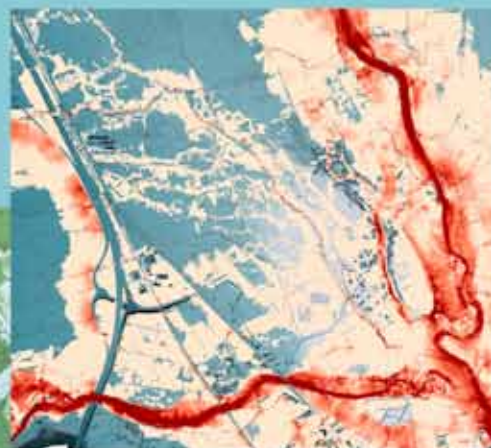


# GUÍA METODOLÓGICA

PARA EL DESARROLLO DEL SISTEMA NACIONAL  
DE CARTOGRAFÍA DE ZONAS

# INUNDABLES



GOBIERNO  
DE ESPAÑA

MINISTERIO  
DE MEDIO AMBIENTE,  
Y MEDIO RURAL Y MARINO

GUÍA METODOLÓGICA  
PARA EL DESARROLLO DEL SISTEMA NACIONAL  
DE CARTOGRAFÍA DE ZONAS  
**INUNDABLES**



Madrid - 2011

# GUÍA METODOLÓGICA

## PARA EL DESARROLLO DEL SISTEMA NACIONAL DE CARTOGRAFÍA DE ZONAS INUNDABLES

<b>1 INTRODUCCIÓN</b>	<b>13</b>
<b>2 CARTOGRAFÍA Y DATOS BÁSICOS DE PARTIDA</b>	<b>17</b>
2.1 INFORMACIÓN DE PARTIDA	19
2.2 MODELO DIGITAL DEL TERRENO	19
2.2.1 Introducción a la tecnología LIDAR	19
2.2.2 Precisión del LIDAR	22
2.2.3 Control de calidad por cambios de escala (o resize)	24
2.2.4 Ventajas e inconvenientes del LIDAR respecto a la cartografía tradicional	24
2.2.5 Productos iniciales	25
2.2.6 Eliminación de puentes	25
2.2.7 Corrección de zonas con agua	26
2.2.8 Vectorización de edificios	26
2.2.9 Identificación de motas y terraplenes de obras lineales	27
2.2.10 Productos finales: MDTactual y MDTnatural	27
2.3 ORTOFOTOS ACTUALES	29
2.4 FOTOS AÉREAS HISTÓRICAS	30
2.4.1 Preparación de las fotos	30
2.4.2 Proceso de ortorrectificación	30
2.5 INFORMACIÓN CARTOGRÁFICA COMPLEMENTARIA PARA LA SIMULACIÓN	32
2.5.1 Caracterización de puentes y otras infraestructuras	32
2.5.2 Usos del suelo y rugosidad	32
<b>3 ESTUDIOS HIDROLÓGICOS</b>	<b>35</b>
3.1 INTRODUCCIÓN	37
3.2 EL MAPA DE CAUDALES MÁXIMOS	37
3.3 RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN FORONÓMICA	40
3.3.1 Criterios de selección de los puntos aforados (estaciones de aforo y embalses)	41
3.3.2 Tratamiento y revisión de la información sobre caudales máximos anuales	44
3.3.3 Análisis y tratamiento de la información sobre volúmenes máximos anuales	49
3.3.4 Ajuste de las leyes de frecuencia de caudales y volúmenes máximos	53
3.4 GRADO DE ALTERACIÓN HIDROLÓGICA DE LA CUENCA	60
3.5 ESTIMACIÓN PRELIMINAR DEL GRADO DE LAMINACIÓN	63
3.6 CÁLCULO DE LOS HIDROGRAMAS DE CRECIDA EN RÉGIMEN NATURAL. CUENCAS DE PEQUEÑO Y MEDIANO TAMAÑO	66
3.6.1 Construcción del modelo	68
3.6.1.1 División en subcuencas	68
3.6.1.2 Tormentas de cálculo	71
3.6.1.2.1 Interpolación de la precipitación y cálculo de la lluvia areal	72
3.6.1.2.1.1 Métodos directos de cálculo de la lluvia areal	73
3.6.1.2.1.2 Métodos de ajuste de una superficie de precipitación	75
3.6.1.2.1.3 Comparación entre métodos y ejemplo de aplicación	79
3.6.1.2.2 Construcción del hietograma de cálculo	81

