70	13,39	1,06	1,12
45	28,09	21,06	1,06	12,70	15,24	16,07	1,27	1,34
50	26,45	22,04	0,98	11,75	19,41	20,46	1,62	1,71
55	25,04	22,96	0,91	10,95	28,02	29,54	2,33	2,46
60	23,81	23,81	0,85	10,26	85,73	90,40	7,14	7,53
65	22,72	24,62	0,81	9,66	38,04	40,11	3,17	3,34
70	21,75	25,38	0,76	9,13	22,76	24,00	1,90	2,00
75	20,88	26,10	0,72	8,66	17,03	17,96	1,42	1,50
80	20,09	26,79	0,69	8,25	13,84	14,59	1,15	1,22
85	19,37	27,44	0,66	7,87	11,75	12,39	0,98	1,03
90	18,71	28,07	0,63	7,53	10,26	10,82	0,85	0,90
95	18,11	28,67	0,60	7,21	9,13	9,63	0,76	0,80
100	17,55	29,25	0,58	6,93	8,25	8,69	0,69	0,72
105	17,03	29,80	0,56	6,67	7,53	7,94	0,63	0,66
110	16,55	30,34	0,54	6,43	6,93	7,31	0,58	0,61
115	16,10	30,86	0,52	6,20	6,43	6,78	0,54	0,56
120	15,68	31,35	0,50	5,99	5,99	6,32	0,50	0,53

MÉTODO DE LOS BLOQUES ALTERNADOS					LLUVIA DE PROYECTO	LLUVIA DE PROYECTO FUTURA	LLUVIA DE PROYECTO	LLUVIA DE PROYECTO FUTURA
Duración (min)	I (D,T) (mm/h)	Lluvia Acum (mm)	Δ lluvia (mm)	Intensidad bloque (mm/h)	Hietograma Sintético (mm/h)	Hietograma Sintético c 7,32% (mm/h)	Pluviograma Sintético (mm)	Pluviograma Sintético c 7,32% (mm)
5	103,00	8,58	8,58	103,00	7,45	8,00	0,62	0,67
10	74,35	12,39	3,81	45,70	8,01	8,60	0,67	0,72
15	60,78	15,20	2,80	33,66	8,67	9,30	0,72	0,78
20	52,42	17,47	2,28	27,35	9,45	10,15	0,79	0,85
25	46,60	19,42	1,94	23,31	10,41	11,17	0,87	0,93
30	42,25	21,12	1,71	20,46	11,61	12,46	0,97	1,04
35	38,83	22,65	1,53	18,31	13,15	14,12	1,10	1,18
40	36,05	24,03	1,39	16,62	15,25	16,37	1,27	1,36
45	33,74	25,31	1,27	15,25	18,31	19,65	1,53	1,64
50	31,78	26,48	1,18	14,12	23,31	25,02	1,94	2,09
55	30,08	27,58	1,10	13,15	33,66	36,12	2,80	3,01
60	28,60	28,60	1,03	12,33	103,00	110,54	8,58	9,21
65	27,30	29,57	0,97	11,61	45,70	49,04	3,81	4,09
70	26,13	30,49	0,91	10,97	27,35	29,35	2,28	2,45
75	25,08	31,35	0,87	10,41	20,46	21,96	1,71	1,83
80	24,13	32,18	0,83	9,91	16,62	17,84	1,39	1,49
85	23,27	32,97	0,79	9,45	14,12	15,15	1,18	1,26
90	22,48	33,72	0,75	9,04	12,33	13,23	1,03	1,10
95	21,75	34,44	0,72	8,67	10,97	11,78	0,91	0,98
100	21,08	35,14	0,69	8,33	9,91	10,63	0,83	0,89
105	20,46	35,80	0,67	8,01	9,04	9,70	0,75	0,81
110	19,88	36,45	0,64	7,72	8,33	8,93	0,69	0,74
115	19,34	37,07	0,62	7,45	7,72	8,28	0,64	0,69
120	18,83	37,67	0,60	7,20	7,20	7,73	0,60	0,64

MÉTODO DE LOS BLOQUES ALTERNADOS					LLUVIA DE PROYECTO	LLUVIA DE PROYECTO FUTURA	LLUVIA DE PROYECTO	LLUVIA DE PROYECTO FUTURA
Duración (min)	I (D,T) (mm/h)	Lluvia Acum (mm)	Δ lluvia (mm)	Intensidad bloque (mm/h)	Hietograma Sintético (mm/h)	Hietograma Sintético c 9,21% (mm/h)	Pluviograma Sintético (mm)	Pluviograma Sintético c 9,21% (mm)
5	127,98	10,66	10,66	127,98	9,26	10,11	0,77	0,84
10	92,38	15,40	4,73	56,78	9,95	10,87	0,83	0,91
15	75,53	18,88	3,49	41,82	10,77	11,76	0,90	0,98
20	65,14	21,71	2,83	33,98	11,75	12,83	0,98	1,07
25	57,91	24,13	2,41	28,97	12,93	14,13	1,08	1,18
30	52,49	26,25	2,12	25,42	14,42	15,75	1,20	1,31
35	48,24	28,14	1,90	22,75	16,34	17,85	1,36	1,49
40	44,80	29,86	1,72	20,66	18,95	20,70	1,58	1,73
45	41,92	31,44	1,58	18,95	22,75	24,85	1,90	2,07
50	39,49	32,91	1,46	17,54	28,97	31,64	2,41	2,64
55	37,38	34,27	1,36	16,34	41,82	45,68	3,49	3,81
60	35,54	35,54	1,28	15,32	127,98	139,77	10,66	11,65
65	33,92	36,75	1,20	14,42	56,78	62,01	4,73	5,17
70	32,47	37,88	1,14	13,63	33,98	37,11	2,83	3,09
75	31,17	38,96	1,08	12,93	25,42	27,77	2,12	2,31
80	29,99	39,98	1,03	12,31	20,66	22,56	1,72	1,88
85	28,92	40,96	0,98	11,75	17,54	19,16	1,46	1,60
90	27,93	41,90	0,94	11,24	15,32	16,73	1,28	1,39
95	27,03	42,80	0,90	10,77	13,63	14,89	1,14	1,24
100	26,20	43,66	0,86	10,34	12,31	13,44	1,03	1,12
105	25,42	44,49	0,83	9,95	11,24	12,27	0,94	1,02
110	24,70	45,29	0,80	9,59	10,34	11,30	0,86	0,94
115	24,03	46,06	0,77	9,26	9,59	10,48	0,80	0,87
120	23,40	46,81	0,75	8,95	8,95	9,77	0,75	0,81

Tabla 29: Método bloques alternados para las luvias de proyecto actuales y futuras de duración 2 hora

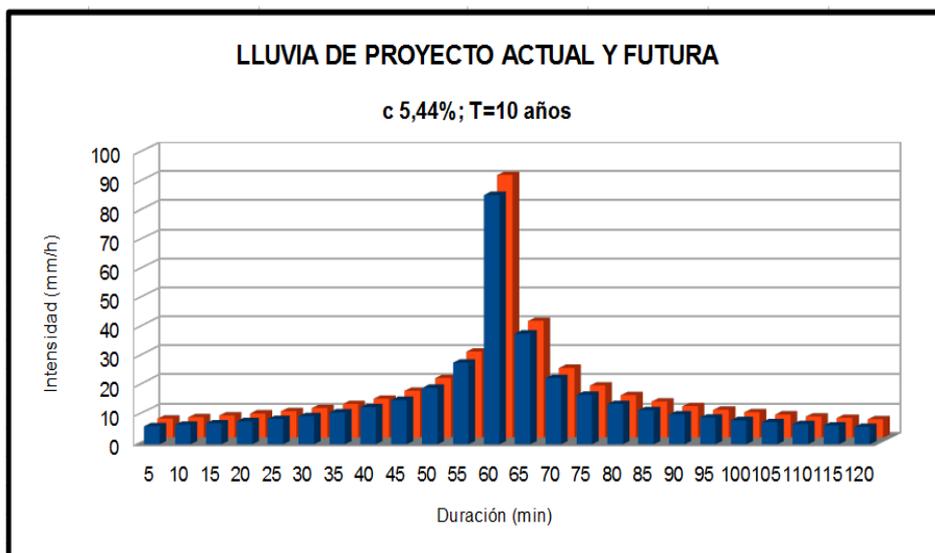


Ilustración 61: Lluvia de proyecto actual y futura para 2 hora ; T=10 años

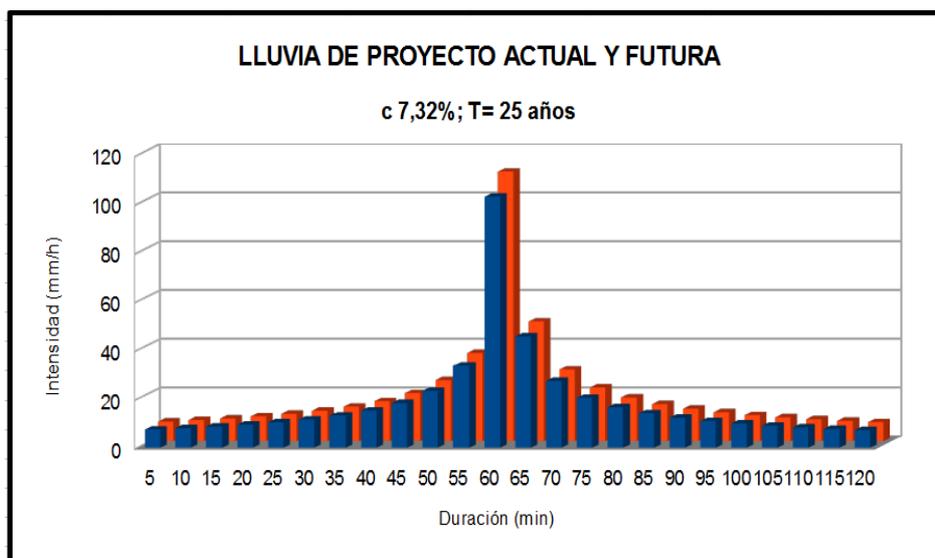


Ilustración 62: Lluvia de proyecto actual y futura para 2 hora ; T=25 años

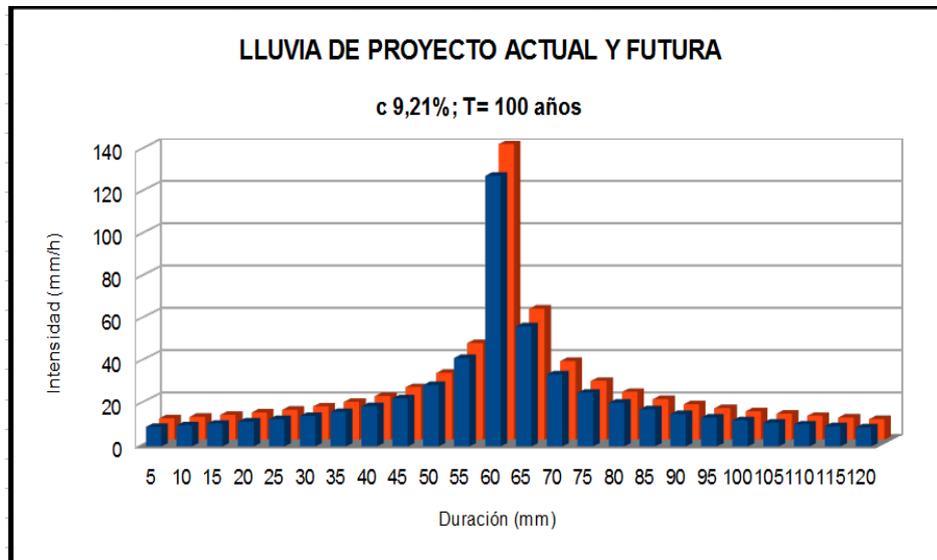


Ilustración 63: Lluvia de proyecto actual y futura para 2 hora ; T=100 años

10. CREACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO EN HEC-HMS

Se va a realizar la modelización hidrológica para el presente caso de estudio, y así determinar la respuesta hidrológica del sistema. Se han utilizado los resultados obtenidos del tratamiento del terreno con ArcGis del Proyecto Fin de Carrera realizado por Pablo Pallarés (Pallarés Bailo, 2010), con el que se han definido las características fisiográficas de la cuenca de estudio.

10.1. HERRAMIENTA PARA LA MODELIZACIÓN HIDROLÓGICA

10.1.1. Componentes de HEC-HMS

Para simular la respuesta hidrológica de la cuenca de estudio, HEC-HMS utiliza las siguientes componentes:

- Modelos de cuenca
- Modelos meteorológicos
- Especificaciones de control
- Datos de entrada

Una simulación calcula la transformación de lluvia a caudal en el modelo de la cuenca, dada la entrada del modelo meteorológico.

Las especificaciones de control definen el periodo de tiempo durante el cual se realizará la simulación y el intervalo de tiempo a utilizar.

Los componentes de los datos de entrada, tales como series temporales, tablas y datos por celdas son requerido como parámetros o condiciones de contorno tanto en el modelo de la cuenca como en el modelo meteorológico.

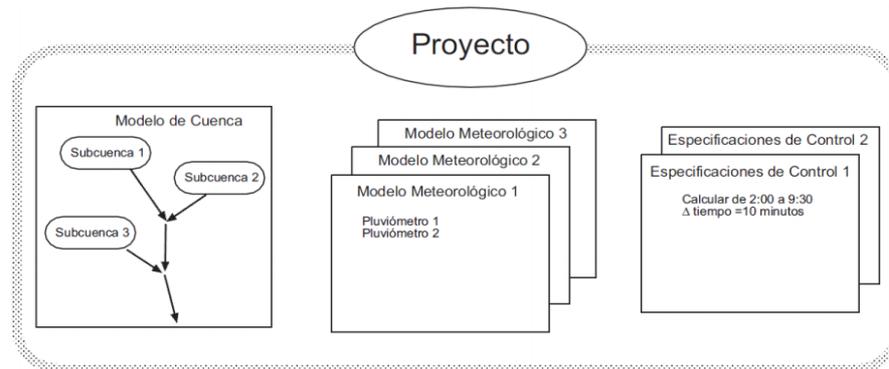


Ilustración 64: Componentes de HEC-HMS

10.1.1.1. Componentes del modelo de la cuenca

Representa la cuenca física. El usuario desarrolla el modelo de la cuenca incluyendo y conectando elementos hidrológicos. Los elementos hidrológicos utilizan modelos matemáticos para describir los procesos físicos producidos en la cuenca.

Descripción de los elementos hidrológicos:

- **Subcuenca** (*Subbasin*): Se emplea para representar la cuenca física.
- **Tramo** (*Reach*): Se emplea para transportar el agua de un punto a otro aguas abajo de la cuenca. La respuesta de este transporte es un retardo y una atenuación del hidrograma de entrada.
- **Unión** (*Junction*): se usa para sumar flujos de agua que provienen de elementos hidrológicos situados aguas arriba de la unión.
- **Fuente** (*Source*): Se emplea para introducir agua dentro del modelo de la cuenca. Este elemento no tiene entrada y la salida la define el usuario.
- **Sumideros** (*Sink*): se usa para representar el punto de salida de la cuenca. La entrada puede provenir de varios elementos situados aguas arriba del sumidero. Este elemento no tiene salida.
- **Depósito** (*Reservoir*): se usa para modelar la retención y atenuación de un hidrograma causado por un embalse o depósito de retención. La entrada puede provenir de varios elementos hidrológicos situados aguas arriba del depósito.
- **Derivación** (*Diversion*): se emplea para modelar un flujo de agua que abandona un tramo de cauce. La entrada proviene de varios elementos de aguas arriba. La salida de este elemento consiste en un flujo derivado y otro no derivado, es decir, que sigue por el cauce.

Los elementos hidrológicos se encuentran en la barra de herramientas como se aprecia en la imagen.

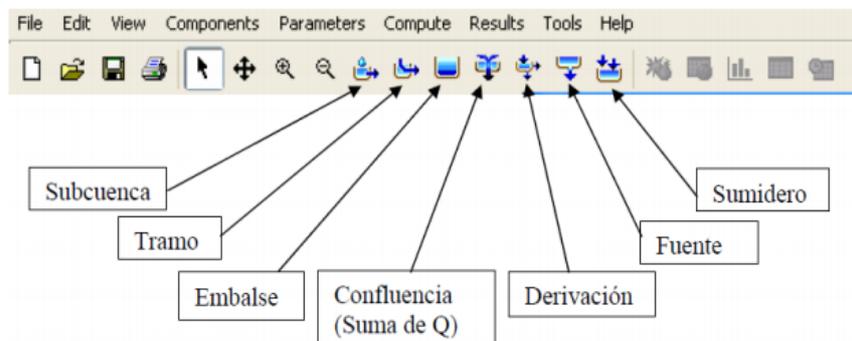


Ilustración 65: Componentes hidrológicos

10.1.1.1.1. Métodos de cálculo para subcuencas

Los métodos empleado en el *modelo de Perdidas* son:

- *Déficit y tasa constante (DC)*
- *Inicial y tasa constante*
- *Exponencial*
- *Número de curva CN SCS*
- *Green Ampt*
- *Consideración de la humedad del suelo (SMA)*
- *DC por celdas*
- *CN SCS por celdas*
- *SMA por celdas*

Los modelos empleados en el *modelo de transformación Lluvia-Escorrentía* son:

- *Hidrograma Unitario (HU) de Clark*
- *Onda cinemática*
- *ModClark*
- *HU SCS*
- *HU Snyder*
- *HU especificado por el usuario*
- *Hidrograma en S del usuario*

Los métodos empleados en el *modelo de Propagación de caudales* son:

- *Onda cinemática*
- *Retardo*



- *Puls modificado (embalse a nivel)*
- *Muskingum*
- *Muskingum-Cunge*

Los métodos empleados para el *modelo de Flujo Base* son:

- *Recesión restringida*
- *Constante mensual*
- *Depósito lineal*
- *Recesión*

10.1.1.2. Componentes del modelo meteorológico

El modelo hidrológico calcula la entrada de precipitación que requiere un elemento de subcuenca. El modelo meteorológico puede usar precipitación puntual o por celdas y puede modelar precipitación sólida y líquida junto con la evapotranspiración.

Los diferentes métodos de precipitación disponibles son:

- *Tormenta asociada a frecuencia*
- *Pluviómetros con pesos*
- *Precipitación por celdas*
- *Inversas de la distancia*
- *Tormentas del SCS*
- *Hietograma específico*
- *Tormenta de proyecto estándar*

10.1.1.3. Componentes de las especificaciones de control

las especificaciones de control se refieren al tiempo de duración de la simulación, incluye las fecha y hora de comienzo y fin del proyecto e intervalo de cálculo.

10.1.1.4. Componentes de la entrada de datos

Datos de series temporales, pares de datos y datos por celdas son requerido como parámetros o condiciones de contorno en los modelos de cuenca y meteorológicos.

Series temporales de datos	Pares de datos	Datos por celdas
Pluviómetros Medidores de caudal Limnímetros Termómetros Medidores de radiación solar Medidores de coeficientes de cultivo	Funciones almacenamiento-caudal Funciones cota-almacenamiento Funciones cota-área Funciones cota-caudal Funciones caudal-derivación Secciones transversales Hidrogramas unitarios Curvas de porcentaje Funciones de fusión de nieve Patrones de tasa de fusión de nieve	Precipitación Temperatura Radiación solar Coeficiente de cultivo Capacidad de almacenamiento Tasa de percolación Coeficientes de almacenamiento Déficit de humedad Área impermeable Número de curva CN SCS Cotas Equivalente de agua de nieve Contenido de agua Tasa de fusión de nieve

Tabla 30: Componentes de los datos de entrada

10.1.2. Interfaz de usuario

- La interfaz de usuario consiste en:
- Barra de menú
- Barra de herramientas
- Cuatro paneles principales que son:
 - *Explorador de cuenca*
 - *Escritorio*
 - *Editor de componentes*
 - *Registro de mensajes*

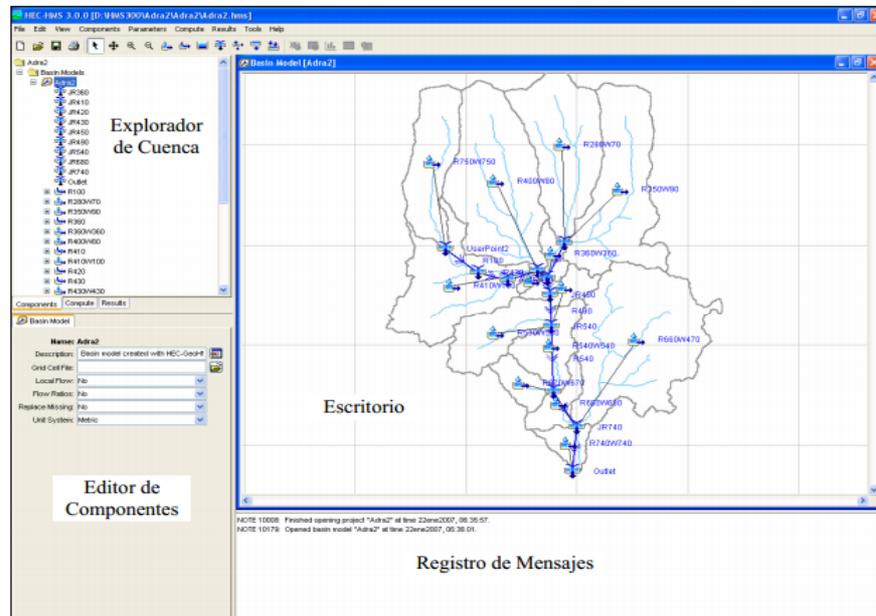


Ilustración 66: Interfaz de usuario de HEC-HMS

10.1.2.1. Explorador de cuenca

Está desarrollado para dar un rápido acceso a los componentes de un proyecto HEC-HMS. El explorador de cuenca está dividido en tres partes:

- **Components:** aquí se encuentra la estructura jerárquica de los componentes del modelo hidrológico.
- **Compute:** para acceder a las simulaciones, optimizaciones y análisis.
- **Results:** se encontraran los resultados del proyecto, incluso se puede comparar los resultados de diferentes simulaciones en un mismo gráfico o tabla.

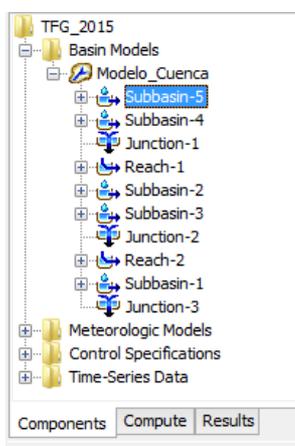


Ilustración 67: Explorador de cuenca

10.1.2.2. Editor de componentes

Cuando un componente o subcomponente se activa en el explorador de cuenca, se abre un editor de componente específico. Todos los datos característicos y requeridos por los componentes se ingresan en el editor.

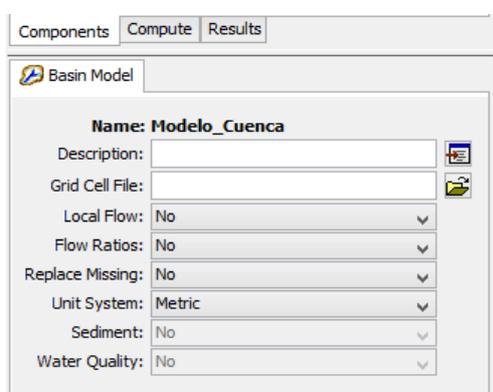


Ilustración 68: Ejemplo de editor de componente de un modelo de cuenca

10.1.2.3. Registro de mensajes

Las notas, advertencias (warning) y errores, se muestran en el registro de mensajes.

10.1.2.4. Escritorio

En el escritorio pueden aparecer varias ventanas, incluyendo tablas resumen, series temporales, gráficos, editores globales y el mapa del modelo de cuenca (*background*).

10.2. DATOS DE ENTRADA DEL MODELO HIDROLÓGICO

A continuación, se presentan los datos de entrada para la modelización hidrológica con la herramienta HEC-HMS.

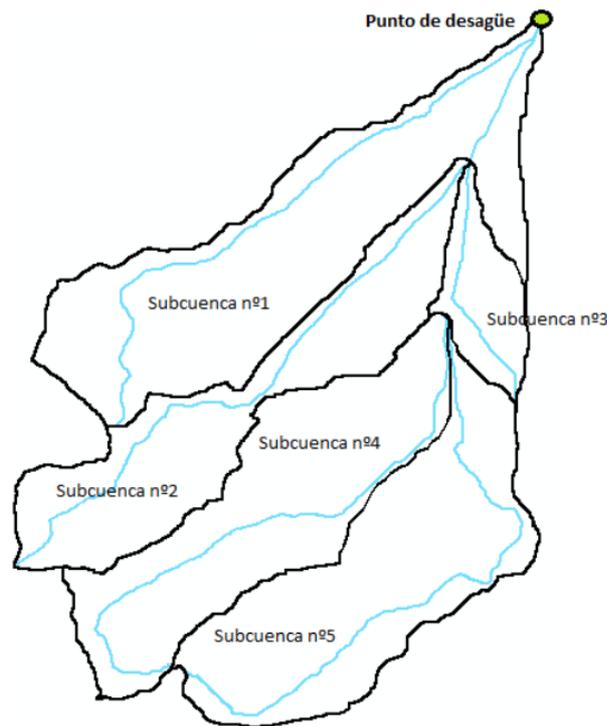


Ilustración 69: Cuenca de estudio

Para calcular el tiempo de concentración (T_c) se ha considerado la fórmula propuesta por Témez, que tiene en cuenta estudios realizados con los datos del SCS y con cuencas españolas.

$$T_c = 0,3 \cdot \left(\frac{L}{i^{0,25}} \right)^{0,76}$$

Donde:

T_c es el tiempo de concentración en horas.

L la longitud del cauce en km.

i pendiente media del cauce m/m.

El tiempo de retardo de la punta se puede expresar como:

$$t_c = 0,35 \cdot T_c$$

Subcuenca	Cota superior(m)	Cota inferior (m)	Pendiente (m/m)	Longitud cauce más largo (m)	Área (km ²)	Tc (h)	Tlag (min)	Curve Number (CN)
1	612,32	374,87	0,05	5020,06	3,40	1,826	38,34	71,53
2	679,91	393,88	0,06	4832,44	2,25	1,699	35,69	69,78
3	443,93	393,88	0,02	2152,74	0,60	1,098	23,06	70,75
4	730,51	415,69	0,07	4681,84	3,56	1,619	34,01	64,42
5	730,35	415,69	0,06	5149,21	2,76	1,773	37,23	70,83

Tabla 31: Parámetros topográficos e hidrológicos de cada subcuenca

Los parámetros de los tramos de propagación se calculan:

Tramo (Reach)	Cota superior(m)	Cota inferior(m)	Pendiente (m/m)	Longitud cauce(m)	Tc (h)	K (h)
1	415,69	393,88	0,0187	1161,63	0,715	0,429
2	393,88	374,87	0,0158	1201,80	0,758	0,455

Tabla 32: Datos característicos de los tramos de cauce donde se realiza la propagación

El valor de Mukingum K , que se define como la distancia entre los centros de gravedad entre los hidrogramas de entrada y salida, para calcular el valor K se debe conocer el valor del tiempo de concentración que propone Témez, para posteriormente aplicar la siguiente expresión:

$$K = 0,6 \cdot Tc$$

Para analizar la respuesta del sistema hidrológico con HEC-HMS, se deben realizar los siguientes pasos:

1. Crear un nuevo proyecto
2. Crear datos de pluviómetros
3. Ingresar los datos de los modelos de cuencas
4. Ingresar los datos del modelo de precipitación
5. Ingresar las especificaciones de control
6. Crear y ejecutar una simulación del programa

10.2.1. Crear un proyecto nuevo en HEC-HMS

Seleccionar *File* > *New*

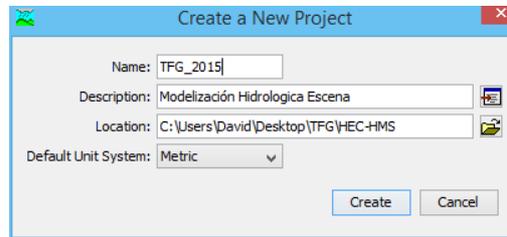


Ilustración 70: Crear proyecto nuevo

Se selecciona como unidades por defecto el sistema métrico.

Elegir los métodos de cálculo

Seleccionar *Tools* > *Program Settings*

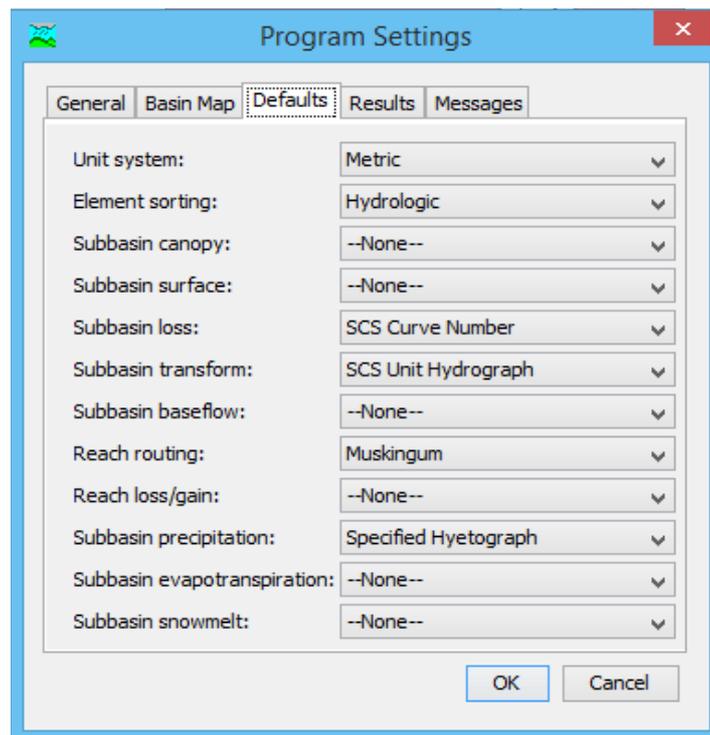


Ilustración 71: Seleccionar los métodos de cálculo por defecto

los métodos de cálculo empleados en modelización del sistema hidrológico han sido presentados en el capítulo de *Hidrología*.

- **Crear el modelo de cuenca**

Seleccionar *Components* > *Basin Model Manager*

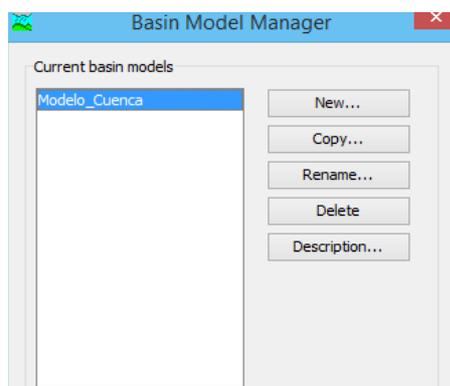


Ilustración 72: Crear modelo de cuenca

Dentro de la carpeta *Basin Models* de la ventana del Explorador de Cuenca, aparecerá el *Modelo_Cuenca* y se abrirá la ventana Escritorio.

- **Mapa de fondo (*Background*)**

Antes de empezar a diseñar el modelo de cuenca, puede servir de gran utilidad el cargar un mapa de fondo, para ello seleccionar *View > Background maps*. Los ficheros que se pueden cargar son: *.dlg, *.shp, *.img, *.map, *.dxf

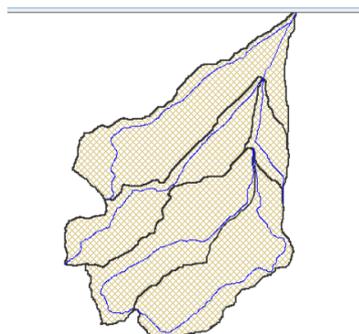


Ilustración 73: Mapa de fondo cargado en la ventana Escritorio

- **Crear los elementos hidrológicos**

Seleccionar el icono del elemento que se desea crear y pinchar con el cursor en la posición donde lo queremos fijar de la ventana de Escritorio.

Los elementos hidrológicos a crear en el proyecto de HMS son 5 *Subbasin*, 3 *Junction* y 2 *Reach*.

El lugar de la ventana Escritorio donde se sitúe el elemento hidrológico es indiferente, lo importante es en la conexión entre elementos.

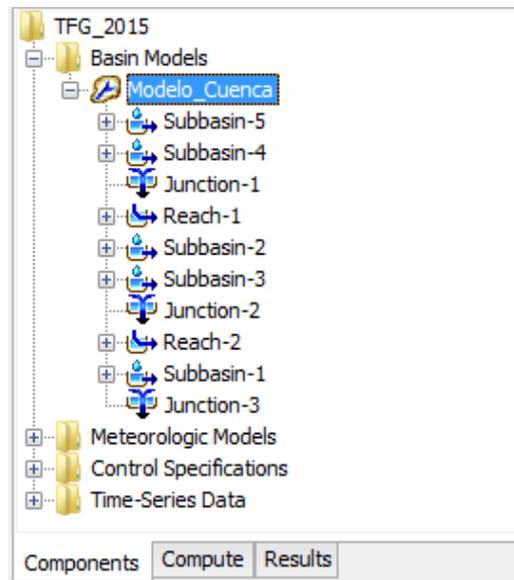


Ilustración 74: Explorador de cuenca

- **Conectar elementos hidrológicos**

Una vez creado todos los elementos hay que conectarlos unos con otros desde aguas arriba hacia aguas abajo.

Para conectarlos hay que hacer clic sobre el sobre el elemento hidrológico a conectar. Se abrirá una ventana, donde aparecerá la opción *Downstream* y a continuación elegimos el elemento que se desea conectar. En la imagen se muestra un ejemplo de conexión.

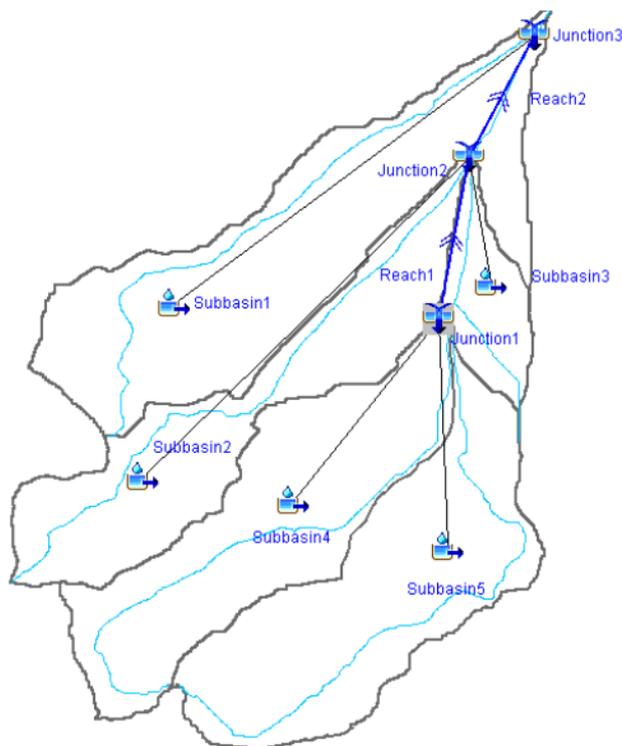


Ilustración 75: Conexión de los elementos hidrológicos

- **Introducción de las características de la subcuenca**

Áreas

Seleccionar *Parameters > Subbasin Area*

En la ventana que aparece se introducen las áreas de cada subcuenca en km².

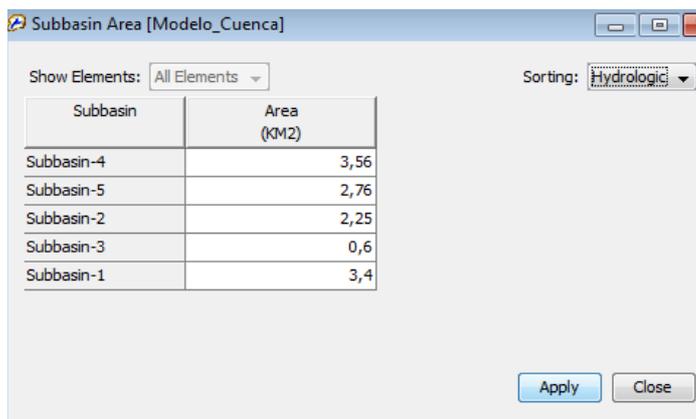
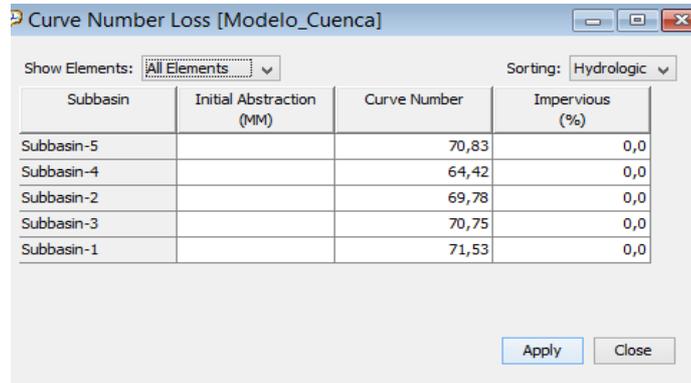


Ilustración 76: Subbasin Area

Parámetros de pérdida

Seleccionar *Parameters* > *Loss* > *SCS Curve Number*

Aparecen tres campo para rellenar *Initial Abstraction*, *Curve Number* y *Impervious*. Se introducirá únicamente los valores correspondientes al *Curve Number*.

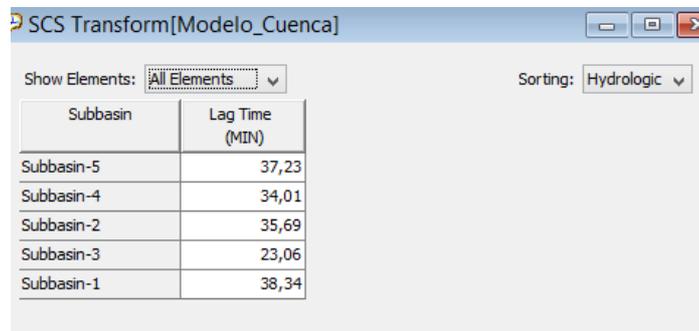


Subbasin	Initial Abstraction (MM)	Curve Number	Impervious (%)
Subbasin-5		70,83	0,0
Subbasin-4		64,42	0,0
Subbasin-2		69,78	0,0
Subbasin-3		70,75	0,0
Subbasin-1		71,53	0,0

Ilustración 77: Curve Number Loss

Parámetros lluvia-caudal

Seleccionar *Parameters* > *Transform* > *SCS Unit Hydrograph*

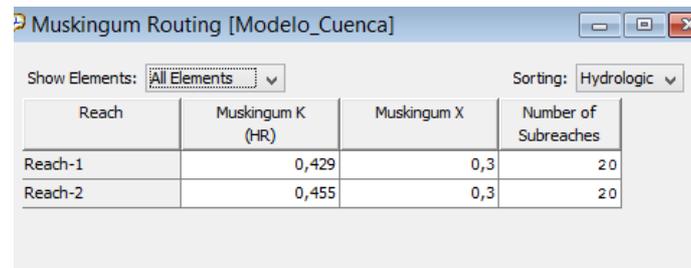


Subbasin	Lag Time (MIN)
Subbasin-5	37,23
Subbasin-4	34,01
Subbasin-2	35,69
Subbasin-3	23,06
Subbasin-1	38,34

Ilustración 78: SCS Transform

Parámetros para propagación de caudales en cauces

Seleccionar *Parameters* > *Routing* > *Muskingum*



Reach	Muskingum K (HR)	Muskingum X	Number of Subreaches
Reach-1	0,429	0,3	20
Reach-2	0,455	0,3	20

Ilustración 79: Muskingum Routing

10.2.2. Crear datos de entrada

- **Crear las Lluvias de Proyecto**

Seleccionar *Components* > *Time-Series Data Manager*

En la ventana *Time-Series Data Manager* elegir dentro de *Data type*, *Precipitation Gages*, y hacer clic en *New*.

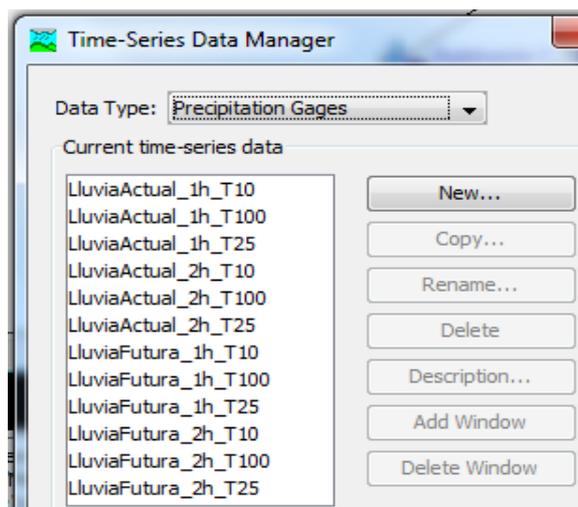


Ilustración 80: Time-Series Data Manager

Crear tantos datos pluviométricos como se desee. En el explorador de Cuenca aparecerá una carpeta *Time-Series Data*.

Seleccionar un pluviómetro y en el Editor de Componentes aparecerán sus propiedades.

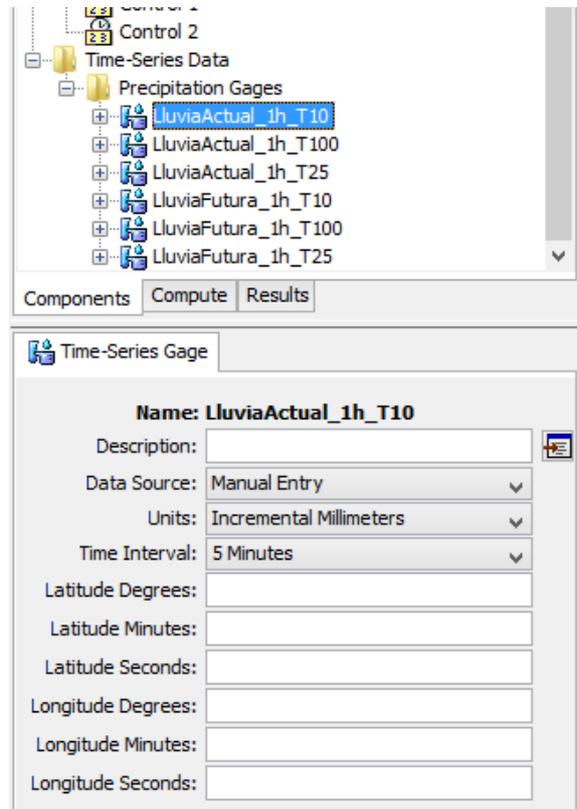


Ilustración 81: Propiedades pluviómetro

En *Data Source* elegir *Manual Entry*

En *Units* seleccionar el modo en que se quiere introducir los datos. En este caso *Incremental Millimeters*. En *Time interval* se elige el intervalo de tiempo elegido por la lluvia de proyecto en este caso será y para el resto será de 5 minutos. Los campos inferiores hacen referencia a la situación del pluviómetro en el espacio geográfico. En este estudio se considera que llueve de forma uniforme en toda la cuenca por lo que no se introducen estos parámetros.

Seleccionar la pestaña *Time Window* e ingresar las fechas y horas de comienzo y fin de la lluvia de proyecto. La duración de la tormenta serán de 1 y 2 horas.

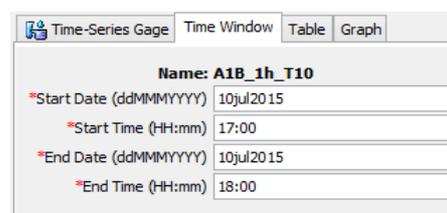


Ilustración 82: Time Window para lluvias de proyecto de 1 hora

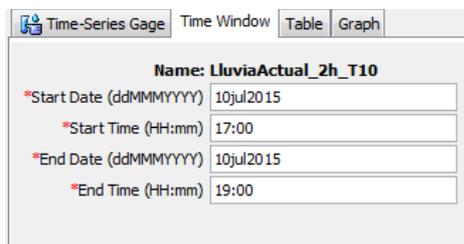


Ilustración 83: Time Window para lluvias de proyecto de 2 hora

En la pestaña *Table* ingresar los valores de cada bloque de lluvia de proyecto en *mm*. En *Graph* se puede visualizar gráficamente la lluvia de proyecto.

Ejemplo:

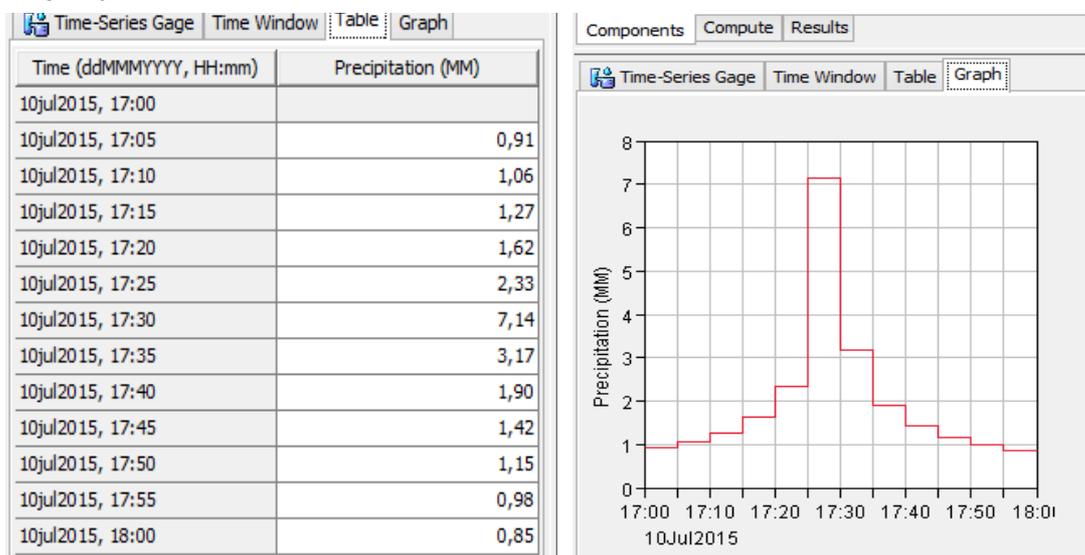


Ilustración 84: Lluvia de proyecto actual para 1 hora; T= 10 años

10.2.3. Modelo meteorológico

Seleccionar *Components > Meteorologic Model Manager*. Se pueden crear tantos modelos meteorológicos como casos se quieran estudiar. Se ha creado un modelo meteorológico para cada lluvia de proyecto actual y futura.

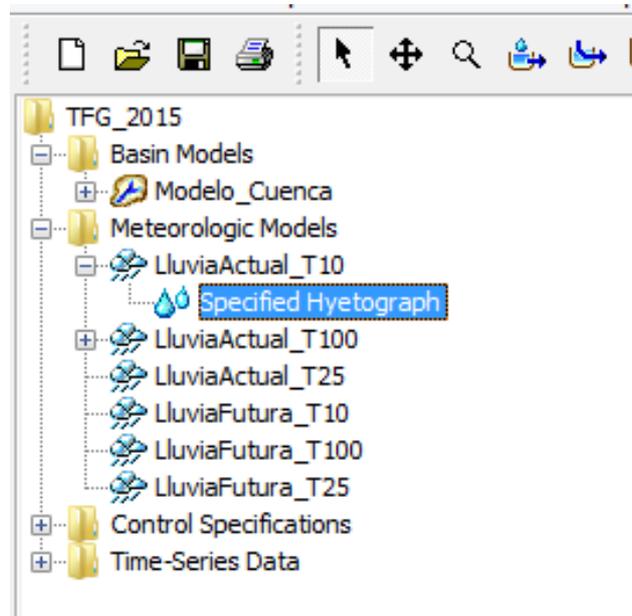


Ilustración 85: Meteorologic Models

En pestaña *Meteorologic Model* en *Precipitation* elegir el método de precipitación, en este caso se selecciona *Specified Hyetograph*, generado anteriormente. En *Unit System* elegir el sistema de unidades, en esta caso *Metric*.

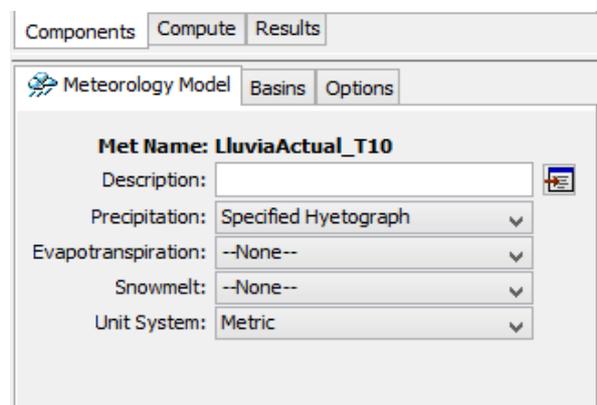


Ilustración 86: Pestaña Meteorology Model

En pestaña *Basins* se ha elegido aplicar la lluvia de diseño a todo el modelo de cuenca, es decir, que se considera que llueve de forma uniforme en toda la cuenca de estudio.

10.2.4. Especificaciones de control

Seleccionar *Componentes* > *Control Specifications Manager*

Se definen las fechas de inicio y final de la simulación del modelo hidrológico. Es decir las condiciones de contorno para que HEC-HMS calcule la respuesta del sistema hidrológico.

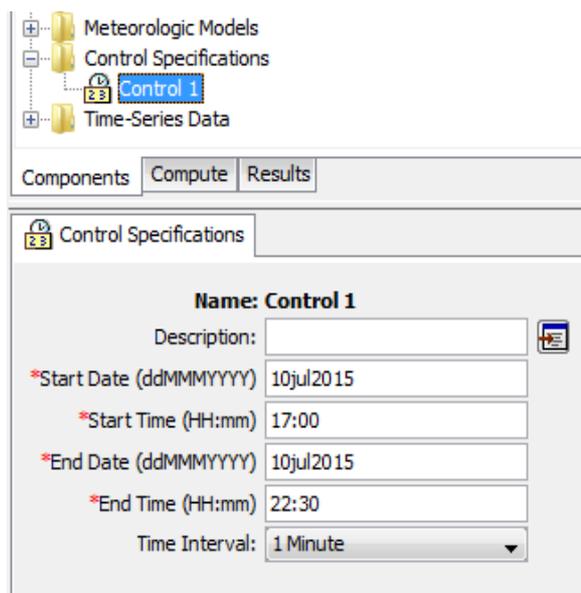


Ilustración 87: Control Specifications

Start Date: Fecha comienzo de la simulación.

Start Time: Hora comienzo de la simulación.

End Date: Fecha finalización de la simulación.

End Time: Hora finalización de la simulación.

Time Interval: Intervalo de tiempo en cual HMS arrojará resultados.

Se han creado un *Control Specifications* con las siguientes características:

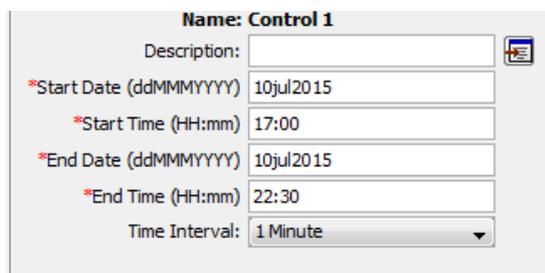


Ilustración 88: Control 1

Las horas de inicio y final de la lluvia, deben coincidir con las del control y la hora de finalización de la lluvia debe ser menor que la hora de finalización del control. El intervalo de tiempo debe ser superior que el tiempo de concentración total para la cuenca. Así se obtienen los caudales máximos posibles.

10.2.5. CREACIÓN DE LA SIMULACIÓN

- **Crear**

En primer lugar se crea la simulación.

Seleccionar *Compute* > *Create Simulation Run*



Ilustración 89: Crear simulación

- **Seleccionar**

En primer lugar se crea la simulación. posteriormente se selecciona el *Modelo de Cuenca* y el *Modelo meteorológico*. Por último se selecciona una de las *Especificaciones de Control*.

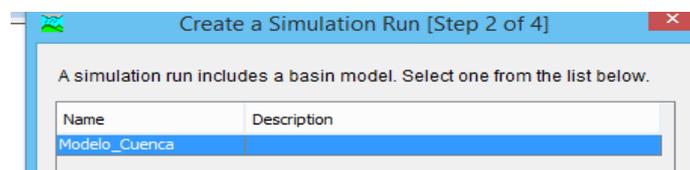


Ilustración 90: Simulación. Selección Step 2

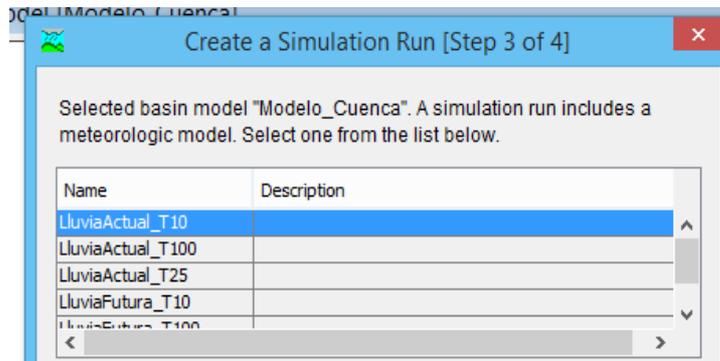


Ilustración 91: Simulación. Selección Step 3

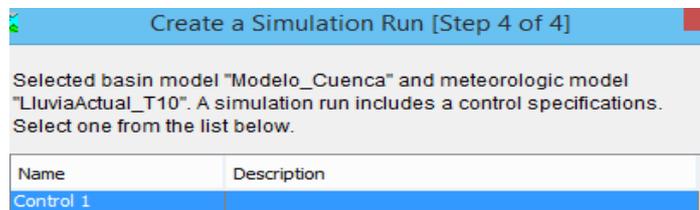


Ilustración 92: Simulación. Selección Step 4

- **Ejecutar**

Seleccionar *Compute> Select Run* y seleccionar una de las simulaciones que aparecen

Seleccionar *Compute> Compute Run*

Cerrar la ventana con *Close*

10.2.6. Resultados

10.2.6.1. Resultados correspondientes a las lluvias de proyecto actuales

- Subcuenca 1

<i>Período de Retorno (T)</i>	<i>Caudal (m³/s)</i>	<i>Precipitación total</i>	<i>Volumen Escorrentía</i>	<i>Tiempo al pico</i>
10 años	0,9	31,37	1,11	19:16:00
25 años	2	37,68	2,57	19:09:00
100 años	4,1	46,82	5,54	19:01:00

Tabla 33: Resultados Subcuenca 1

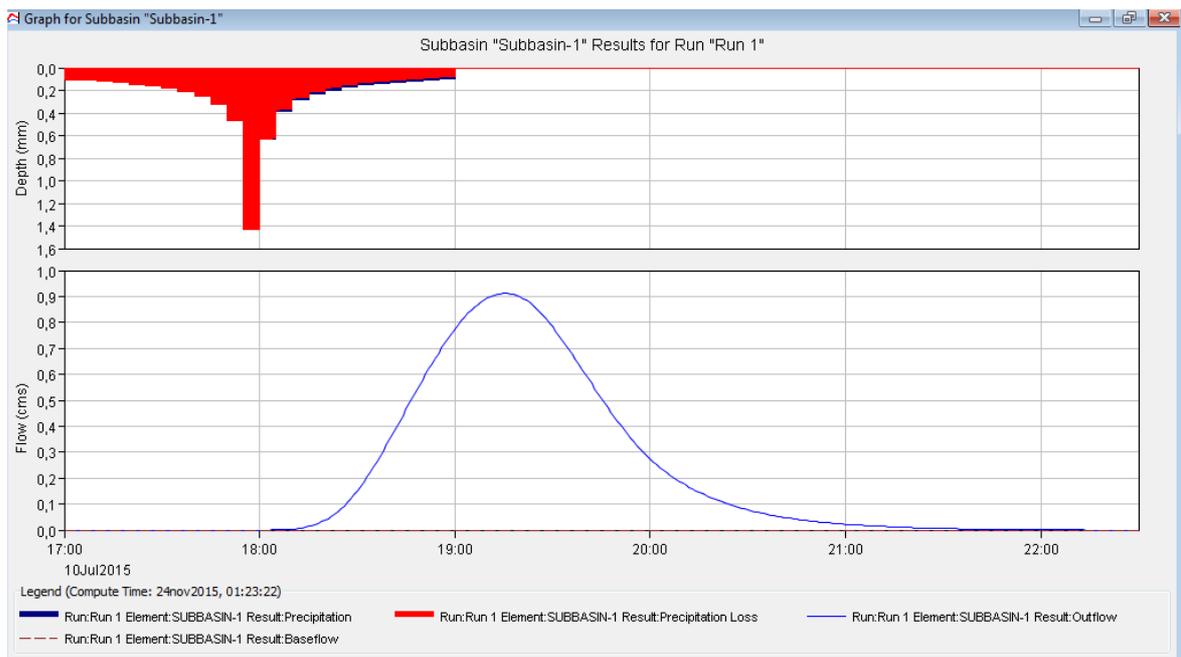


Ilustración 93: Respuesta hidrológica Subcuenca1 para T=10

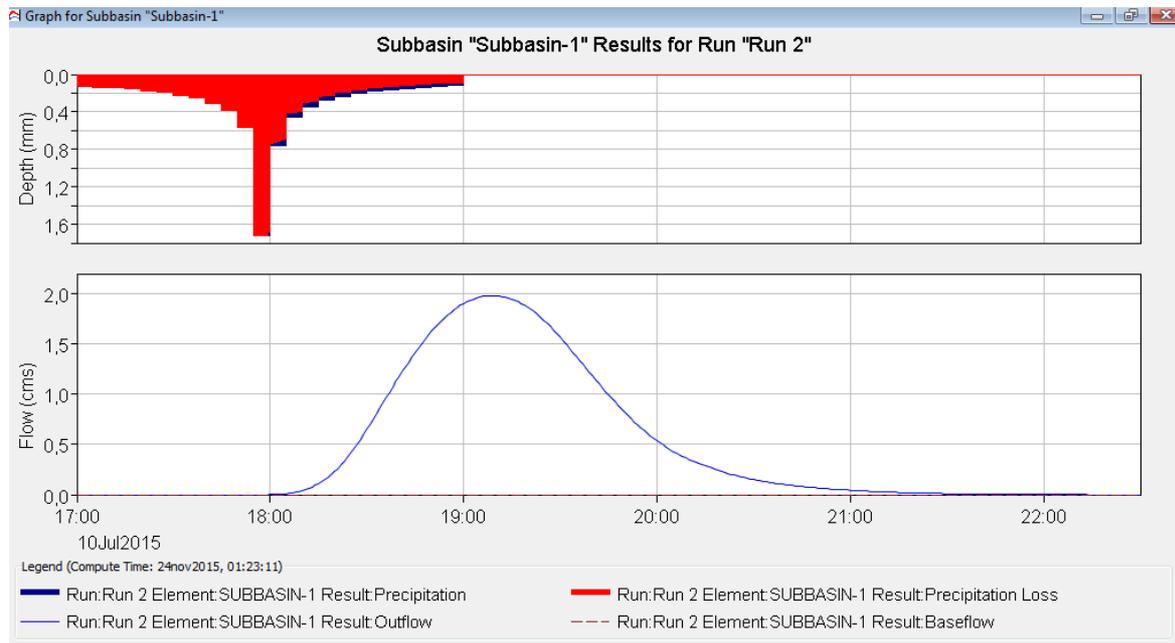


Ilustración 94: Respuesta hidrológica Subcuenca1 para T=25

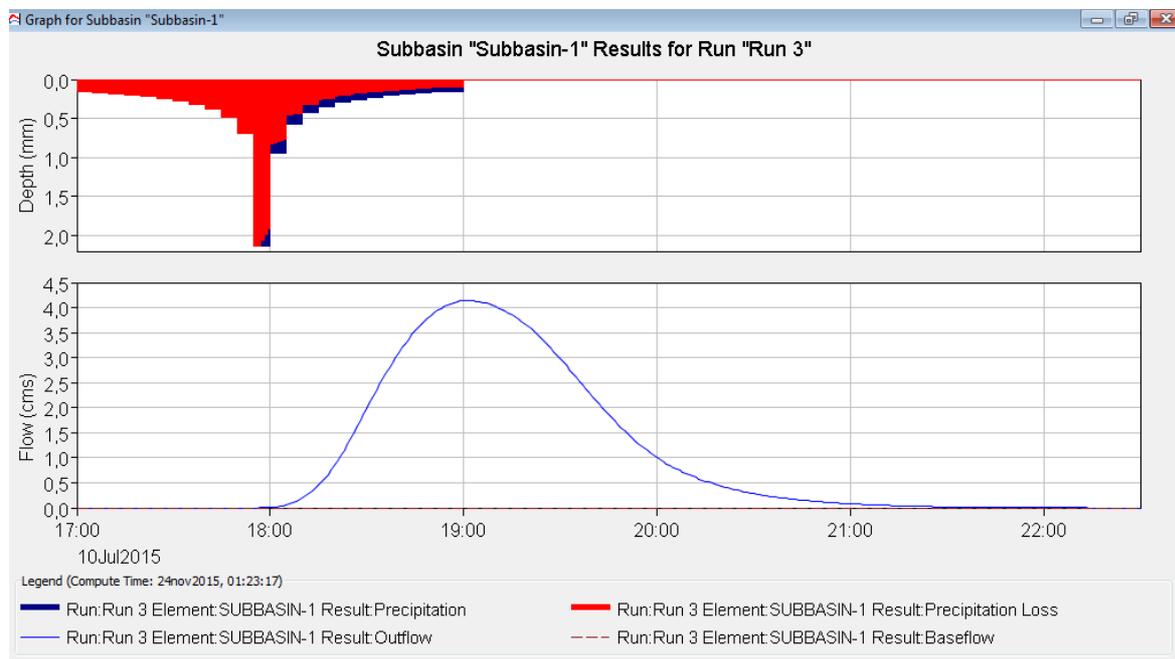


Ilustración 95: Respuesta hidrológica Subcuenca1 para T=100

- Subcuenca 2

<i>Período de Retorno (T)</i>	<i>Caudal (m³/s)</i>	<i>Precipitación total</i>	<i>Volumen Escorrentía</i>	<i>Tiempo al pico</i>
10 años	0,4	31,37	0,74	19:16:00
25 años	1,1	37,68	1,96	19:09:00
100 años	2,3	46,82	4,57	19:01:00

Tabla 34: Resultados Subcuenca 2

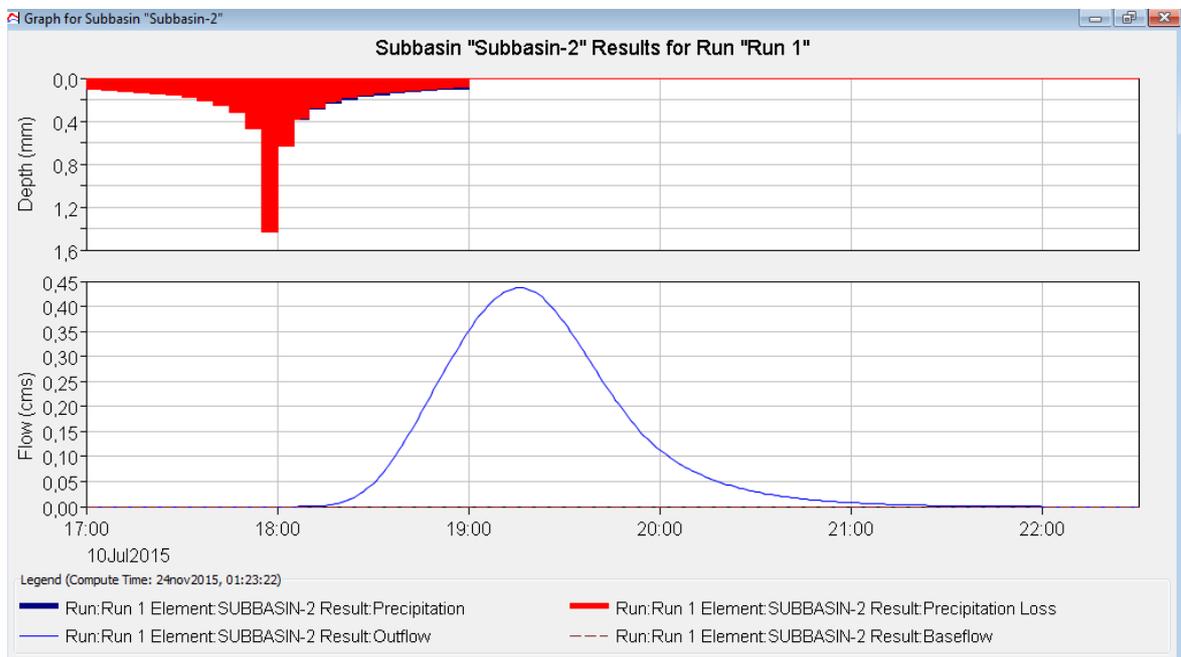


Ilustración 96: Respuesta hidrológica Subcuenca 2 para T=10

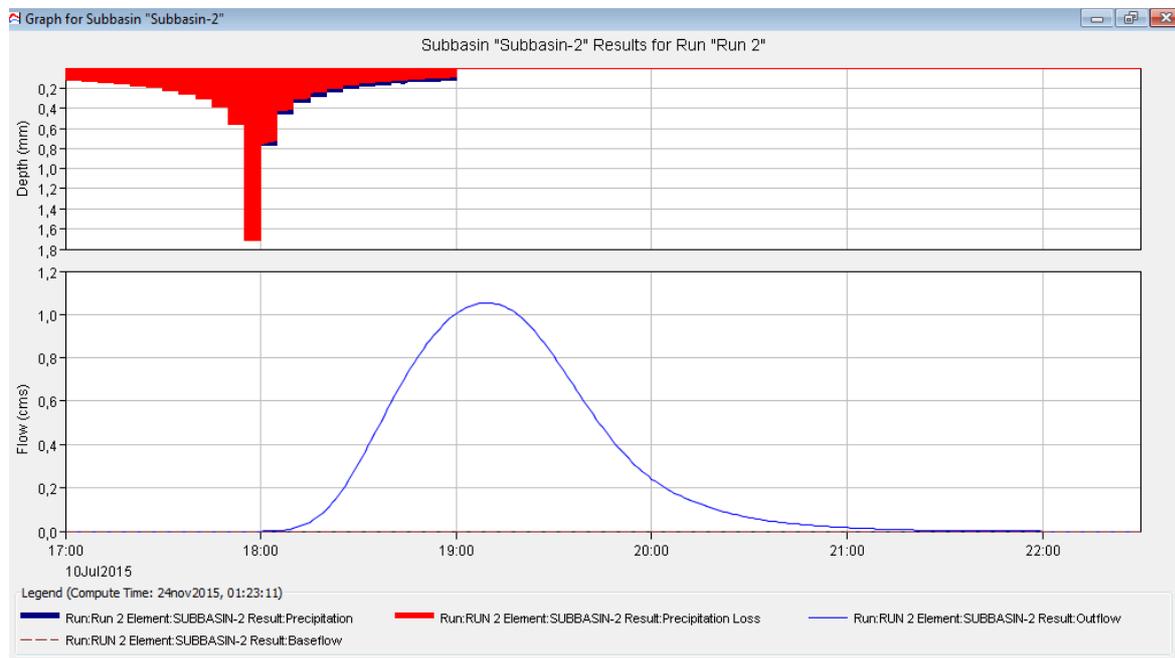


Ilustración 97: Respuesta hidrológica Subcuenca 2 para $T=25$

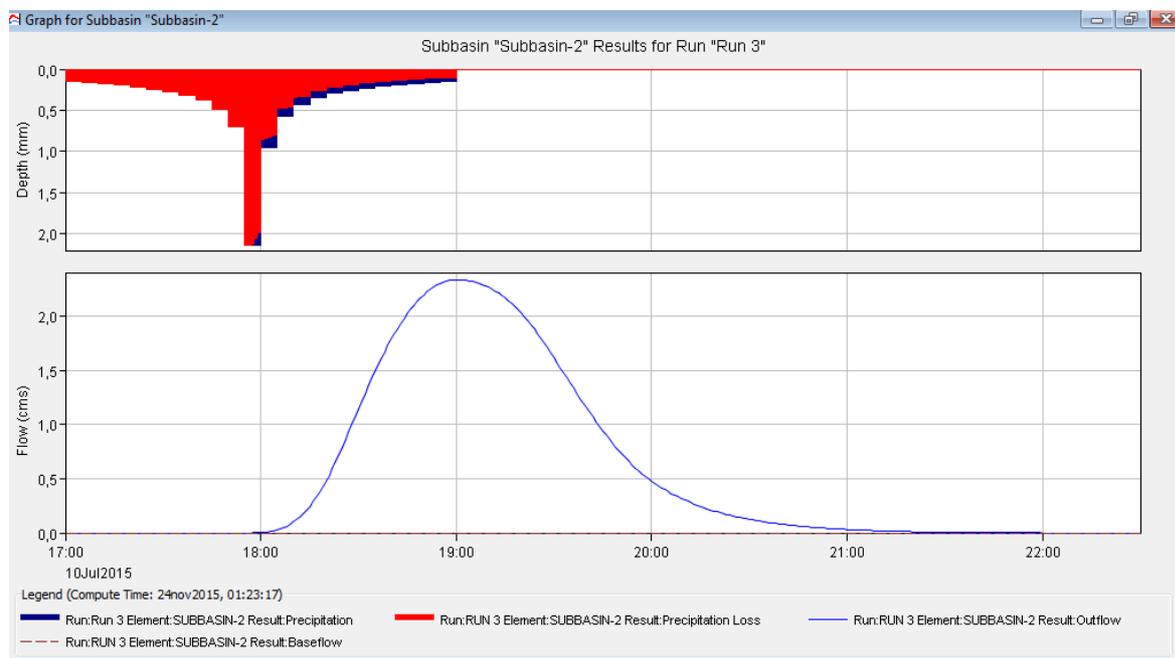


Ilustración 98: Respuesta hidrológica Subcuenca 2 para $T=100$

- Subcuenca 3

<i>Período de Retorno (T)</i>	<i>Caudal (m³/s)</i>	<i>Precipitación total</i>	<i>Volumen Escorrentía</i>	<i>Tiempo al pico</i>
10 años	0,2	31,37	0,93	19:04:00
25 años	0,4	37,68	2,29	18:52:00
100 años	0,8	46,82	5,09	18:39:00

Tabla 35: Resultados Subcuenca 3

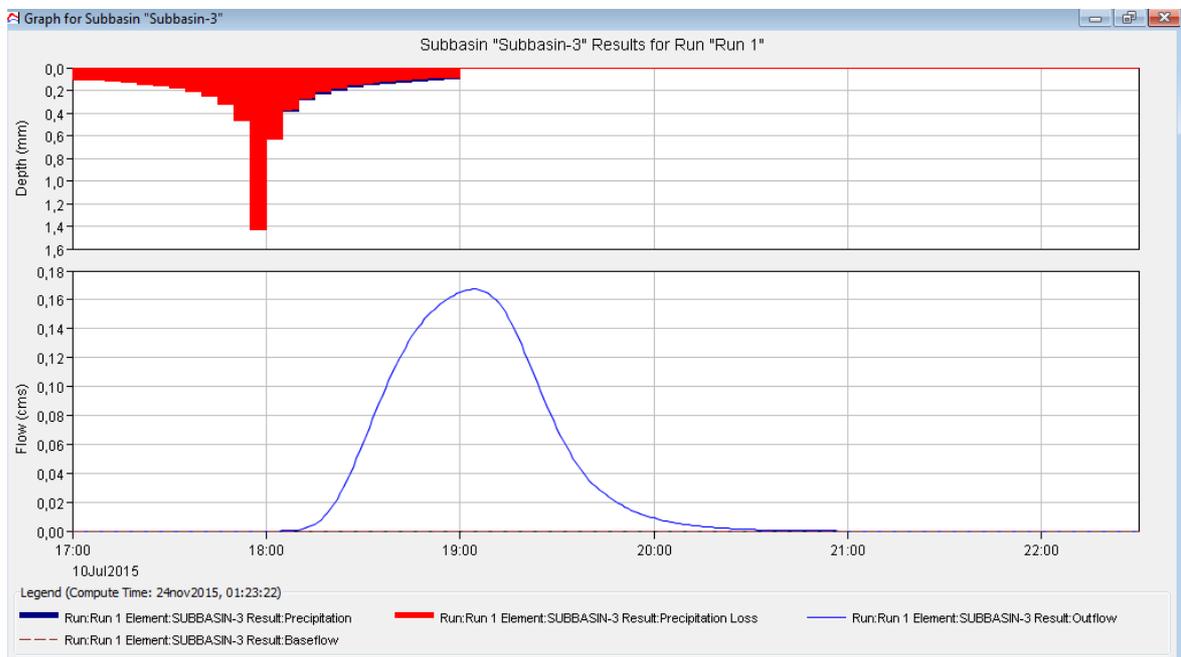


Ilustración 99: Respuesta hidrológica Subcuenca 3 para T=10

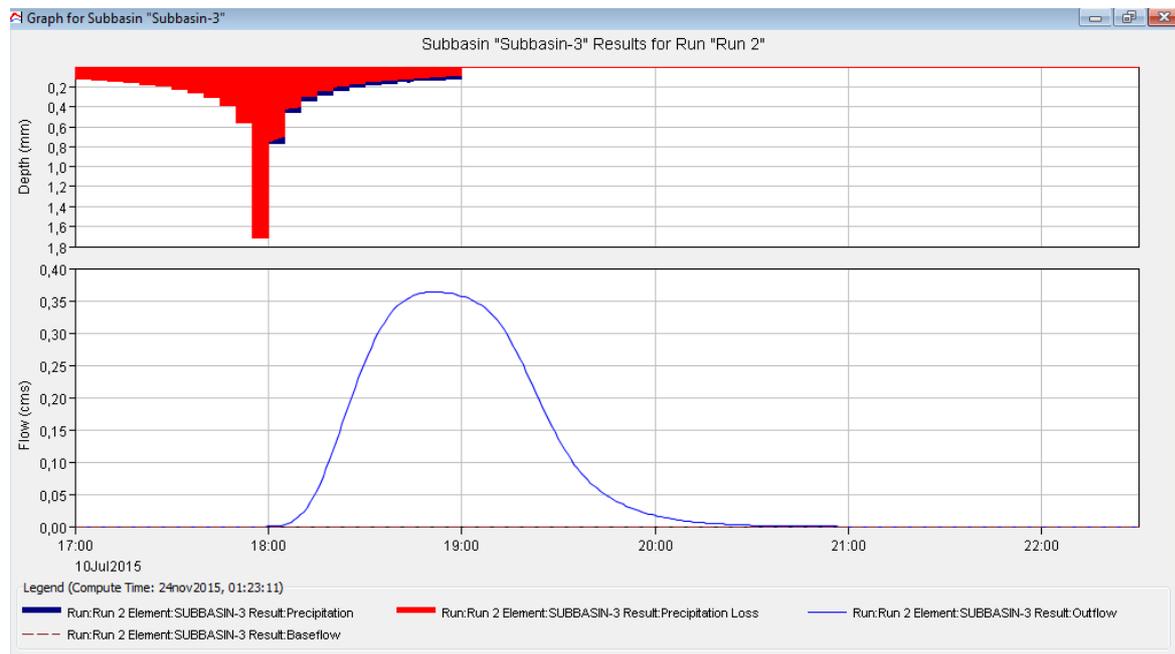


Ilustración 100: Respuesta hidrológica Subcuenca 3 para T=25

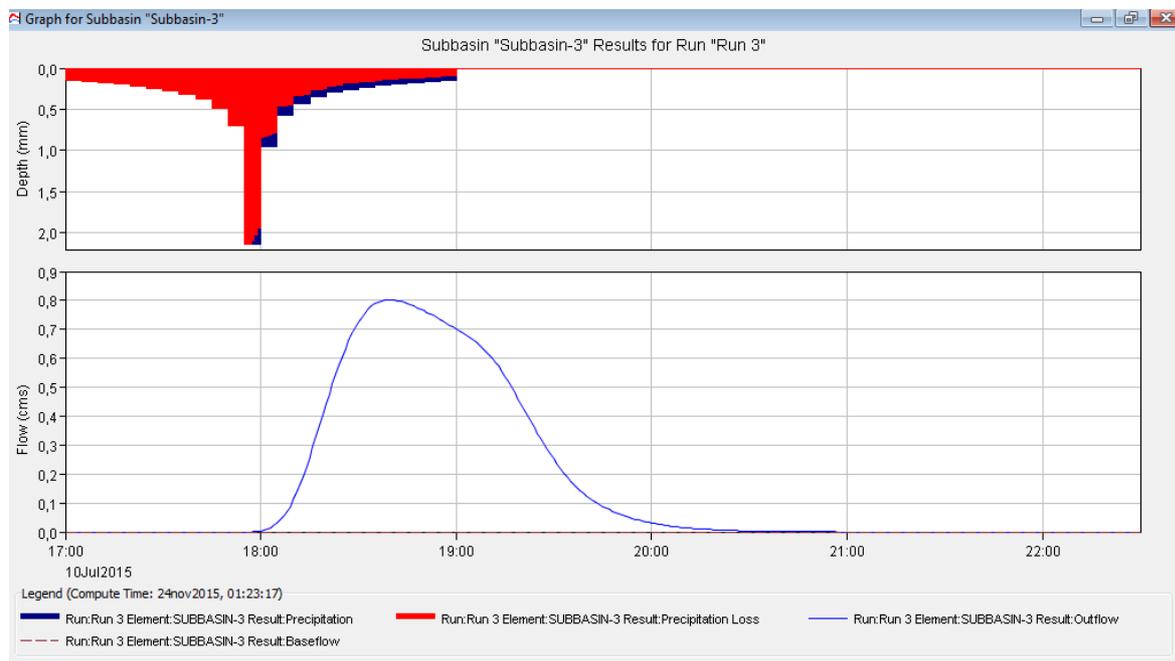


Ilustración 101: Respuesta hidrológica Subcuenca 3 para T=100

- Subcuenca 4

<i>Período de Retorno (T)</i>	<i>Caudal (m³/s)</i>	<i>Precipitación total</i>	<i>Volumen Escorrentía</i>	<i>Tiempo al pico</i>
10 años	0,1	31,37	0,08	19:25:00
25 años	0,4	37,68	0,62	19:17:00
100 años	1,9	46,82	2,21	19:09:00

Tabla 36: Resultados Subcuenca 4

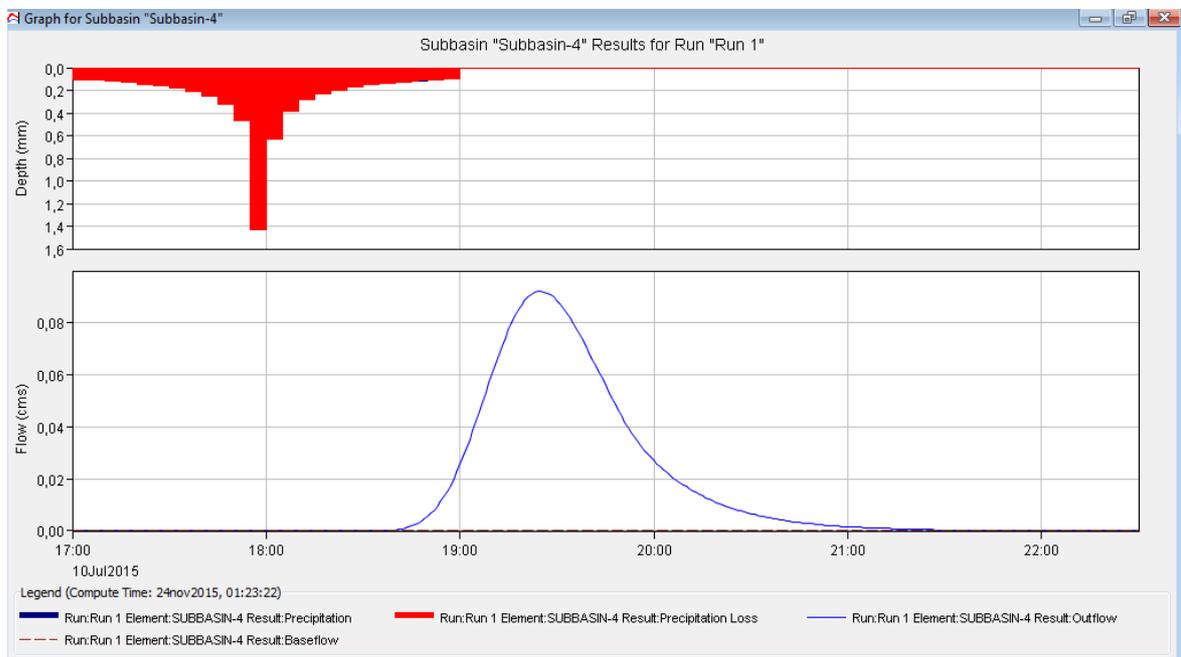


Ilustración 102: Respuesta hidrológica Subcuenca 4 para T=10

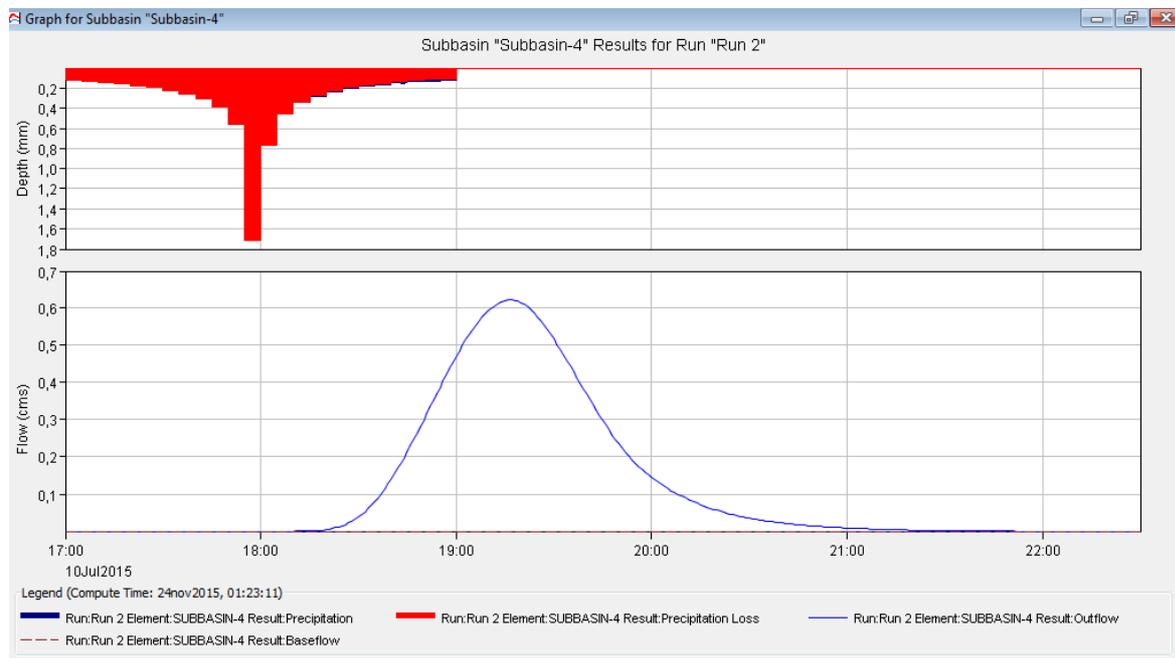


Ilustración 103: Respuesta hidrológica Subcuenca 4 para $T=25$

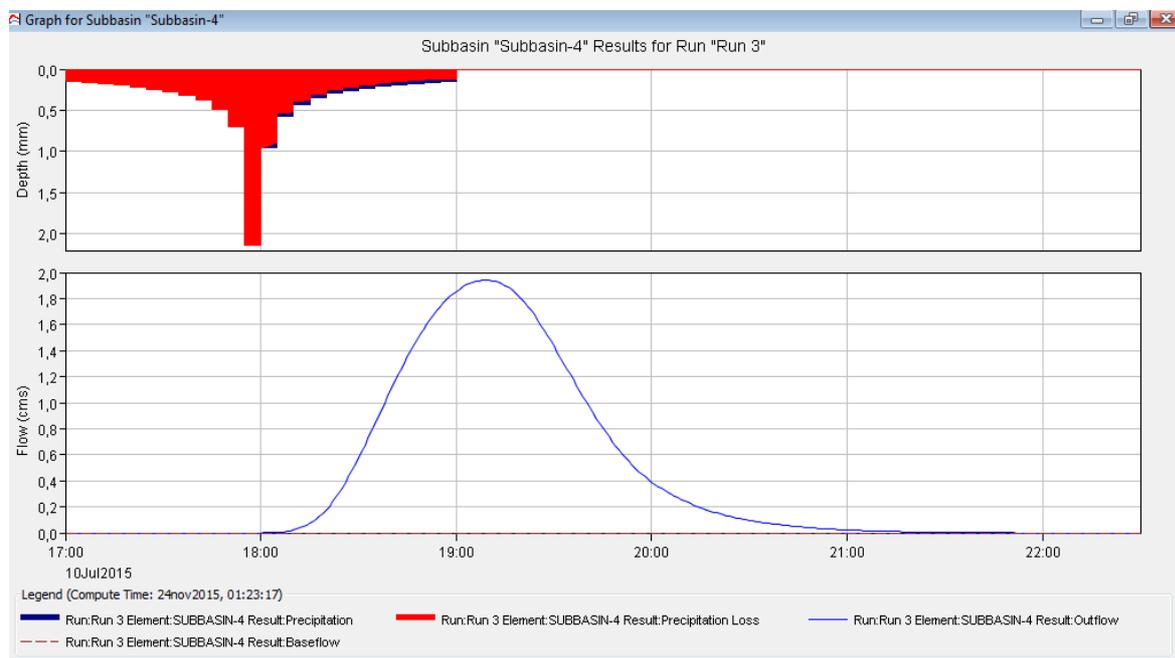


Ilustración 104: Respuesta hidrológica Subcuenca 4 para $T=100$

- Subcuenca 5

<i>Período de Retorno (T)</i>	<i>Caudal (m³/s)</i>	<i>Precipitación total</i>	<i>Volumen Escorrentía</i>	<i>Tiempo al pico</i>
10 años	0,7	31,37	0,95	19:16:00
25 años	1,5	37,68	2,31	19:09:00
100 años	3,2	46,82	5,14	19:01:00

Tabla 37: Resultados Subcuenca 5

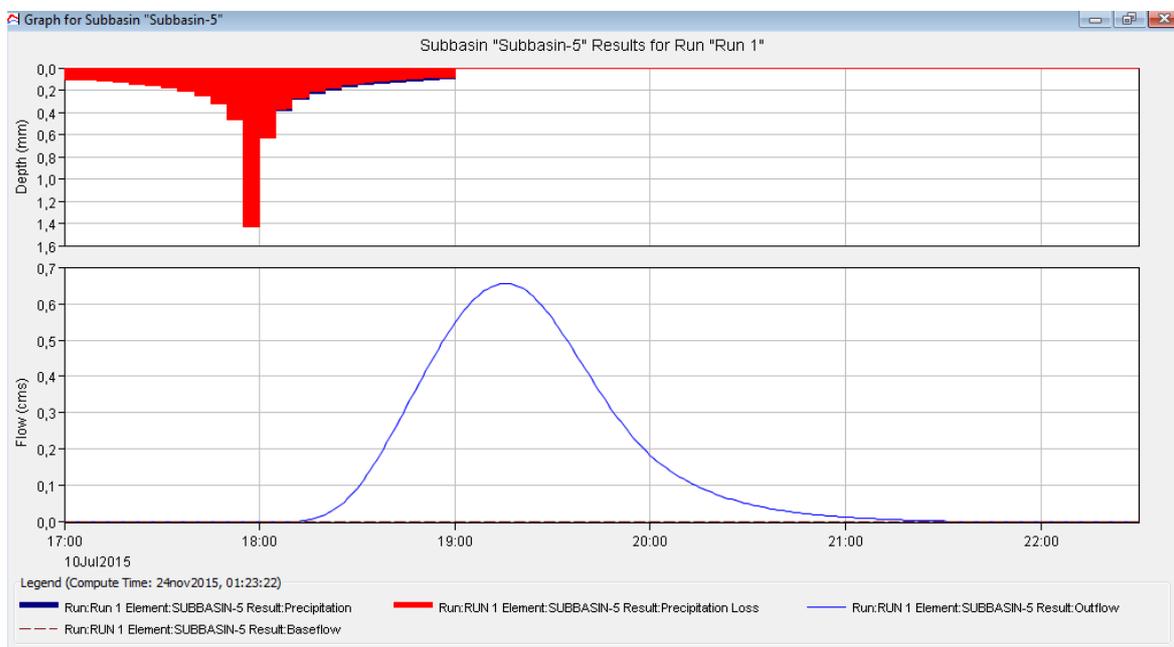


Ilustración 105: Respuesta hidrológica Subcuenca 5 para T=10

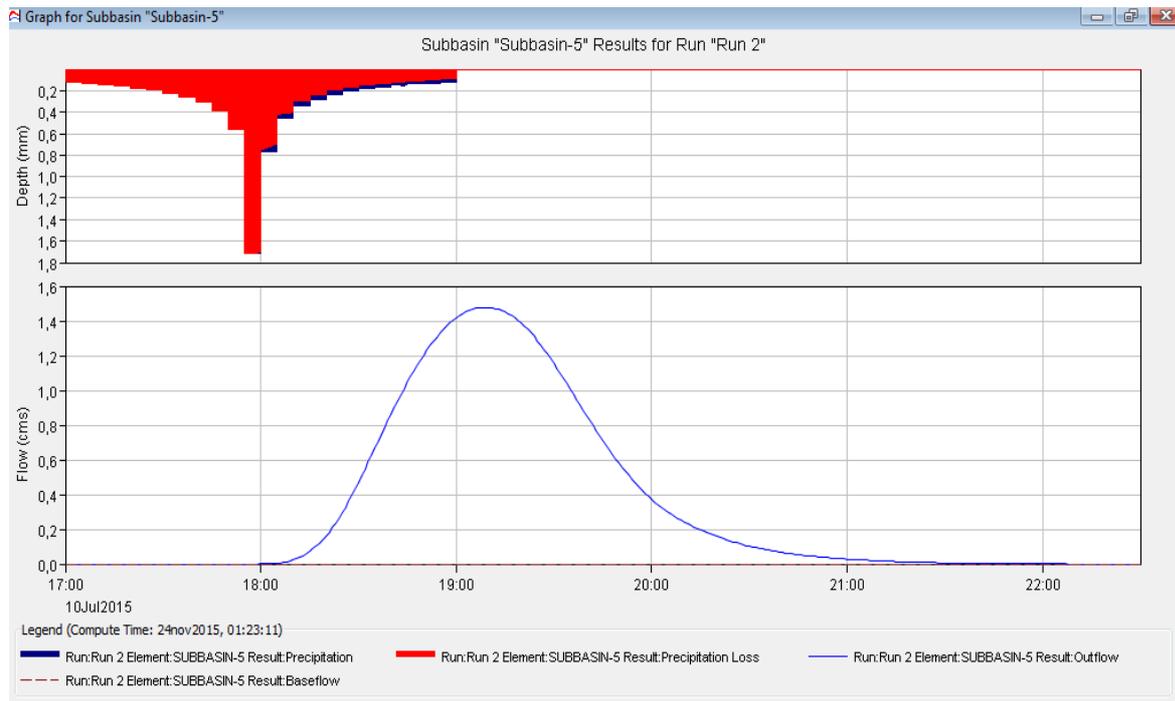


Ilustración 106: Respuesta hidrológica Subcuenca 5 para $T=25$

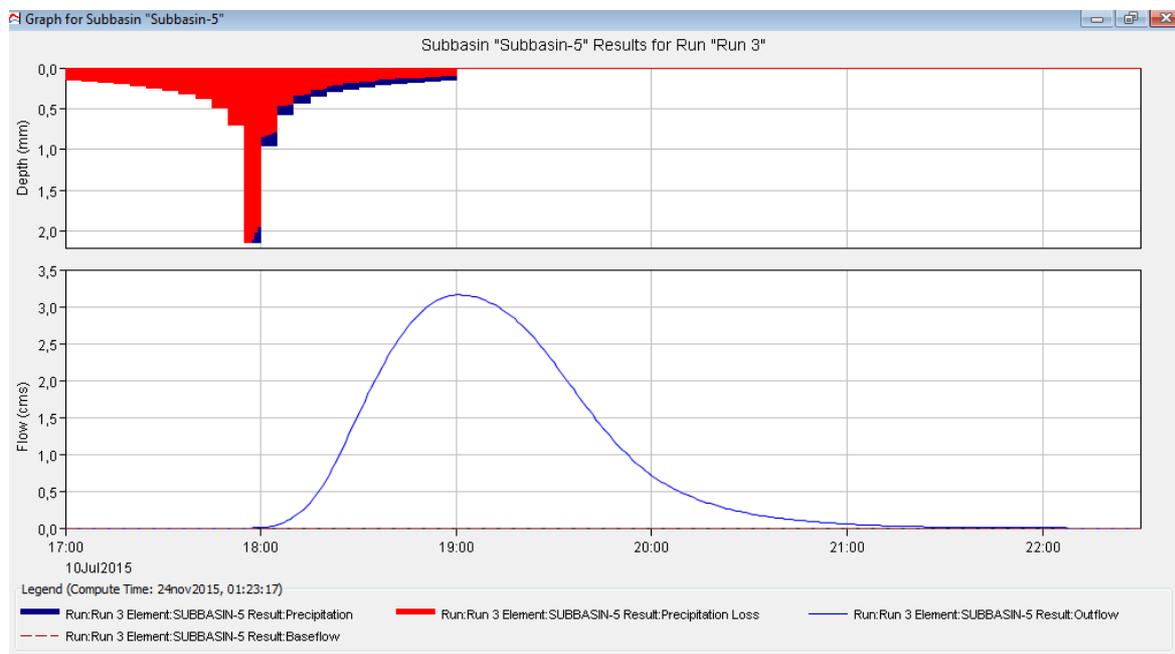


Ilustración 107: Respuesta hidrológica Subcuenca 5 para $T=100$

10.2.6.2. Resultados correspondientes a las lluvias de proyecto futuras

- Subcuenca 1

Período de Retorno (T)	Caudal (m ³ /s)	Precipitación total (mm)	Volumen Escorrentía(mm)	Tiempo al pico (h/min)
10 años	1,2	33,05	1,45	19:13:00
25 años	2,6	40,45	3,37	19:06:00
100 años	5,4	51,12	7,23	18:59:00