3.6.1.3	Modelización de la infiltración y otras detracciones. Función producción	86
3.6.1.4	Cálculo del caudal de escorrentía directa. Función distribución	89
3.6.1.5	Propagación en cauce	91
3.6.2	Calibración del modelo	98
3.6.2.1	Calibración de la función producción	98
3.6.2.2	Calibración de la función distribución	100
3.7	CÁLCULO DE LOS HIDROGRAMAS DE CRECIDA EN RÉGIMEN NATURAL EN CUENCAS DE GRAN TAMAÑO	103
3.8	CÁLCULO DE CAUDALES EN RÉGIMEN ALTERADO	106
<b>4</b>	<b>ANÁLISIS HISTÓRICO</b>	<b>109</b>
4.1	INTRODUCCIÓN	111
4.2	ESTUDIO EVOLUTIVO DEL MEDIO FLUVIAL	111
4.2.1	Introducción	111
4.2.2	Delimitación de la zona inundable	112
4.2.3	Delimitación del cauce histórico	113
4.2.3.1	Canal de aguas bajas	114
4.2.3.2	Zona ribereña	116
4.2.3.3	Cauces meandriformes y trenzados ( <i>braided</i> )	118
4.2.3.4	Ampliaciones del cauce	118
4.2.4	Identificación de márgenes con alta inundabilidad	120
4.2.4.1	Evidencias relacionadas con una inundación reciente	120
4.2.4.2	Evidencias de actividad fluvial reiterada	120
4.3	ANÁLISIS DE INUNDACIONES HISTÓRICAS	124
4.3.1	Fuentes de datos sobre inundaciones históricas	124
4.3.2	Selección y almacenamiento	125
4.3.3	Validación de datos y secuencia de inundaciones	127
4.3.4	Calados	130
4.3.5	Inundabilidad natural y/o actual	132
4.3.6	Jerarquización de eventos históricos en función de su envergadura	133
4.3.6.1	Indicador 1. Datos de caudal	134
4.3.6.2	Indicador 2. Magnitud del evento	136
4.3.6.3	Indicador 3. Número de encuestas que aluden al evento	138
4.3.6.4	Indicador 4. Porcentaje de llanuras con ocupación máxima	139
4.3.6.5	Indicador 5. Otras fuentes de datos	140
4.3.6.6	Combinación de indicadores	141
4.3.6.7	Análisis de resultados	142
4.3.7	Recurrencia de las inundaciones	143
4.3.7.1	Datos históricos abundantes y baja influencia artificial	144
4.3.7.2	Datos históricos reducidos y alta influencia artificial	146
4.3.7.3	Sólo un dato de inundación histórica	147
4.3.8	Representación cartográfica y gestión de datos	147
<b>5</b>	<b>ANÁLISIS GEOMORFOLÓGICO</b>	<b>151</b>
5.1	INTRODUCCIÓN	153
5.1.1	Antecedentes	153
5.1.2	Objetivos y etapas metodológicas	154
5.2	OBSERVACIONES EN EL CAUCE	154
5.2.1	Análisis de gabinete	155
5.2.2	Análisis de campo	156
5.2.2.1	Evidencias efímeras y topográficas de actividad reciente o reiterada	158
5.2.2.1.1	Depósitos de flotantes	158
5.2.2.1.2	Sedimentos fluviales expuestos y bajo-nulo desarrollo edáfico	159
5.2.2.2	Límites del cauce	160
5.3	OBSERVACIONES EN LAS MÁRGENES	163
5.3.1	Terrenos con evidencias efímeras de inundación reciente	163
5.3.1.1	Superficie afectada y calado de la inundación	163

5.3.1.2	Indicadores de avenidas intensas	164
5.3.1.3	Análisis combinado de indicadores	166
5.3.2	Terrenos con evidencias de inundación reiterada	166
5.3.2.1	Ejemplos LIDAR	168
5.3.2.2	Ejemplos de ortofotos	169
5.3.3	Terrenos sin evidencias de inundación	170
5.3.4	Terrenos retocados artificialmente	170
5.3.5	Delimitación de unidades inundables	170
5.4	REPRESENTACIÓN CARTOGRÁFICA	174
5.4.1	Flujos secundarios	175
5.4.1.1	Flujos secundarios de tipo A	175
5.4.1.2	Flujos secundarios de tipo B	175
5.4.1.3	Flujos secundarios de tipo C	176
5.4.2	Evidencias efímeras y topográficas	176
5.4.2.1	Evidencias efímeras de inundación reciente (EF)	176
5.4.2.2	Evidencias erosivas y sedimentarias nítidas (EN)	176
5.4.2.3	Evidencias erosivas y sedimentarias suavizadas (ES)	177
<b>6</b>	<b>ANÁLISIS GEOMORFOLÓGICO-HISTÓRICO</b>	<b>179</b>
6.1	DOMINIO PÚBLICO HIDRÁULICO PROBABLE	181
6.1.1	Opción A (DHPa)	181
6.1.2	Opción B (DHPb)	182
6.1.3	Opción C (DHPc)	184
6.2	ZONA DE FLUJO PREFERENTE	185
6.3	ZONIFICACIÓN DEL ÁREA INUNDABLE	187
6.3.1	Introducción y objetivos	187
6.3.2	Etapas metodológicas en la zonificación	187
6.3.3	Inundabilidad en condiciones naturales	189
6.3.3.1	Inundabilidad muy alta ( $\leq 10$ años)	190
6.3.3.2	Inundabilidad alta (10-100 años)	190
6.3.3.3	Inundabilidad media-baja (100-500 años)	190
6.3.3.4	Inundabilidad máxima	191
6.3.3.5	Ejemplo: inundabilidad según análisis geomorfológico	192
6.3.4	Inundabilidad en condiciones actuales alteradas	193
6.3.4.1	Ejemplo: análisis geomorfológico-histórico en terrenos antropizados	194
6.4	TRATAMIENTO DE SISTEMAS TORRENCIALES	196
6.4.1	Introducción	196
6.4.2	Antecedentes	198
6.4.3	Metodología	199
6.4.3.1	Identificación de zonas torrenciales	199
6.4.3.1.1	Abanicos torrenciales	200
6.4.3.1.2	Fondos de valle torrenciales	201
6.4.3.1.3	Zonas de pérdida de confinamiento	202
6.4.3.2	Identificación de procesos dominantes	202
6.4.3.3	Zonificación de la peligrosidad	203
<b>7</b>	<b>ESTUDIO HIDRÁULICO</b>	<b>207</b>
7.1	INFORMACIÓN DE PARTIDA	209
7.2	SELECCIÓN DEL MODELO HIDRÁULICO	209
7.2.1	Ecuaciones de Saint-Venant	209
7.2.2	Modelos unidimensionales y bidimensionales	210
7.2.3	Modelos en régimen variable o permanente	214
7.2.4	Análisis preliminar de la zona inundable	215
7.3	MODELOS UNIDIMENSIONALES	218
7.3.1	Introducción a los modelos unidimensionales	218
7.3.2	Análisis de la zona de estudio	219