Tabla 38: Resultados Subcuenca 1

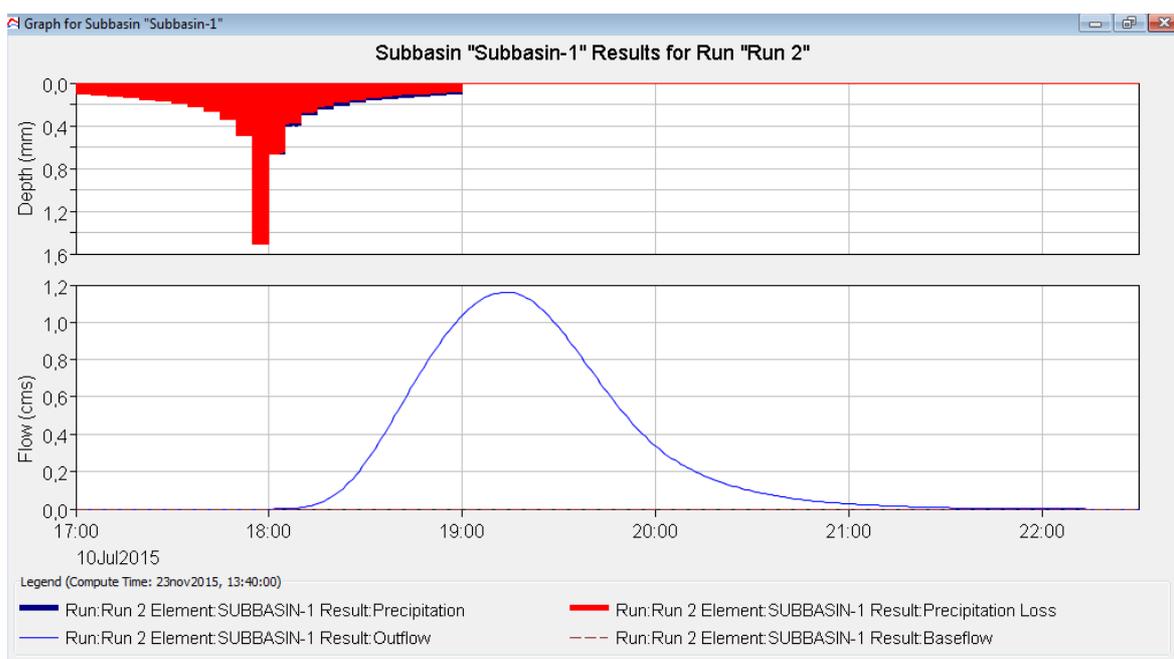


Ilustración 108: Respuesta hidrológica Subcuenca 1 para T=10

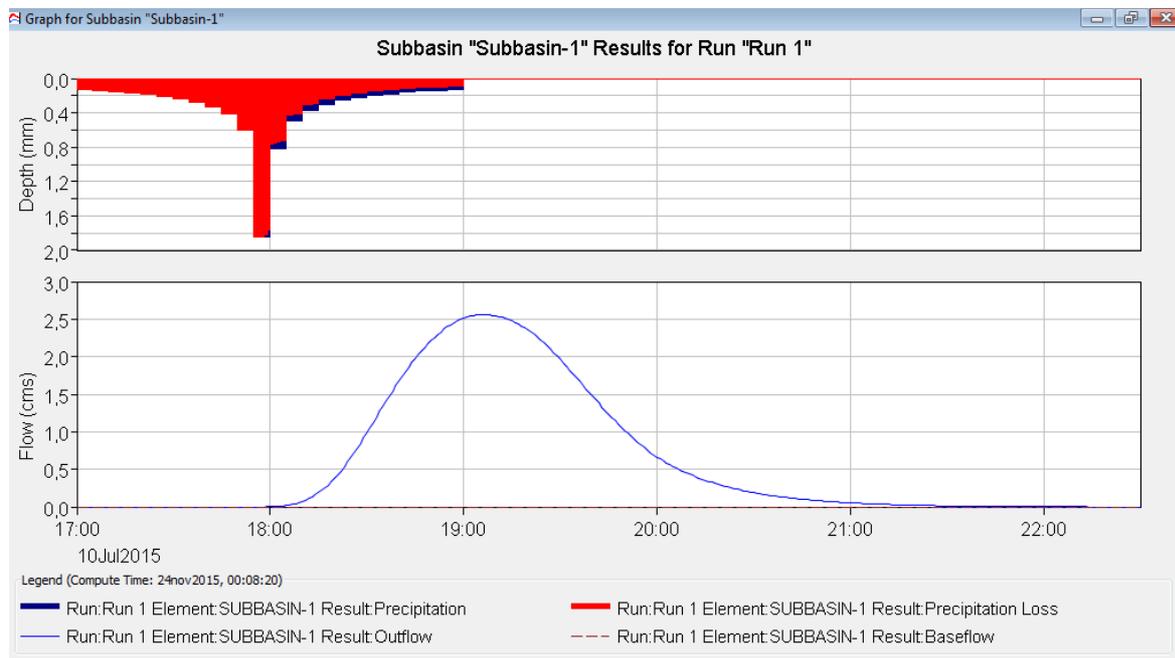


Ilustración 109: Respuesta hidrológica Subcuenca 1 para T=25

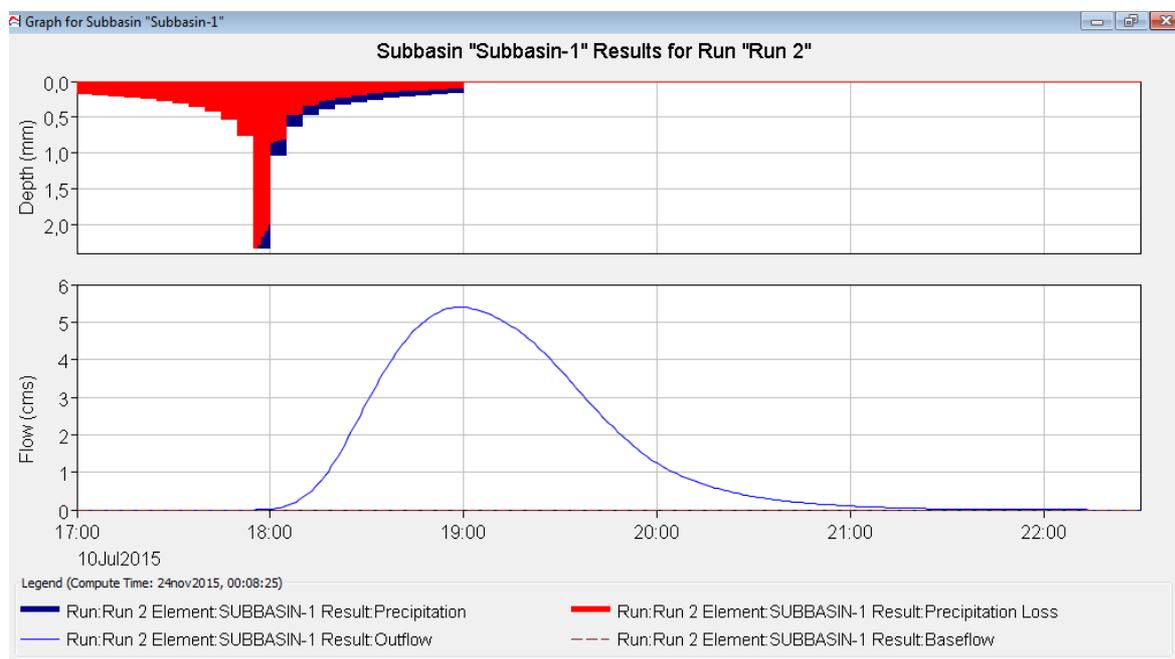


Ilustración 110: Respuesta hidrológica Subcuenca 1 para T=100

- Subcuenca 2

Período de Retorno (T)	Caudal (m ³ /s)	Precipitación total (mm)	Volumen Escorrentía(mm)	Tiempo al pico (h/min)
10 años	0,6	33,05	1,01	19:14:00
25 años	1,4	40,45	2,65	19:07:00
100 años	3,1	51,12	6,1	18:57:00

Tabla 39: Resultados Subcuenca 2

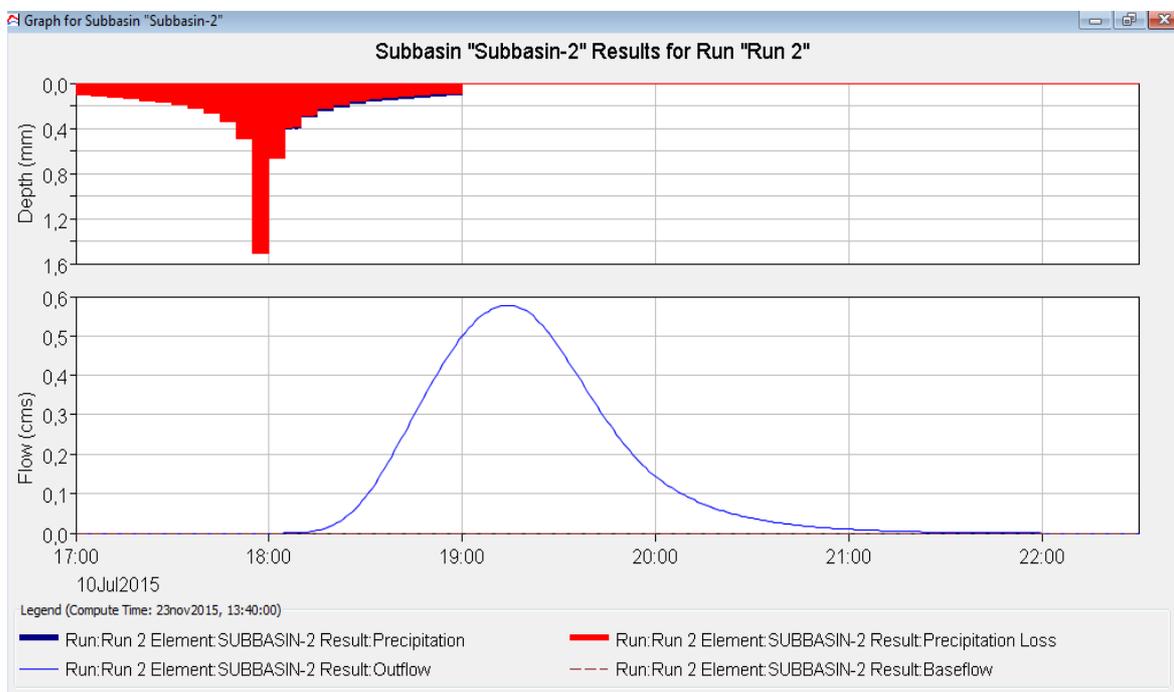


Ilustración 111: Respuesta hidrológica Subcuenca 2 para T=10

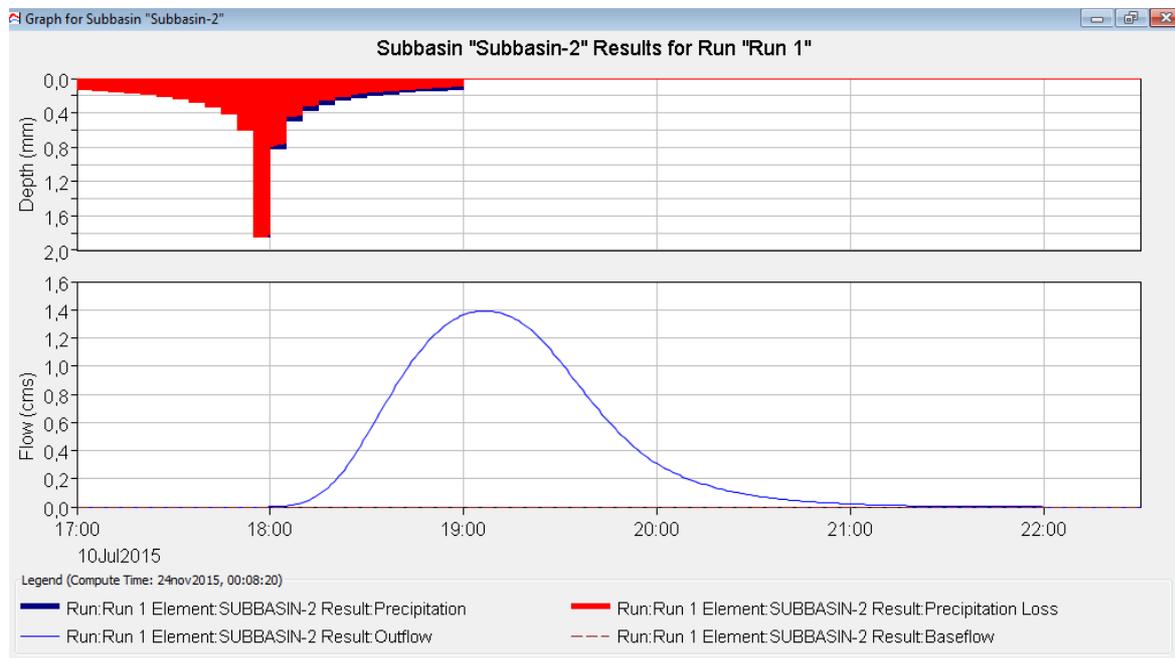


Ilustración 112: Respuesta hidrológica Subcuenca 2 para $T=25$

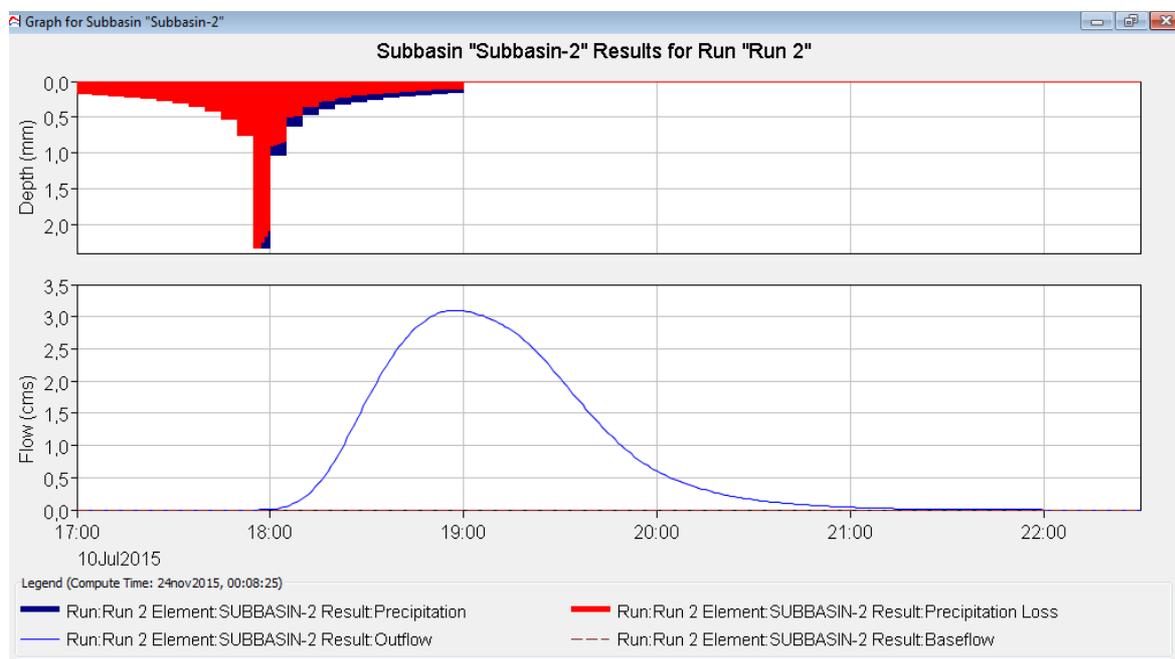


Ilustración 113: Respuesta hidrológica Subcuenca 2 para $T=100$

- Subcuenca 3

Período de Retorno (T)	Caudal (m ³ /s)	Precipitación total (mm)	Volumen Escorrentía(mm)	Tiempo al pico (h/min)
10 años	0,2	33,05	1,24	19:02:00
25 años	0,5	40,45	3,04	18:47:00
100 años	1,1	51,12	6,71	18:37:00

Tabla 40: Resultados Subcuenca 3

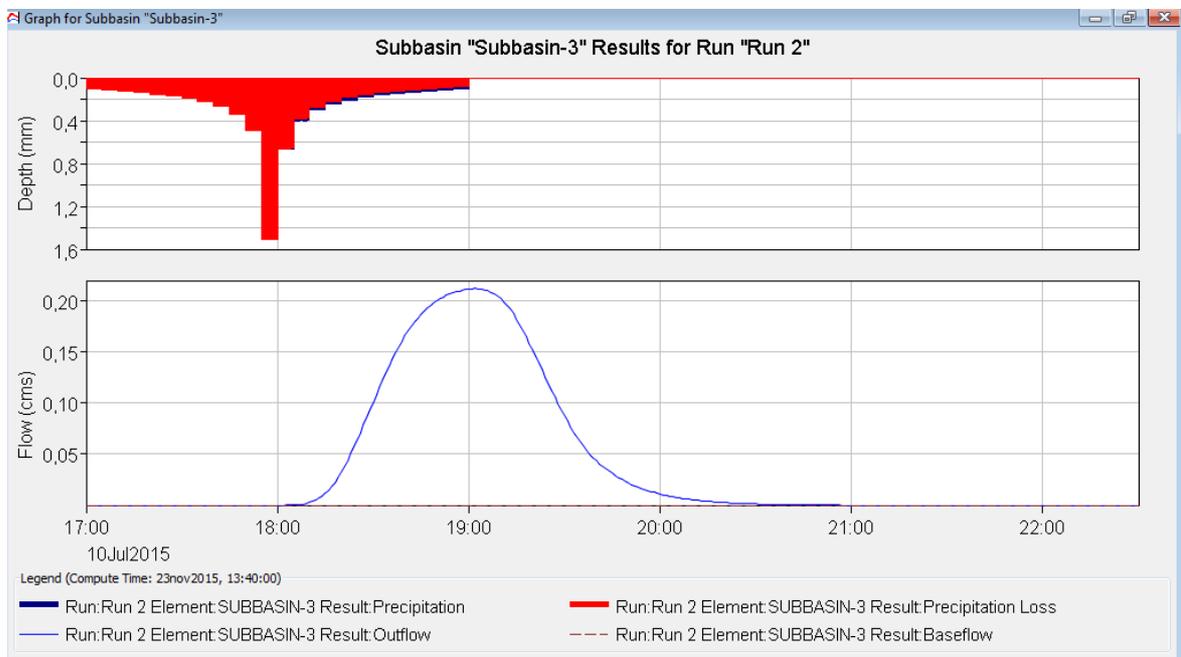


Ilustración 114: Respuesta hidrológica Subcuenca 3 para T=10

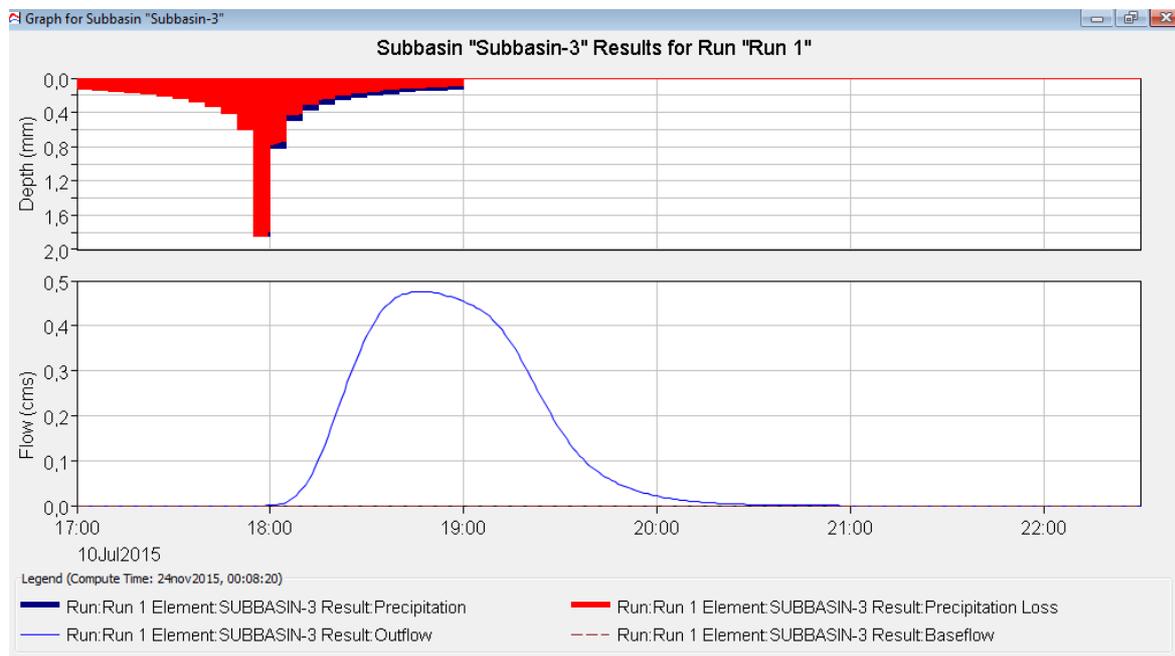


Ilustración 115: Respuesta hidrológica Subcuenca 3 para $T=25$

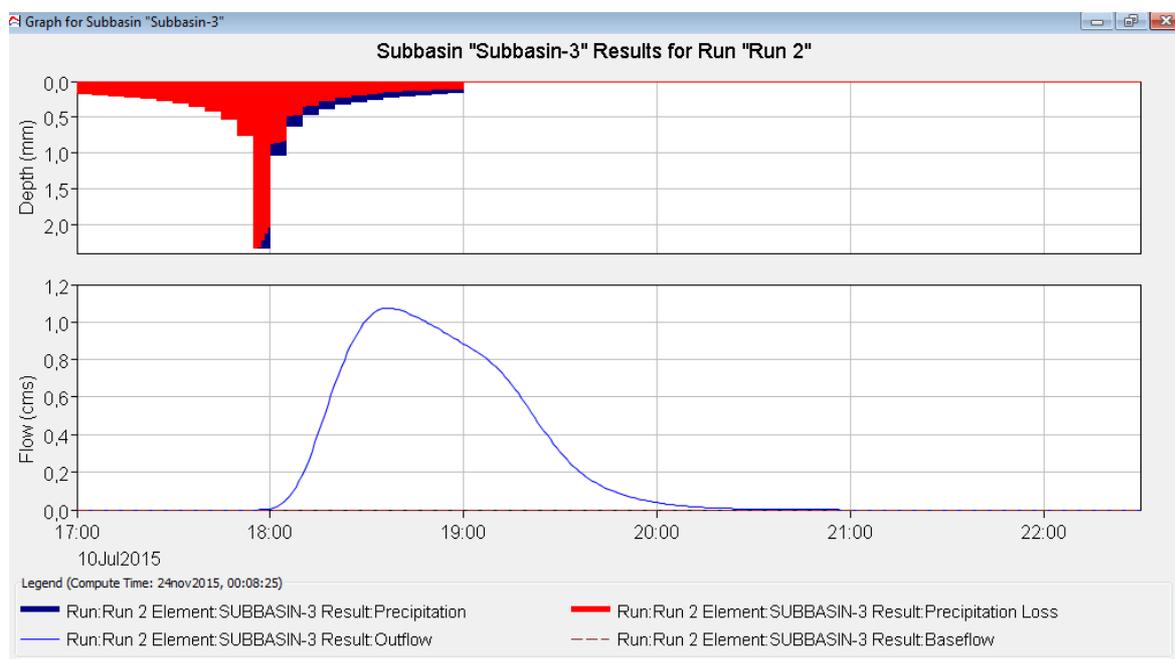


Ilustración 116: Respuesta hidrológica Subcuenca 3 para $T=100$

- Subcuenca 4

<i>Período de Retorno (T)</i>	<i>Caudal (m³/s)</i>	<i>Precipitación total (mm)</i>	<i>Volumen Escorrentía(mm)</i>	<i>Tiempo al pico (h/min)</i>
10 años	0,2	33,05	0,17	19:22:00
25 años	1	40,45	1,01	19:14:00
100 años	2,8	51,12	3,26	19:05:00

Tabla 41: Resultados Subcuenca 4

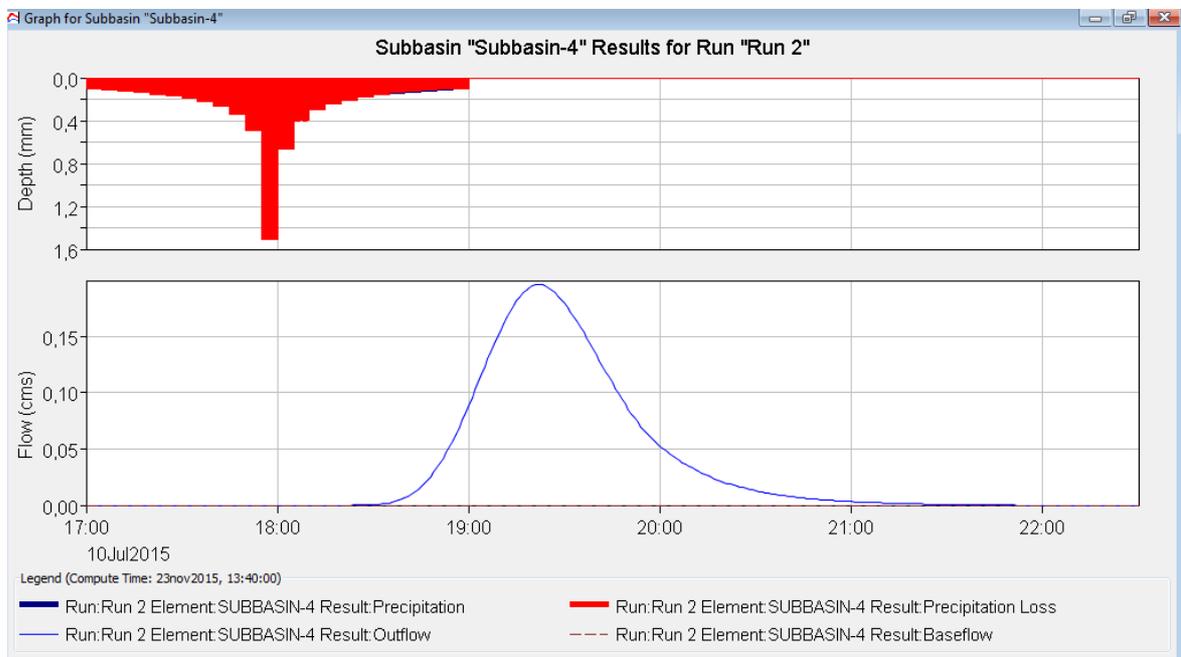


Ilustración 117: Respuesta hidrológica Subcuenca 4 para T=10

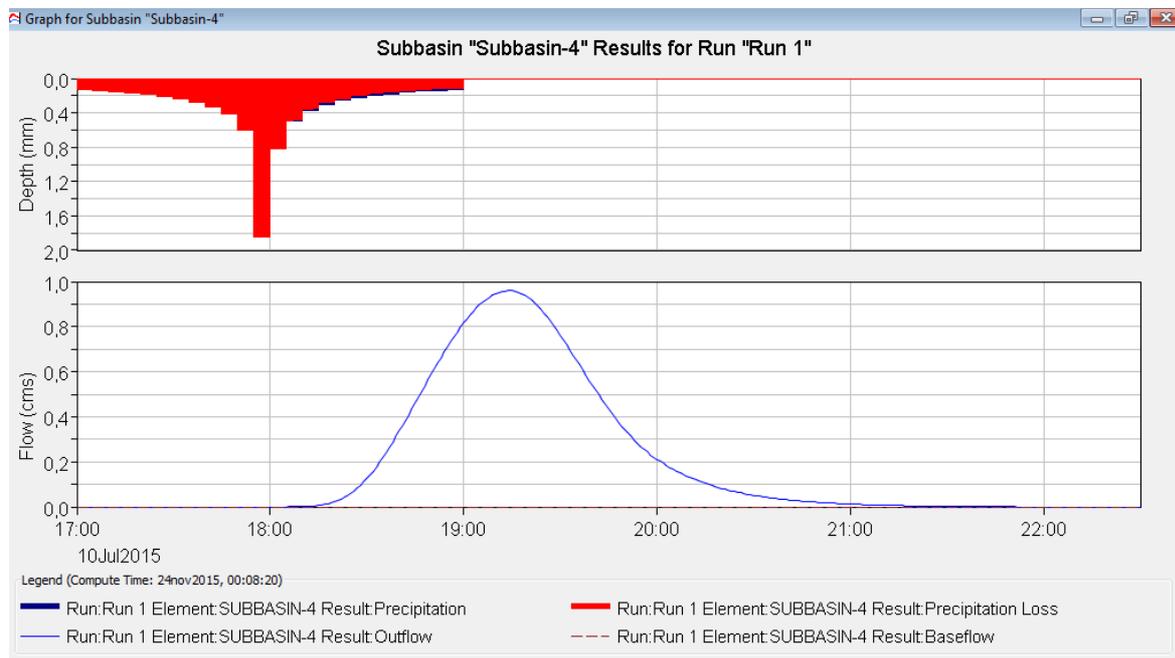


Ilustración 118: Respuesta hidrológica Subcuenca 4 para $T=25$

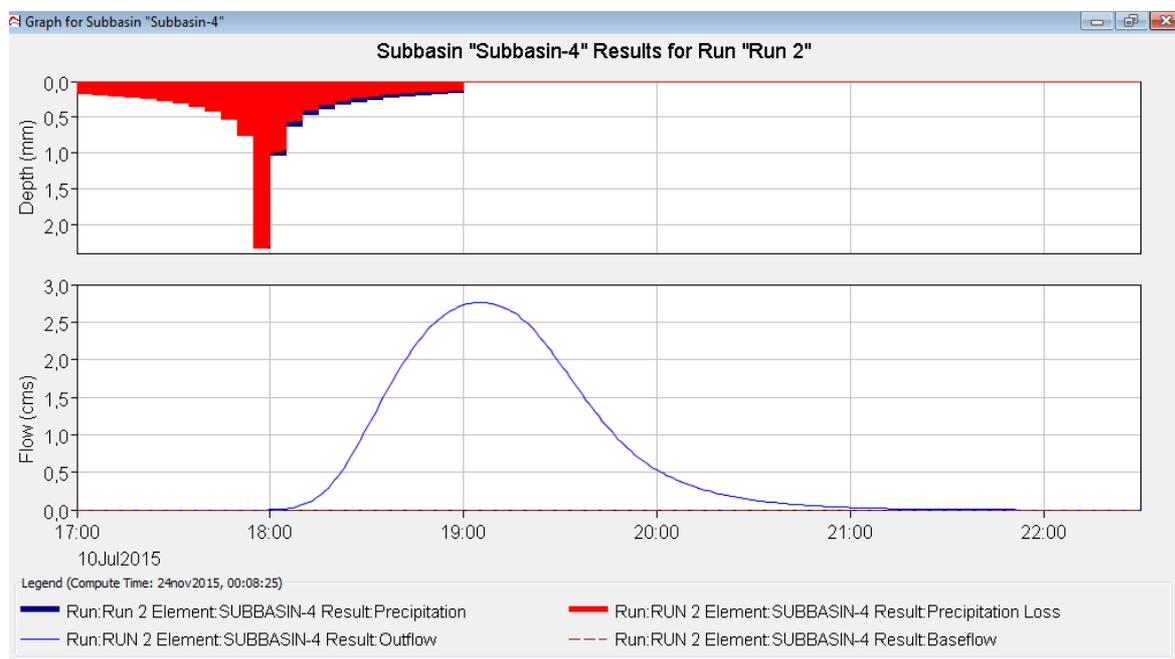


Ilustración 119: Respuesta hidrológica Subcuenca 4 para $T=100$

- Subcuenca 5

Período de Retorno (T)	Caudal (m ³ /s)	Precipitación total (mm)	Volumen Escorrentía(mm)	Tiempo al pico (h/min)
10 años	0,8	33,05	1,26	19:14:00
25 años	1,9	40,45	3,07	19:06:00
100 años	4,1	51,12	6,77	18:58:00

Tabla 42: Resultados Subcuenca 5

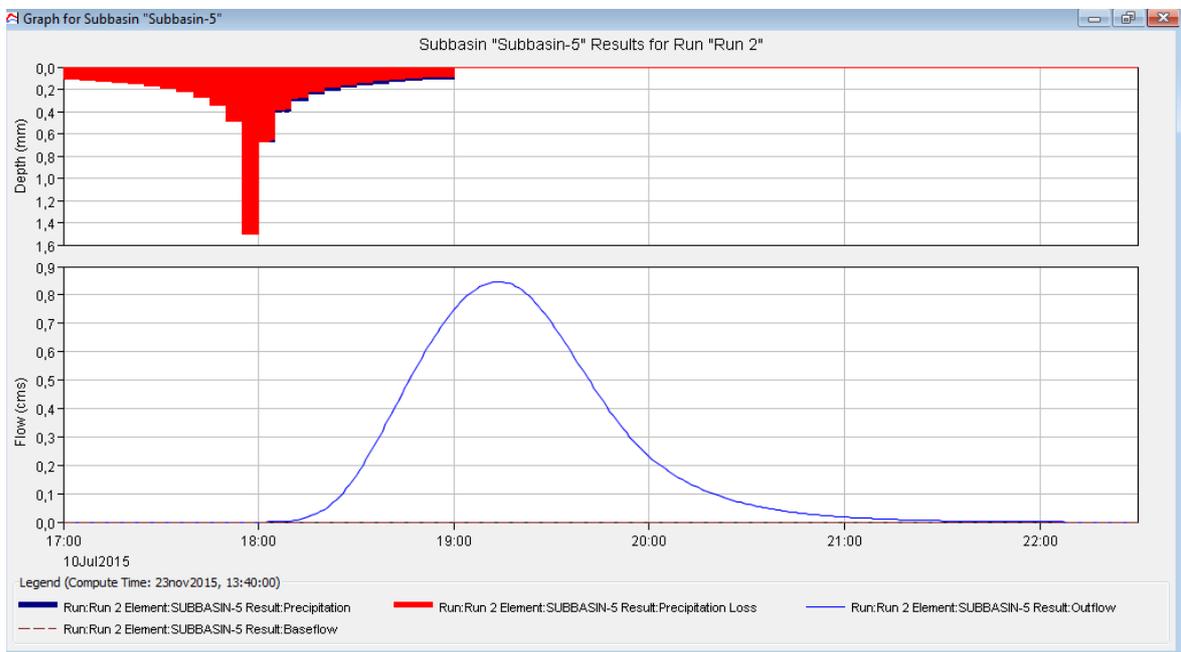


Ilustración 120: Respuesta hidrológica Subcuenca 5 para T=10

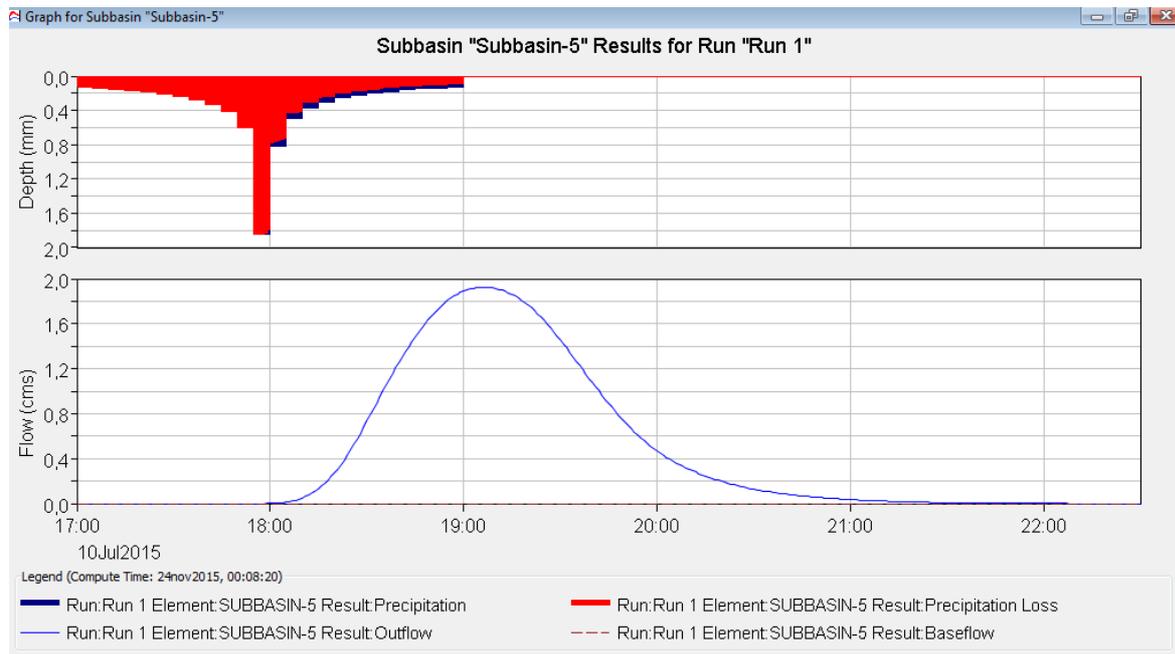


Ilustración 121: Respuesta hidrológica Subcuenca 5 para T=25

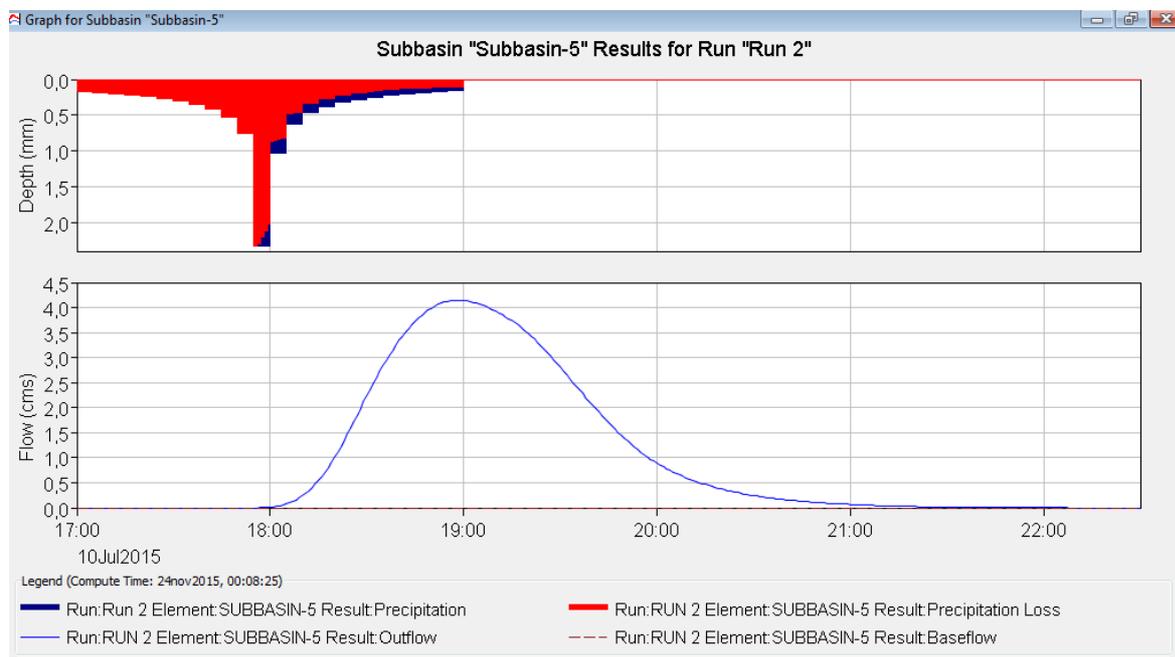


Ilustración 122: Respuesta hidrológica Subcuenca 5 para T=100

- **Resultados en el punto de desagüe para la lluvia de proyecto actual**

<i>Período de Retorno (T)</i>	<i>Caudal (m³/s)</i>	<i>Volumen Escorrentía (mm)</i>	<i>Tiempo al pico (h/min)</i>
10 años	1,5	0,71	19:37:00
25 años	3,9	1,84	19:39:00
100 años	9,2	4,31	19:37:00

Tabla 43: Resultados Punto de desagüe

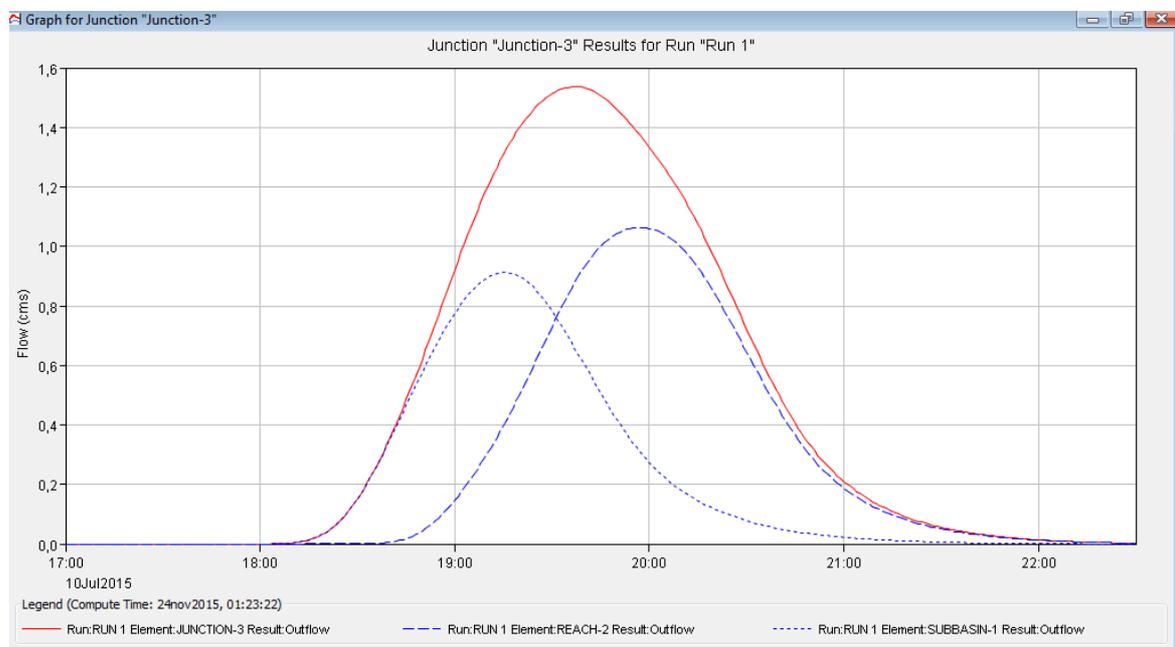


Ilustración 123: Respuesta hidrológica en el punto de desagüe para T=10

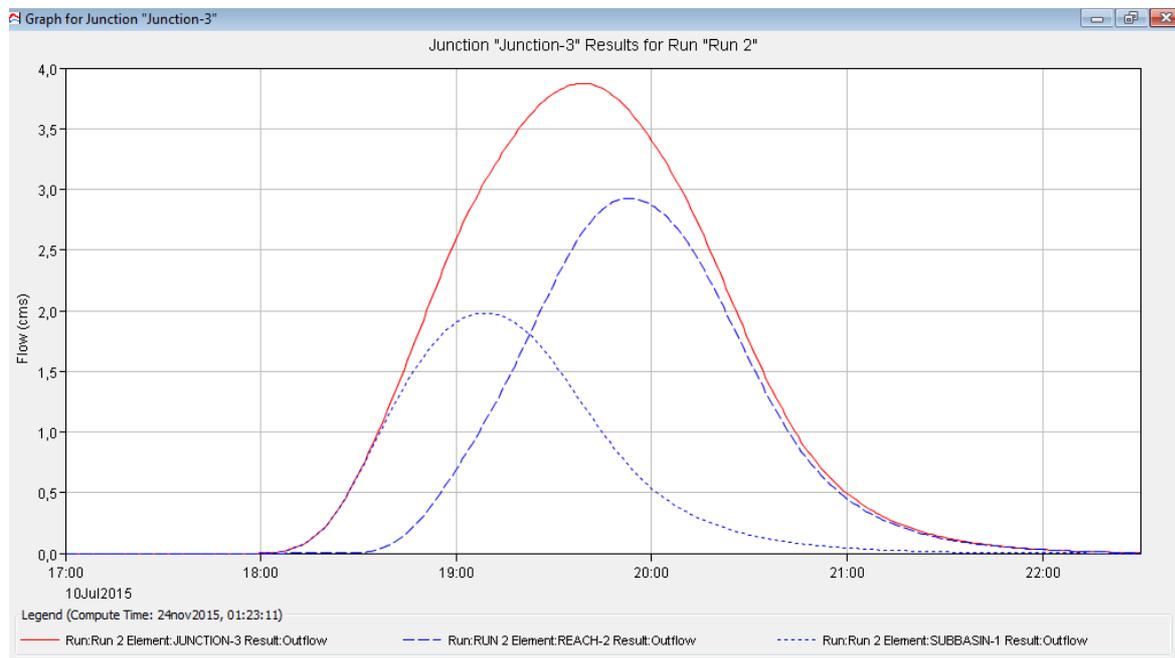


Ilustración 124: Respuesta hidrológica en el punto de desagüe para T=25

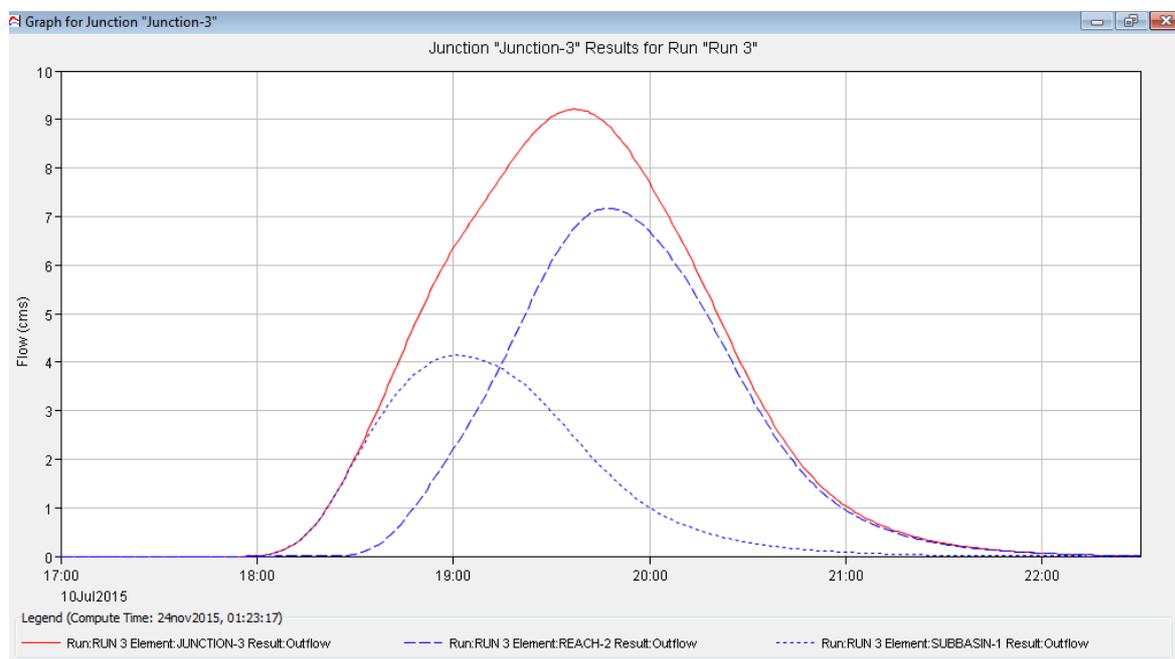


Ilustración 125: Respuesta hidrológica en el punto de desagüe para T=100



• **Resultados en el punto de desagüe para la lluvia de proyecto futura**

Período de Retorno (T)	Caudal (m ³ /s)	Volumen Escorrentía (mm)	Tiempo al pico (h/min)
10 años	2	0,96	19:37:00
25 años	5,3	2,49	19:39:00
100 años	12,4	5,78	19:36:00

Tabla 44: Resultados Punto de desagüe

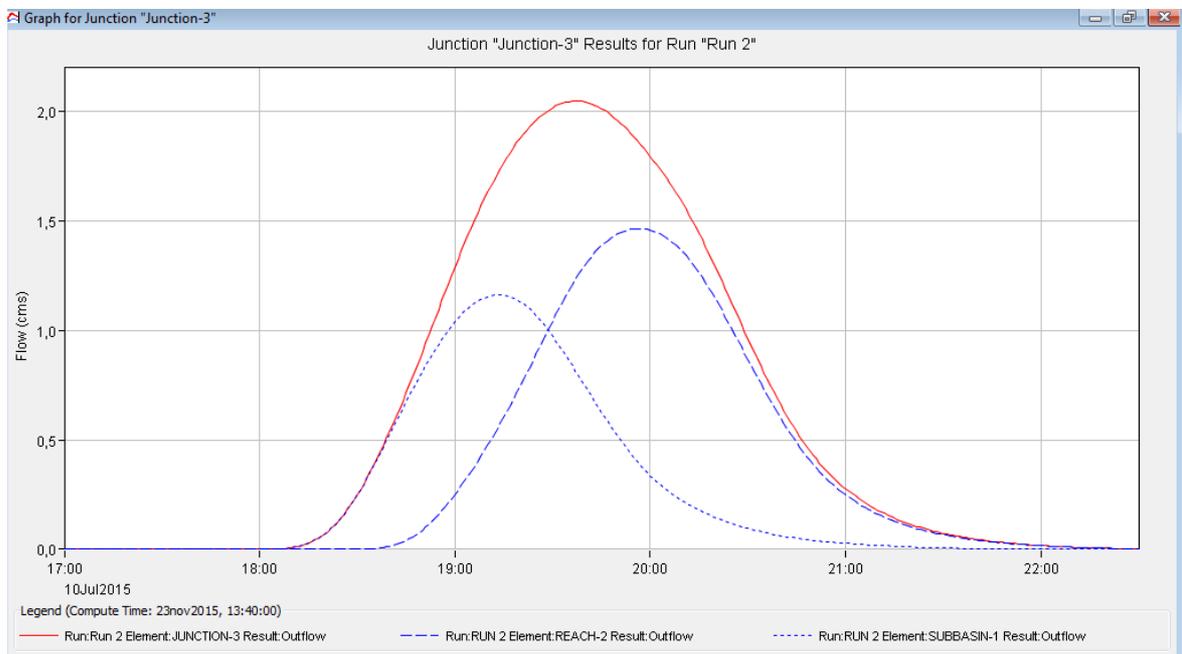


Ilustración 126: Respuesta hidrológica en el punto de desagüe. Hipótesis Futura, T=10

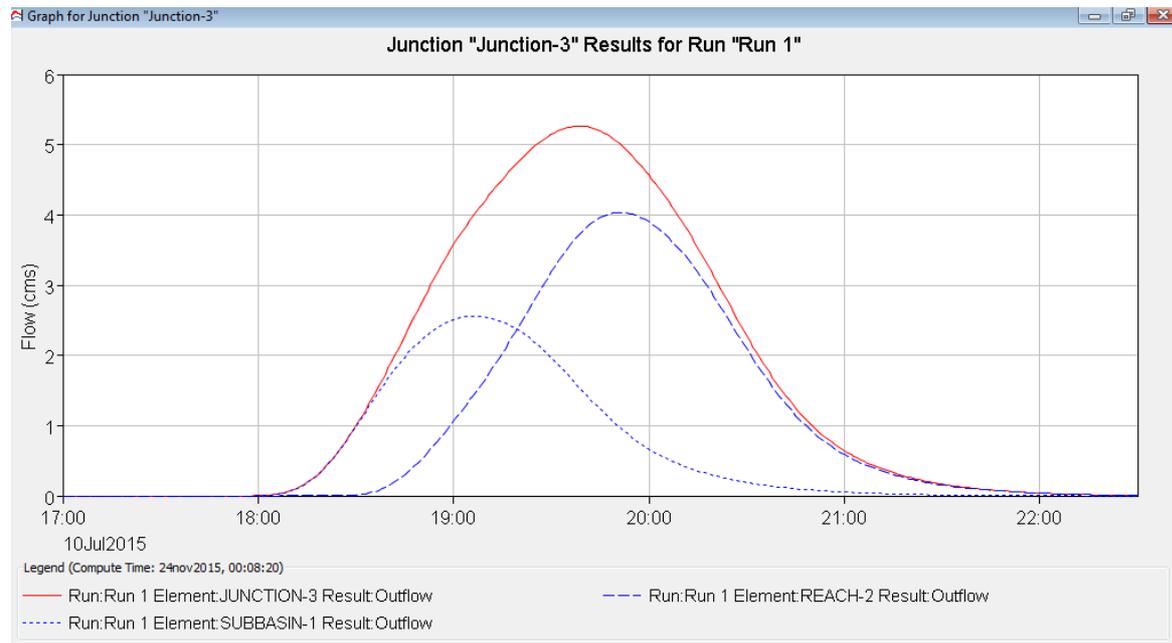


Ilustración 127: Respuesta hidrológica en el punto de desagüe. Hipótesis Futura, T=25

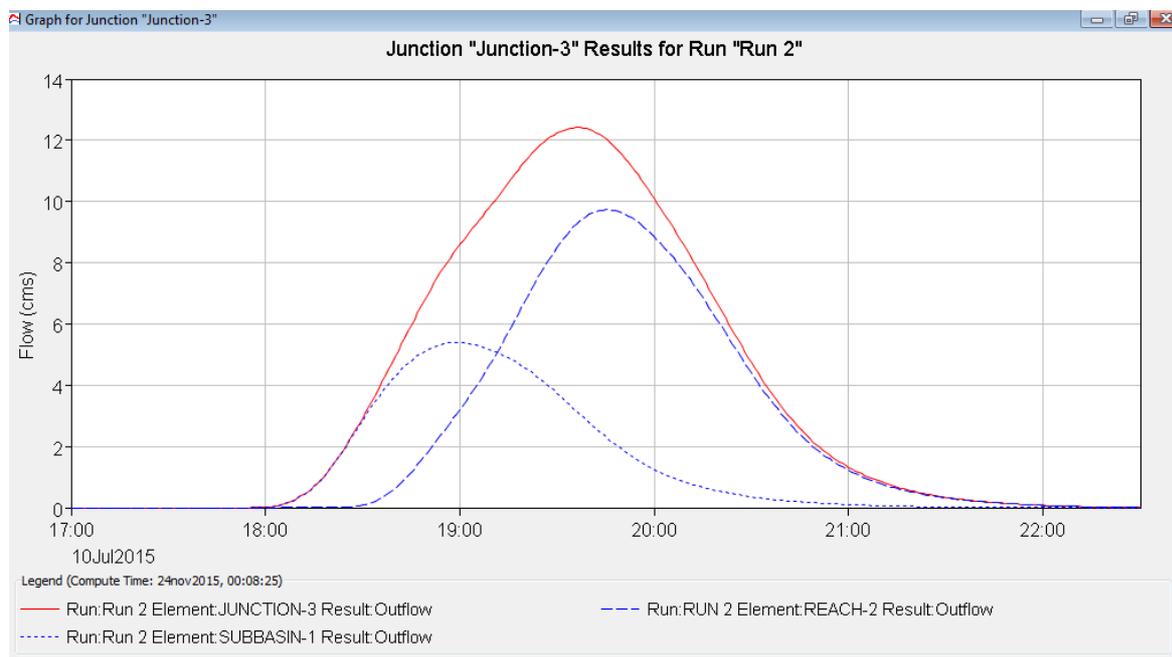


Ilustración 128: Respuesta hidrológica en el punto de desagüe. Hipótesis Futura, T=100

11. MODELIZACIÓN MATEMÁTICA

11.1. INTRODUCCIÓN

La publicación de la directiva europea 2007/60/CE de evaluación y gestión de los riesgos de inundación supuso un estímulo en el desarrollo de nuevos métodos y herramientas de modelización numérica de las inundaciones fluviales. En dicha directiva se establecen unos horizontes temporales para la evaluación y elaboración de los mapas de peligrosidad y riesgo, pero también unas obligaciones de actualización de los resultados. La directiva se transpuso al ordenamiento español a través, principalmente, del Real Decreto 903/2010. El objetivo de estas normativas es reducir las consecuencias de las inundaciones sobre la salud humana, el medio ambiente, el patrimonio cultural y la actividad económica.

En primer lugar, conviene recordar que la modelización numérica no es la única metodología para abordar el problema de las inundaciones, así queda recogido en la misma Directiva Europea o el Real Decreto antes mencionados. En ambos se recoge la necesidad de una evaluación preliminar utilizando principalmente datos o registros históricos, y cualquier otra información que permita deducir el impacto a largo plazo a poder ser considerando el efecto del cambio climático.

Un modelo matemático es una relación entre ciertos objetos matemáticos y sus conexiones por un lado, y por el otro, una situación o fenómeno de naturaleza no matemática. A continuación en la Ilustración 129 se presenta un ejemplo sencillo y cotidiano de lo que es un modelo matemático.

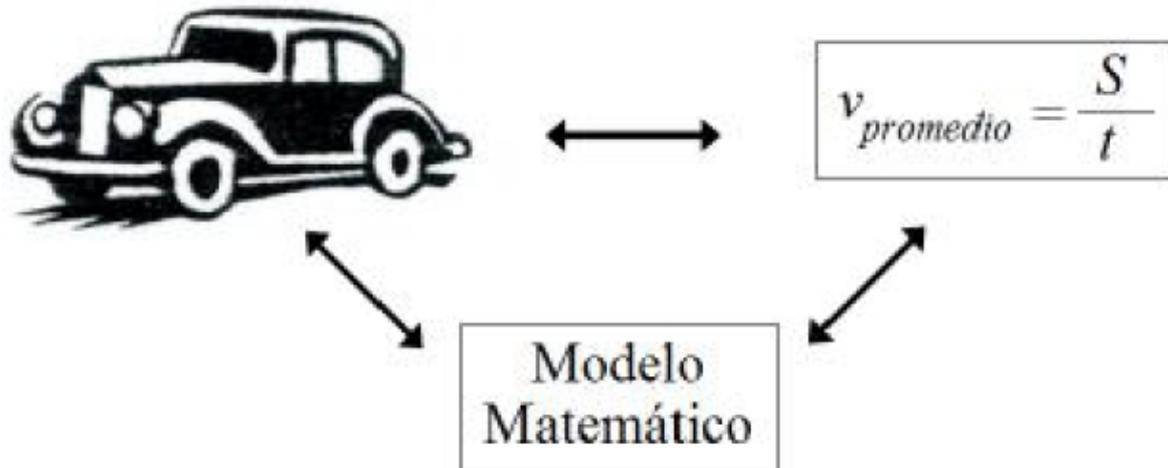


Ilustración 129: El cálculo de la velocidad promedio de un viaje particular de un automóvil es un modelo matemático

11.1.1.El proceso de modelización

Existe un proceso de modelización detrás de todo modelo matemático. Para crear y emplear un modelo matemático es necesario en la mayoría de los casos recorrer un proceso de modelización. Analíticamente se puede describir un proceso de modelización matemática en los siguientes pasos (Blomhøj, 2008):

- Formulación del problema para identificar las características de la realidad percibida que será modelizada.
- Sistematización: selección de los objetos relevantes, relaciones, etc. del dominio de investigación e idealización de las mismas para hacer posible una representación matemática.
- Traducción de objetos y relaciones al lenguaje matemático.
- Uso de métodos matemáticos para presentar resultados y conclusiones.
- Interpretación de los resultados y conclusiones considerando el dominio de investigación.
- Evaluación de la validez del modelo por comparación con datos y/o con el conocimiento teórico.

El proceso de modelización no es un proceso lineal. Un proceso de modelización siempre toma la forma de un proceso cíclico (Ilustración 130).

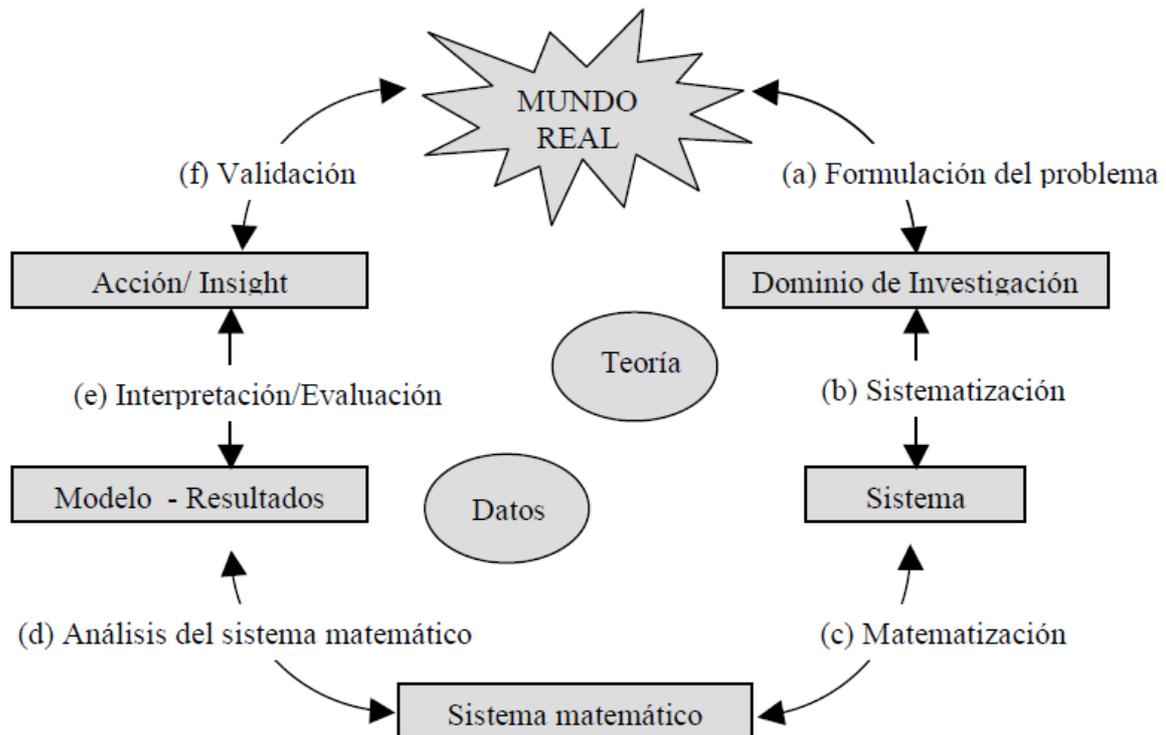


Ilustración 130: Un modelo gráfico de un proceso de modelización

El conocimiento teórico y los datos empíricos del dominio de estudio son la base para todos los subprocesos. Esto está indicado mediante las dos elipses en el centro del diagrama. El término *Teoría* significa el conocimiento acerca del dominio de investigación usado en el proceso de modelización. Por otra parte si existen *Datos* previos al proceso de modelización, éstos pueden ser usados en los procesos de sistematización y matematización y en ocasiones empleados para validar el modelo. Sin embargo, lo normal es que los datos relevantes se tengan que obtener como parte del proceso de modelización.

11.2. MODELIZACIÓN NUMÉRICA DE LA HIDRODINÁMICA DE RÍOS

Para la modelización numérica de la hidrodinámica de ríos se precisa de:

- El empleo de la teoría hidráulica del flujo en lámina libre.
- Los métodos numéricos para resolver las ecuaciones de conservación.

Por ello a continuación se presenta la clasificación del flujo en lámina libre y el

método numérico empleado por el software Infoworks RS para resolver las ecuaciones del flujo bidimensional en lámina libre o ecuaciones de Saint Venant. El conjunto se ha definido como *hidroinformática*.

11.2.1. Discretización espacial

Un modelo numérico es una representación simplificada de la realidad. Un aspecto fundamental de los modelos de flujo en ríos es la representación de la topografía del cauce y llanuras de inundación. Existen herramientas de modelización numérica que permiten realizar simulaciones con una aproximación unidimensional (1D), bidimensional (2D) o tridimensional (3D). Contrariamente a lo que se supone, la modelización en un mayor número de dimensiones (2D contra 1D, o 3D contra 2D) no implica mejores resultados.

Los resultados de las simulaciones van a depender principalmente de:

- Las ecuaciones que se resuelvan (y por tanto de sus hipótesis básicas).
- Del esquema numérico utilizado para resolverlas.
- De la discretización espacial que se realice de la geometría.
- De las condiciones de contorno utilizadas.
- De la rugosidad del terreno, como principal parámetro.

En el presenta caso de estudio, se emplea un modelo bidimensional para analizar el comportamiento hidráulico. Para ello se utiliza la herramienta informática de modelización InfoWorks RS. A continuación se describen los diferentes tipos de modelos espaciales.

11.2.1.1. Modelos unidimensionales

Los modelos unidimensionales han sido y son los más utilizados desde que la modelización numérica del flujo en ríos empezó a utilizarse a partir de mediados de s. XX. En una dimensión lo habitual es considerar el río como una línea, con una serie de puntos de cálculo que son las secciones transversales, de manera que la geometría del cauce es un propiedad de cada punto de cálculo o sección. Las hipótesis básicas que más influencia tienen en los resultados del modelo son:

1. El flujo de agua se produce en el sentido del eje del río y es perpendicular a cada sección transversal.
2. La cota de agua es constante en cada sección.
3. La velocidad del agua es constante en cada sección.

Un problema de los modelos unidimensionales es la definición de las secciones



transversales cuando existen llanuras de inundación y el cauce principal tiene cierta curvatura. En estos casos es difícil definir las secciones de forma que se cumpla la hipótesis del flujo perpendicular a la sección y sin que las secciones transversales se superpongan entre sí.

Los modelos 1D comportan una considerable facilidad en cuanto a creación y ejecución del modelo cuando se compara con otras opciones, en especial en régimen permanente.

11.2.1.2. Modelos Cuasi-2D

Con el objetivo de incorporar la llanura de inundación de una manera simplificada, en la década de los 70 se desarrolló un método para considerar las áreas anexas al cauce principal como una serie de celdas o depósitos conectados entre sí.

11.2.1.3. Modelos bidimensionales

En dos dimensiones el río se discretiza como una malla formada por una serie de celdas poligonales que representan la topografía del cauce y llanuras de inundación. La malla puede ser *regular* o *irregular*, *estructurada* o *no estructurada*. La mayor flexibilidad para una buena representación de la geometría y contornos se suele conseguir con una malla irregular formada por triángulos o cuadriláteros.

En ocasiones ha resultado útil la combinación de esquemas unidimensionales y esquemas bidimensionales para aprovechar en cada zona del dominio las ventajas más relevantes de cada uno de ellos. Menor tiempo computacional en 1D pero mayor precisión en 2D.

En la modelización en dos dimensiones, el proceso que suele requerir de una mayor carga de trabajo es la generación de una malla de cálculo adaptada al caso de estudio. En la actualidad los modelos en 2D tienen una gran aceptación.

11.2.1.4. Modelos tridimensionales

La utilización de modelos tridimensionales para el cálculo de zonas inundables es mucho menos común que la de los modelos 1D y 2D, debido a que la extensión espacial del modelo requeriría la utilización de mallas de cálculo de varios millones de elementos, con un coste computacional muy elevado.

Los modelos 3D utilizan distinto tipos de discretización espacial, la cuál suele estar relacionada con el método utilizado para el tratamiento de la lámina libre.

Existen diferentes métodos para la discretización en modelos 3D. Uno de ellos es la utilización de *capas sigmas*, para generar la discretización vertical. Este tipo de

discretización consisten en una malla 2D horizontal a partir de la cuál se generan un número de capas en la dirección vertical. Dichas capas tienen un espesor variable y se distribuyen entre el fondo y la lámina libre.

Otro método de discretización en modelos 3D es utilizar una *malla tridimensional fija*, y definir la posición de la lámina de agua a partir del valor de una variable definida en cada elemento de la malla. La ventaja de este tipo de discretización es el de representar formas de la lámina de agua muy complejas, y tiene el inconveniente de utilizar mallas relativamente finas para definir de forma precisa la posición de la lámina de agua, lo que implica un incremento del número de elementos de la malla y el tiempo de cálculo.

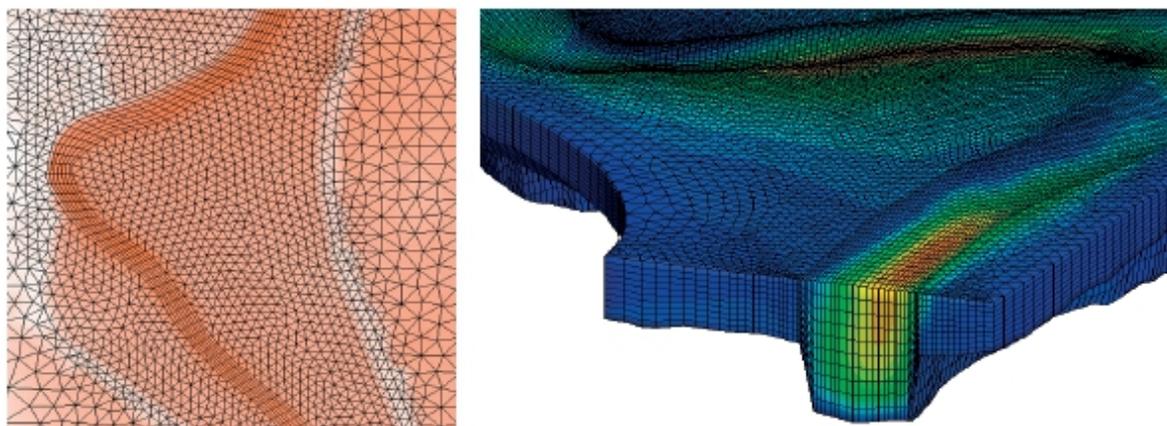


Ilustración 131: Malla 2D estructurada en el cauce y no estructurada en llanuras (izqda) y 3D (dcha).

11.3. FLUJO VARIABLE EN LÁMINA LIBRE

11.3.1. Introducción

En primer lugar se deducen las leyes físicas de conservación que rigen el flujo de un fluido. Desde el punto de vista particular del fluido agua, incompresible e isótropo, se obtienen las *ecuaciones de Navier-Stokes* para el movimiento instantáneo y de ellas se deducen, considerando variables medias en el tiempo, las *ecuaciones de Reynolds*. Estas serían las ecuaciones básicas que habría que resolver en el caso de flujo tridimensional de agua. Su resolución exigiría una discretización tridimensional del dominio de estudio y el esquema numérico sería complejo y costoso



computacionalmente.

De las *ecuaciones de Reynolds*, integrando para la profundidad para eliminar la dimensión vertical, se obtiene las *ecuaciones de Saint Venant bidimensionales* (las ecuaciones numéricas objeto del presente estudio, explicadas en profundidad más adelante), con velocidades verticales pequeñas, pendientes del fondo del cauce suaves, y generalmente, la dimensión horizontal predominante sobre la dimensión vertical.

Las siguiente simplificación es el paso a las *ecuaciones de Saint Venant unidimensionales*, ecuaciones que no son de interés en el presente estudio. Ecuaciones clásicas en hidráulica que en la mayoría de ocasiones representa correctamente el movimiento no permanente en lámina libre en cauces, naturales o artificiales. Las ecuaciones de Saint Venant forman un sistema de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales, hiperbólicas y cuasi-lineales.

11.3.2. Clasificación del flujo en lámina libre

El movimiento en lámina libre se clasifica análogamente al régimen en carga. Este tipo de flujo lleva en general a una variación de niveles y velocidades tanto en el tiempo como en el espacio.

Según la variación en el tiempo podemos clasificar el régimen en:

- **Permanente**, lo que significa que para una sección concreta no se observan cambios de nivel y velocidad a lo largo del tiempo. Todo eso implica que el caudal es constante.
- **Variable**, lo que significa que para una sección concreta se observan cambios de nivel y velocidad a lo largo del tiempo y el caudal de paso no es constante.

Hay una segunda distinción, según si estas variaciones son suaves o bruscas. Si la variación es suave, se habla de *flujo gradualmente variable*, si es brusca, se habla de *flujo rápidamente variable*. La frontera entre ambos tipos viene marcada por las hipótesis de las *ecuaciones de Saint Venant*. Si algunas de estas hipótesis se incumplen, el movimiento será rápidamente variable.

Según la variación en el espacio, podemos clasificar el régimen en:

- **Uniforme**, si el nivel y la velocidad son iguales en todas las secciones de un tramo. Con referencias a un intervalo de tiempo en el cual se puede considerar constante el caudal, se considera el *régimen permanente y uniforme*.
- **Variado**, si el nivel y la velocidad no son iguales en todas las secciones de un

tramo. Con referencia a un intervalo de tiempo en el cuál se puede considerar constante el caudal, se puede considerar el *régimen permanente y variado*.

Si el flujo no es uniforme, se distingue entre variaciones suaves y bruscas a lo largo del espacio: si las variaciones son todas suaves, se habla de flujo *permanente gradualmente variado*. De incumplirse las hipótesis de variación suave, se llega al movimiento *permanente rápidamente variado*.

La palabra *variado* hace referencia a un tramo de canal, la palabra *variable* hace referencia a un intervalo de tiempo.

11.4. ECUACIONES Y ESQUEMAS NUMÉRICOS

A continuación se presenta el esquema numérico que emplea el código de cálculo InfoWorks RS en la modelización hidráulica en 2D.

11.4.1. Ecuaciones de Saint Venant bidimensionales

El flujo de un fluido en general viene gobernado por las siguientes leyes físicas de conservación:

1. Ley de conservación de la masa o ecuación de continuidad

$$\frac{d}{dt}(m)=0$$

Donde m es la masa del fluido y la expresión d/dt representa la derivada material.

2. Ley de conservación de la cantidad de movimiento (segunda Ley de Newton) o ecuación del movimiento:

$$\frac{d}{dt}(mV)=F$$

Donde V es el vector velocidad y F las fuerzas exteriores que en general son vectores de tres componentes coincidentes con las tres dimensiones espaciales.

3. Propiedades termodinámicas de los fluidos de las que se obtiene las ecuaciones constitutivas.
4. Ley de conservación de la energía o primera Ley de Newton de la termodinámica

$$\frac{d}{dt}(E)=\frac{dJ}{dt}+\frac{dW}{dt}$$



Donde E es la energía de la masa m , J es el calor y W es el trabajo desarrollado por las fuerzas exteriores.

5. Segunda Ley de la termodinámica:

$$dS - \frac{dJ}{T} \geq 0$$

Donde S es la entropía y T la temperatura absoluta

A menudo se representa el movimiento de un fluido con las dos primeras leyes ya que en ellas aparecen explícitamente las variables que describen el movimiento. Sin embargo, son insuficientes para describir todos los procesos físicos que intervienen en el movimiento de un fluido, por lo que se necesitan las condiciones adicionales dadas por el resto de las leyes.

Al considerar las propiedades termodinámicas de los fluidos se obtienen relaciones que permiten algunos fluidos particulares (fluidos incompresibles), cerrar el sistema de ecuaciones, como serían las ecuaciones constitutivas (relación entre las tensiones y la velocidad de deformación del fluido).

En la ley de conservación de la energía, la energía total de una masa m es la suma de la energía interna y la energía mecánica. Se podría suponer que el proceso de calentamiento del fluido es independiente del movimiento mecánico, con lo que podríamos descomponer la ley mencionada en dos, una relacionada con la energía interna o térmica y otra con la energía mecánica. Si consideramos además que el movimiento del fluido no depende de la temperatura, la ecuación de conservación de la energía interna, que describe el cambio de energía interna debido a la transferencia de calor queda desacoplada del resto de ecuaciones y por lo tanto no hace falta tenerla en cuenta para el cálculo del movimiento del fluido.

Con la hipótesis anterior, la ley de conservación de la energía mecánica tiene las mismas variables que la ley de conservación de la cantidad de movimiento, ya que el producto de ésta por la velocidad es precisamente la energía mecánica. Se podría representar el movimiento del fluido mediante una de estas dos leyes de conservación juntamente con la ecuación de continuidad. La suposición de la independencia de la energía mecánica y la energía interna no son exactamente ciertas, sobre todo en movimientos rápidamente variables, por ejemplo la disipación de energía en un resalto hidráulico, por lo que es más correcto considerar la ecuación de continuidad junto con la de conservación de la cantidad de movimiento.

La segunda ley de la termodinámica se utiliza sobretodo como comprobación de que las soluciones obtenidas son posibles, y en concreto para rechazar algunas

soluciones, posibles matemáticamente, que físicamente son incorrectas ya que violan dicha ley. Para el caso de flujo de agua en lámina libre en principio no se considera la variación de calor, por lo que la segunda ley que da en que la variación de entropía tiene que ser mayor o igual a cero.

Con las cinco leyes mencionadas, se puede obtener un sistema cerrado de ecuaciones para cualquier fluido, aunque para flujos complejos o fluidos con propiedades termodinámicas complicadas, a menudo algunos términos son desconocidos o se basan en aproximaciones empíricas.

11.4.2. Ecuaciones de Navier Stokes

En particular, para un fluido newtoniano, e isótropo (las propiedades del fluido no cambian con la dirección), como es el agua el conjunto de leyes anteriores que gobiernan los fluidos se concreta en las *ecuaciones de Navier-Stokes*, que se obtienen directamente de las ecuaciones de continuidad y del movimiento (Bladé Castellet, 2005).

- La *ecuación de continuidad* será directamente la expresión de la ley de conservación de la masa.
- La *ecuación del movimiento*, se obtiene de analizar la naturaleza de las fuerzas que actúan sobre el fluido por unidad de volumen. Estas fuerzas son las que ejerce el propio fluido más las fuerzas exteriores que puedan existir.

En la deducción de las ecuaciones se plantea el equilibrio de fuerzas sobre un volumen de control. Las fuerzas que se ejercen sobre el contorno de este volumen de control, por parte del propio fluido o de un contorno material, son unas tensiones sobre la superficie del mismo que se pueden representar con un *tensor de tensiones* σ , de manera que los elementos de diagonal de este tensor son las *fuerzas normales* por unidad de superficie en el contorno del volumen y el resto de componentes serían las *componentes tangenciales* de dichas fuerzas. Por equilibrio de momentos se demuestra que el tensor de tensiones es simétrico. El resto de fuerzas exteriores las agrupamos bajo el término **b** (fuerzas por unidad de masa), aunque en general sólo se consideran la gravedad y la fuerza de Coriolis debido a la rotación de la tierra. Aplicando directamente la ley de conservación de la cantidad de movimiento con las consideraciones anteriores sobre el volumen de control y utilizando el teorema de Gauss o de la divergencia en la superficie cerrada que es su contorno, se obtiene:



$$\rho \frac{dV}{dt} = \nabla \cdot \sigma + \rho b$$

El tensor de tensiones se puede descomponer a su vez, para el caso de fluido incompresible, en la suma de dos. El primero representa su parte isótropa, que es una matriz diagonal 3x3 de componentes iguales, mientras que el resto se podría llamar tensor de tensiones viscosas τ , es decir:

$$\sigma = -pI + \tau$$

Donde I representa la matriz identidad y p es un escalar que viene dado por:

$$p = \frac{-tr(\sigma)}{3}$$

$tr(\sigma)$ es la traza (suma de los elementos de la diagonal) del tensor de tensiones, que para un fluido en movimiento se conoce por *presión dinámica*. Para el caso de fluidos compresibles (excepto en gases monoatómicos) esto no es exactamente cierto ya que habría que considerar la influencia de una viscosidad adicional debida a la dilatación volumétrica del fluido. Stokes formuló la hipótesis de que esta influencia se podría despreciar siempre, en este caso, de las dos ecuaciones anteriores se desprende que la traza de τ es igual a cero.

El tensor de tensiones viscosas representa la parte no isótropa del tensor de tensiones. Sus elementos de la diagonal son las tensiones viscosas normales, mientras que el resto son las tensiones viscosas tangenciales, por lo que la hipótesis de Stokes implica que la suma de las tensiones viscosas normales es cero.

Un fluido newtoniano es aquel que cumple la Ley de Newton, según la cual la tensión tangencial entre dos capas de fluido en movimiento es proporcional a la velocidad relativa entre dichas capas. Matemáticamente esto se traduce en que el tensor de tensiones totales es proporcional a la parte simétrica del tensor velocidad de deformación, y se escribe como:

$$\sigma = 2\mu E$$

Donde E es la parte simétrica del tensor velocidad de deformación que, en componentes, responde a la expresión:

$$e_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

Donde u_k sería la componente de la velocidad en la dirección del espacio dada por x_k . μ es el coeficiente de viscosidad dinámica que relaciona el tensor de tensiones con el tensor velocidad de deformación.

Sustituyendo la Ley de Newton en la ecuación, y teniéndola en cuenta a su vez en la expresión de la presión se obtiene que:

$$\tau = 2\mu E - \frac{2\mu}{3}(\nabla \cdot V) I$$

Esta expresión en conjunto con la ecuación del movimiento y algunas operaciones matemáticas permite obtener la ecuación del movimiento para un fluido isótropo, newtoniano, que juntamente con la ecuación de continuidad, teniendo en cuenta que la densidad del fluido ρ es precisamente la masa por unidad de volumen, constituyen las ecuaciones de Navier-Stokes:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V) = 0$$

$$\rho \frac{\partial V}{\partial t} = -\nabla p + \rho b + \mu \nabla^2 V + \frac{\mu}{3} \nabla (\nabla \cdot V)$$

Donde \mathbf{V} es el vector velocidad, ρ es la densidad del fluido, p la presión, \mathbf{b} el vector de fuerzas exteriores pro unidad de masa.

En las expresiones anteriores d/dt representa la derivada material, que puede expresarse como la derivada local más la componente convectiva: $d/dt = \partial/\partial t + \nabla V \cdot$. Se recuerda que el operador ∇ aplicado a un vector es la divergencia de éste, mientras que aplicado a un escalar es su gradiente. Las derivadas respecto del tiempo, d/dt , que aparecen en las leyes de conservación, también deben entenderse en este sentido. Los dos últimos términos de la ecuación del movimiento corresponden a la divergencia del tensor de tensiones.

Para fluido incompresible, utilizando la ecuación de continuidad, se puede ver que el último término de la derecha de la ecuación del movimiento es igual a cero: en este caso las ecuaciones de Navier-Stokes quedarían, en componentes, así:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_j} + b_i + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j}$$

Donde $u_{i,j,k}$ son las tres componentes del vector de velocidad \mathbf{V} , b_i las componentes del vector de fuerzas por unidad de masa \mathbf{b} y ν el coeficiente de viscosidad cinemática $\nu = \mu/\rho$. se utiliza la notación de Einstein donde componentes repetidas indican sumatorio. Las componentes del tensor de tensiones son entonces:



$$\tau_{ij} = \nu \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$$

En el caso de un fluido ideal, ($\mu=0$), las ecuaciones de Navier-Stokes junto con la ecuación de conservación de la energía, reciben el nombre de *ecuaciones de Euler*. La búsqueda de métodos de resolución para las ecuaciones de Euler ha sido muy importante para el avance en métodos numéricos para la resolución de sistemas de ecuaciones en derivadas parciales hiperbólicos. Gran parte de los métodos de resolución para las ecuaciones en lámina libre y especialmente los métodos de alta resolución, fueron desarrollados para la resolución de las ecuaciones de Euler.

11.5. INTEGRACIÓN VERTICAL DE LAS ECUACIONES DE REYNOLDS. ECUACIONES DEL FLUJO BIDIMENSIONAL EN LÁMINA LIBRE O ECUACIONES DE SAINT VENANT.

En gran parte de los flujos en lámina libre, y especialmente en problemas de propagación de avenidas en ríos, el valor de las variables cambia poco en una misma vertical. Esta consideración permite pensar en una simplificación de las ecuaciones de Reynolds a dos dimensiones mediante un promedio vertical de las ecuaciones tridimensionales. Para poder hacer la simplificación se consideran las hipótesis siguientes:

1. Profundidad de la capa de agua pequeña con relación a las otras dimensiones del problema.
2. Distribución hidrostática de presiones en la vertical.
3. Pendiente de solera reducida.

Para que se cumpla la hipótesis de distribución hidrostática de presiones es necesario que la curvatura de las líneas de corriente sea pequeña. El cumplimiento de estas hipótesis implica además que las componentes de la velocidad y aceleración en el eje z son despreciables frente a las componentes en los otros ejes, y también que éstas últimas tienen una marcada uniformidad vertical.

Para la integración de las ecuaciones de Reynolds en la profundidad, se define la velocidad promediada como $U=(u_1, u_2)$ representada en la Ilustración 132 por las componentes u y v (Bladé Castellet, 2005).

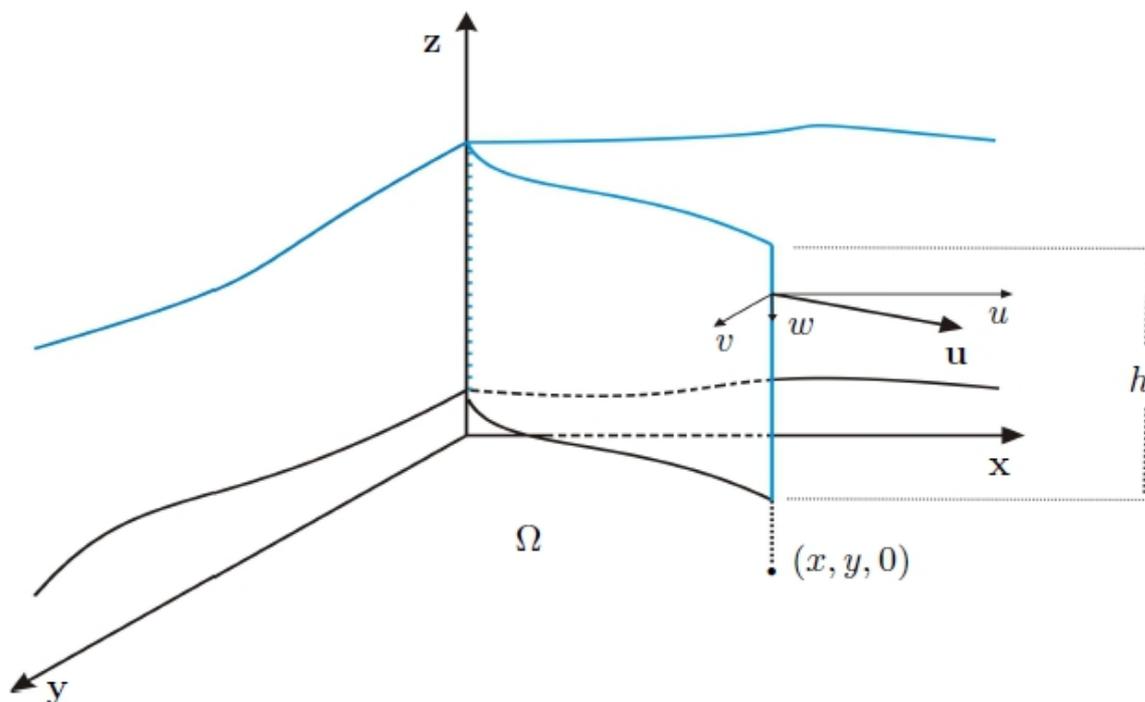


Ilustración 132: Velocidad promedio en la vertical y se desprecia la componente z.

Las ecuaciones bidimensionales del flujo en lámina libre o ecuaciones de Saint Venant bidimensional en su expresión más completa en forma conservativa donde se ha utilizado la notación u y v para u_1 y u_2 (Aragón Hernández & Bladé, 2013).

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(hu) + \frac{\partial}{\partial x}(hu^2 + g\frac{h^2}{2}) + \frac{\partial}{\partial y}(huv) = gh(S_{0x} - S_{fx}) + fhv + \frac{\tau_{sx}}{\rho} + S_{t1}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(hv) + \frac{\partial}{\partial x}(huv) + \frac{\partial}{\partial y}(hv^2 + g\frac{h^2}{2}) = gh(S_{0y} - S_{fy}) - fhu + \frac{\tau_{sy}}{\rho} + S_{t2}$$

Donde:

- f es el coeficiente de Coriolis debido a la fuerza de rotación la tierra.
- τ_{sx} y τ_{sy} son las tensiones tangenciales en la superficie debidas a la fuerza del viento.
- S_{t1} y S_{t2} son los términos turbulentos, objeto de los cuales son los modelos de turbulencia.

Estos términos llamados también *tensiones efectivas*, se componen por:

- Las *tensiones viscosas* relacionadas con la viscosidad del fluido.



- Las *tensiones turbulentas* resultado del promedio temporal de las ecuaciones de Navier Stokes.
- Las *tensiones convectivas* resultantes de la integración en la vertical de los términos convectivos tridimensionales.

La fuerza de Coriolis sólo tiene importancia en grandes masas de aguas, las tensiones debidas al viento pueden ser significativas en grandes superficies con vientos fuertes, y los términos turbulentos tienen poca relevancia con respecto a los otros términos, por lo que su efecto se puede evaluar mediante el término de fricción con el fondo.

De esta forma, si no se considera la fuerza de Coriolis, las tensiones producidas por el viento en la superficie libre del agua y las tensiones efectivas, se pueden escribir las ecuaciones de aguas poco profundas en 2D en forma conservativa como (Aragón Hernández & Bladé, 2013):

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(hu) + \frac{\partial}{\partial x}(hu^2 + g\frac{h^2}{2}) + \frac{\partial}{\partial y}(huv) = gh(S_{0x} - S_{fx})$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(hv) + \frac{\partial}{\partial x}(huv) + \frac{\partial}{\partial y}(hv^2 + g\frac{h^2}{2}) = gh(S_{0y} - S_{fy})$$

Utilizando notación vectorial, se obtiene:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \nabla F = H$$

Con $\nabla F = \frac{\partial F}{\partial x} + \frac{\partial F}{\partial y}$, que responde a las expresiones:

$$U = \begin{bmatrix} h \\ hu \\ hv \end{bmatrix} \quad F = \begin{bmatrix} hu & hv \\ hu^2 + g\frac{h^2}{2} & huv \\ huv & hv^2 + g\frac{h^2}{2} \end{bmatrix} \quad H = \begin{bmatrix} 0 \\ gh(S_{0x} - S_{fx}) \\ gh(S_{0y} - S_{fy}) \end{bmatrix}$$

Donde:

- ***U*** es el vector de variables dependientes o de flujo.
- ***F*** el vector o tensor de flujo.
- ***H*** el vector del término independiente o fuente.
- *h* el calado.
- *u* la componente de la velocidad en dirección del eje *x*.
- *v* la componente de la velocidad en dirección del eje *y*.
- S_{0x} la pendiente del terreno en la dirección *x*.
- S_{0y} la pendiente del terreno en la dirección *y*.
- S_{fx} la pendiente de fricción o motriz en la dirección *x*.
- S_{fy} la pendiente de fricción o motriz en la dirección *y*.

Las dos últimas se expresan como:

$$S_{fx} = \frac{u\sqrt{u^2 + v^2}n^2}{h^{4/3}}$$
$$S_{fy} = \frac{v\sqrt{u^2 + v^2}n^2}{h^{4/3}}$$

Donde *n* es el coeficiente de fricción de Manning.

11.5.1. Métodos y esquemas numéricos

Las ecuaciones empleadas en este trabajo, no disponen de una solución analítica, salvo para tipos de flujo y situaciones muy específicas. La solución de estas ecuaciones se obtiene con un método numérico, la rama de la mecánica de fluidos que se ocupa de encontrar este tipo de soluciones mediante el ordenador se denomina *Mecánica de Fluidos Computacional*, en este caso el método empleado por el software InfoWorks RS para la solución de las ecuaciones de flujo variable en lámina libre en 2D son los volúmenes finitos.

11.5.1.1. Método de los volúmenes finitos

El método de los volúmenes finitos, fue introducido por McDonald (1972) y MacConrmack y Paullay (1972) para la solución las ecuaciones de Euler en dos dimensiones. El método de los volúmenes finitos trajo una revolución a los sistemas hiperbólicos no lineales con el método conservativo de primer orden de Godunov (1959).

En la formulación original del método de Godunov la información de propagación de la onda fue suministrada localmente vía soluciones exactas de las ecuaciones de

gobierno sujetas a condiciones iniciales especiales. Este particular problema de valor inicial es llamado problema de Riemann.

Este tipo de métodos requiere conocer la solución del problema de Riemann, pero conocerla de manera exacta es costoso computacionalmente, de manera que se utilizan soluciones aproximadas, conocidos como *Riemann solvers*. Estos *Riemann solvers* utilizan el hecho que para aplicar el método de Godunov no necesitan saber el detalle de toda la solución del problema de Riemann, sino sólo el valor de la solución en el contorno entre dos volúmenes finitos.

Los métodos desarrollados para la solución de las ecuaciones de Euler se adaptaron a las ecuaciones de Saint Venant en 1D, a las ecuaciones de flujo en presión en 1D y a las ecuaciones de aguas poco profundas en 2D, debido a gran medida a la similitud de sus términos. La principal diferencia de los esquemas numéricos tanto en 1D como en 2D radica en la forma de calcular el flujo numérico entre las fronteras de los volúmenes finitos.

Por ello, el método de los volúmenes finitos actualmente es uno de los más comunes en el campo de la *Mecánica de Fluidos Computacional*. Siendo las ventajas de este método su generalidad, conservatividad, simplicidad, su interpretación física intuitiva y por la facilidad de implementación a cualquier tipo de mallas, siendo la discretización aplicable directamente a las ecuaciones integrales para volúmenes de control finitos.

La aplicación de un método numérico conlleva la discretización espacial del dominio en puntos, celdas o elementos de cálculo. Cada elemento representa un volumen de control o volumen finito. La unión de estos elementos forma una malla, la cual puede ser estructurada o no estructurada.

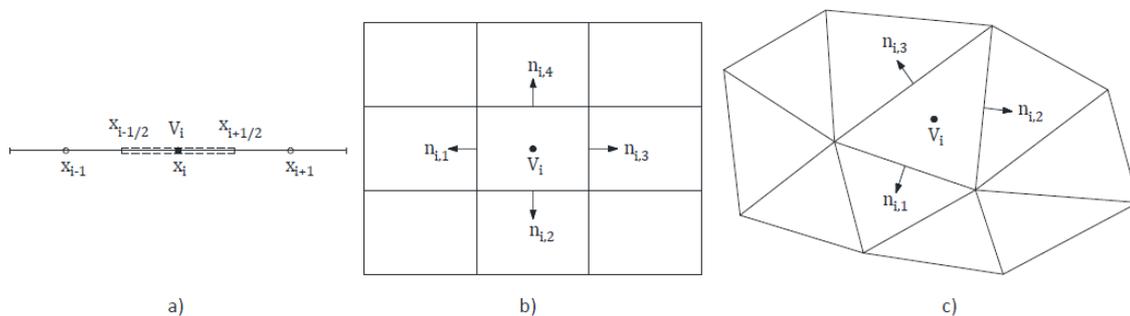


Ilustración 133: Tipos de malla: a) Malla en una dimensión, b) Malla estructurada en dos dimensiones, c) Malla no estructurada en dos dimensiones.