7.3.3	Construcción de la geometría del modelo	220
7.3.3.1	Preparación de la geometría básica a partir de capas de información requeridas por HEC-GeoRAS	220
7.3.3.2	Importación de la geometría básica al modelo e introducción de los elementos estructurales adicionales en situación alterada	223
7.3.3.3	Creación de las geometrías necesarias para la modelización detallada de calados y velocidades	223
7.3.4	Incorporación de puentes en la modelización hidráulica	226
7.4	MODELOS BIDIMENSIONALES	231
7.4.1	Recomendaciones para la creación de mallas no estructuradas en la modelización bidimensional	232
7.4.2	Creación de mallas a partir de TINs	233
7.4.3	Creación de mallas a partir del MDT	234
7.4.4	Control de calidad final de la malla de cálculo	238
7.5	ESTIMACIÓN DE LAS PÉRDIDAS DE CARGA	240
7.5.1	Pérdidas de carga por fricción	240
7.5.1.1	Rugosidad en la llanura de inundación	242
7.5.1.2	Rugosidad en el cauce	245
7.5.2	Pérdidas de carga por contracción y expansión	247
7.6	CONDICIONES DE CONTORNO Y CONDICIÓN INICIAL	248
7.6.1	Condiciones de contorno	248
7.6.2	Condición inicial	256
7.7	CALIBRACIÓN	257
7.8	POSTPROCESO Y REPRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS DE LA MODELIZACIÓN HIDRÁULICA	261
<b>8</b>	<b>DELIMITACIÓN DEL DOMINIO PÚBLICO HIDRÁULICO PROBABLE Y DE LA ZONA DE FLUJO PREFERENTE Y ZONIFICACIÓN DE LA INUNDABILIDAD</b>	<b>267</b>
8.1	DELIMITACIÓN DEL DOMINIO PÚBLICO HIDRÁULICO PROBABLE	269
8.1.1	Definición	269
8.1.2	Estimación de la MCO a partir de registros foronómicos suficientemente largos	269
8.1.3	Estimación de la MCO a partir de la información del CAUMAX	270
8.1.4	Estimación de la MCO en puntos no aforados	271
8.1.5	Delimitación del DPHP	271
8.2	DELIMITACIÓN DE LA ZONA DE FLUJO PREFERENTE	273
8.3	ZONIFICACIÓN DE LA INUNDABILIDAD	280
<b>ANEJOS</b>		
ANEJO I:	AJUSTE DE LA FUNCIÓN $\text{SQRT-ET}_{\text{máx}}$ MEDIANTE MOMENTOS PONDERADOS PROBABILÍSTICAMENTE	283
ANEJO II:	TABLAS DE VALORES DEL UMBRAL DE ESCORRENTÍA (mm)	287
ANEJO III:	EJEMPLO DE CÁLCULO DE CAUDALES EN RÉGIMEN ALTERADO MEDIANTE GENERACIÓN ESTOCÁSTICA DE PRECIPITACIONES	295
ANEJO IV:	MÉTODO BOOTSTRAP PERCENTIL	307
ANEJO V:	VALORES DEL COEFICIENTE DE RUGOSIDAD DE MANNING ASIGNADOS A LOS USOS DEL SUELO DEL SIOSE Y CLC2000	311
ANEJO VI:	MÉTODO DE COWAN PARA LA ESTIMACIÓN DEL NÚMERO DE MANNING EN EL LECHO DEL CAUCE	319
ANEJO VII:	APLICACIÓN DE MODELOS BIDIMENSIONALES EN EL ESTUDIO HIDRÁULICO DE RÍOS	323
ANEJO VIII:	CONTRASTE DE INFORMACIÓN ESPACIAL SOBRE INUNDACIONES	333
ANEJO IX:	REFERENCIAS	341