- En las **mallas estructuradas**, cada elemento está identificadas por los índices i, j y k en coordenadas cartesianas. Los elementos de la malla por lo general son cuadriláteros
- En las **mallas no estructuradas** los elementos no tienen un orden particular. Los elementos de la malla pueden ser triángulos, cuadriláteros o una combinación de ambos. Además, tienen la ventaja de adaptarse a geometrías complejas, pero requieren de una estructura de datos compleja y unos requerimientos de memoria mayores.

Para la generación o construcción de los volúmenes finitos en 2D, existen diferentes metodologías para definir la forma y posición del volumen de control con respecto a la malla (Aragón Hernández & Bladé, 2013):

- **Volúmenes finitos tipo celda**

Lo más sencillo consiste en utilizar la discretización espacial y ubicar el nodo de la celda o volumen finito en el centroide de cada elemento. Tienen la ventaja de que se utiliza la discretización inicial como malla, pero tiene el inconveniente de que los valores de las variables se almacenan en el centro de la celda, lo que le dificulta la imposición de las condiciones de contorno.

- **Volúmenes finitos tipo vértice y tipo arista**

En la cual el nodo se ubica en el vértice y en el punto medio de la arista respectivamente. Posteriormente, con la ayuda de las medianas, se construye una nueva malla de volúmenes finitos en torno a estos nodos. Estas dos últimas tienen el inconveniente de que se requiere la construcción de una nueva malla, sin embargo facilita la imposición de las condiciones de frontera, ya que los nodos de las celdas de la frontera están localizados en el contorno. Por otra parte, los volúmenes tipo vértice tiene la desventaja de que en dominios irregulares, los elementos frontera pueden tener asociado dos vectores normales, estos problemas son evitados con los volúmenes tipo arista, pero estos últimos tienen el inconveniente de que las variables no se almacenan ni en el centro ni en los vértices de la malla inicial.

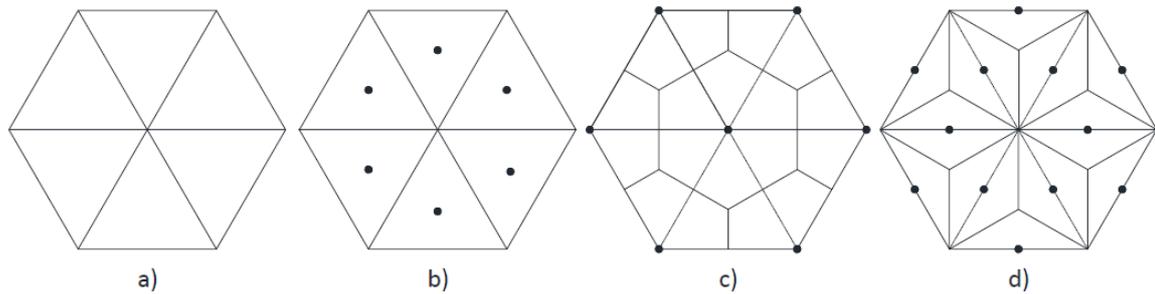


Ilustración 134: Generación de mallas: a) Malla triangular original, b) Volúmenes finitos tipo celda, c) Volúmenes finitos tipo vértice, d) Volúmenes finitos tipo arista.

Con cada volumen finito se asocia una función base como la que se muestra en la Ilustración 135, es decir, se supone que las incógnitas del modelo son constantes en cada volumen (López López & Alavez-Ramírez, 2009).

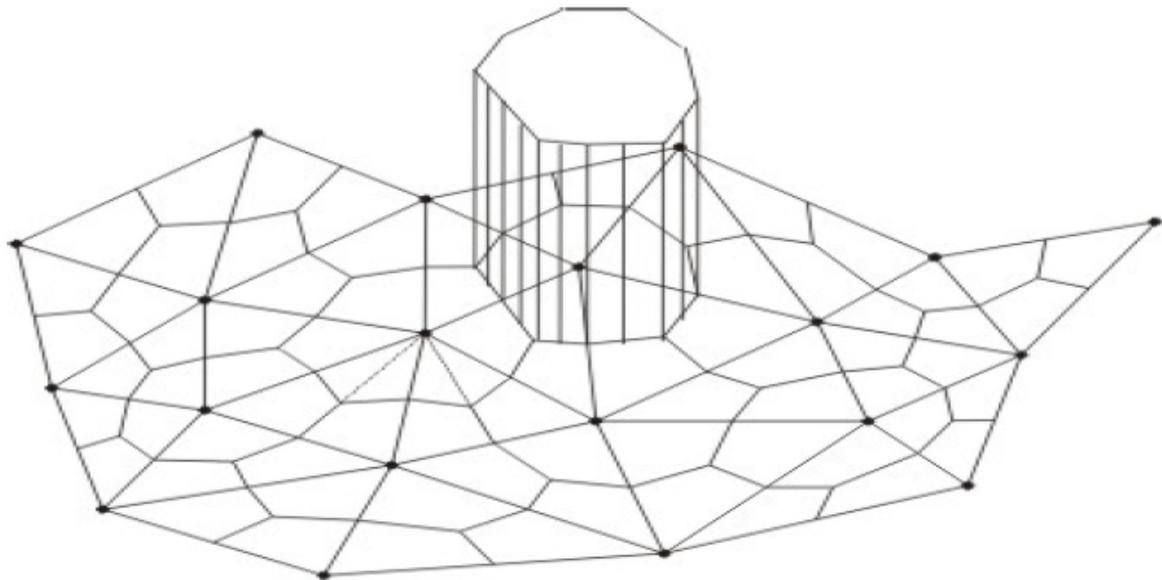


Ilustración 135: Función base asociada a cada volumen finito.

12. CREACIÓN DEL MODELO HIDRÁULICO EN INFOWORKS RS

12.1. INFORMACIÓN DE PARTIDA

12.1.1. Hidrogramas de Salida

Los hidrogramas de salida de la cuenca formada por los barrancos de Fontellas y Cantalobos cuyo punto de desagüe se encuentra en la Carrera de Tenerías, forman parte de las propiedades de contorno del modelo en 2D en InfoWorks RS. Los hidrogramas de salida se han calculado anteriormente en el análisis hidrológico realizado con HEC-HMS.

Se recuerda que los hidrogramas de salida se han calculado para para los periodos de retorno de 10, 25 y 100 años considerando el escenario Actual y el escenario Futuro evaluando los efectos del cambio climático para el horizonte 2050.

12.1.2. Descarga de Datos

- **ORTOFOTO PNOA MÁXIMA ACTUALIDAD**

Mosaicos de ortofotos del PNOA (Plan Nacional de Ortofotografía Aérea) más recientes disponibles, en formato ECW, sistema geodésico de referencia ETRS89 y proyección UTM en su huso correspondiente. La unidad de distribución y descarga es la hoja del MTN50 (Mapa Topográfico Nacional 1:50.000), resultado de componer un mosaico con las ortofotos correspondientes a cada hoja del MTN50. Un mosaico de Máxima Actualidad por hoja MTN50 se forma seleccionando de entre toda la información de ortofotografía PNOA disponible, aquella que tenga una fecha de referencia más reciente, y en caso de coincidencia, se seleccionará la que tenga un tamaño de píxel menor. La hoja MTN50 para el presente estudio corresponde a la 410 y la proyección UTM en el huso 30. La Ortofoto ha sido descargada desde el Centro de Descargas del Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG).

- **MDT05-LIDAR**

Modelo digital del terreno con paso de malla de 5 m, con la misma distribución

de hojas que el MTN50. Formato de archivo ASCII matriz ESRI (asc). Sistema geodésico de referencia ETRS89 y proyección UTM en el huso correspondiente a cada hoja. La hoja MTN50 para el presente estudio corresponde a la 410 y la proyección UTM en el huso 30. El MDT ha sido descargada desde el Centro de Descargas del Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG).

- **Cartografía 1:1000 Aragón: Planos topográficos de núcleos urbanos**

La Cartografía Base del municipio de La Almunia de Doña Godina se ha obtenido del centro de descargas del SITAR en formato CAD con extensión *.dxf* a escala 1:1000.

12.2. INFOWORKS RS

El software InfoWorks 2D empleado es un software para la gestión de sistemas hídricos en zonas fluviales, urbanas y rurales. Este programa ha sido desarrollado por Wallingford Software (MWH Soft).

InfoWorks 2D combina una serie de características importantes como:

- Análisis y predicción de calados, velocidad y extensión potencial de una inundación.
- Funcionalidades para modelar las interacciones entre sistemas subterráneos y superficiales.
- Integración de modelación 1D-2D
- Múltiples posibilidades para el diseño de mallas de cálculo que permite optimizar la flexibilidad del modelo.

El módulo 2D de InfoWorks está integrado con el módulo de modelación de ríos (InfoWorks RS) el cual ha sido utilizado en este estudio y sus características principales son:

- El módulo InfoWorks 2D se integra totalmente con el motor de simulación 1D, logrando modelaciones detalladas, precisas y eficaces de flujos a través de las geometrías complejas. Las conexión 1D-2D se realiza mediante los elementos de unidades de vertido y por los nodos de conexión 1D-2D.
- Utiliza el método de volúmenes finitos para resolver las ecuaciones de flujo de aguas.
- Utiliza mallas triangulares, rectangulares e irregulares con elementos escalonados planos horizontales para modelar el terreno lo cual permite una

alta flexibilidad para describir geometrías complejas. La malla se genera automáticamente, si tener en cuenta la morfología del terreno, pudiendo seleccionar zonas de mayor precisión, zonas donde no se desea mallar como en los edificios, líneas de rotura para modelar con mayor precisión zonas de cambios bruscos de pendiente, muros con una altura o cota dada, muros porosos que permiten el paso parcial del agua y muros infinitos. La cota de cada triángulo se calcula a partir de las cotas de cada uno de sus vértices.

- Rugosidad variable dentro de la malla.
- Múltiples posibilidades de condiciones de contorno.
- Se obtiene como resultado los calados en el centro de cada celda de la malla y las velocidades en las caras.

12.3. INTERFAZ GRÁFICA DE INFOWORKS RS

El entorno de trabajo de InfoWorks RS consta de 5 elementos, como se aprecia en la siguiente imagen.



Ilustración 136: Interfaz gráfica de InfoWorks RS.

1. **Menú.** Desde él se acude a las listas despegables propias de los programas del entorno Windows. En él, se puede encontrar:
 - *Archivo*



- *Editar*
 - *Red*
 - *Selección*
 - *Geo*
 - *Resultados*
 - *Herramientas*
 - *Modelo*
 - *Ventana*
 - *Ayuda*
2. **Barra de herramientas.** Se recopilan diferentes iconos para la creación de los diferentes objetos, tablas, gráficos, vistas, etc. se puede modificar añadiendo o eliminando iconos de ella, según las necesidades del usuario.
 3. **Grupo de Modelos.** Desde él se crean las diferentes redes y proyectos con las carpetas contenedoras de la información de cada tipo de red. Existen los siguientes grupos: *Grupo de redes, Red, Evento, Control lógico, Sedimento, Calidad de agua, Geoexplorador, Grupo de análisis de frecuencia, Grupo de análisis de resultados, Grupo de análisis POT, Grupo de base de datos de rugosidad, Grupo de colección de episodios, Grupo de consultas almacenadas, Grupo de datos de excedencia, Grupo de datos originales, Grupo de gráficos, Grupo de informes personalizados, Grupo de listas de selecciones, Grupo de listas de capas, Grupo de listas de etiquetas, Grupo de modelos de terreno compuestos, Grupo de modelos de terreno GRID, Grupo de modelos de terreno TIN, Grupo de simulación de calidad de agua, Grupo de simulaciones, Grupo de temáticos, Grupo de validación de diseño, Grupo entorno de trabajo.*
 4. **GeoPlan.** Se representan gráficamente la red de trabajo, junto con las aplicaciones que se inserten (MDT, red drenaje, llanuras de inundación, ortofotos u otras capas, etc.).
 5. **Ventana de Advertencias.** Se muestran los diferentes errores, advertencias o avisos de importancia tras la validación de la red del modelo.

12.4. OBJETOS Y CAMPOS EN INFOWORKS RS

Cada objeto en InfoWorks RS representa un elemento o situación específica. Cada objeto estará caracterizado por unos campos como pueden ser la geometría,

rugosidad etc.

Hay tres tipologías de campos para cada objeto:

1. Las **características geométricas o físicas** de los mismos (por ejemplo, la sección de un río, su rugosidad), tienen el icono 
2. Los **eventos**, describen las condiciones iniciales y los datos variables del objeto (por ejemplo, caudales, lluvias). Pueden abrirse separadamente de una red, pero únicamente son editables los objetos de condición de contorno. Tienen el icono 
3. Los **controles lógicos**, es decir, los campos de IW que permiten describir el funcionamiento y la gestión de un objeto. Tienen el icono 

En IW los eventos y los controles lógicos están separados de las características físicas, las primeras están en el objeto Evento y Control Lógico, mientras que las características físicas se encuentran en la red. Únicamente cuando se ha abierto el Control Lógico y/o el evento junto a la red se pueden modificar.

12.4.1. Tipos de objetos

12.4.1.1. Secciones

Para crearla se utiliza el icono 

Las secciones representan secciones transversales del modelo y existen los siguientes tipo:

- Sección del Río
- Sección de la Llanura de Inundación
- Unidad de Vertido

12.4.1.2. Nodos

Los nodos también suelen representar secciones transversales del modelo y existen los siguientes tipos:

- Abstracción
- Nodo de Condiciones de Contorno
- Conducto Circular
- Conducto en Arco Completo
- Sección Interpolada

- Nodo de Unión
- Tránsito de Muskingum
- Condiciones Contorno Normal
- Conducto Rectangular
- Sección Clonada
- Conducto/Tubería en Arco
- Conducto Simétrico
- VPMC (r) RIBAMAN
- Tránsito VPMC (v)

12.4.1.3. Conexiones

Para crearlas se utiliza el icono 

Las conexiones conectan dos nodos. Estas pueden ser una conexión con longitud o longitud cero, o una estructura de control.

- **Conexión que definen sólo conectividad**
 - Conexión
 - Conexión de Caudal Lateral
 - Conexión de Conectividad
 - Conexión de Caudal Urbano
 - Conexión de Vertido
- **Conexiones que representan estructuras de control**
 - Bloqueo
 - Bomba
 - Compuerta de Compuertas Radiales
 - Compuerta de Compuertas Verticales
 - Curva de la Obra de Drenaje
 - Entrada de la Obra de Drenaje
 - Salida de la Obra de Drenaje
 - Orificio
 - Pérdida de Carga General
 - Pérdidas de Bernoulli
 - Puente Arco
 - Puente USBPR
 - Vertedero con Compuertas

- Vertedero de Pared Delgada
- Vertedero con Control de Caudal-Altura
- Vertedero de Pared Gruesa
- Vertedero de Sifón
- Vertedero Crump
- Vertedero Teórico
- Vertedero Aliviadero

12.4.1.4. Polígonos

Para crearlos se utiliza en icono 

Los polígonos en general representan áreas del modelo y existen los siguientes tipos:

- Polígono General
- Polígono de Simulación 2D
- Polígono de Malla
- Polígono de Rugosidad
- Subcuenca
- Balsa
- Área de Almacenamiento

12.4.1.5. Líneas de campañas de campo

Para crearlas se utiliza el icono 

Las líneas de campañas de campo representan los datos tomados en el campo. No pertenecen al modelo (no se realizan simulaciones con ellas), pero permiten realizar operaciones para la creación del modelo, a partir de datos de campo que se importan desde AutoCAD o un SIG.

Existen los siguientes tipos:

- Línea de Sección Transversal
- Líneas de la Margen Derecha
- Línea de la Margen Izquierda
- Línea Central del Río
- Línea General
- Muro Poroso
- Tramo del Río

12.5. METODOLOGÍA DE TRABAJO Y ESTRUCTURA DE INFOWORKS

El Administrador de InfoWorks sirve para controlar y gestionar la organización de la Base de Datos. A continuación se describe el procedimiento para crear una nueva Base de Datos Maestra con el Administrador.

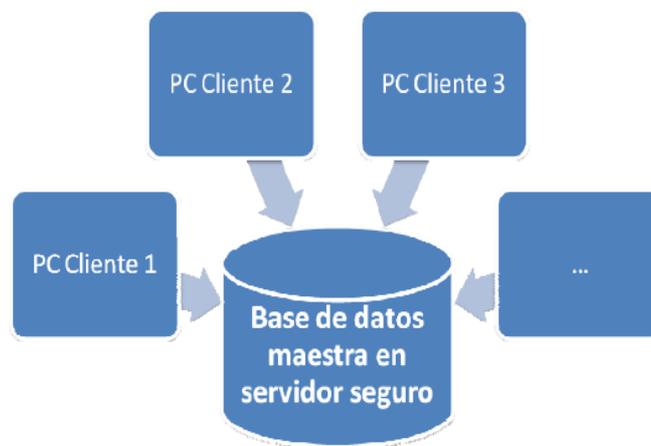


Ilustración 137: Metodología de trabajo de InfoWorks

La metodología de trabajo de InfoWorks se basa en una base de datos única con extensión IWM, en la que se almacenan todos los datos (geometría de la red, datos de condiciones de contorno, etc). Esta base de datos se puede almacenar en un servidor con acceso a múltiples usuarios. Los usuarios que accedan a la base de datos trabajarán localmente desde sus PCs mediante el uso de la "Local Root" (Rutal Local) que deberá estar en el disco duro de cada PC.

- **Creación de una nueva Base de Datos Maestra**

Para el nuevo proyecto en InfoWorks RS se creará una nueva Base de Datos Maestra; para ello desde la aplicación "IW RS Admin" se acude desde menú a *Base de Datos > Nueva Base de Datos Maestra...*

- **Creación del modelo**

Posteriormente se selecciona la Base de Datos Maestra creada desde el menú *Base de Datos > Seleccionar Base de Datos Maestra*. Se acude al explorador desde el menú *Vista > Explorador de InfoWorks* y creamos el modelo del proyecto.

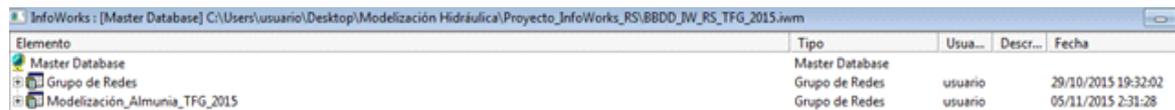


Ilustración 138: Explorador de InfoWorks

Una vez se tiene el modelo y la Base de Datos Maestra del proyecto en InfoWorks, se abre la el código de cálculo InfoWorks RS 2D, seleccionando la Base de Datos Maestra creada y la Local Root.

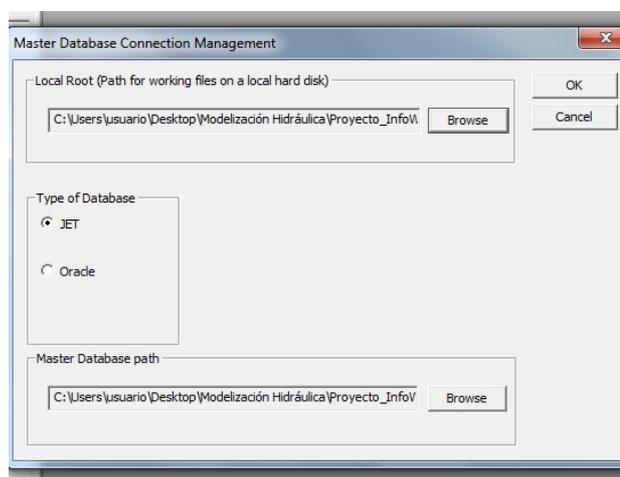


Ilustración 139: Selección de Base de Datos Maestra creada y Local Root.

12.6. INSERTAR MODELO DIGITAL DEL TERRENO (MDT)

Se dispone a insertar el MDT, uno de los datos de partida indicados anteriormente, y del cuál depende la precisión de los resultados obtenidos en la ejecución de las diferentes simulaciones creadas.

Para insertar en el modelo el MDT de la correspondiente cuadrícula cartográfica 410 del MTN50, en la que se encuentra la localidad de estudio, La Almunia de Doña Godina; se crea una carpeta del tipo "Grupo de Modelos del Terreno Grid"; debido a que el MDT está en formato raster. Para importar el MDT se acude a la carpeta creada de "Grupo de Modelos del Terreno Grid" y se realiza la "importación de archivos en

tablas”.

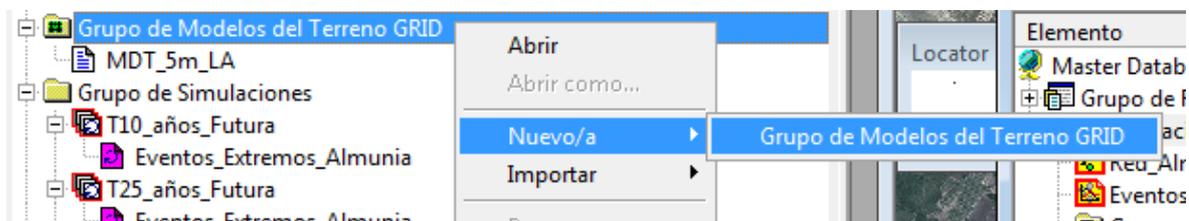


Ilustración 140: Importación MDT

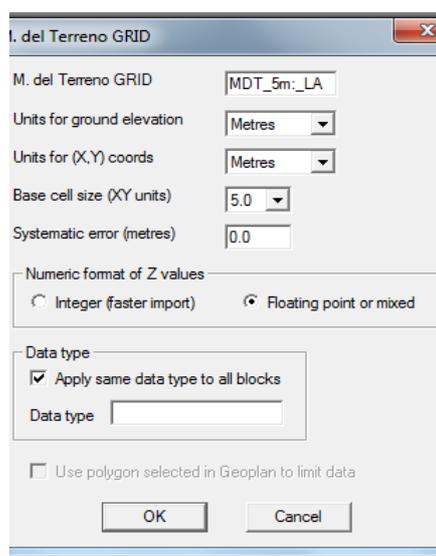


Ilustración 141: Parámetros MDT

12.6.1. Creación de un temático para el MDT

Para poder visualizar el MDT se crea una vista temática y se aplica sobre una red. Por ello, el primer paso es crear una nueva “Red” que se denomina *Red Almunia* y además un “Grupo de Temáticos”. Abierta la Red se arrastra el MDT sobre el Geoplan, desde donde se crea el temático para visualizar el MDT. Para ello, con el botón derecho del ratón se selecciona la opción “Temáticos”, y en la pestaña “Terrenos” se activa la opción “Contornos” creando 10 categorías en “Rangos y Colores”, con una escala autoajustada.

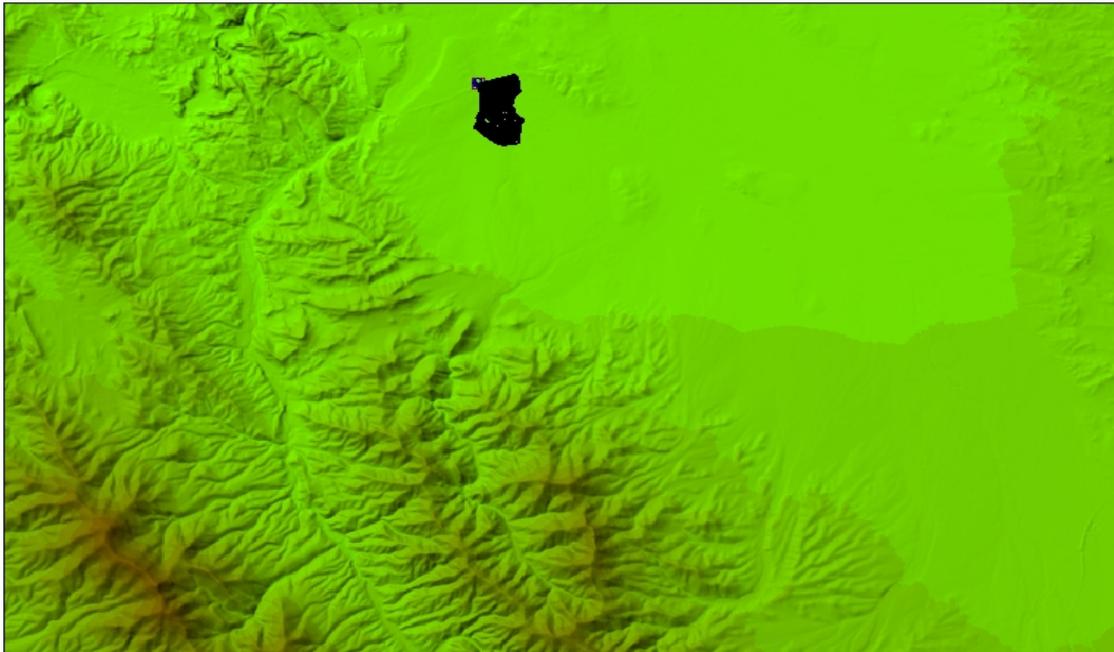


Ilustración 142: Visualización del MDT sobre el Geoplan.

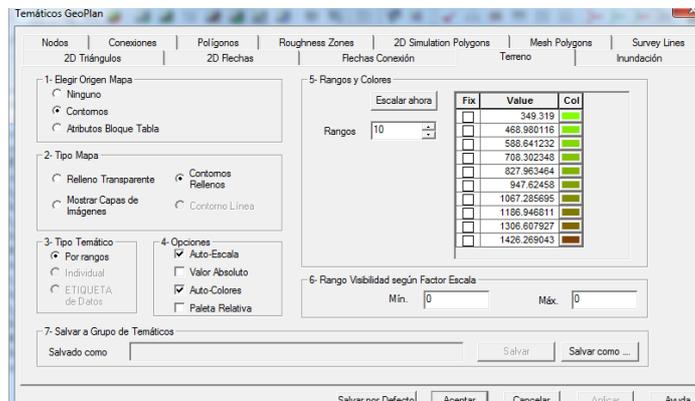


Ilustración 143: Ventana Temáticos GeoPlan

La altitud del MDT está comprendido entre los 349 y los 1426 metros. Por otra parte, hay la posibilidad de visualizar el MDT en 3D.

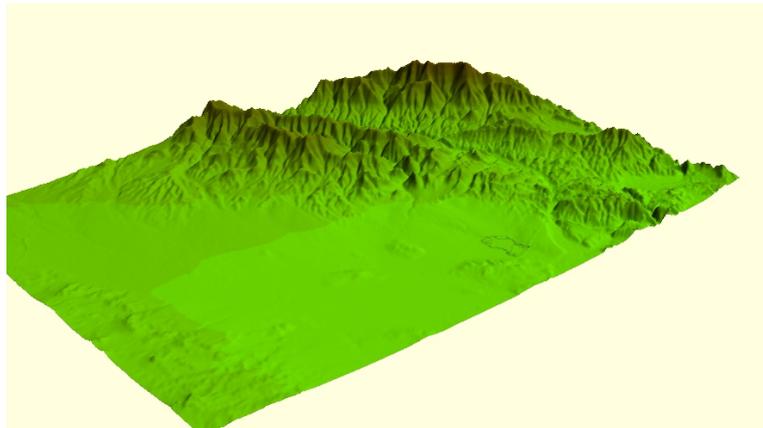


Ilustración 144: Vista tridimensional del MDT. Escala vertical 3:1.

12.7. CONTROL DE CAPAS DE LA RED

Desde el Geoplan con botón derecho en el ratón se selecciona la opción "Control de capas" para insertar la Ortofoto y el archivo CAD en formato *.dxf* con la capa creada específicamente para los voids.

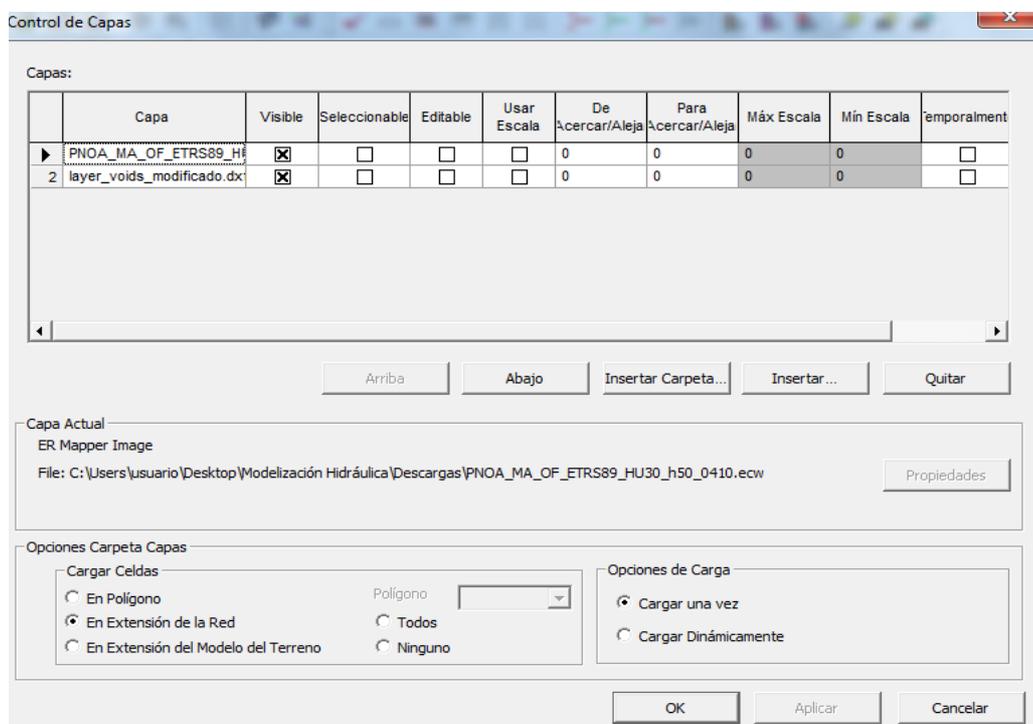


Ilustración 145: Control de Capas.

12.7.1. Ortofoto

La Ortofoto PNOA de máxima actualidad correspondiente a la cuadrícula 410 del MTN50 es uno de los datos de partida del modelo hidráulico en 2D. Se utiliza como referencia y soporte para la zona de estudio.

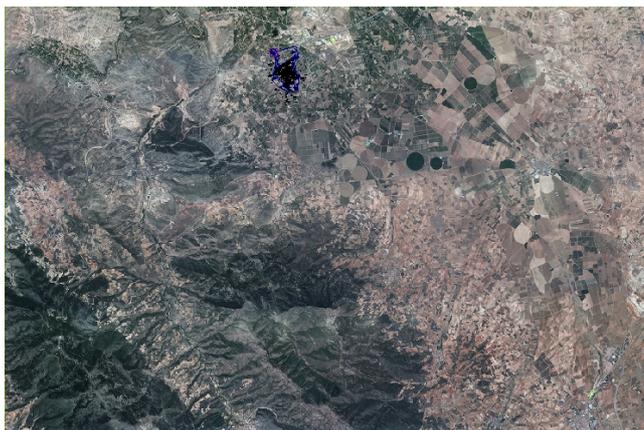


Ilustración 146: Visualización de la Ortofoto (hoja 410 del MTN50) sobre el Geoplan.

12.7.2. Capa voids

La definición e importación de la capa *Voids* sobre el Geoplan corresponde a las zonas donde no se va a realizar mallado; definiendo los elementos que el flujo no puede atravesar como edificios, muros, etc.

Hay varias opciones a la hora de definir los *voids* del modelo, en el presente estudio se ha empleado la Cartografía Base del municipio de La Almunia de Doña Godina proporcionada por el SITAR en formato CAD con extensión *.dxf*, a escala 1:1000. Así, a partir del archivo CAD se ha elaborado una capa denominada *layer_voids* con la que se han definido las polilíneas que conforman los *voids* (las superficies que ocupan los edificios de la localidad). Posteriormente se importa desde "Control de capas", insertando únicamente las áreas de las polilíneas creadas con la capa *layer_voids*.

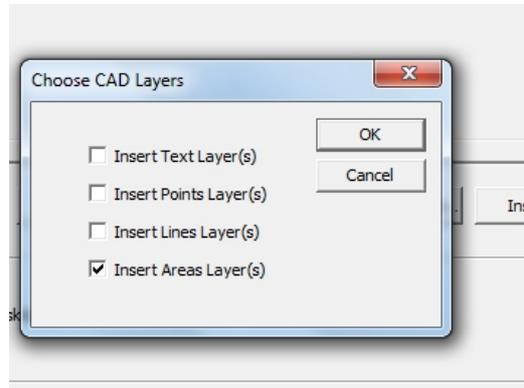


Ilustración 147: Insertar la capa con los voids.

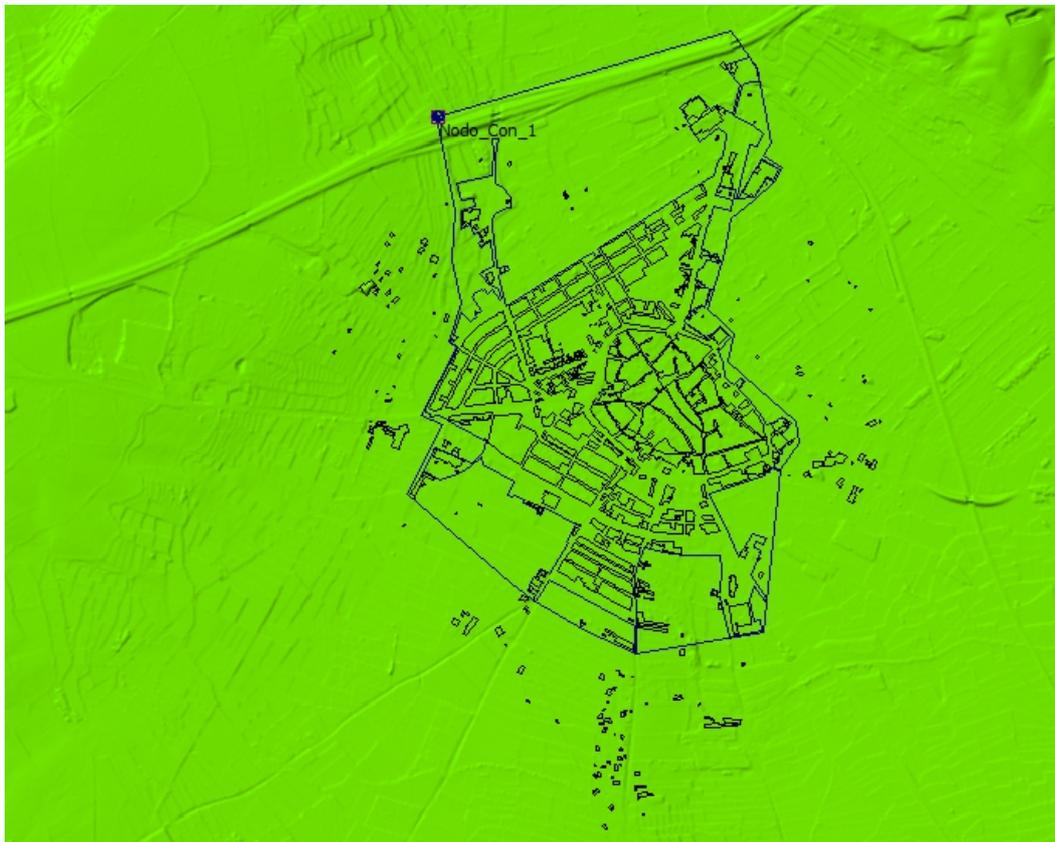


Ilustración 148: Visualización de la capa de Voids sobre el Geoplan.

12.8. CREACIÓN DEL POLÍGONO DE SIMULACIÓN 2D

A continuación se procede a la modelización bidimensional, para ello en primer

lugar hay que definir el dominio de estudio del cálculo bidimensional. Para ello, creamos un “Nuevo Polígono” desde la barra de herramientas de InfoWorks RS.

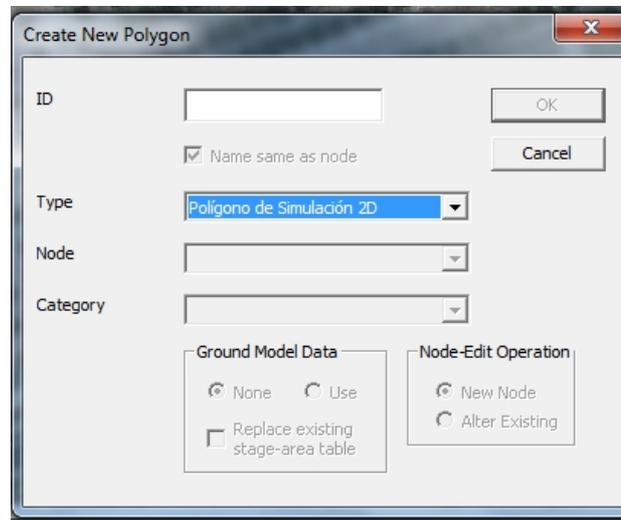


Ilustración 149: Creación del Polígono de simulación 2D.

Siendo el dominio bidimensional de estudio el siguiente.

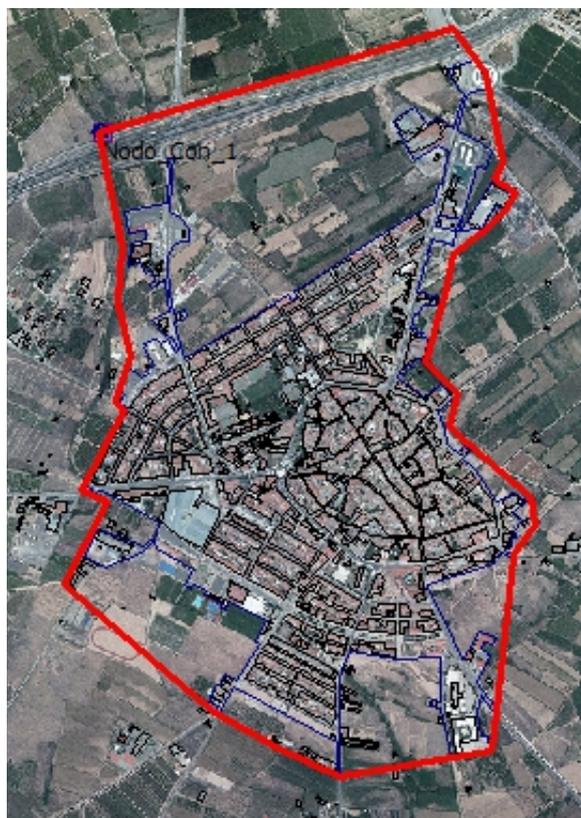
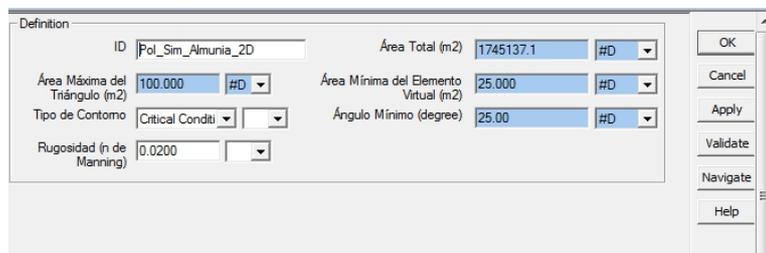


Ilustración 150: Visualización del Polígono de simulación 2D sobre el Geoplan.

A la hora de definir el polígono, hay que tener en cuenta que debe abarcar el área de la que se quieren obtener los resultado de forma precisa, pero sin excederse en sus dimensiones.

Los parámetros que definen el polígono de simulación 2D son:

- ID: Nombre del polígono creado.
- Área de triángulo Máxima (m²). Límite máximo del área de las celdas triangulares de la malla 2D. Se toma un valor de 100 m², que permite obtener resultados con la precisión suficiente.
- Área mínima del Elemento de Malla (m²). Es recomendable que sea ¼ de la anterior, por lo que su valor es 25 m². En la creación del mallado, debido a la complejidad de la geometría; de cara a la ejecución de la simulación se agregan los triángulos adyacentes de tamaño inferior hasta formar celdas mayores a los 25 m², ahorrando una importante cantidad de tiempo de cálculo.
- Tipo de Contorno. El tipo de límite empleado en la zona 2D, para el dominio de estudio ha sido "Critical Condition". Considera que el nivel del agua en borde del mallado 2D es superior al nivel medio del segmento del contorno que le afecta, el caudal de salida del polígono se calcula utilizando las ecuaciones del vertedero de pared gruesa sin pérdida de energía. Si el nivel es inferior, se considera un muro impermeable. Se recomienda usar este tipo de contorno si no se sabe lo que pasa con el agua.
- Ángulo mínimo: sirve par evitar que se creen triángulos de forma irregular.
- Rugosidad *n* de Manning: este valor afectará a todo el dominio del polígono de simulación, sin embargo pueden crearse polígonos adicionales con rugosidades diferentes. Así en el *Polígono de Simulación 2D* se considera en todo el dominio como zona de suelo agrícola, considerando un coeficiente de rugosidad con un valor $n=0,02 \text{ s/m}^{1/3}$.



Definition	
ID	Pol_Sim_Almunia_2D
Área Total (m2)	1745137.1 #D
Área Máxima del Triángulo (m2)	100.000 #D
Área Mínima del Elemento Virtual (m2)	25.000 #D
Tipo de Contorno	Critical Condti
Ángulo Mínimo (degree)	25.00 #D
Rugosidad (n de Manning)	0.0200

Ilustración 151: Parámetros Polígono de Simulación 2D.

12.8.1. Polígono de Rugosidad

En la zona de estudio se han considerado dos tipologías de suelo:

- *Suelo Urbano* con un coeficiente de rugosidad de Manning: $n = 0.016 \text{ s/m}^{1/3}$
- *Suelo Agrícola* con un coeficiente de rugosidad de Manning: $n = 0.02 \text{ s/m}^{1/3}$

El Polígono de Simulación 2D ha sido caracterizado con el coeficiente de rugosidad para suelo agrícola. Por ello, para definir la zona de suelo urbano del dominio de estudio, se crea un "Polígono de Rugosidad".

Antes de crear el polígono de rugosidad, es necesario crear una *zona de rugosidad*, para ello seleccionamos en la barra de herramientas la opción "Nueva tabla de otros objetos", y en la pestaña de *Zona de Rugosidad* se introduce el valor del coeficiente de rugosidad para la zona de *Suelo Urbano* indicado anteriormente.

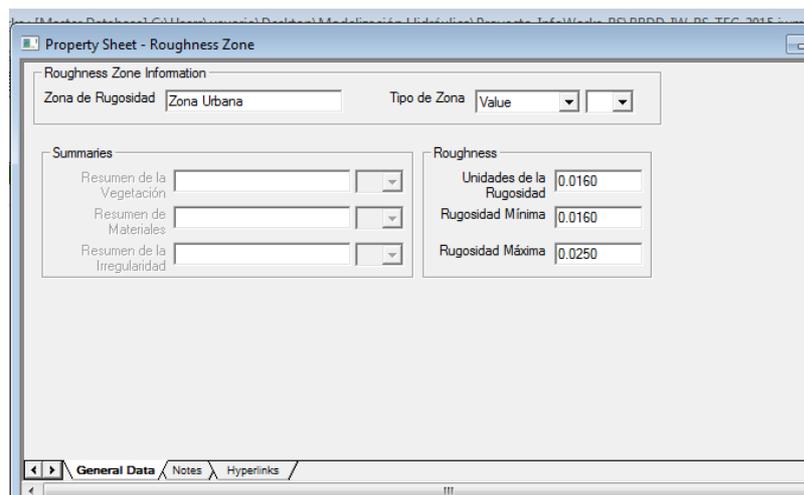


Ilustración 152: Zona de Rugosidad para Suelo Urbano.

Ahora ya se puede definir el dominio del *Polígono de Rugosidad* para *Zona Urbana*. En la siguiente imagen se muestra el *Polígono de Rugosidad* (en verde) para el suelo urbano en el interior del dominio del *Polígono de Simulación 2D*.

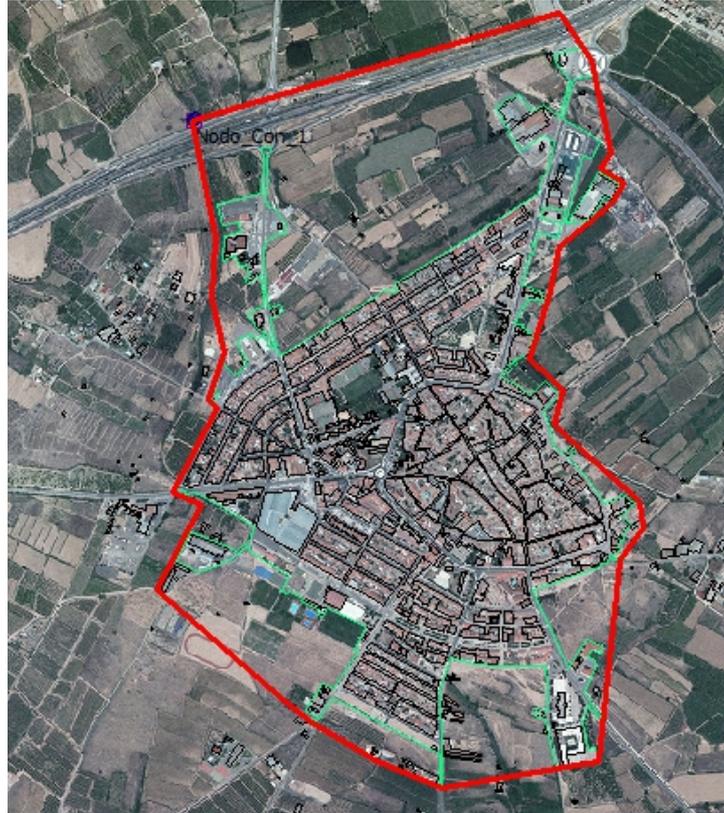


Ilustración 153: Polígono de Rugosidad (en verde) para suelo urbano sobre el Geoplan.

12.9. CONDICIONES DE CONTORNO

En primer lugar, se crea el Evento del modelo para almacenar la información, para ello botón derecho sobre Grupo de Modelos *Nuevo* > *Evento*.

El evento creado se arrastra sobre el GeoPlan, para que quede abierto junto con la red. A continuación, se crea desde la barra de herramientas un "Nuevo contorno 2D" que se sitúa en el punto de desagüe de la cuenca de estudio que corresponde a la sección de la Carretera de Tenerías. El contorno 2D será colineal al *Polígono de Simulación 2D* y se denomina *Hidrogramas*.



Ilustración 154: Contorno 2D en la sección correspondiente a la Carretera de Tenerías.

En la ventana de propiedades de condiciones de contorno 2D se selecciona el tipo de evento "Flow-Time", debido a que se quiere introducir los hidrogramas de entrada del modelo. Se crearán las siguientes condiciones de contorno:

- *Q10_Actual*
- *Q25_Actual*
- *Q100_Actual*
- *Q10_Futura*
- *Q25_Futura*
- *Q100_Futura*

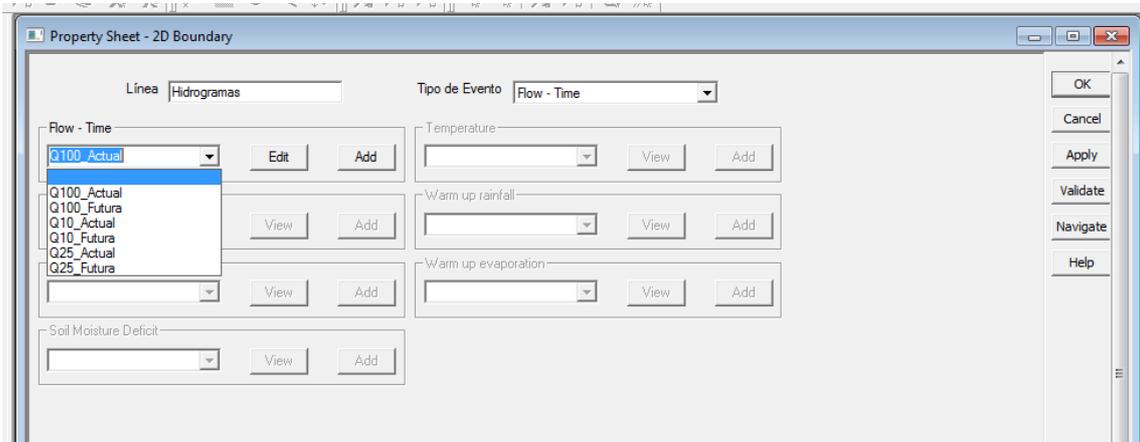


Ilustración 155: Ventana de propiedades de las Condiciones de Contorno 2D.

Para introducir los hidrogramas de cada condición de contorno se presiona en "Add".

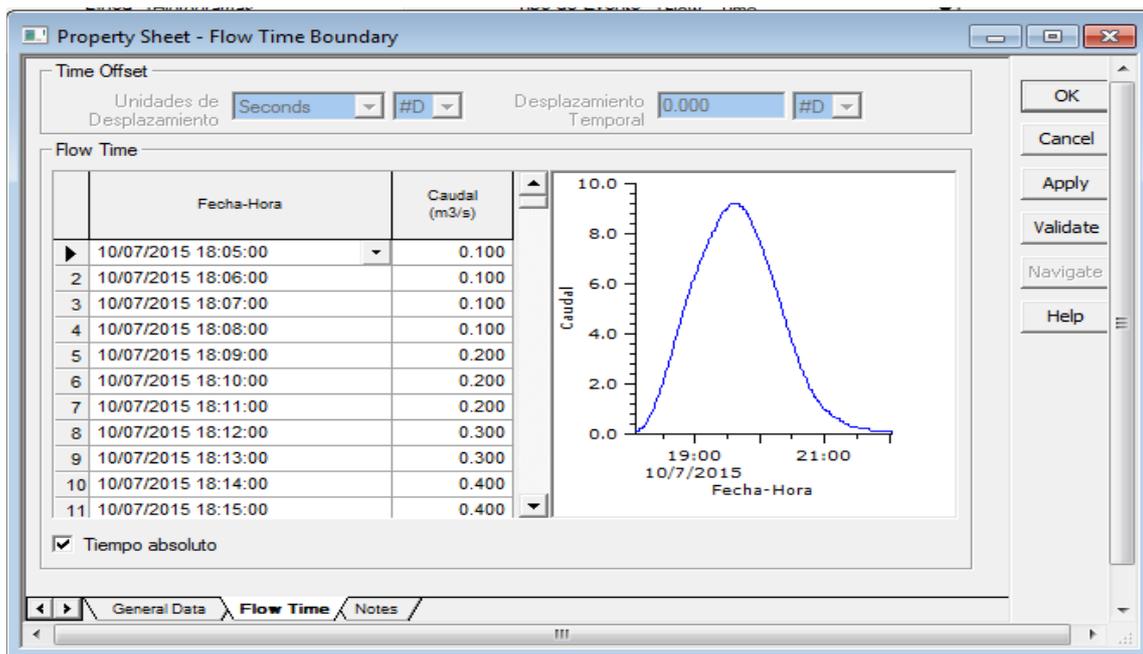


Ilustración 156: Condición de Contorno correspondiente al Hidrograma Actual T=100 años

Introducidos los hidrogramas y se establecen los parámetros generales de los mismos. Se selecciona como *Repetir* el modo "Extend", si el periodo de la simulación es mayor que el del hidrograma, prolongará a éste conforme al último valor de la serie del hidrograma. Por ello el último valor que se introduce en los hidrogramas debe ser 0 m³/s. La interpolación entre los valores del hidrograma será "Linear".

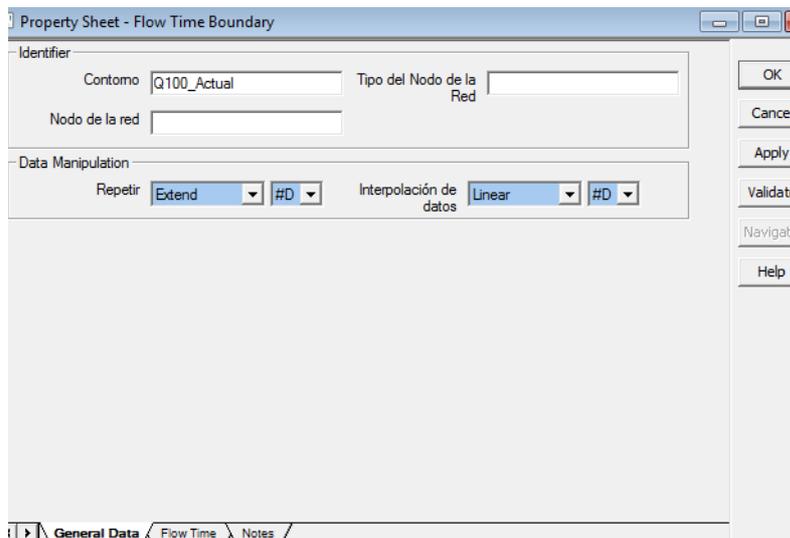


Ilustración 157: Parámetros generales de las condiciones de contorno.

12.10. CONEXIÓN 1D-2D

InfoWorks RS 2D está pensado para simular conjuntamente 1D+2D, por lo que se hace necesario introducir al menos un elemento unidimensional, aunque este elemento no afectará al modelo. Estos elementos unidimensionales podrían servir, por ejemplo, para caracterizar obras de drenaje o puentes, aunque en el modelo de estudio no es necesario.

Para ello, se crean dos nodos del tipo "Nodo de Conexión 1D-2D" para establecer la conexión unidimensional entre ellos.

Para realizar la conexión se utiliza la opción de la barra de herramientas "Nueva conexión", se elige como tipo de conexión "Orificio". Debido a que no es necesario una conexión 1D-2D para el presenta estudio, se definen los parámetros de la conexión 1D-2D para que no influya en el comportamiento del modelo.

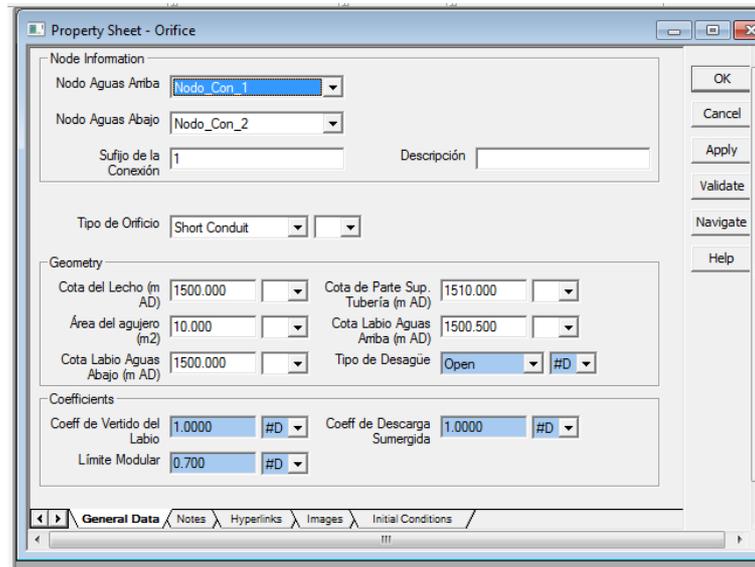


Ilustración 158: Parámetros de la conexión 1D-2D.

En la Ilustración 159 se presenta el emplazamiento de la conexión 1D-2D. Se ha elegido la ubicación a conciencia de manera que no se vea involucrada por la inundación del evento. Por ello se encuentra la conexión en la parte superior izquierda del *Polígono de Simulación 2D*, siendo esta zona una de las más elevadas del MDT.



Ilustración 159: Ubicación y visualización de Conexión 1D-2D sobre el Geoplan.

12.11. MALLADO BIDIMENSIONAL

Una vez creado el dominio de cálculo bidimensional y haberlo caracterizado con los diferentes valores de rugosidad, e introducido la capa con los *Voids* de la zona de estudio, puede generarse el mallado bidimensional, formado por elementos triangulares que constituyen las unidades del cálculo bidimensional.

Estas unidades de cálculo se crearán en base a los parámetros introducidos anteriormente en la creación del *Polígono de Simulación 2D*:

- Área máxima del triángulo
- Área mínima del elemento virtual
- Tipo de contorno
- Rugosidad n de Manning

Para generar el mallado se acude al Menú *Geo* y seleccionamos la opción "Polígono de Simulación de Malla 2D"; apareciendo la siguiente ventana emergente en la que seleccionaremos las siguientes características del modelo:

- Capa de *Voids* insertada anteriormente.
- El Modelo Digital del Terreno (MDT) insertado anteriormente a la Red.

- Líneas de rotura y muros (en el presente estudio no hay, así que se selecciona la opción *Ninguno*).

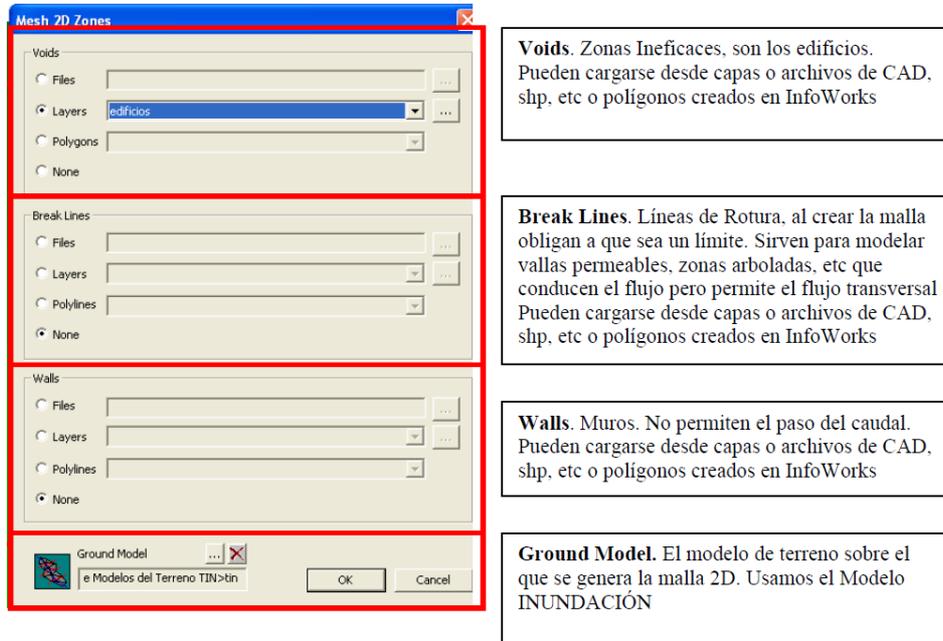


Ilustración 160: Polígono de simulación de malla 2D.

12.12. VALIDACIÓN DEL MODELO

Antes de ejecutar la simulación, es necesario validar la red, para comprobar que todos los elementos del modelo han sido definidos correctamente. En caso contrario, el programa muestra los errores y advertencias en aquellos elementos que considera que no han sido definidos correctamente.

La validación es un procedimiento de control de la red, necesario antes de lanzar una simulación. InfoWorks señala en una ventana los posibles errores encontrados en el proceso de validación (*en rojo*), "warnings" o advertencias (*en amarillo*) y sólo información importante (*en rosa*).

Los errores se tiene que solucionar para poder ejecutar el modelo (de otra manera la simulación no se puede iniciar); las advertencias (warning) sólo informan de situaciones anómalas que no impiden la simulación, pero que puede ser necesario corregir; la información (*en rosa*) aparece en caso de detectar valores poco recomendables en algún campo de datos, si bien tampoco impide ejecutar la simulación (se indica a modo de comprobación).

Para validar el modelo acudiremos a la opción de la barra de herramientas "Validar".

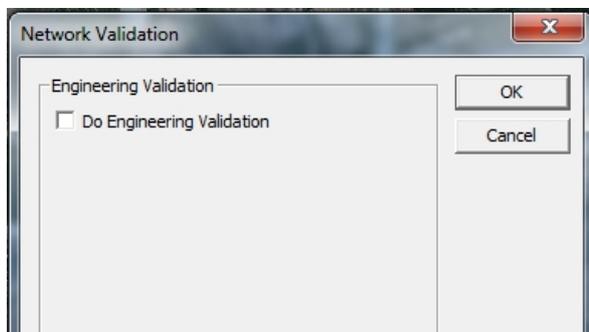


Ilustración 161: Validación de la Red.

12.13. EJECUCIÓN DE LA SIMULACIÓN

La ventana de diálogo de la simulación permite indicar la red a simular y las condiciones de contorno que se usarán, además de indicar los parámetros de simulación adicionales, y el tipo de simulación a realizar *permanente* o *variable*.

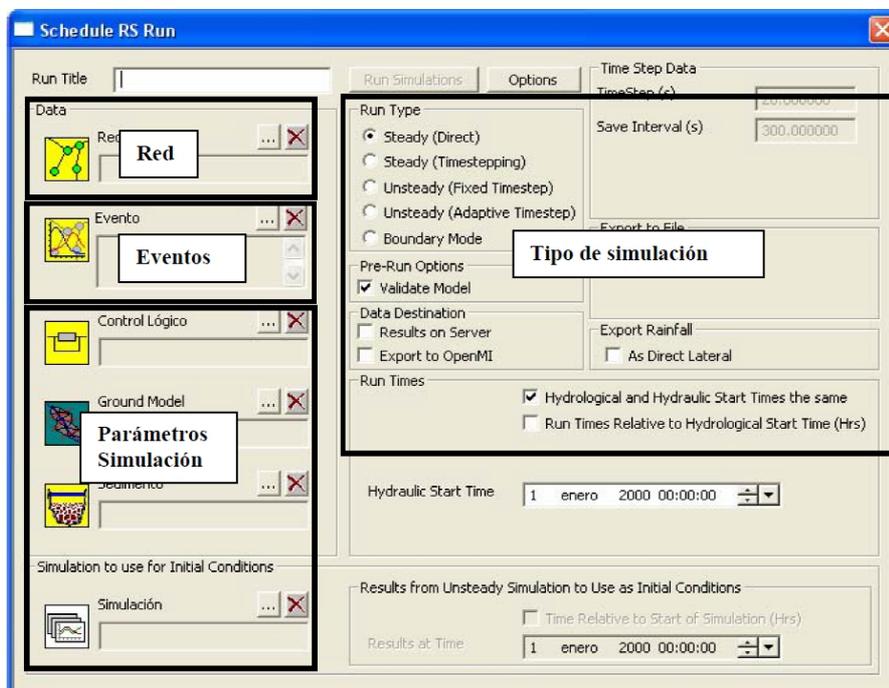


Ilustración 162: Ventana del diálogo de la simulación

Siguiendo la metodología de InfoWorks RS se crea un "Grupo de Simulaciones",



para ello botón derecho *sobre el Grupo de Modelos*> *Nuevo*> *Grupo de Simulaciones*. A continuación, botón derecho sobre el Grupo que se acaba de crear: *Nueva*> *Simulación*.

Se creará una simulación para cada condición de contorno, teniendo las siguientes simulaciones:

- *T10_años_Actual*
- *T25_años_Actual*
- *T100_años_Actual*
- *T10_años_Futura*
- *T25_años_Futura*
- *T100_años_Futura*

Sobre cada simulación creada, deben fijarse varios parámetros antes de ejecutar la simulación.

Los parámetros que se definirán serán los siguientes:

- En *Data* se introducirán los datos de la red, evento y MDT.
- En *Run Type*, se selecciona la opción "Unsteady (adaptative timestep)", para que la simulación se ejecute en *Régimen Variable*, con lapsos de tiempo de cálculo variables según los requerimientos en los sistemas de ecuaciones de Saint Venant a resolver.
- En *Timestep Data*, se selecciona un intervalo de tiempo de cálculo (timestep) pequeño, de 1 segundo, para que el cálculo sea estable. Cuanto más pequeño sea este valor, más estable es el sistema, pero tiene el inconveniente que el tiempo requerido para ejecutar la simulación es mayor. A la hora de la obtención de los resultados, se define un intervalo de guardado de datos (save interval) y de visualización de los datos de 300 segundos. El paso de tiempo mínimo y máximo se fija según estos valores.
- En *Run Times*, se definen los intervalos de tiempo en los que va a realizarse la simulación. Para ello se tiene en cuenta los tiempos introducidos en las condiciones de contorno, es decir, de los hidrogramas de salida de la cuenca de estudio, o mejor dicho de los hidrogramas de entrada en la red. Por ello se determina un tiempo de simulación suficiente para mostrar el comportamiento del modelo una vez deja de llegar caudal procedente de la cuenca de estudio.

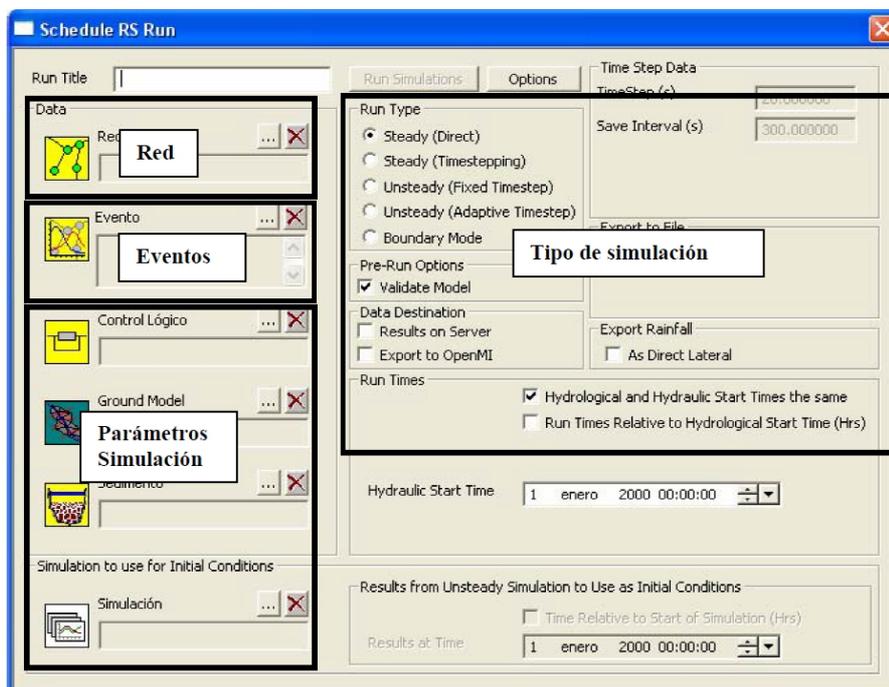


Ilustración 163: Ventana del diálogo de la simulación

Una vez introducidos los parámetros, se procede a ejecutar la simulación pulsando con el ratón "Run Simulation" ("Re-Run Simulation" en caso de que se haya simulado el modelo y se haya modificado alguno de los parámetros de la red).

Los parámetros de simulación fijados, han sido los mismos para todas las simulaciones, modificando únicamente las condiciones de contorno (los hidrogramas de entrada al dominio de estudio) fijadas a través del *Evento*, con lo que se diferencia entre los hidrogramas de entrada actuales y futuros (evaluando el efecto del cambio climático) para los periodos de retorno de 10, 25 y 100 años.

En la siguiente imagen se muestra como ejemplo la ventana de simulación para las Condiciones de Contorno correspondiente al hidrograma "Q10_Actual" sobre la que se introduce los valores de los parámetros definidos anteriormente.

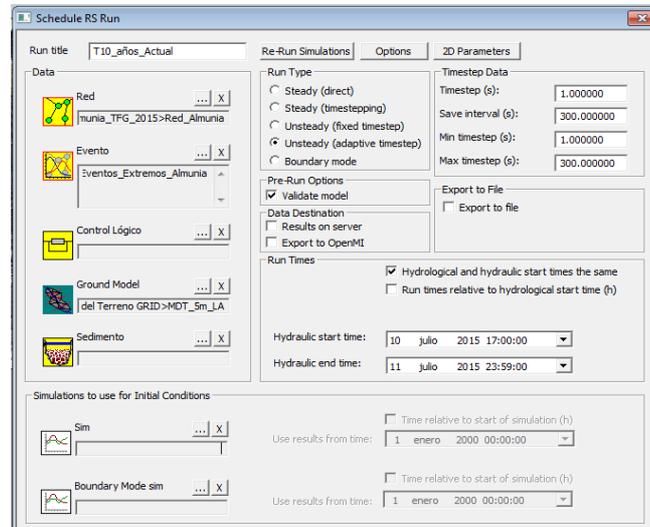


Ilustración 164: Información de la simulación.

13. MARCO LEGISLATIVO

A la hora de evaluar el riesgo de las inundaciones del modelo hidráulico en 2D, se va a tener como referencia el marco legal relativo a la evaluación y gestión de los riesgos de inundación, que se indica a continuación.

1. DIRECTIVA 2007/60/CE

La Directiva 2007/60/CE del Parlamento Europeo establece un marco para la evaluación y gestión de los riesgos de inundación con arreglo a la política comunitaria de aguas; teniendo en cuenta los efectos de las inundaciones pasadas, futuras y el efecto del cambio climático.

2. Directriz Básica de Inundaciones

Resolución de 31 de enero de 1995, de la Secretaría de Estado de Interior, por la que se dispone la publicación del acuerdo del Consejo de Ministros por el que se aprueba la Directriz Básica de Planificación de Protección Civil ante el Riesgo de Inundaciones. (BOE de 14 de febrero de 1995)

3. Real Decreto 903 2010

Real Decreto 903/2010, de 9 de julio, de evaluación y gestión de riesgos de inundación (BOE de 15 de julio de 2010, núm. 171). Este Real Decreto transpone a la legislación española la Directiva 2007/60 y, fundamentalmente, supone una ayuda a la coordinación de todas las administraciones, estableciendo una serie de elementos y estudios necesarios para una efectiva prevención y protección frente a los efectos adversos de las inundaciones.

Realizado una revisión bibliográfica del marco legal relativo a la evaluación y gestión de los riesgos de inundación, se va a señalar los aspectos más importante para el presenta estudio.

Se presta especial atención al *Real Decreto 903/2010, de evaluación y gestión de riesgos de inundación*, debido a que transpone a la *Directiva 2007/60*.

Por lo que se refiere al marco legal relativo a la gestión de los riesgos frente a las inundaciones, la Directiva 2007/60/CE, y su transposición en el Real Decreto 903/2010 se establece el siguiente calendario para reducir las consecuencias negativas de las inundaciones sobre la salud humana, el medio ambiente, el patrimonio cultural y la actividad económica:

- *Evaluación preliminar del riesgo de inundación (2011)*



- *Mapas de peligrosidad y riesgo de inundaciones* (2013)
- *Planes de gestión del riesgo de inundación* (2015)

Se definen según el RD 903/2010 varios conceptos que se consideran importantes en el presente estudio.

En primer lugar se define el término *Inundación*.

- **Inundación:** Anegamiento temporal de terrenos que no están normalmente cubiertos de agua ocasionadas por desbordamiento de ríos, torrentes de montaña y demás corrientes de agua continuas o intermitentes, así como las inundaciones causadas por el mar en las zonas costeras y las producidas por la acción conjunta de ríos y mar en las zonas de transición.

A continuación se definen dos conceptos de gran importancia a la hora de entender que son los *Mapas de peligrosidad y de riesgo de inundación* que en ocasiones pueden llevar a confusión y utilizar de forma incorrecta.

- **Peligrosidad por inundación:** Probabilidad de ocurrencia de una inundación, dentro de un período de tiempo determinado y en un área dada.
- **Riesgo de inundación:** Combinación de la probabilidad de que se produzca una inundación y de sus posibles consecuencias negativas para la salud humana, el medio ambiente, el patrimonio cultural, la actividad económica y las infraestructuras.

El primer paso antes de elaborar los *Mapas de peligrosidad y de riesgo de inundación* es la evaluación preliminar del riesgo de inundación en cada demarcación hidrográfica; con objeto de determinar aquellas zonas en las que existe un riesgo potencial de inundación significativo o en las cuales la materialización de ese riesgo puede considerarse probable.

El objetivo del RD es regular los procedimientos para realizar la evaluación preliminar del riesgo de inundación, los mapas de peligrosidad y riesgo y los planes de gestión de los riesgos de inundación en todo el territorio español.

El RD decreto será de aplicación a las inundaciones ocasionadas por desbordamiento de ríos, torrentes de montaña y demás corrientes de agua continuas o intermitentes, así como las inundaciones causadas por el mar en las zonas costeras y las producidas por la acción conjunta de ríos y mar. Cabe destacar, que el presente estudio se englobaría como una corriente de agua intermitente.

Se va a hacer hincapié al Capítulo III del RD dedicado a los *Mapas de*

peligrosidad y de riesgo de inundación, que es el objetivo del estudio realizado.

El RD contempla los siguientes escenarios para los *Mapas de peligrosidad por inundación*.

- a) **Alta probabilidad** de inundación, cuando proceda.
- b) **Probabilidad media** de inundación (periodo de retorno mayor o igual a 100 años).
- c) **Baja probabilidad** de inundación o escenario de eventos extremos (periodo de retorno igual a 500 años).

Se dispone de información relativa a los periodos de retorno estudiados de 10, 25 y 100 años. Estarían englobados en los escenarios de *Alta probabilidad* y *Probabilidad media*.

El RD define los contenidos que deben incluir los mapas de peligrosidad:

- a) Extensión la inundación y calados del nivel de agua.
- b) En los casos que proceda se incluirá información adicional relevante como los caudales y/o velocidades máximas alcanzadas por la corriente.
- c) Las inundaciones causadas por las aguas costeras y de transición se reflejará el régimen de oleaje y de mareas, así como las zonas sometidas a procesos erosivos y las tendencias en la subida del nivel medio del mar como consecuencia del cambio climático.

El RD determina que los *Mapas de riesgo de inundación* incluirán, como mínimo, la siguiente información para los escenarios indicados anteriormente.

- a) Número indicativo de habitantes que pueden verse afectados.
- b) Tipo de actividad económica de la zona que puede verse afectada.
- c) Instalaciones industriales a que se refiere el anejo I de la Ley 16/2002, de 1 de julio, de Prevención y Control Integrado de la Contaminación que puedan ocasionar contaminación accidental en caso de inundación así como las estaciones depuradoras de aguas residuales.
- d) Zonas protegidas para la captación de aguas destinadas al consumo humano, masas de agua de uso recreativo y zonas para la protección de hábitats o especies que pueden resultar afectadas.
- e) Cualquier otra información que se considere útil, como la indicación de zonas en las que puedan producirse inundaciones con alto contenido de sedimentos transportados y flujos de derrubios e información sobre otras fuentes importantes de contaminación, pudiendo también analizarse la infraestructura viaria o de otro tipo que pueda verse afectada.

14. ESTADO DEL ARTE SOBRE CRITERIOS DE RIESGO A CONSIDERAR PARA EL FLUJO EN ZONA URBANA

Eventos extremos de lluvia combinados con la entrada en carga del sistema de drenaje pueden producir inundaciones de áreas urbanas y problemas asociados a la circulación vehicular y peatonal.

Se consideran dos casos específicos como posibles causas de pérdidas de vidas humanas durante eventos de lluvia extremos:

- Vuelco y/o deslizamiento de peatones y vehículos.
- Peligro de quedarse atrapado en vehículos y edificios.

Para el riesgo de vuelco y/o deslizamiento se han realizado estudios experimentales para proponer un límite de seguridad del producto entre el calado y (m) y la velocidad v (m/s) en un persona adulta entre 0,5 y 1 m²/s.

14.1. NIVEL DE SEGURIDAD DE UNA CALLE URBANA

En la actualidad se define el nivel de seguridad de una calle durante un suceso de lluvia con un determinado periodo de retorno, a través de los valores máximo de dos parámetros significativos del flujo:

- Calado máximo (y_{max})
- Velocidad máxima del flujo (v_{max})

Cada Administración Pública tiene el deber de fijar un nivel de seguridad para sus calles urbanas durante eventos de lluvia extremos.

14.2. ESTADO DEL ARTE RELATIVO A CRITERIOS DE RIESGO ASOCIADOS A ESCORRENTÍA EN MEDIO URBANO

En muchos lugares el valor máximo del calado coincide con aquel valor que no permita el ingreso del agua pluvial en comercios o viviendas particulares.

A continuación se propone una tabla con los valores de máximo calado encontrados a nivel mundial (Russo, Gómez, Macchione, & de Recerca FLUMEN, s. f.)

Estado del arte sobre criterios de riesgo a considerar para el flujo en zona urbana

con algunas informaciones sobre la tipología y el ámbito del estudio. Gran parte de estos criterios se refieren a inundaciones en cuencas naturales, al tránsito de avenidas en cauces o a desbordamiento de ríos en las llanuras de inundación.

Fuente	Referencia	y _{máx} (m)	Justificación del criterio	Ámbito de estudio
Manual de Drenaje de la Ciudad de Denver (EEUU)	Wright-Mc Laughlin, 1969	0.45	Altura máxima próxima al límite a partir del cual un vehículo empieza a perder adherencia con el pavimento y a flotar	Urbano
Monografía Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos (España)	Témez, 1992	1.00	Altura máxima para una situación de peligro para individuos en cauces naturales y llanuras de inundación	Rural
Manual de Drenaje del Contado de Clark (EEUU)	CCRFC, 1999	0.30	Límite para que la escorrentía no sobrepase el bordillo	Urbano
Criterio de Mendoza (Argentina)	Nanía, 1999	0.30	Altura máxima para evitar el ingreso de agua pluvial en viviendas y comercios	Urbano
Consejo para la Agricultura y la Gestión de los Recursos (Australia y Nueva Zelanda)	ARMC, 2000	1.20 – 1.50	No se refiere sólo a la estabilidad de los individuos sino también a daños generales que la inundación puede provocar.	Urbano
Riesgos hidrometeorológico (Suiza)	Belleudy, 2004	0.00 - 1.00	Este criterio propone varios calados máximo en función del uso del suelo y se refiere a inundaciones provocadas por desbordamiento de ríos	Urbano / Rural
Picba07: Plan Integral de Alcantarillado de Barcelona 2007	CLABSA, 2007	0.06	Se admite, para una lluvia con periodo de retorno de 10 años, tener los dos carriles laterales inundados.	Urbano

Tabla 45: Criterio de riesgo de calado máximo: referencias a nivel mundial

En relación a los criterios asociados a velocidades máximas con independencia del calado, el estado del arte actual ofrece aún menos referencias que en el caso anterior. Existen estudios desarrollados para medios rurales como el de Témez, que proponen una velocidad límite 1 m/s; por no se pueden emplear para el estudio del comportamiento hidráulico de superficies urbanas. Debido a los diferentes coeficientes de rugosidad dependiendo de si se trata de medio urbano, rural o en cuencas naturales; se encontrarán calados de centímetros frente a niveles de metros en el caso de cuencas naturales. Sin embargo en medio urbano se pueden producir velocidades de varios metros por segundo, especialmente en caso de precipitaciones extremas y en calles de gran pendiente se pueden alcanzar velocidades de 3, 4 ó más m/s.

A continuación se presenta una tabla sobre el criterio de riesgo de velocidad máxima con algunas referencias encontradas en literatura técnica.

Fuente	Referencia	$v_{m\acute{a}x}$ (m/s)	Justificación del criterio	Ámbito de estudio
Monografía Colegio de Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos (España)	Témez, 1992	1.00	Velocidad límite para que un individuo pueda vencer a nado la resistencia del flujo	Rural
Consejo para la Agricultura y la Gestión de los Recursos (Australia y Nueva Zelanda)	ARMC, 2000	1.50	Velocidad límite, para calados pequeños, que supone la pérdida de capacidad por parte de un individuo de caminar por el agua	Urbano
Riesgo hidro-meteorológico (Suiza)	Belleudy, 2004	0.25 - 1.00	Propone varias velocidades máximas en función del uso del suelo y se refiere a inundaciones provocadas por desbordamiento de ríos	Urbano / Rural

Tabla 46: Criterio de riesgo de velocidad máxima: referencias a nivel mundial

Por otra parte, también se proponen otros criterios que consisten en considerar el producto de los calados y velocidades del flujo.

Algunos autores proponen resultados hallados a través de estudios experimentales basados sobre el análisis de estabilidad de peatones frente a corrientes de flujo en canales. Este flujo puede generar una fuerza y un momento que pueden provocar fenómenos de deslizamiento, arrastre y vuelco sobre los peatones. Los modelos utilizados en los análisis experimentales proporcionan resultados más precisos para medio rural y cauces naturales. Otros estudios han abordado el problema bajo un punto de vista teórico considerando un cierto grado de aproximación en el uso de diferentes coeficientes de seguridad y de formas.

En la tabla se presenta las referencias encontradas a nivel mundial sobre criterios de riesgo basados en la consideración del producto de los calados y velocidades del flujo en medio urbano.

Fuente	Referencia	v·y (m ² /s)	v ² ·y (m ³ /s ²)	Justificación del criterio	Ámbito de estudio
Agencia Federal Americana para la Gestión de Emergencias (EEUU)	FEMA, 1979	0.56	-	El valor del producto representa la condición límite a partir de la cual un peatón adulto empieza a perder estabilidad (el estudio argumenta que para niños este producto bajaría sensiblemente) límite representa el comienzo	Urbano / Rural
Estudio sobre la estabilidad humana en zonas de riesgo (EEUU)	Abt, 1999	0.70 2.12	-	Los valores del producto límite v·y, hallados a través de test experimentales, varían dependiendo de la altura y del peso de las personas (a mayor producto peso por altura, mayor estabilidad)	Urbano / Rural
Monografía Colegio de Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos (España)	Témez, 1992	0.50	-	Altura máxima para individuar una situación de peligro para individuos en cauces naturales y llanuras de inundación	Rural
Manual de Drenaje del Contado de Clark (EEUU)	CCRFGD, 1999	0.55	-	Altura máxima para garantizar que la escorrentía no sobrepase el bordillo de la acera	Urbano
UPC (España)	Nanía, 1999	-	1.00	Estudio teórico de la estabilidad de un peatón frente al fenómeno del deslizamiento	Urbano
Proyecto Europeo RESCDAM (Finlandia)	Reiter, 2000	0.25 0.70	-	Este criterio se refiere a experiencias experimentales. Los dos valores presentados se refieren a pérdida de estabilidad frente al flujo para individuos adultos y niños	Rural
Curso de Hidrología Urbana (España)	Gómez et al. 2008	0.45	-	Estudio teórico de la estabilidad de un peatón frente al fenómeno del vuelco	Urbano

Tabla 47: Criterios de riesgo basados en la consideración conjunta de calados y velocidades

Para expresar el nivel de peligrosidad, diversos autores proponen el rango 0.5-1.0 para el producto de calado por velocidad. Sin embargo, muchas de las expresiones son planteadas para inundaciones de tipo fluvial, con lo que no sería adecuado utilizarlas en zonas urbanas con superficies que presenten rugosidades inferiores, donde se producen menores calados y velocidades más elevadas (Martínez-Gomariz, Gómez, & Russo, s. f.). En zonas urbanas es posible demostrar que la estabilidad de los peatones depende de los productos velocidad por calado y velocidad al cuadrado por calado.

En la imagen gráfica se representan las dos funciones como umbral de seguridad para la estabilidad de peatones.

- $v \cdot y = 0,5 \text{ m}^2/\text{s}$
- $v \cdot y = 0,2 \text{ m}^2/\text{s}$

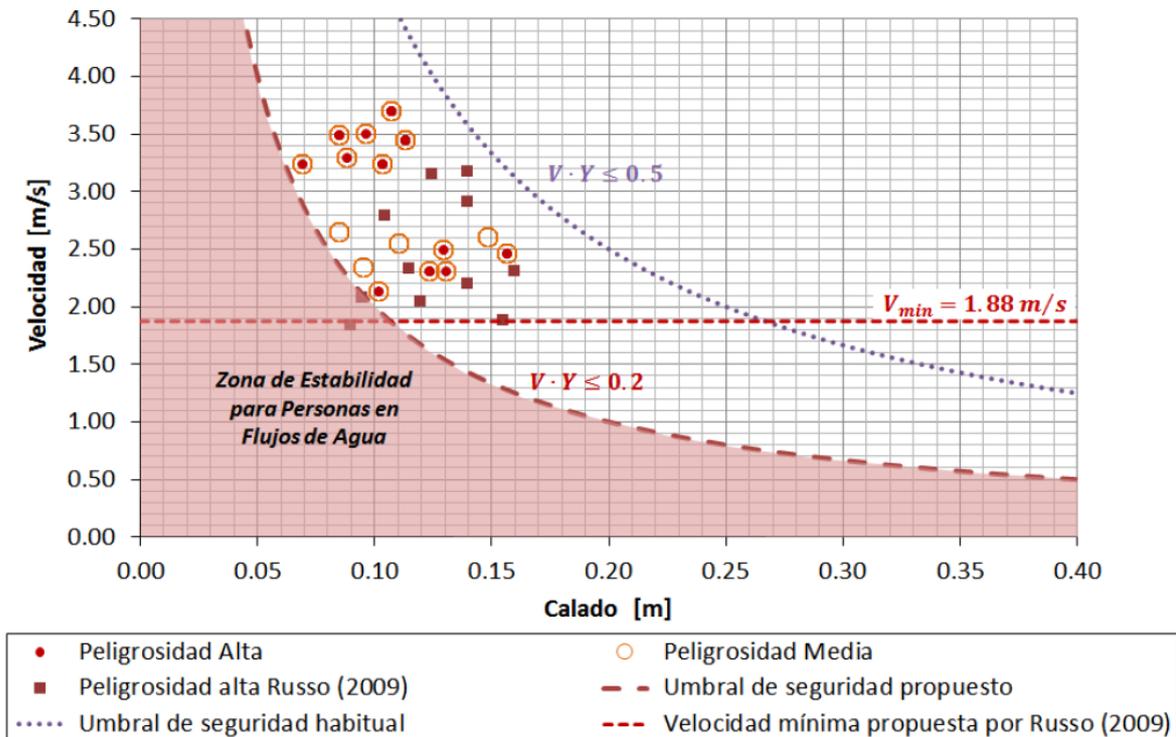


Ilustración 165: Representación de las condiciones hidráulicas (velocidad y calado) que han generado situaciones de peligrosidad media y alta, definición de la función de seguridad ($V \cdot Y \leq 0.2$) y representación del criterio de seguridad habitual para personas ($V \cdot Y \leq 0.5$)

Un reciente estudio propone un umbral de seguridad ($v \cdot y < 0,2$) mucho más restrictivo que el umbral de seguridad habitual utilizado ($v \cdot y < 0,5$) (Martínez-Gomariz et al., s. f.). Finalmente el estudio concluye que los criterios de evaluación de la peligrosidad del flujo en calles deben ser mucho más restrictivos que los que se venían teniendo en cuenta hasta el momento.

Por otra parte, un estudio realizado por el Grupo de Investigación FLUMEN de la Universidad Politécnica de Barcelona (UPC) propone gráficamente los criterios de riesgo utilizados para el diseño del drenaje urbano en una cuenca de Barcelona (Gómez & Russo, 2009).

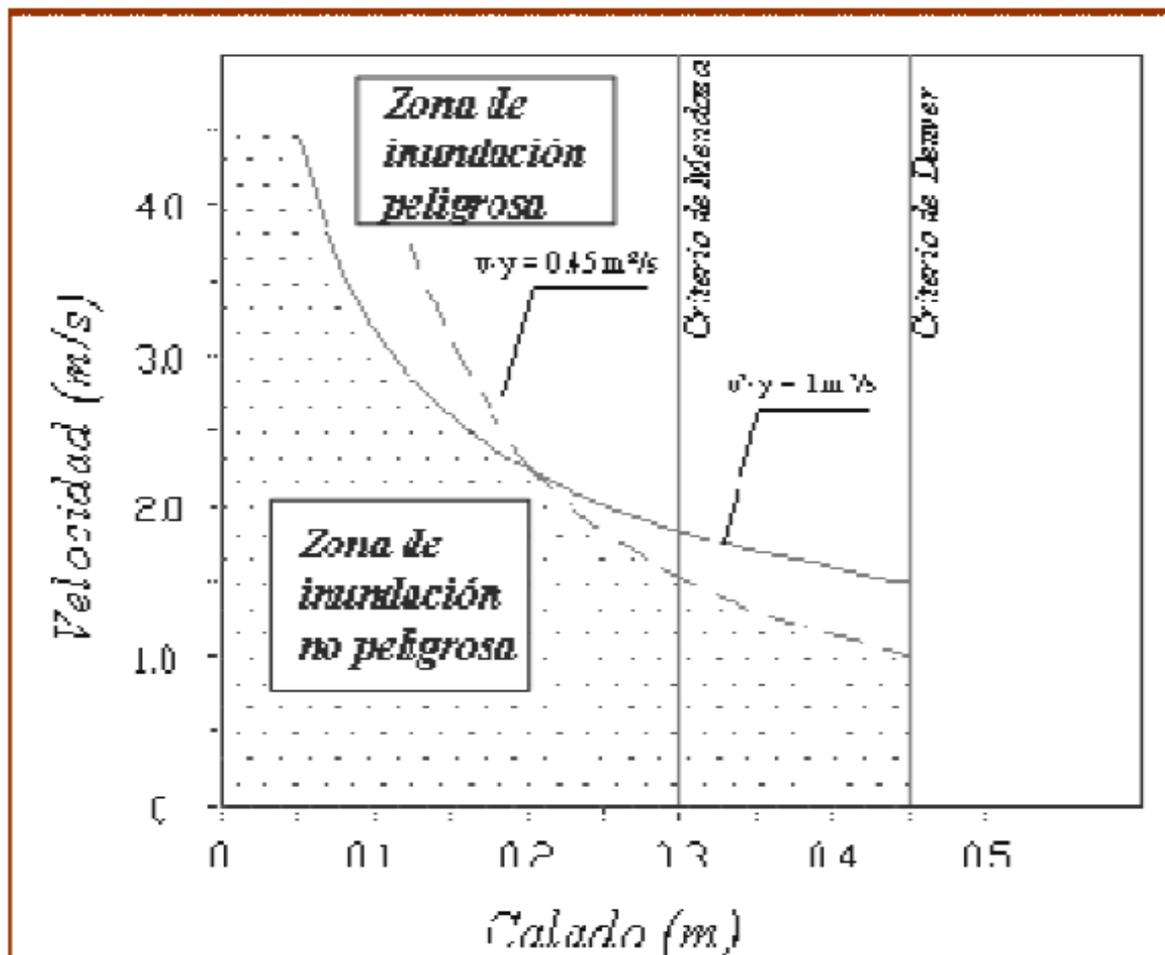


Ilustración 166: Criterios de riesgo para flujo en calles

Para caracterizar el nivel de riesgo asociado a las condiciones del flujo y al comportamiento de cada individuo, se han considerado las siguientes situaciones.

Condiciones de riesgo alto (*high hazard conditions*)

- El individuo presentaba claros síntomas de inestabilidad (por ejemplo el individuo no podía permanecer estable estando parado de pie o circulando por la plataforma o había sido arrastrado por el flujo, etc.)
- El individuo presentaba clara pérdida de maniobrabilidad (por ejemplo el individuo no podía acabar el protocolo de ensayo correctamente sin agarrarse a los cables de seguridad, etc.)

Condiciones de riesgo medio (*medium hazard conditions*)

- El individuo mostraba significativas pérdidas de estabilidad (por ejemplo el individuo no podía moverse de forma correcta o hacía gran esfuerzo para permanecer estable)

- El presentaba pérdida significativa de maniobrabilidad (por ejemplo el individuo mostraba evidentes dificultades para acabar el ensayo)

Condiciones de riesgo leve (*low hazard conditions*)

- El individuo se agarraba de forma instintiva al cable de seguridad
- El individuo mostraba dificultades al entrar al agua y bajar la acera
- El individuo mostraba pequeños problemas de estabilidad al circular por la plataforma

Se han definido los umbrales de velocidad para cada situación de riesgo (alto, medio y leve) definidas anteriormente:

- Riesgo alto: $v > 1.88 \text{ m/s}$
- Riesgo medio: $1.56 \text{ m/s} < v < 1.88 \text{ m/s}$
- Riesgo leve: $1.51 \text{ m/s} < v < 1.56 \text{ m/s}$
- Zona de seguridad: $v < 1.56 \text{ m/s}$

14.3. CRITERIOS DE PELIGROSIDAD ADOPTADOS

Se establecen tres criterios de riesgo en el presente estudio:

- Calado (y_{\max})
- Velocidad (v_{\max})
- Producto de calado y velocidad ($(v.y)_{\max}$)

En el caso del **Calado** se establece como criterio un calado máximo de 10 cm, que corresponde a la altura de las aceras. Calado superiores pueden empezar a aparecer problemas de inundación de edificios y garajes.

En el caso de la **Velocidad** se relaciona con la seguridad de los peatones frente al flujo. Se establece el criterios de riesgo referentes a la estabilidad de los peatones propuesto por el Grupo de Investigación FLUMEN (Gómez & Russo, 2009) citado en el anterior apartado, realizando alguna modificación, considerando *Riesgo alto* y *Riesgo medio*, y la *Zona de seguridad* por debajo de 1.51 m/s .

- Riesgo alto: $v > 1.88 \text{ m/s}$
- Riesgo medio: $1.51 \text{ m/s} < v < 1.88 \text{ m/s}$
- Zona de seguridad: $v < 1.51 \text{ m/s}$

En el caso del **Producto de calado y velocidad** se emplea el criterio propuesto por el reciente estudio (Martínez-Gomariz et al., s. f.) donde se determina un nuevo

Evaluación de los efectos del cambio climático en los problemas de inundación de la villa de La Almunia de Doña Godina (Zaragoza)



Estado del arte sobre criterios de riesgo a considerar para el flujo en zona urbana

umbral de seguridad para la estabilidad de los peatones más restrictivo. Considerando que valores de v y superiores a $0,2 \text{ m}^2/\text{s}$ generan situaciones de riesgo para los peatones frente al vuelco, arrastre y deslizamiento.



15. ANÁLISIS DE RESULTADOS

A la hora de realizar el análisis de resultados se han elaborado diferentes mapas de peligrosidad con temáticas específicas para los criterios de peligrosidad adoptados.

A parte de el análisis gráfico con los mapas de peligrosidad, también se ha analizado de forma numérica el comportamiento hidráulico del modelo, a partir de una series de puntos de análisis repartidos por el dominio de estudio en aquellas zonas más conflictivas.

En primer lugar se ha realizado la comparación de la superficie inundada de forma gráfica e intuitiva en los siguientes mapas de peligrosidad para los periodos de retorno de 10, 25 y 100 años considerando el escenario Actual y el escenario Futuro derivado de evaluar los efectos del cambio climático en los problemas de inundación de la villa de La Almunia de Doña Godina.



Ilustración 167: Superficie inundable para hipótesis actual y futura; T=10 años.



Ilustración 168: Superficie inundable para hipótesis actual y futura; T=25 años.



Ilustración 169: Superficie inundable para hipótesis actual y futura; T=100 años.

	T=10 años		T=25 años		T=100 años	
	Superficie Actual	Superficie Futura	Superficie Actual	Superficie Futura	Superficie Actual	Superficie Futura
Superficie Inundación (ha)	11,53	11,76	15,30	16,14	17,82	19,10
Diferencia de Superficies inundadas (%)	1,92%		5,21%		6,68%	

Tabla 48: Superficie inundada para las hipótesis Actual y Futura para cada período de retorno.

A continuación se evaluarán las variables hidráulicas definidas anteriormente en los criterios de peligrosidad. La primera de las variables que se evalúa con los mapas de peligrosidad es el *Calado*. La temática crada para evaluar el *Calado* ha sido la definida anteriormente, es decir, determinar la superficie inundada que se encuentra con un calado superior a los 10 cm, identificada en el mapa por el color *ROJO*. En color *AMARILLO* se encuentra la superficie inundada con calados entre 1mm y 10 cm.

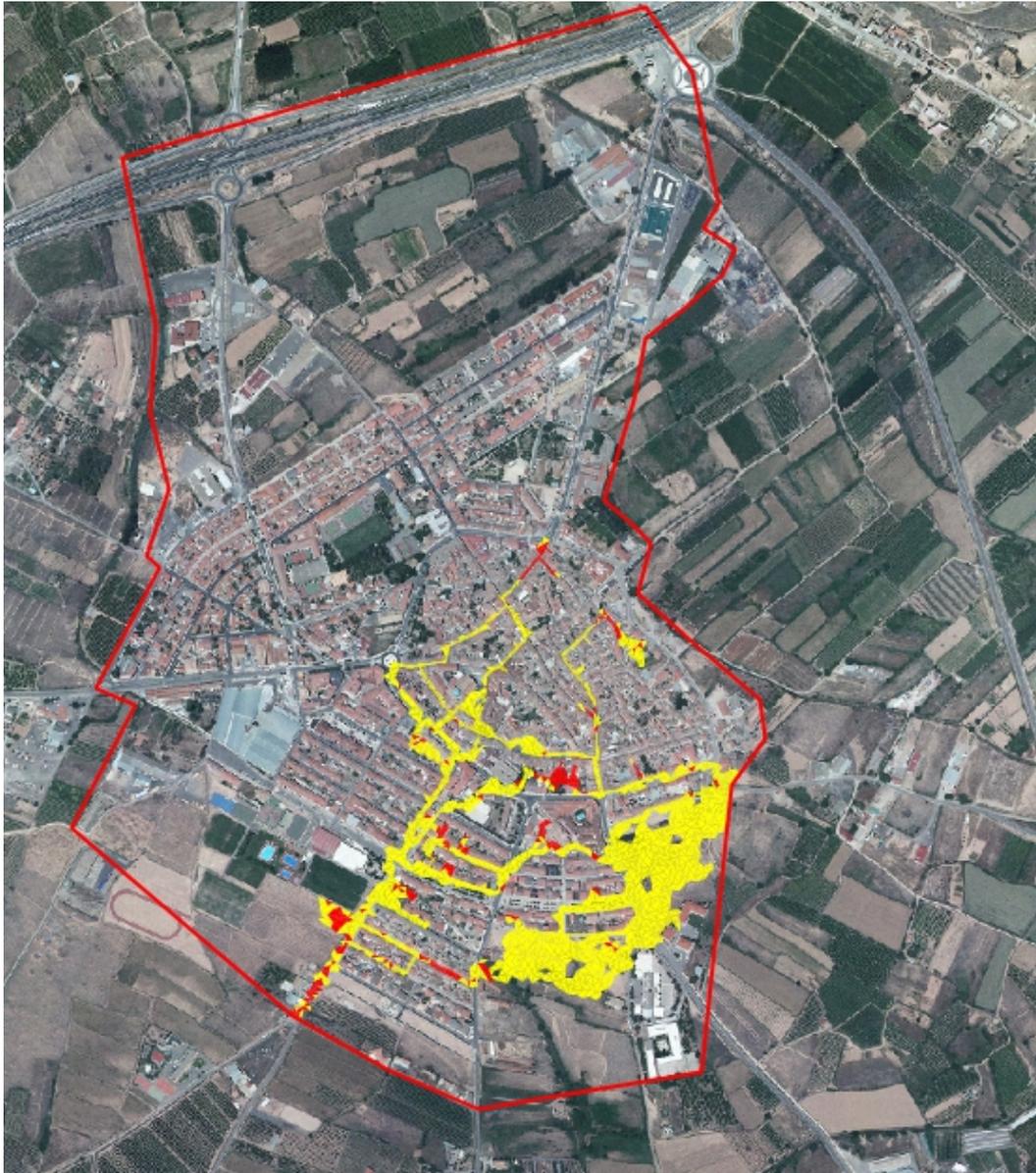


Ilustración 170: Mapa de peligrosidad de calado para la hipótesis Actual; T=10 años.

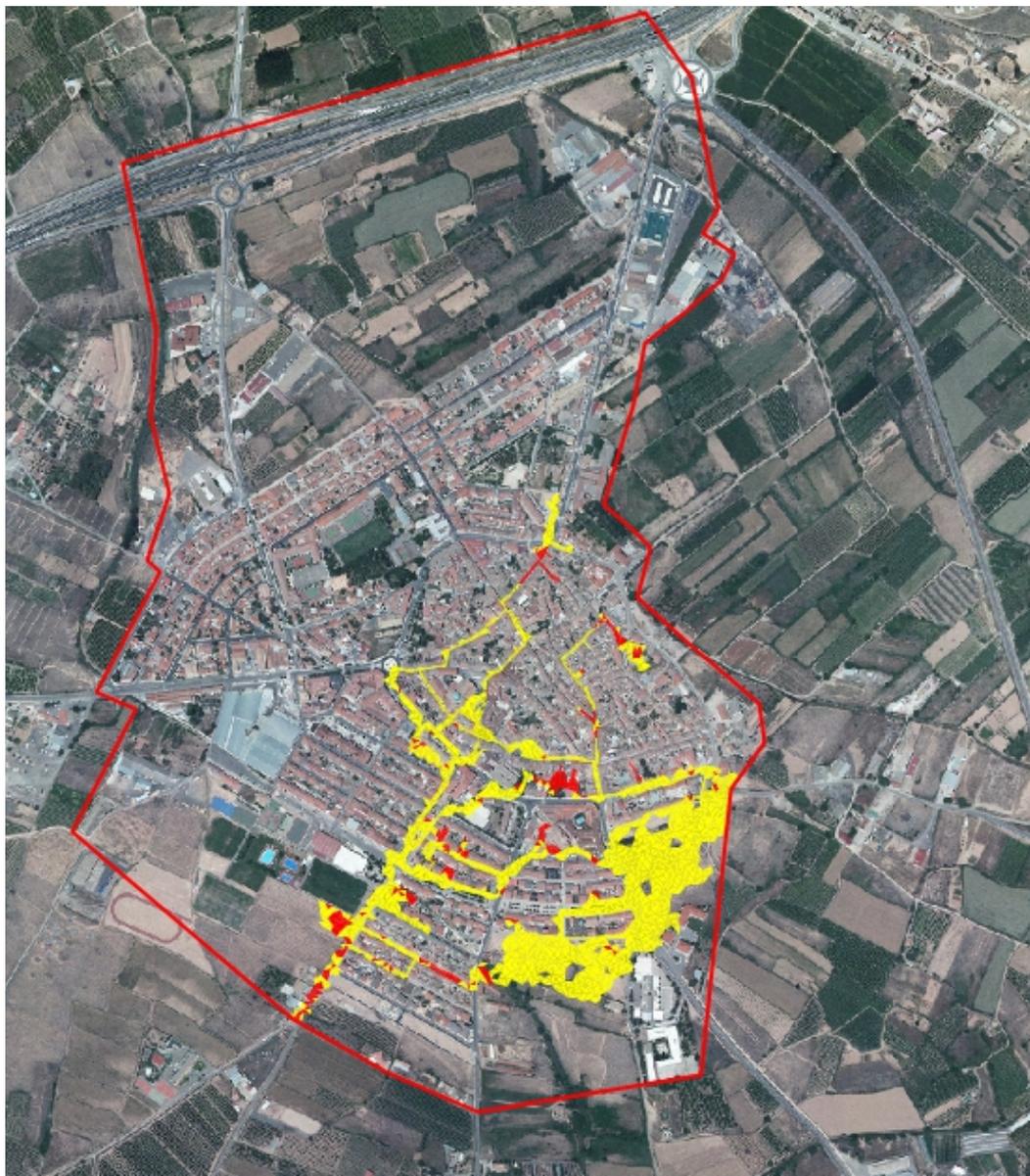


Ilustración 171: Mapa de peligrosidad de calado para la hipótesis Futura; T=10 años.

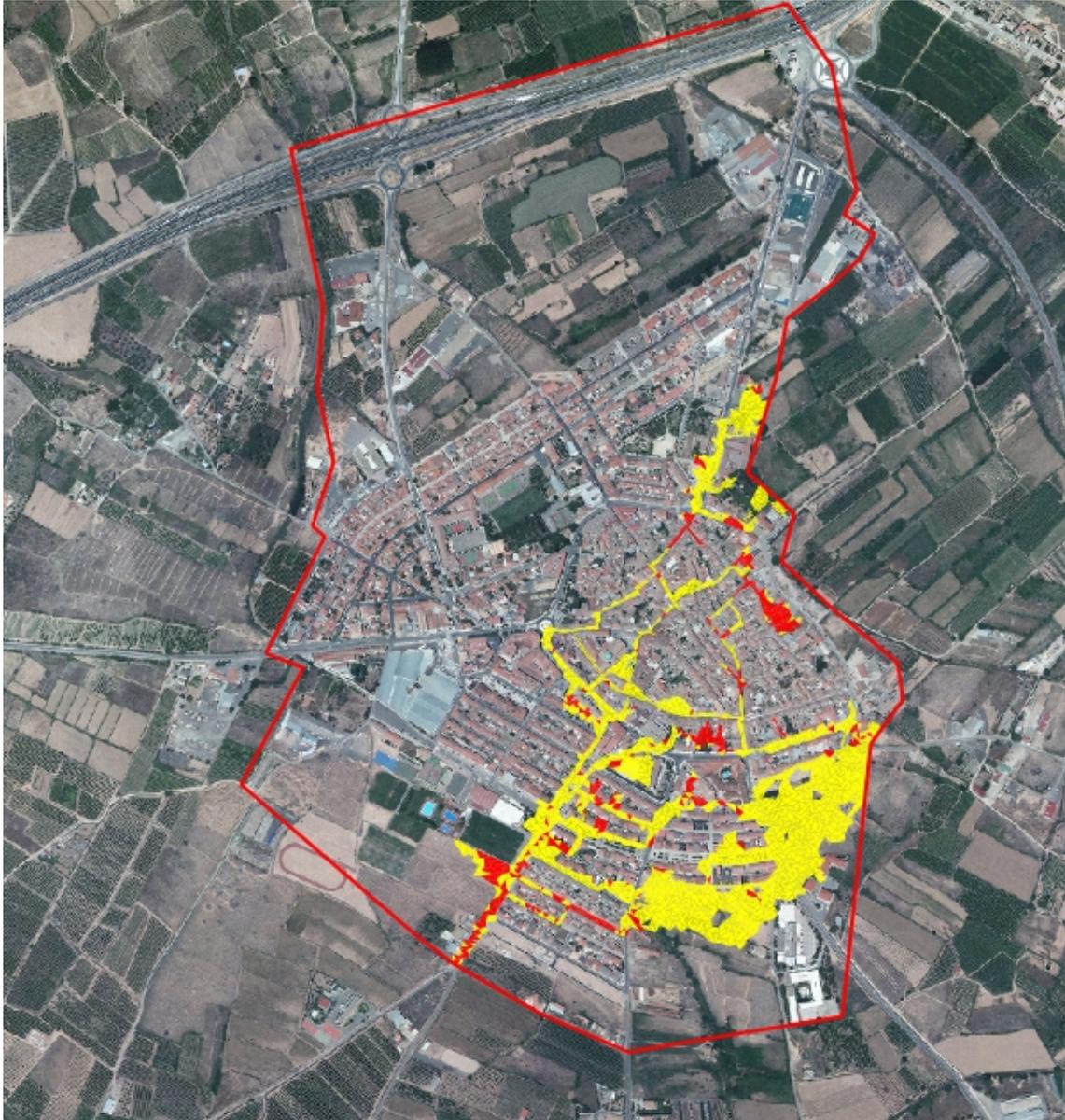


Ilustración 172: Mapa de peligrosidad de calado para la hipótesis Actual; T=25 años.

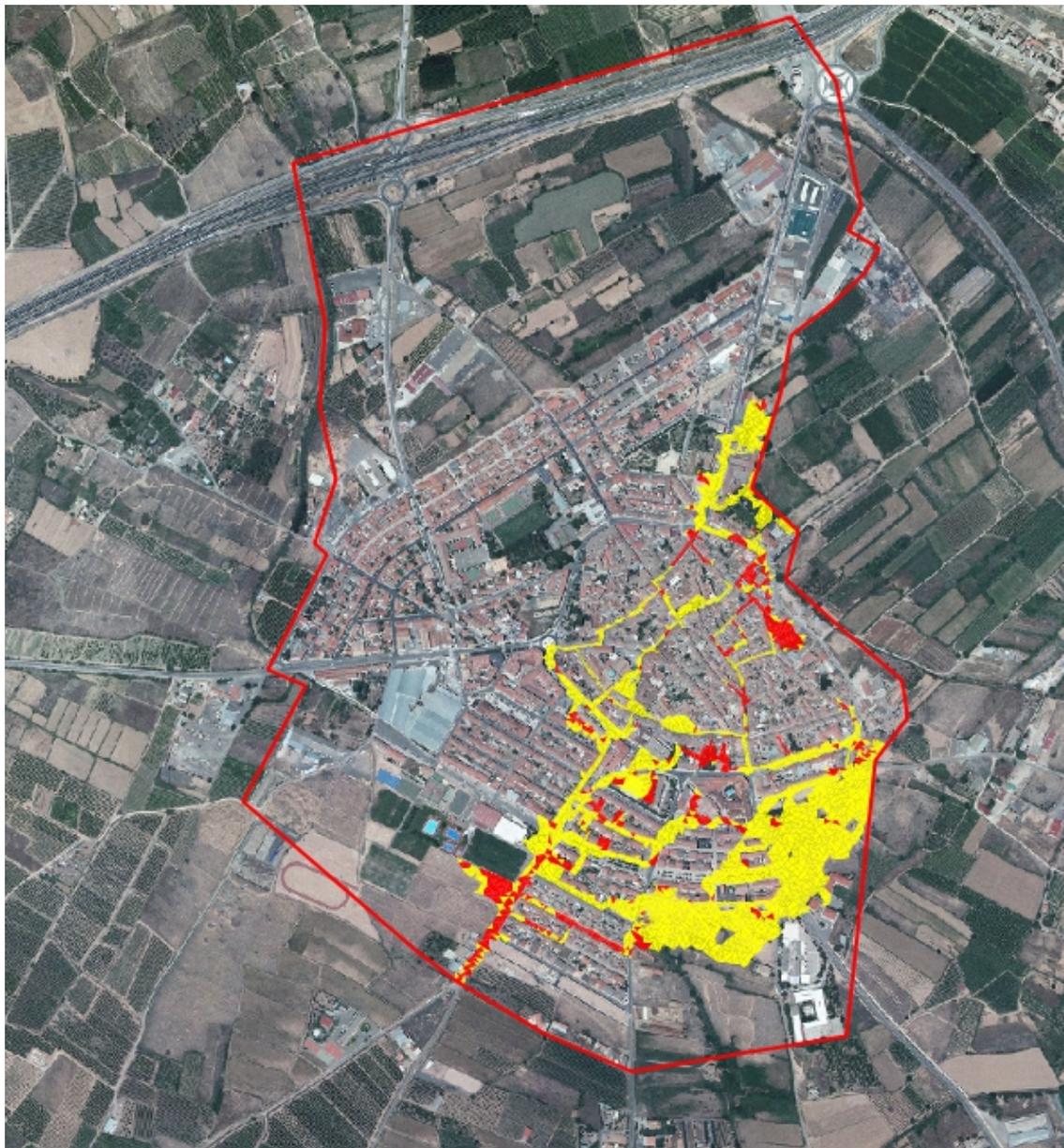


Ilustración 173: Mapa de peligrosidad de calado para la hipótesis Futura; T=25 años.

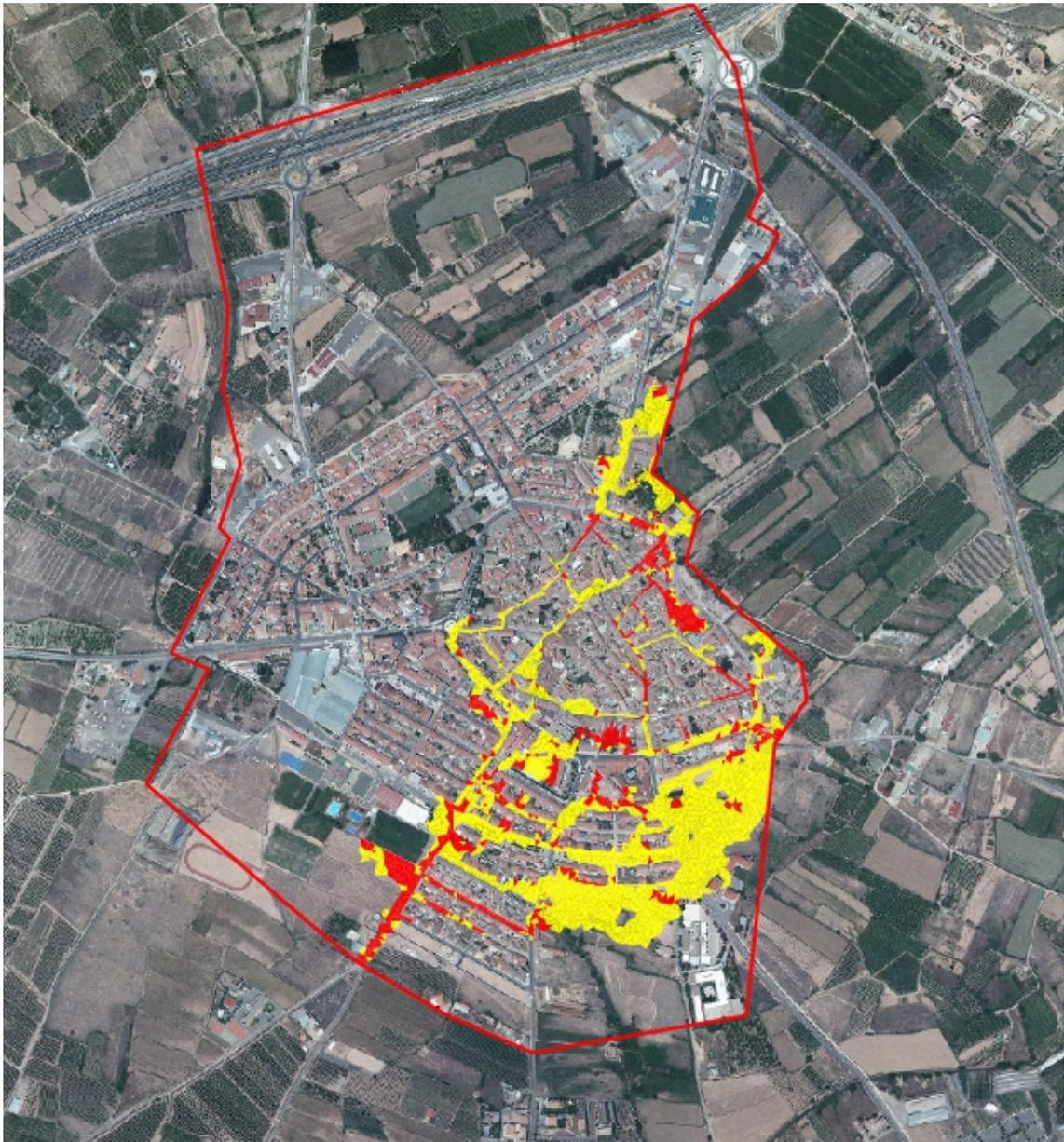


Ilustración 174: Mapa de peligrosidad de calado para la hipótesis Actual; T=100 años.

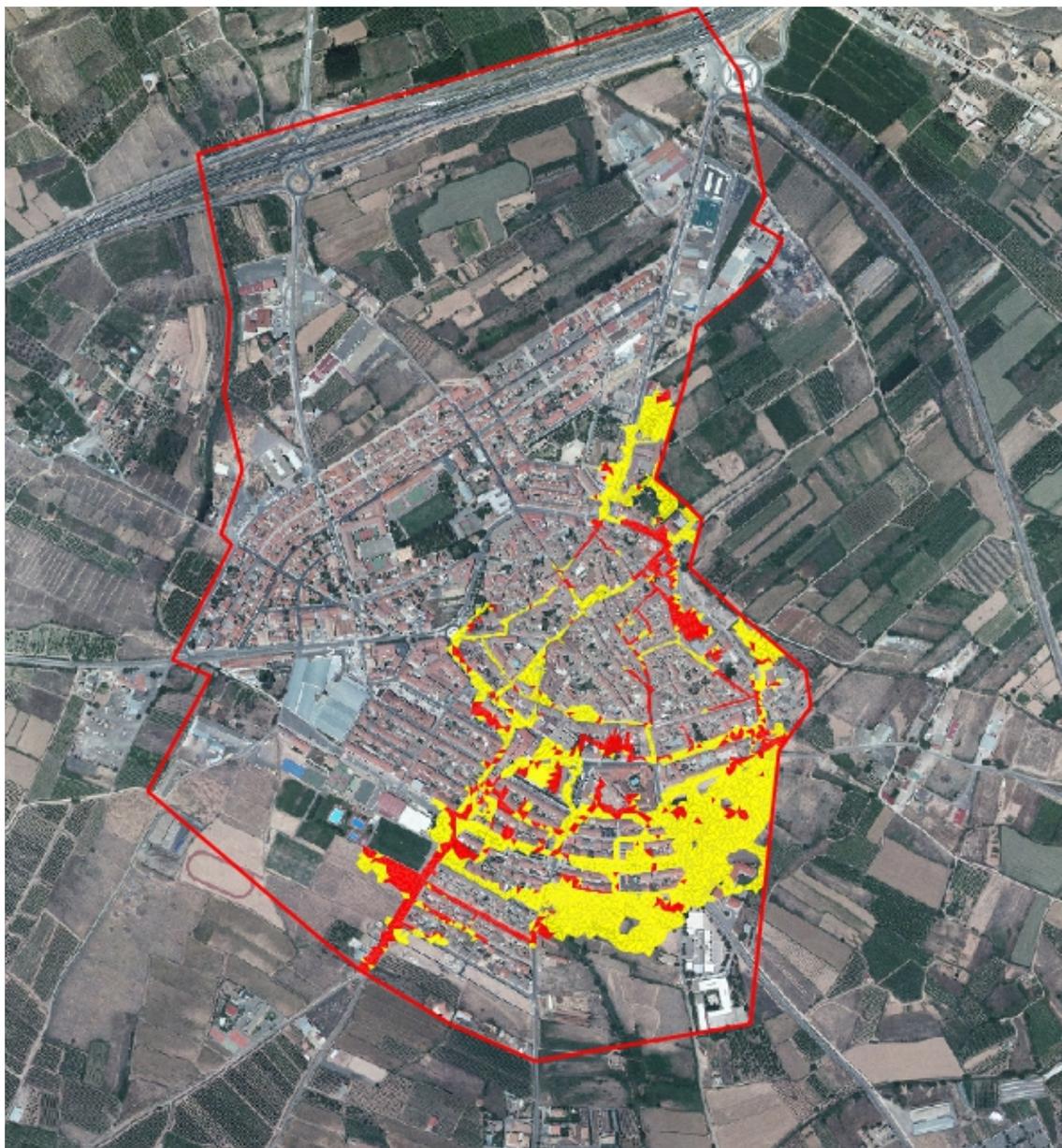


Ilustración 175: Mapa de peligrosidad de calado para la hipótesis Futura; T=100 años.

La conclusión principal a la que se llega de los mapas de peligrosidad de calado, es que conforme mayor es el período de retorno, mayor es la superficie inundada y mayor superficie con calados superiores a los 10 cm. En la hipótesis futuras, donde se evalúa el efecto del cambio climático se aprecia un aumento de la superficie inundada con calados superiores a los 10 cm. Las zonas más afectadas del dominio de estudio corresponden a la zona donde desaguan los barrancos de Fontellas Y Cantalobos, correspondiente a la Carretera de Tenerías. La inundación en las diferentes hipótesis

se extiende y desplaza por la parte Este y Suroeste del dominio de estudio, aumentando los puntos conflictivos en zona urbana conforme aumenta el periodo de retorno, es decir, aumenta la superficie inundada con calados superiores a los 10 cm. Destacar que la hipótesis futura que evalúa el cambio climático es más desfavorable para todos los periodos de retorno estudiados.

Para el periodo de retorno de 10 años los puntos más conflictivos en la zona urbana del dominio de estudio se encuentran en las siguientes calles:

- Ctra. Tenerías
- Calle Sierra de Algairén
- Calle Sierra de Vicor
- Calle José María Contín
- Ctra. Alpartir
- Calle el Fuerte
- Av. Laviaga Castillo
- Calle Sayas
- Calle Vargas
- Calle Ntra. Sra. del Rosario
- Calle Adobares
- Calle Barriocurto
- Calle Perales
- Calle Ntra. Sra. del Cabañas

Para el periodo de retorno de 25 años los puntos más conflictivos en la zona urbana además de los anteriormente citados, se encuentran en las siguientes calles:

- Calle La Paz
- Av. Corazón de Jesús
- Av. Cariéna
- Calle Barriocurto
- Calle Terrero
- Calle San Jorge

Para el periodo de retorno de 100 años los puntos más conflictivos en la zona urbana además de los anteriormente citados, se encuentran en las siguientes calles:

- Calle San Antonio
- Calle Juan de Lanuza
- Calle Miraflores

- Calle Barrioverde
- Calle San Juan
- Entorno de la Plaza Obispo

Se ha realizado otra temática (ver *Anexo II. Mapas de Peligrosidad*) para los calados en función de cada hipótesis estudiada para definir de forma más exacta la magnitud de los calados que circulan por el dominio de estudio, donde se aprecian zonas puntuales, donde los calados alcanzan y en algunos superan el metro de profundidad. Estos problemas son debidos a la acumulación de agua, al ser puntos bajos con respecto a su entorno.

Para el estudio de las *Velocidades* se ha realizado una temática adoptando los criterios de peligrosidad anteriormente definidos.



Ilustración 176: Rango de valores en m/s para la temática de velocidad.

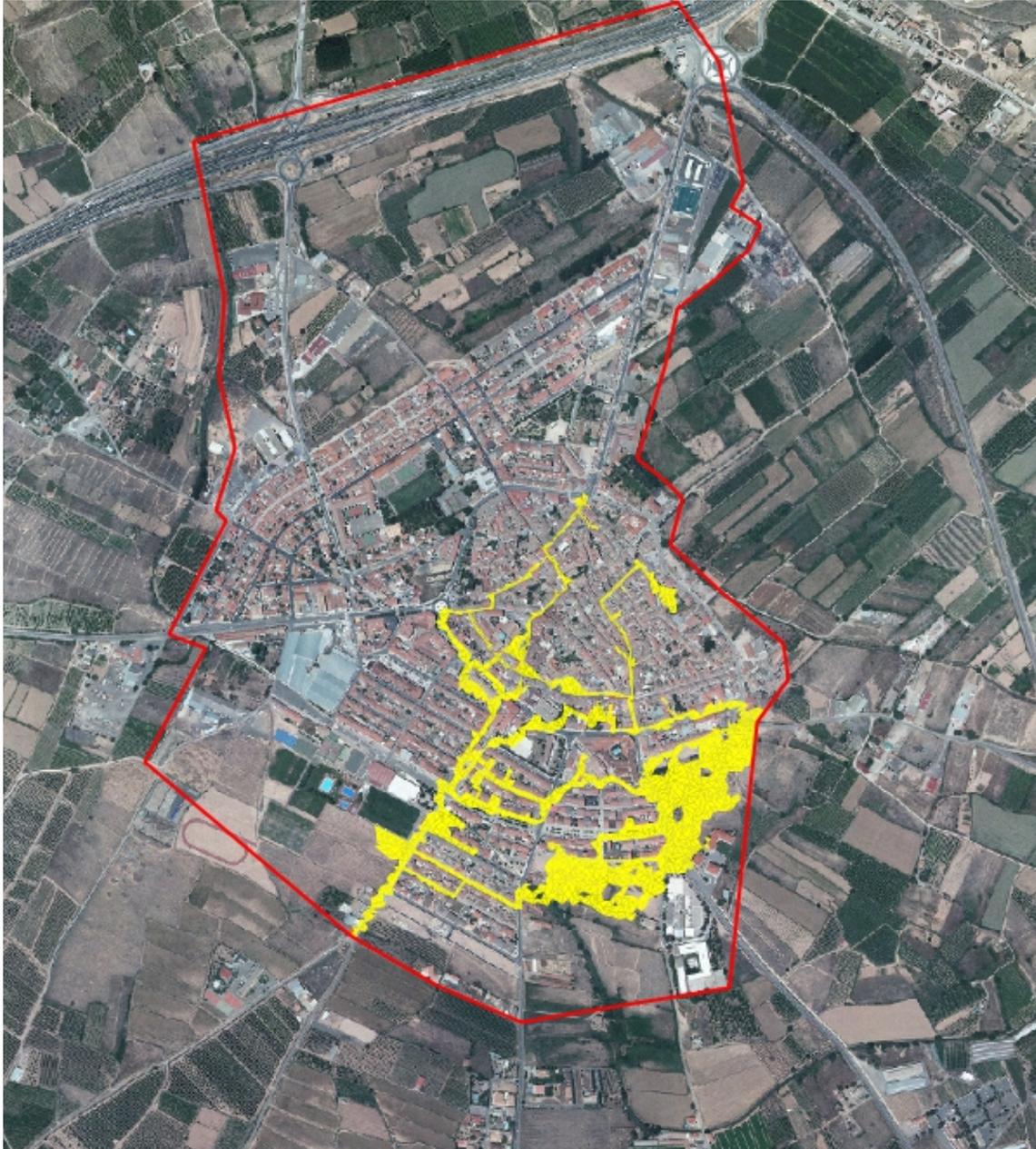


Ilustración 177: Mapa de peligrosidad de velocidad para la hipótesis Actual; T=10 años.

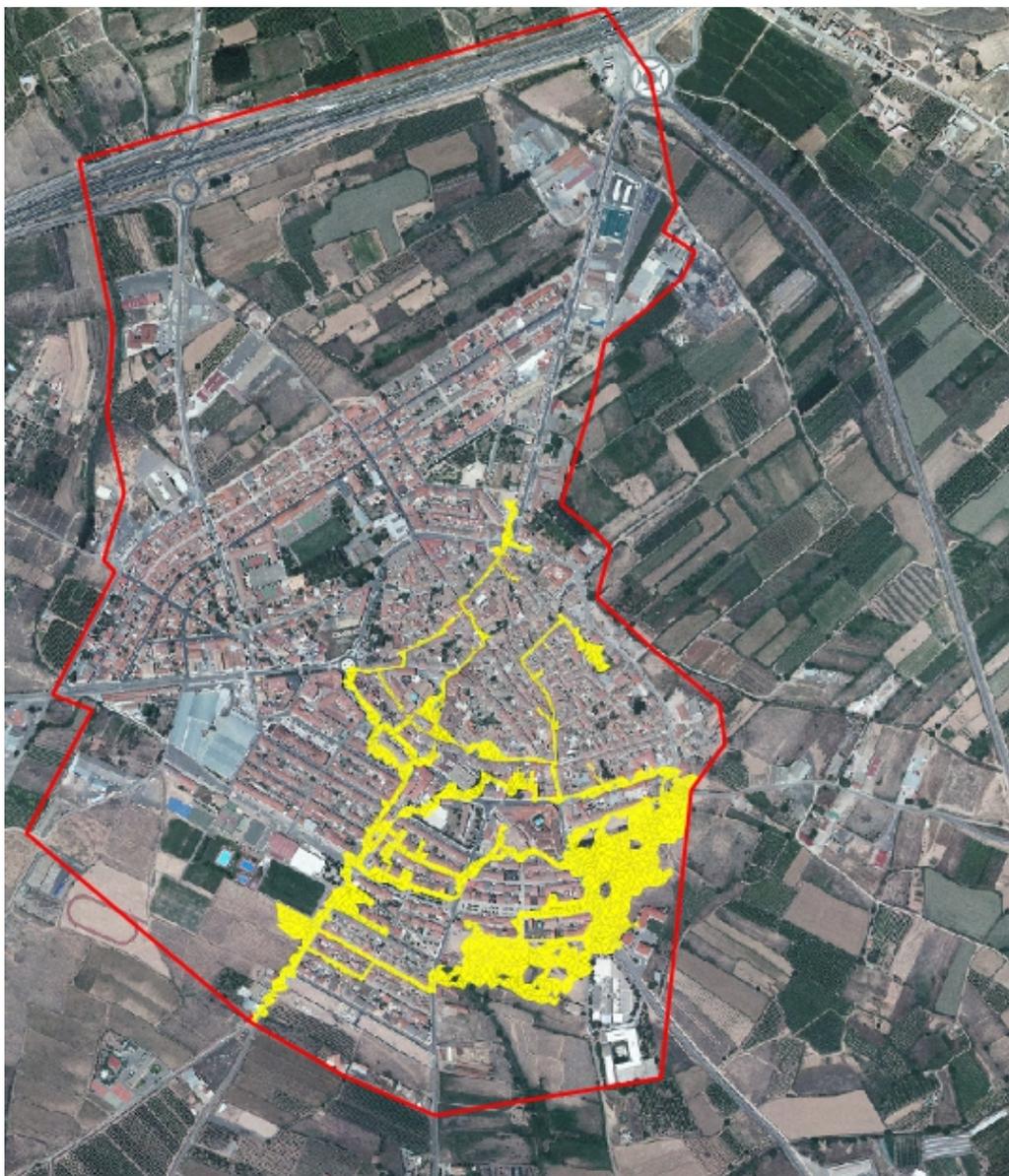


Ilustración 178: Mapa de peligrosidad de velocidad para la hipótesis Futura; T=10 años.

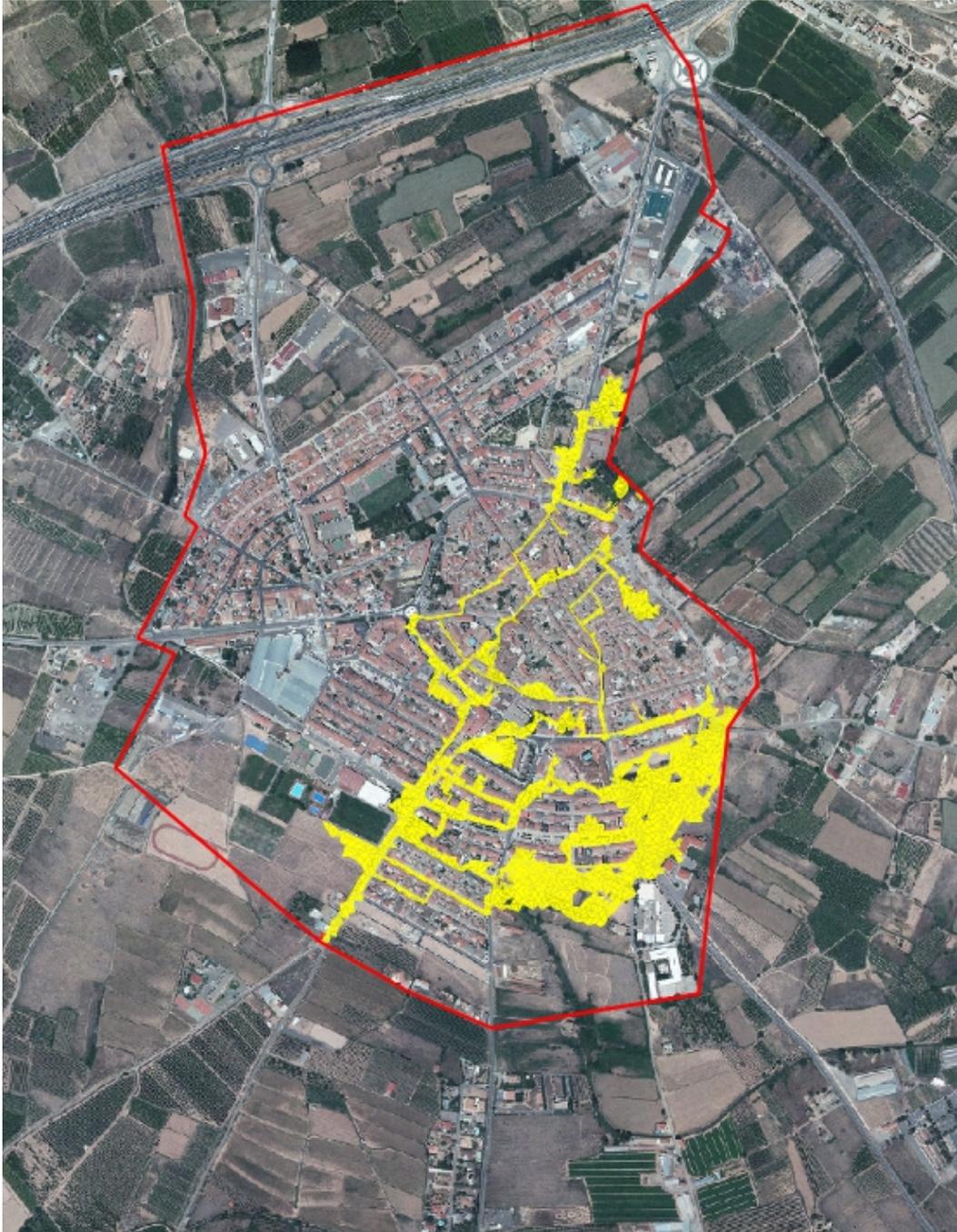


Ilustración 179: Mapa de peligrosidad de velocidad para la hipótesis Actual; T=25 años

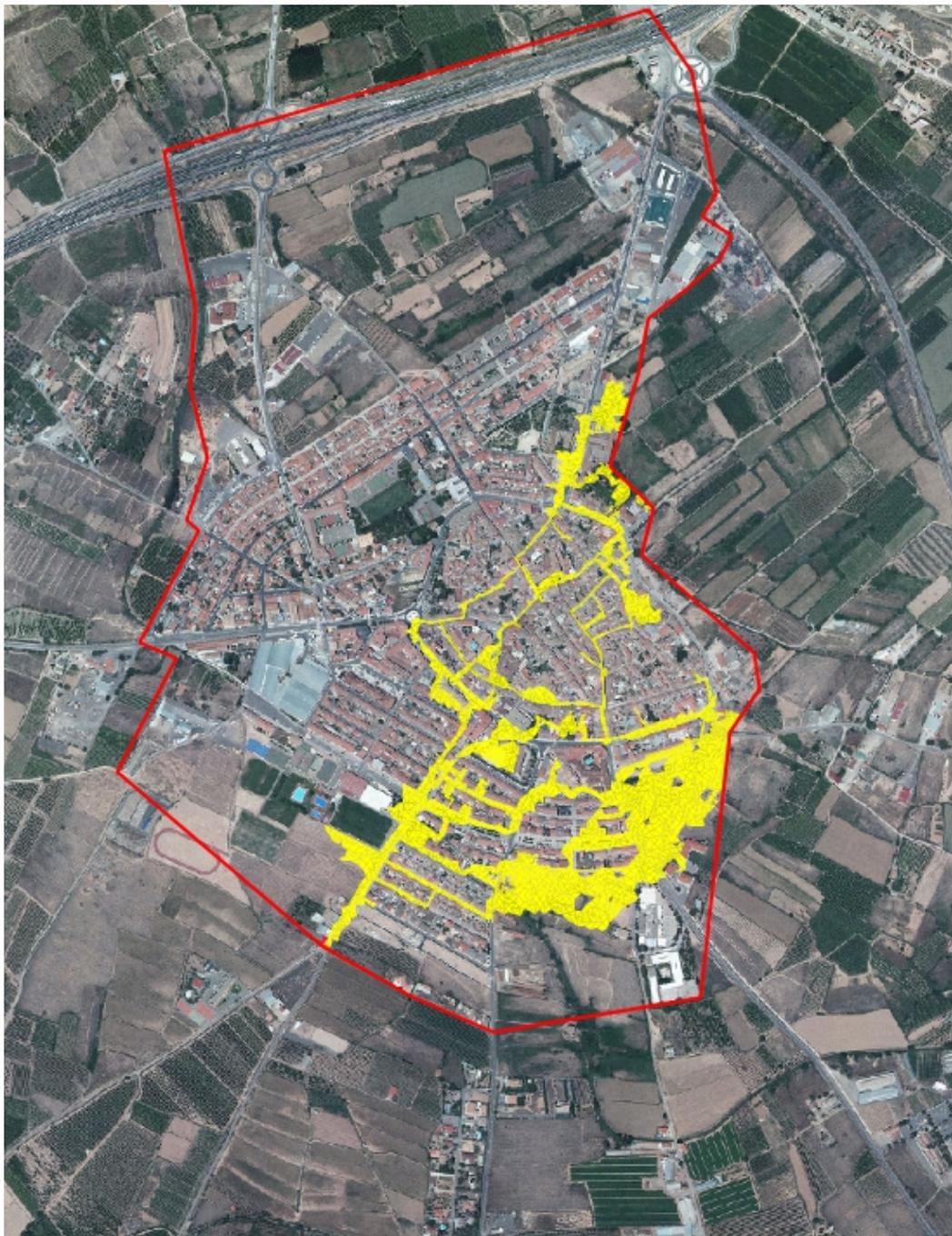


Ilustración 180: Mapa de peligrosidad de velocidad para la hipótesis Futura; T=25 años

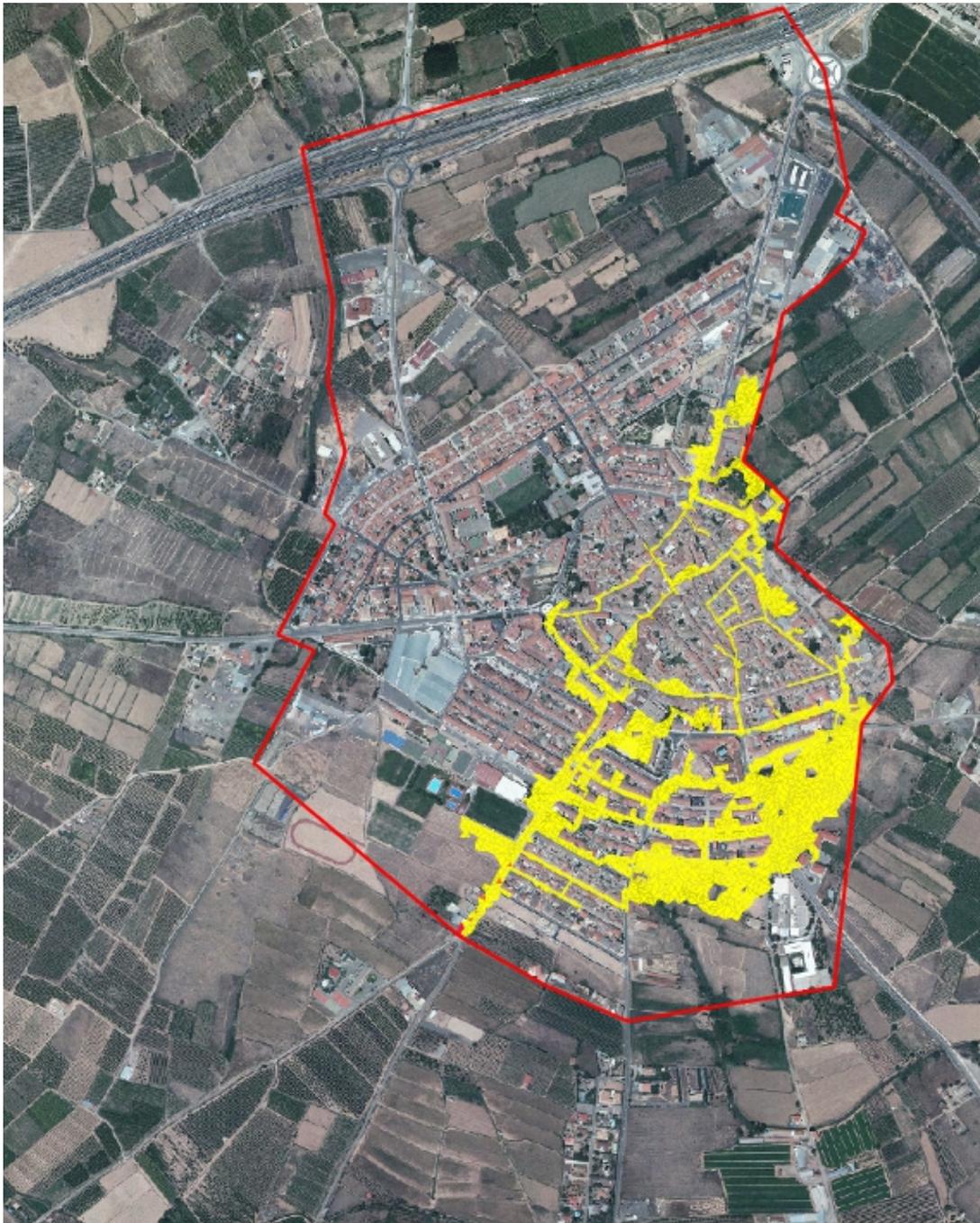


Ilustración 181: Mapa de peligrosidad de velocidad para la hipótesis Actual; T=100 años

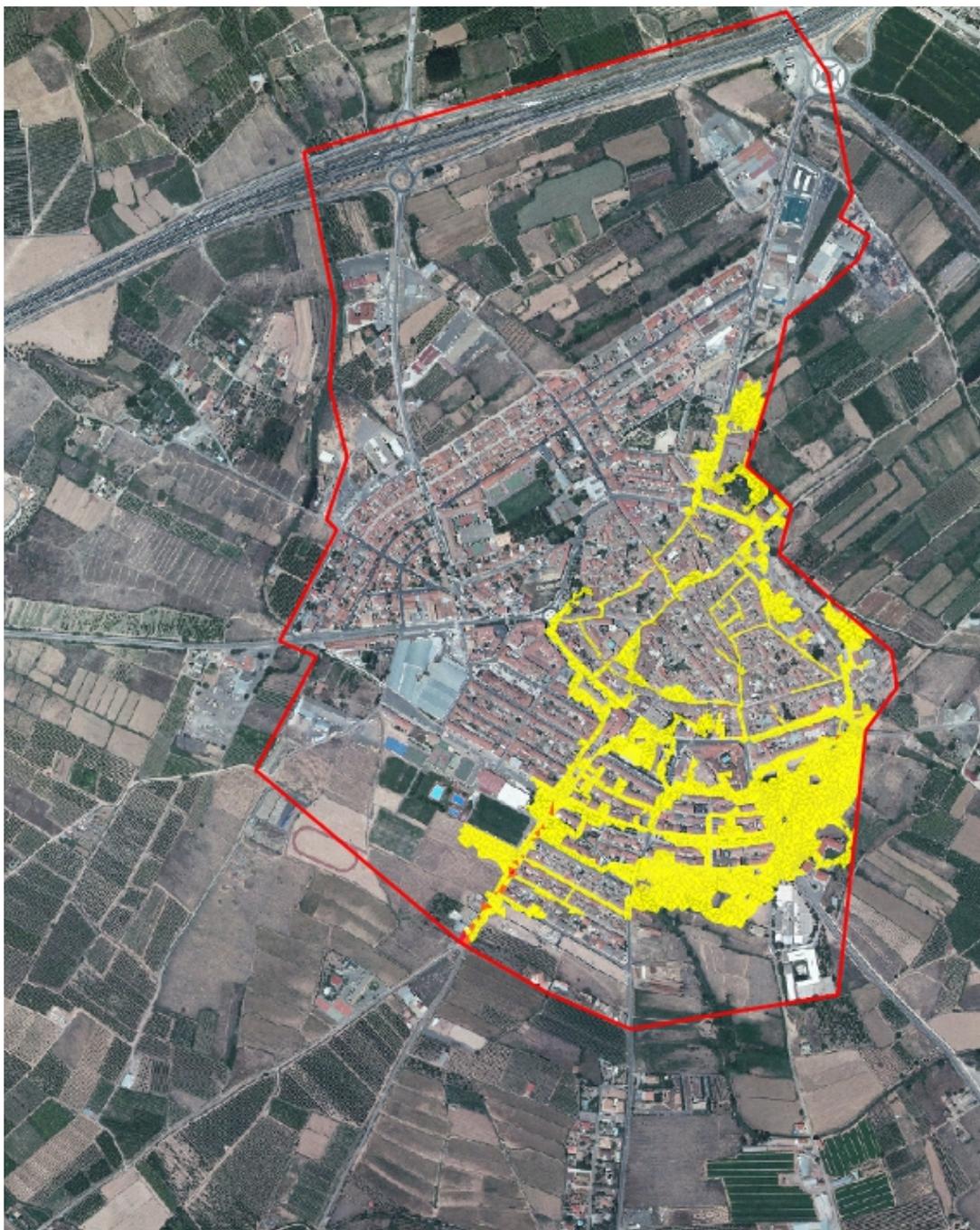


Ilustración 182: Mapa de peligrosidad de velocidad para la hipótesis Futura; T=100 años

Analizando los resultados obtenidos para la *Velocidad* se llega a la conclusión de que no suponen un riesgo alto para las personas, salvo en el punto de desagüe de los barrancos, el resto de zonas urbanas están dentro de la *Zona de Seguridad* que considera $v < 1,51$ m/s. El único caso en el que la *Velocidad* puede causar problemas es



para el periodo de retorno de 100 años en el que hay riesgo medio-alto en algunos puntos de la *Carretera de Tenerías*, donde vierte la cuenca de estudio.

Buscando una respuesta a los valores tan reducidos de la *Velocidad*, se llega a la conclusión que puede ser debido a las bajas pendientes de la zona urbana y a que no se conoce la información referente a la velocidad con la que llega el volumen de escorrentía al punto de desagüe. Por lo tanto, podría darse el caso de tener mayores velocidades en el dominio de estudio que se verían atenuadas a causa de las reducidas pendientes del casco urbano. También hay que tener en cuenta que la cuenca desagua en una zona agrícola llana, por lo que se pueden esperar velocidades medias.

Para analizar el producto calado-velocidad se ha empleado el criterio definido anteriormente por el cuál el umbral de seguridad para la estabilidad de los peatones se sitúa $<0,2 \text{ m}^2/\text{s}$.

Se muestran los mapas de peligrosidad para el producto calado-velocidad de los periodos de retorno de 25 y 100 años, los mapas de peligrosidad para el periodo de retorno de 10 años no se han incluido en la memoria debido a que no se supera el umbral de seguridad, pero se pueden encontrar en el Anexo II.



Ilustración 183: Mapa de peligrosidad del producto Calado-Velocidad para la hipótesis Actual; T=25 años



Ilustración 184: Mapa de peligrosidad del producto Calado-Velocidad para la hipótesis Futura; T=25 años



Ilustración 185: Mapa de peligrosidad del producto Calado-Velocidad para la hipótesis Actual; T=100 años

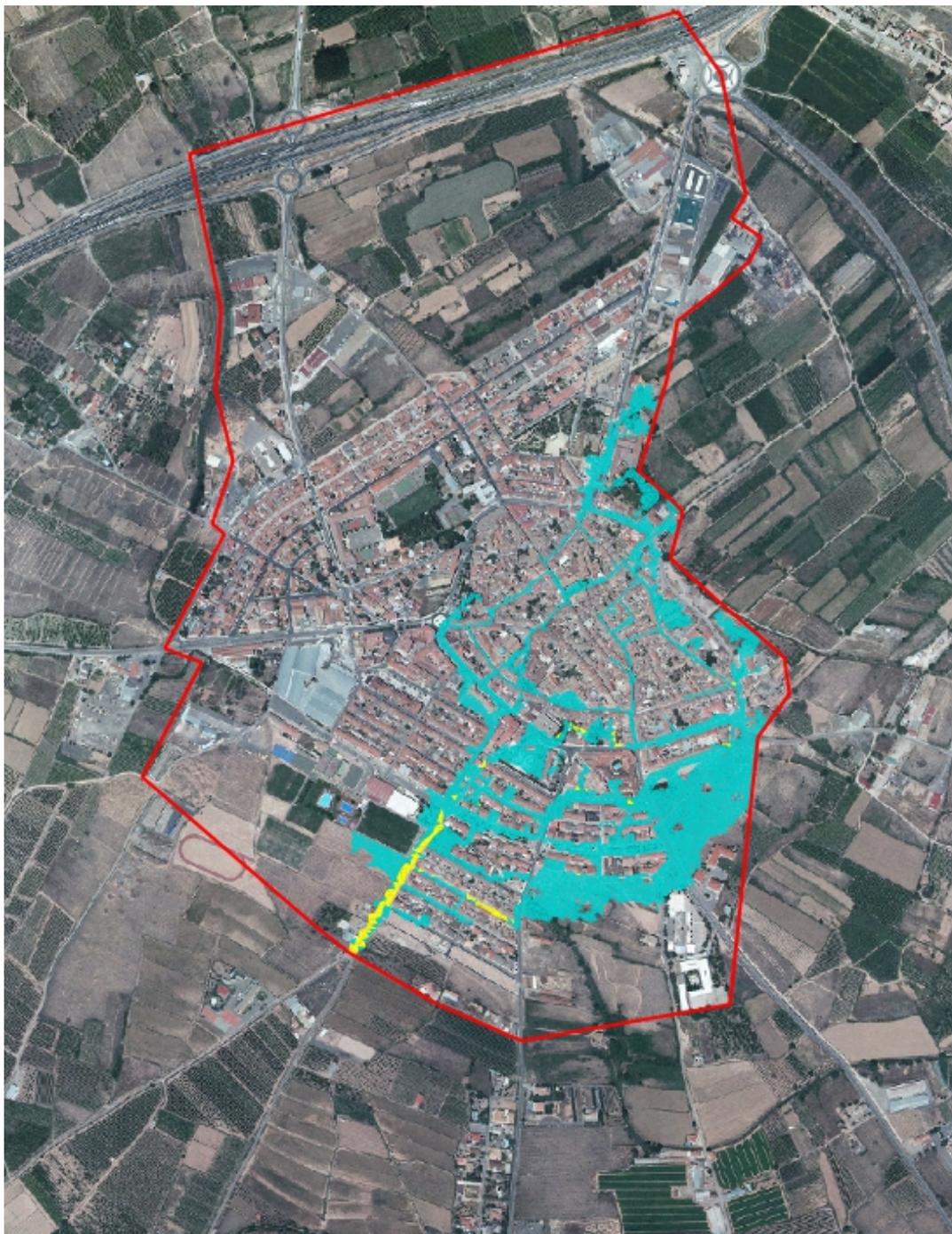


Ilustración 186: Mapa de peligrosidad del producto Calado-Velocidad para la hipótesis Futura; T=100 años

Para el período de retorno de 25 años hay riesgo de estabilidad para los peatones en la Carretera Tenerías y en menor medida en la Avenida Laviaga Castillo.

Para el periodo de retorno de 100 años hay riesgo de estabilidad para los peatones en la Carretera Tenerías, en la Calle Sierra de Vicor y en la Avenida Laviaga Castillo.

A parte de el análisis de los diferentes mapas de peligrosidad, se han establecido diferentes puntos de análisis en las zonas más conflictivas del dominio de estudio, en los que se ha analizado la variación de las variables hidráulicas: *Calado*, *Velocidad* y el *producto de Calado-Velocidad*. En la imagen se muestra la distribución de los 15 puntos de análisis.



Ilustración 187: Puntos de análisis.

A continuación en las tablas se muestran los valores obtenidos para los periodos de retorno estudiados tanto para la hipótesis *Actual* como *Futura* y se muestran en color **ROJO** las variables hidráulicas que han superado los criterios de peligrosidad establecidos anteriormente.

Análisis de resultados

		T=10 años					
		Hipótesis Actual			Hipótesis Futura		
PUNTO DE ANÁLISIS	LOCALIZACIÓN	$y_{m\grave{a}x}$ (m)	$v_{m\grave{a}x}$ (m/s)	$(y.v)_{m\grave{a}x}$ (m ² /s)	$y_{m\grave{a}x}$ (m)	$v_{m\grave{a}x}$ (m/s)	$(y.v)_{m\grave{a}x}$ (m ² /s)
Punto 1	Ctra. Tenerías	0,2225	0,2837	0,0631	0,2225	0,2922	0,0650
Punto 2	Ctra. Tenerías	0,1137	0,5241	0,0596	0,1136	0,5238	0,0595
Punto 3	Calle Sierra de Algairén	0,1853	0,0924	0,0171	0,1849	0,0664	0,0123
Punto 4	Calle Sierra de Vicor	0,1603	0,3467	0,0556	0,1599	0,2568	0,0411
Punto 5	Calle José María Contín	0,1114	0,1101	0,0123	0,1111	0,1093	0,0121
Punto 6	Ctra. Alpartir	0,1342	0,0372	0,0050	0,1348	0,0354	0,0048
Punto 7	Calle el Fuerte	0,1401	0,1599	0,0224	0,1455	0,1931	0,0281
Punto 8	Av. Laviaga Castillo	0,1703	0,1534	0,0261	0,1822	0,2429	0,0442
Punto 9	Calle Sayas	0,1081	0,1436	0,0155	0,1189	0,1656	0,0197
Punto 10	Calle Vargas	0,1020	0,0571	0,0058	0,1133	0,0489	0,0055
Punto 11	Calle Ntra. Sra. del Rosario	0,1761	0,1004	0,0177	0,1850	0,1059	0,0196
Punto 12	Calle Adobares	0,1741	0,0778	0,0135	0,1860	0,0938	0,0174
Punto 13	Calle Barriocurto	0,1644	0,1608	0,0264	0,1762	0,2370	0,0418
Punto 14	Calle Perales	0,2660	0,0746	0,0198	0,2996	0,0523	0,0157
Punto 15	Calle Ntra. Sra. del Cabañas	0,5331	0,2293	0,1222	0,5669	0,1947	0,1104

Tabla 49: Resultados de los Puntos de Análisis; T=10 años.

		T=25 años					
		Hipótesis Actual			Hipótesis Futura		
PUNTO DE ANÁLISIS	LOCALIZACIÓN	$y_{m\grave{a}x}$ (m)	$v_{m\grave{a}x}$ (m/s)	$(y.v)_{m\grave{a}x}$ (m ² /s)	$y_{m\grave{a}x}$ (m)	$v_{m\grave{a}x}$ (m/s)	$(y.v)_{m\grave{a}x}$ (m ² /s)
Punto 1	Ctra. Tenerías	0,3189	0,6916	0,2205	0,3570	0,9100	0,3248
Punto 2	Ctra. Tenerías	0,1972	0,8642	0,1704	0,2229	0,9737	0,2170
Punto 3	Calle Sierra de Algairén	0,2177	0,1327	0,0289	0,2367	0,1907	0,0451
Punto 4	Calle Sierra de Vicor	0,2336	0,4693	0,1097	0,2566	0,5306	0,1362
Punto 5	Calle José María Contín	0,1429	0,2121	0,0303	0,1554	0,2502	0,0389
Punto 6	Ctra. Alpartir	0,1636	0,1417	0,0232	0,1814	0,2090	0,0379
Punto 7	Calle el Fuerte	0,1761	0,4001	0,0704	0,1898	0,5494	0,1043
Punto 8	Av. Laviaga Castillo	0,2233	0,7061	0,1577	0,2342	0,8349	0,1956
Punto 9	Calle Sayas	0,1748	0,4186	0,0732	0,1941	0,4752	0,0922
Punto 10	Calle Vargas	0,1743	0,0979	0,0171	0,1959	0,1160	0,0227
Punto 11	Calle Ntra. Sra. del Rosario	0,2277	0,2873	0,0654	0,2412	0,3457	0,0834
Punto 12	Calle Adobares	0,3846	0,2362	0,0908	0,4064	0,1907	0,0775
Punto 13	Calle Barriocurto	0,3749	0,4591	0,1721	0,3970	0,4888	0,1941
Punto 14	Calle Perales	0,3261	0,1162	0,0379	0,3346	0,0548	0,0183
Punto 15	Calle Ntra. Sra. del Cabañas	0,5943	0,3305	0,1964	0,6031	0,3618	0,2182

Tabla 50: Resultados de los Puntos de Análisis; T=25 años.

PUNTO DE ANÁLISIS	LOCALIZACIÓN	T=100 años					
		Hipótesis Actual			Hipótesis Futura		
		$y_{m\grave{a}x}$ (m)	$v_{m\grave{a}x}$ (m/s)	$(y.v)_{m\grave{a}x}$ (m ² /s)	$y_{m\grave{a}x}$ (m)	$v_{m\grave{a}x}$ (m/s)	$(y.v)_{m\grave{a}x}$ (m ² /s)
Punto 1	Ctra. Tenerías	0,4395	1,0801	0,4747	0,4645	1,4426	0,6701
Punto 2	Ctra. Tenerías	0,2805	1,2191	0,3419	0,3218	1,3816	0,4446
Punto 3	Calle Sierra de Algairén	0,2753	0,3012	0,0829	0,3006	0,3726	0,1120
Punto 4	Calle Sierra de Vicor	0,3008	0,6447	0,1939	0,3338	0,7252	0,2420
Punto 5	Calle José María Contín	0,1907	0,3425	0,0653	0,2211	0,4148	0,0917
Punto 6	Ctra. Alpartir	0,2164	0,3352	0,0725	0,2423	0,4187	0,1015
Punto 7	Calle el Fuerte	0,2171	0,8332	0,1809	0,2370	1,0172	0,2411
Punto 8	Av. Laviaga Castillo	0,2763	1,0383	0,2868	0,3056	1,1155	0,3408
Punto 9	Calle Sayas	0,2390	0,5873	0,1404	0,2646	0,6432	0,1702
Punto 10	Calle Vargas	0,2466	0,1574	0,0388	0,2756	0,0240	0,0066
Punto 11	Calle Ntra. Sra. del Rosario	0,2717	0,4683	0,1272	0,2884	0,5338	0,1539
Punto 12	Calle Adobares	0,4455	0,2421	0,1079	0,4843	0,1344	0,0651
Punto 13	Calle Barriocurto	0,4363	0,5404	0,2358	0,4751	0,2328	0,1106
Punto 14	Calle Perales	0,3534	0,0688	0,0243	0,3639	0,0331	0,0121
Punto 15	Calle Ntra. Sra. del Cabañas	0,6226	0,4296	0,2675	0,6336	0,1451	0,0919

Tabla 51: Resultados de los Puntos de Análisis; T=100 años.

De los resultados se deduce que el verdadero problema para la estabilidad de las personas es el valor del *Calado* que se produce en determinadas zonas del casco urbano. Él es el causante de que se se supere en varios puntos para los periodos de retorno de 25 y 100 años el umbral de seguridad para la estabilidad de las personas expresado mediante la función $v.y \leq 0,2$. Para ello se ha definido de forma gráfica los puntos de análisis que superan el umbral de seguridad para la estabilidad de las personas en flujos de agua.

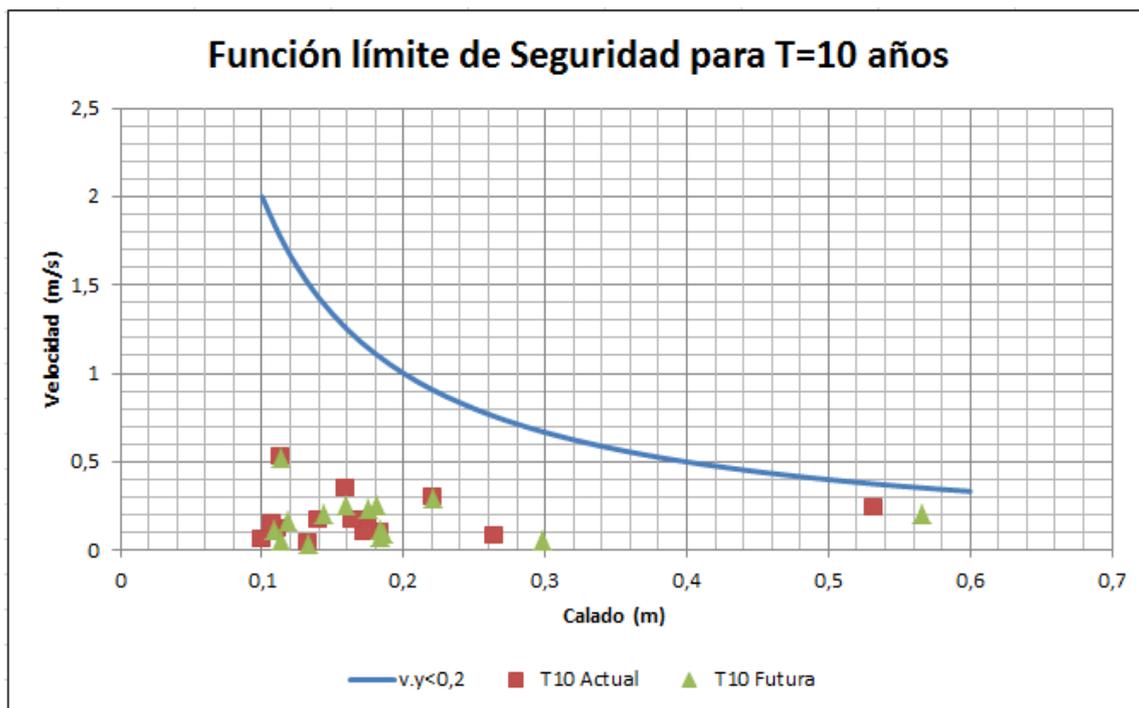


Ilustración 188: Representación de las condiciones hidráulicas (velocidad y calado) de los puntos de análisis para T=10 años.

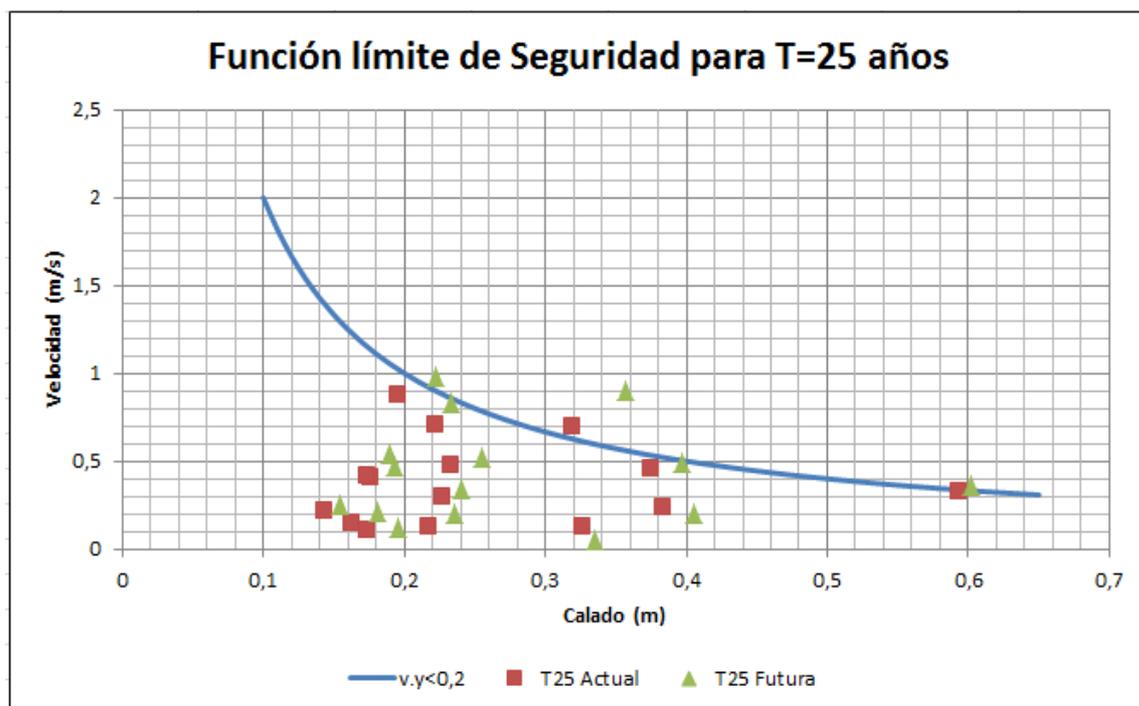


Ilustración 189: Representación de las condiciones hidráulicas (velocidad y calado) de los puntos de análisis para T=25 años.

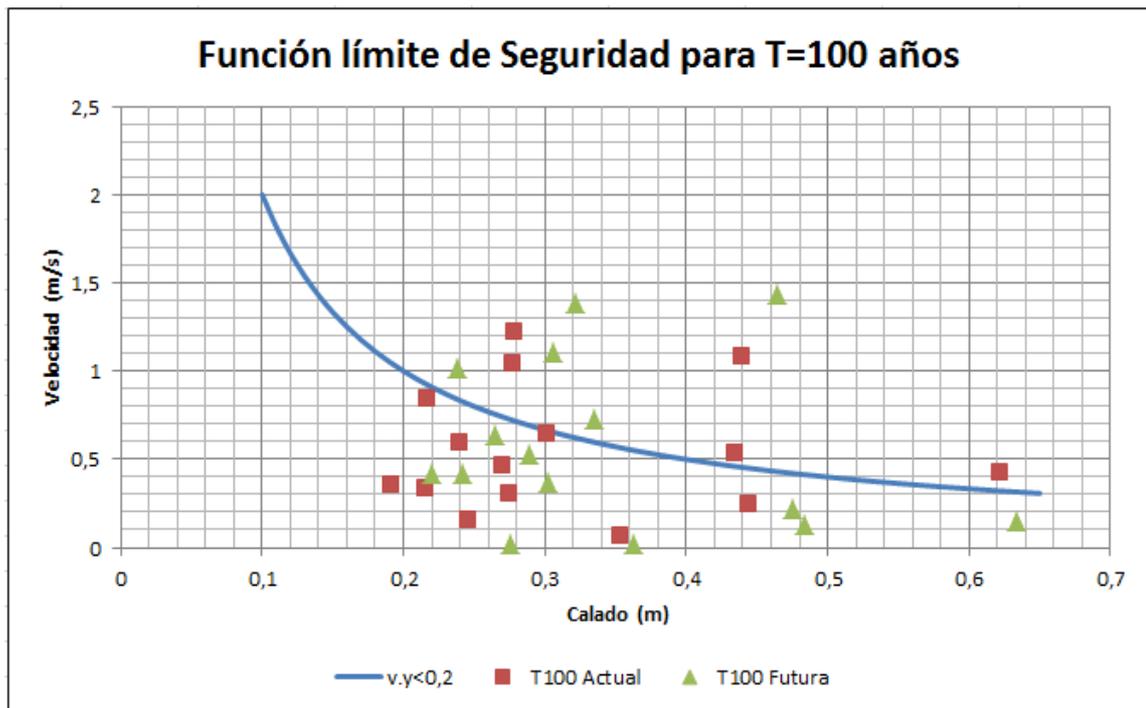


Ilustración 190: Representación de las condiciones hidráulicas (velocidad y calado) de los puntos de análisis para T=100 años.

Se han escogido dos puntos de análisis representativos para evaluar su comportamiento hidráulico, y se ha llegado a la conclusión de que se producen dos tendencias. En primer lugar una tendencia donde la velocidad como el calado ascienden hasta el valor máximo y posteriormente disminuyen hasta alcanzar valores nulos, estas zonas inundadas se corresponden a "zonas de paso" (ejemplo *Punto de Análisis 2*).

En segundo lugar una tendencia donde la velocidad alcanza su valor máximo y posteriormente disminuye hasta alcanzar un valor nulo, sin embargo el calado se mantiene constante una vez la velocidad es nula, estas zonas inundadas corresponden a zonas de "acumulación" (ejemplo *Punto de Análisis 15*).

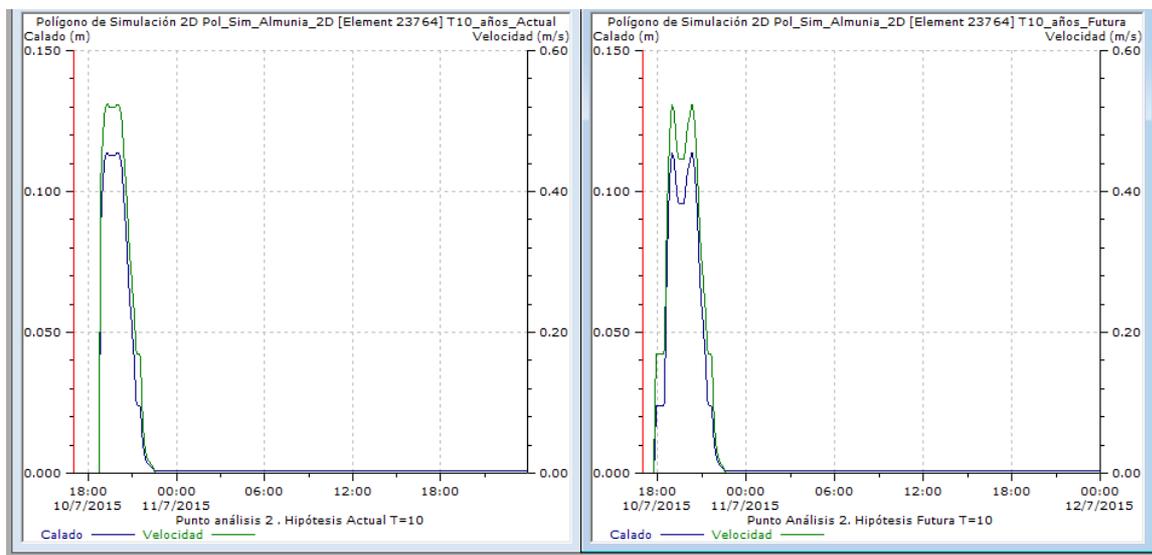


Ilustración 191: Punto de Análisis 2 para T=10 años. (Actual Izqda. y Futura Dcha.)

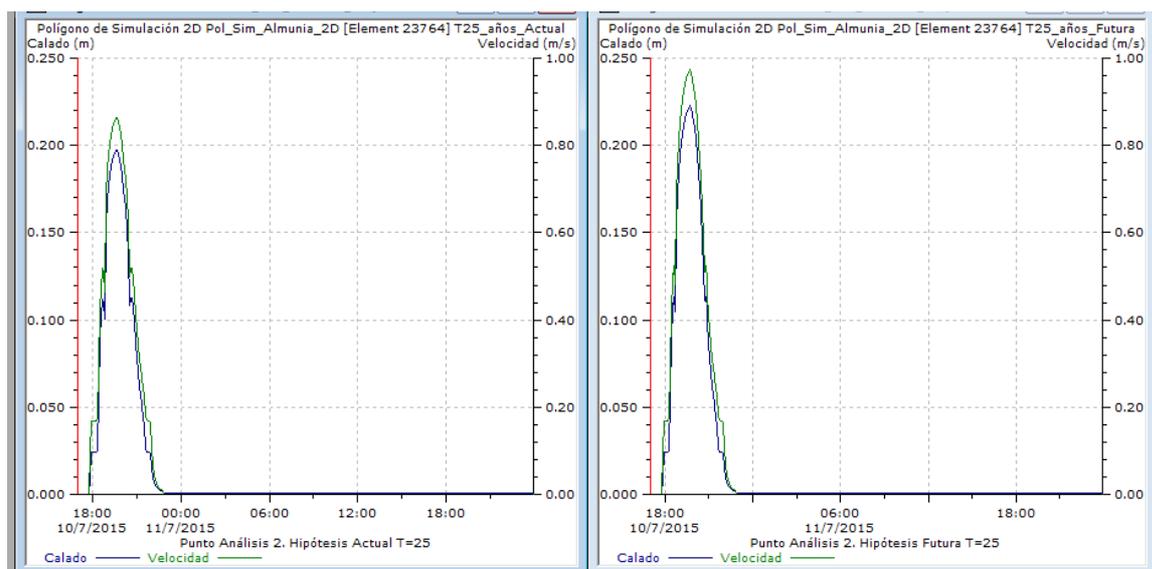


Ilustración 192: Punto de Análisis 2 para T=25 años. (Actual Izqda. y Futura Dcha.)

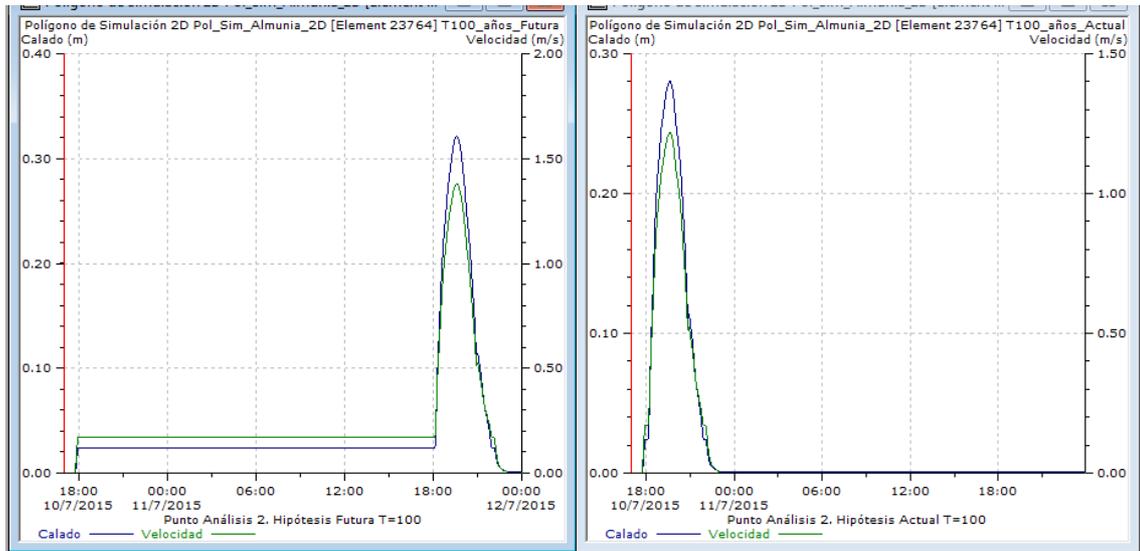


Ilustración 193: Punto de Análisis 2 para T=100 años. (Actual Izqda. y Futura Dcha.)

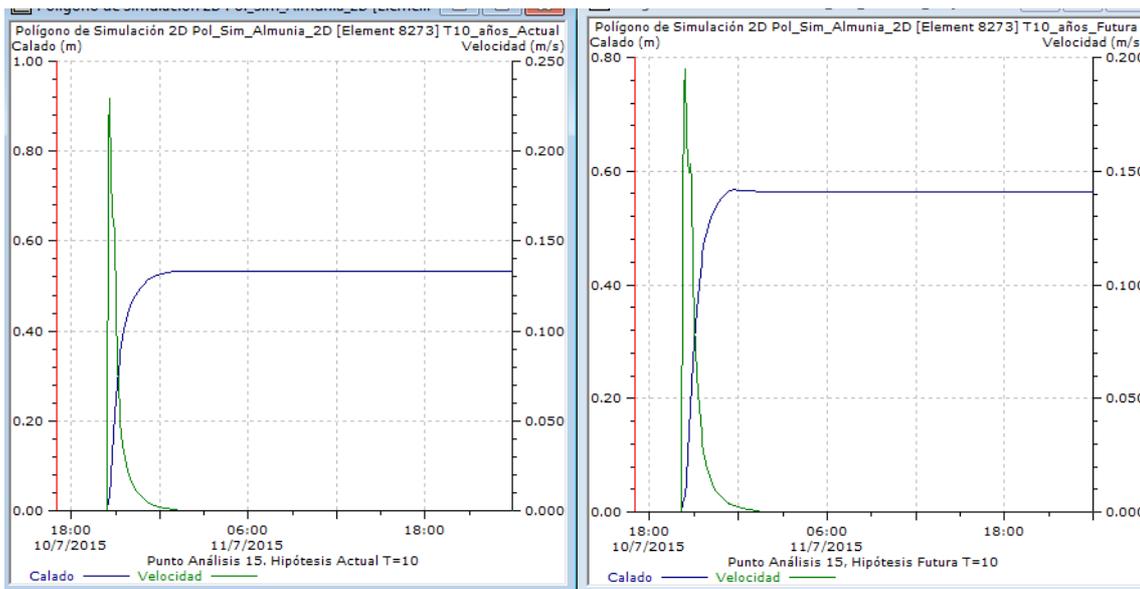


Ilustración 194: Punto de Análisis 15 para T=10 años. (Actual Izqda. y Futura Dcha.)

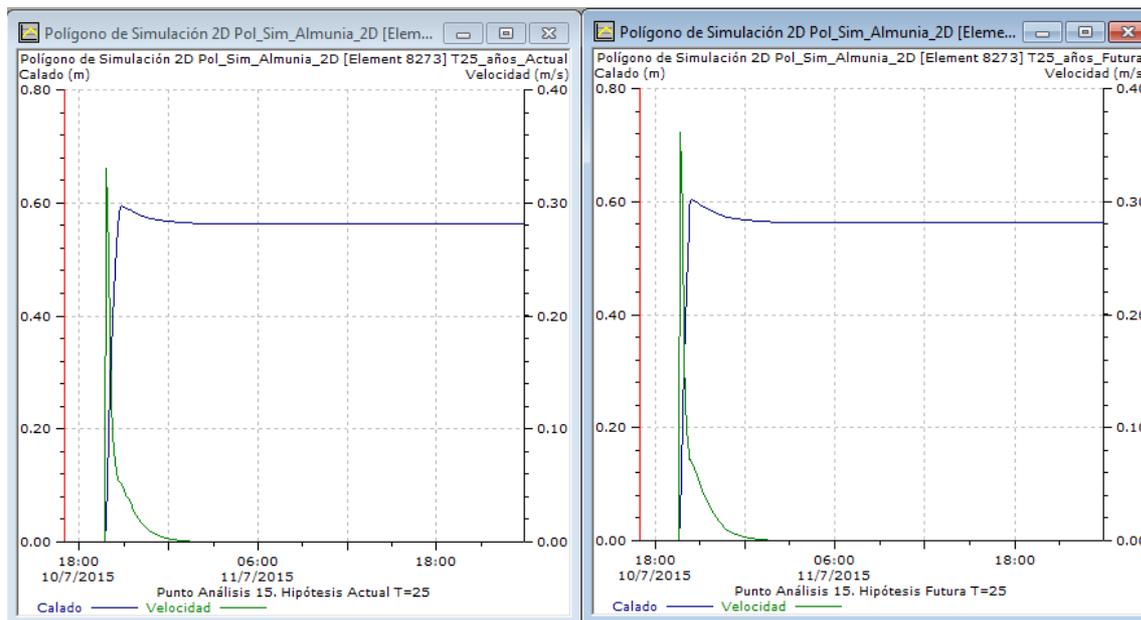


Ilustración 195: Punto de Análisis 15 para T=25 años. (Actual Izqda. y Futura Dcha.)

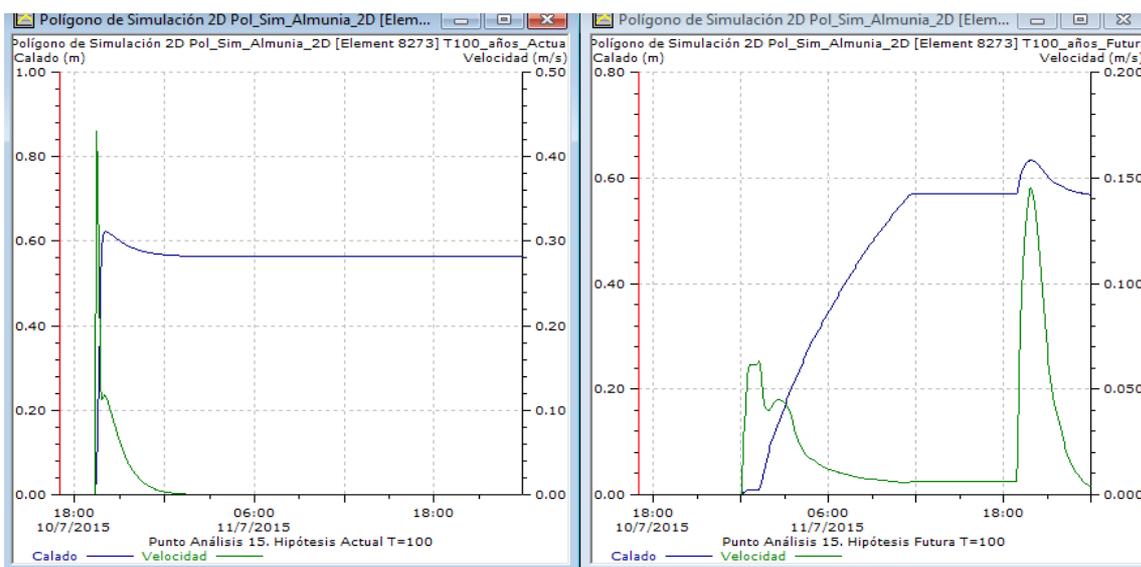


Ilustración 196: Punto de Análisis 15 para T=100 años. (Actual Izqda. y Futura Dcha.)

En base a los resultados obtenidos en este Trabajo Fin de Grado, se han realizado los diferentes planos de Mapas de Peligrosidad que se recogen en el Anexo II.

16. CONCLUSIONES FINALES

Los resultados obtenidos en las tres hipótesis planteadas han mostrado una gran variabilidad, se ha elegido la hipótesis del *Análisis conjunto de los modelos regionales MM5 y PROMES del proyecto Escena* por ser la opción que mejor representa las características de las líneas evolutivas de la familia de escenarios climáticos estudiados (A2, A1B y B1). Por otra parte la variabilidad de los resultados obtenidos para cada escenario en las diferentes hipótesis es debido al modelo de circulación general utilizado para cada caso en particular. Como continuación del presente estudio se propone el empleo de modelos regionales estadísticos como el *proyecto Estcena*.

En el estudio hidrológico realizado con el software HEC-HMS se ha calculado la respuesta hidrológica para las lluvias de proyecto de 1 y 2 horas de los escenarios Actual y Futuro. Comparando ambas hipótesis se ha determinado que la respuesta hidrológica para las lluvias de proyecto actuales y futuras de 2 horas más desfavorable.

En la respuesta hidrológica de las lluvias de proyecto de 1 hora las pérdidas de precipitación son muy elevadas cercanas a la precipitación bruta del evento de lluvia. En consecuencia, los datos de partida para el modelo hidráulico en 2D en InfoWorks RS serán los hidrogramas de salida producidos por las lluvias de proyecto de 2 horas para los períodos de retorno de 10, 25 y 100 años.

De los hidrogramas de salida en el punto de desagüe de la cuenca se destaca que el tiempo base es similar tanto para el escenario Actual como para el escenario Futuro, que está en torno a 4 horas. Por otra parte, el tiempo al pico para los hidrogramas de salida se sitúa en una hora y media posterior al comienzo del evento de lluvia extremo.

Para la realización del modelo hidráulico en 2D se ha empleado el software InfoWorks RS, el cual ha permitido el análisis de las variables hidráulicas (Calado, *Velocidad* y el producto de las estas dos) en todo el dominio de estudio, gracias a un mallado bidimensional, construido por una malla de 33290 triángulos y de 129,7895 ha. Como continuación ha este estudio se propone realizar el modelo hidráulico en 2D con un mallado bidimensional con mayor precisión y detalle, a través del polígono de malla. Para la creación del modelo hidráulico también necesario disponer de un Modelo Digital del Terreno (MDT) de alta resolución. Para ello se ha empleado el MDT

proporcionado por el CNIG en formato Raster con una resolución de celda de 5 metros, para futuros estudios se propone utilizar MDTs con mayor resolución.

De los resultados del modelo hidráulico en 2D se observa que el verdadero problema para la estabilidad de las personas es el valor del *Calado* que se produce en determinadas zonas del casco urbano, es el causante de que se se supere en varios puntos para los periodos de retorno de 25 y 100 años el umbral de seguridad para la estabilidad de las personas expresado mediante la función $v.y \leq 0,2$.

Por otra parte, en el análisis del comportamiento hidráulico del dominio de estudio se contemplan dos tendencias. En primer lugar una tendencia que corresponde a *zonas de paso* donde la velocidad como el calado ascienden hasta el valor máximo y posteriormente disminuyen hasta alcanzar valores nulos.

En segundo lugar una tendencia que corresponde a *zonas de acumulación* donde la velocidad alcanza su valor máximo y posteriormente disminuye hasta alcanzar un valor nulo, sin embargo el calado se mantiene constante una vez la velocidad es nula.

Para finalizar se presentan los incrementos producidos en los resultados de evaluar los efectos del cambio climático tanto en el modelo hidrológico como en el modelo hidráulico en 2D.

%	10	25	100
Intensidad Media Diaria	5,44	7,32	9,21
Caudal Punta Hidrograma	25	26,42	25,81
Superficie inundada	1,92	5,21	6,68
C_f (en tanto por 1)	1,05	1,07	1,09

Tabla 52: Evaluación (%) de los efectos del cambio climático.

Por otra parte, como continuación a este estudio se plantea evaluar los efectos del cambio climático en la villa de La Almunia de Doña Godina con los nuevos escenarios de emisiones propuestos por el V Informe de Evaluación del ICCP (AR5).

17. BIBLIOGRAFÍA

Aragón Hernández, J. L., & Bladé, E. (2013). Modelación numérica integrada de los procesos hidráulicos en el drenaje urbano.

Arnbjerg-Nielsen, K. (2012). Quantification of climate change effects on extreme precipitation used for high resolution hydrologic design. *Urban Water Journal*, 9(2), 57-65. <http://doi.org/10.1080/1573062X.2011.630091>

Bladé Castellet, E. (2005). Modelación del flujo en lámina libre sobre cauces naturales. Análisis integrado con esquemas en volúmenes finitos en una y dos dimensiones. *TDX (Tesis Doctorals en Xarxa)*.

Blomhøj, M. (2008). Modelización matemática-una teoría para la práctica. *Revista de Educación Matemática*, 23(2).

Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1994). *Hidrología aplicada*. Santafé de Bogotá [etc.] : Mcgraw-Hill, 1994.

Curso InfoWorks RS. (s. f.).

DIRECTIVA 2007/60/CE (2007).

ESCENA | Santander Meteorology Group. (s. f.).

Fernández, J., FITA, L., GARCÍA-DÍEZ, M., MONTÁVEZ, J. P., JIMÉNEZGUERRERO, P., DOMÍNGUEZ, M., ... others. (s. f.). Escenarios-PNACC 2012: Resultados de regionalización dinámica. En *8º Congreso Internacional AEC 2012. Oral contribution*.

García León, J., García Martín, A., & Torres Picazo, M. (2015). *gvSIG: guía para el aprendizaje autónomo*.

Geográfica, C. N. de I. (s. f.). Centro de Descargas del CNIG.

Gómez, M., & Russo, B. (2009). Criterios de riesgo asociados a escorrentía urbana. *Jornadas de Ingeniería del Agua*.

Gómez Valentín, M. (2007, noviembre). Hidrología Urbana. Flumen.

Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. (2007). *Cambio climático 2007 informe de síntesis*. Ginebra: IPCC.

Intergovernmental Panel on Climate Change, Intergovernmental Panel on Climate Change, & Working Group III. (2000). *Escenario de emisiones: resumen para responsables de políticas*. [Ginebra]: Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.

Inundaciones - Dirección General de Protección Civil y Emergencias. (s. f.).

López López, J., & Alavez-Ramírez, J. (2009, diciembre). Solución numérica del modelo de Saint-Venant vía volúmenes finitos. *Revista de Ciencia Básica UJAT*, 8(2), 34-53.

Manual InfoWorks RS, VS 9.0. (s. f.).

Martínez-Gomariz, E., Gómez, M., & Russo, B. (s. f.). Estabilidad de Personas en Flujos de Agua.

Martínez Mercado, C. (2011, julio). *Estudio de Inundabilidad Bidimensional de la villa de La Almunia de Doña Godina (Zaragoza)* (Proyecto Final de Carrera). Universidad de Zaragoza.

Ministerio de la Presidencia. Real Decreto 903/2010, § 1 (2010). Recuperado a partir de <http://www.proteccioncivil.org/documents/11803/70376/Real%2BDecreto%2B903%2B2010.pdf>

MOPU (Ed.). (1990). *Instrucción 5.2-IC. Drenaje superficial* (GRAFFOFFSET. S.L.). Madrid.

Nanía, L. S., & Gómez Valentín, M. (2006). *Ingeniería hidrológica*. Granada: Grupo Editorial Universitario, D.L. 2006.

Pallarés Bailo, P. (2010, septiembre). *Estudio del comportamiento hidráulico de los barrancos de Fontellas y Cantalobos a través del modelo hidrológico HEC-HMS* (Proyecto Final de Carrera). Universidad de Zaragoza.

Pouget, L., Russo, B., Escaler, I., Redaño, Á., Ribalaygua, J., & Garcia, J. (s. f.). Impacto del Cambio Climático en el Riesgo de Inundaciones Urbanas en Barcelona.

Rodríguez, R., Navarro, X., Casas, M. C., Ribalaygua, J., Russo, B., Pouget, L., & Redaño, A. (2014). Influence of climate change on IDF curves for the metropolitan area of Barcelona (Spain): INFLUENCE OF CLIMATE CHANGE ON IDF CURVES OF BARCELONA (SPAIN). *International Journal of Climatology*, 34(3), 643-654. <http://doi.org/10.1002/joc.3712>

Russo, B., Gómez, M., Macchione, F., & de Recerca FLUMEN, G. (s. f.). Criterios de peligrosidad en medio urbano. Estudio comparativo entre referencias nacionales e internacionales.

Russo, B., Velasco, M., & Suñer, D. (2013). FLOOD HAZARD ASSESSMENT CONSIDERING CLIMATE CHANGE IMPACTS—APPLICATION TO BARCELONA CASE STUDY USING A 1D/2D DETAILED COUPLED MODEL. En *International Conference on Flood Resilience: Experiences in Asia and Europe*. Exeter, UK: Centre for Water Systems, University of Exeter.

Santana, A. (s. f.). Introducción al uso de R-Commander.



Secretaría de Estado de Interior. Directriz Básica de Planificación de Protección Civil ante el Riesgo de Inundaciones (1995).

Relación de documentos

(X) Memoria	246	páginas
(_) Anexos	49	páginas

La Almunia, a 2 de diciembre de 2015

Firmado: David Mendieta Redrado