

# **ESTUDIO DE INUNDABILIDAD DE LA E.D.A.R. DE SAHÚN (HUESCA).**

**Proyecto Final de Carrera Tipo II**

**Titulación: Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos**

**Especialidad: Hidráulica y Medio Ambiente**

**Autor: Ignacio Marcos Ramón**

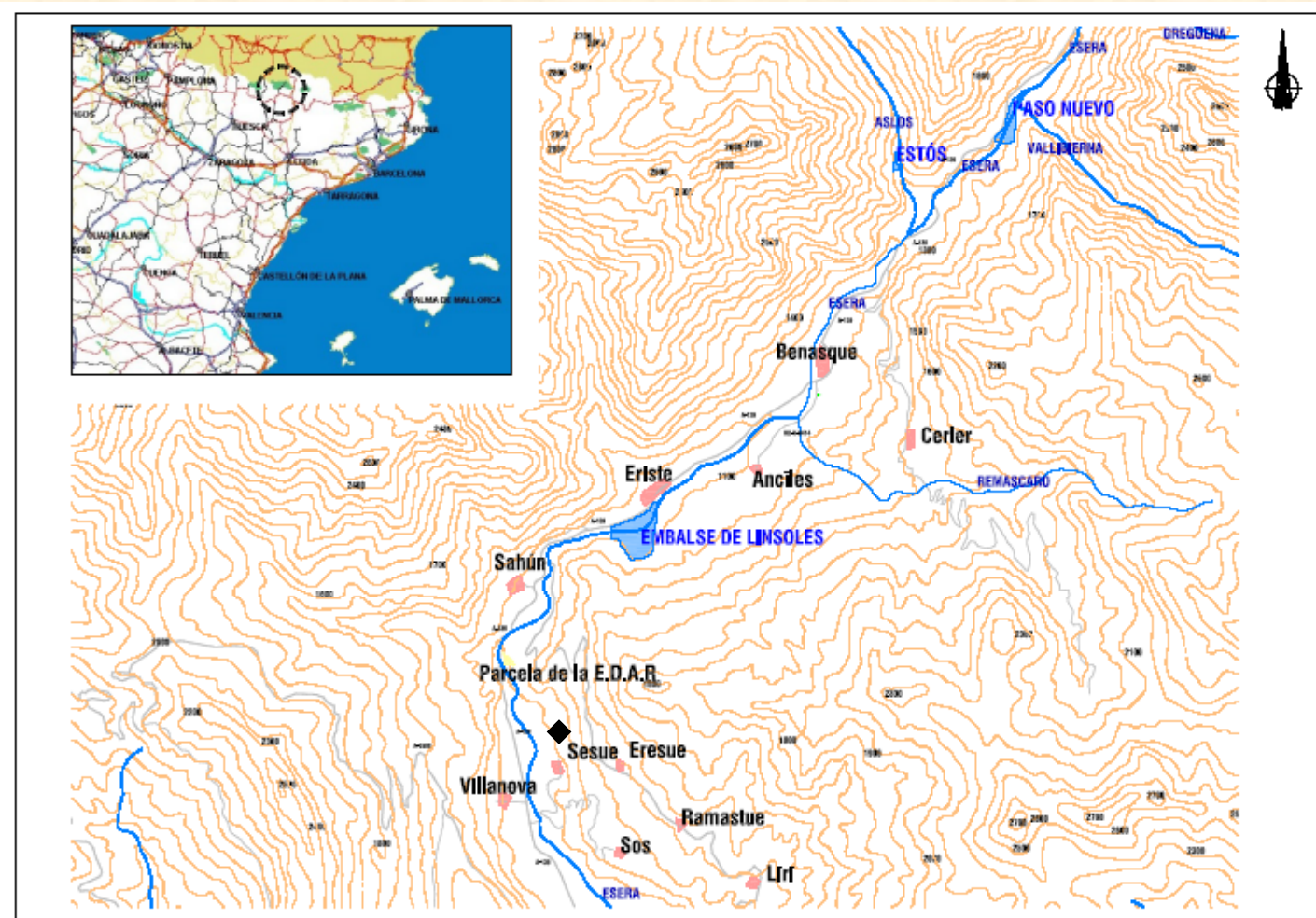
**Tutor: D. Félix R. Francés García**



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA**  
E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos



# Localización



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA  
E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos



# Antecedentes

---

- Crecida del Ésera (800 m<sup>3</sup>/seg) y del Cinca (1500 m<sup>3</sup>/seg) en el año 1907
- Crecida del Ara en Boltaña (2670 m<sup>3</sup>/seg) en el año 1942
- Crecida del Ésera con 130 m<sup>3</sup>/s (11,23 Hm<sup>3</sup>) de media diaria en Eriste y 720 m<sup>3</sup>/seg de máximo instantáneo en Graus en el año 1963.
- Evacuación de Benasque en el año 1982, crecida de 25 años de periodo de retorno



# Objetivos

---

1. Caudales de cálculo.
2. Cotas de la lámina de agua.
3. Zonas afectadas y medidas de protección.



# Metodología

---

## 1. Estudio hidrológico

- ✓ Caracterización hidrológica.
- ✓ Tormenta de diseño.
- ✓ Modelación hidrológica.

## 2. Estudio hidráulico.

- ✓ Construcción del modelo.
- ✓ Cálculo de la lámina de agua.
- ✓ Análisis de sensibilidad.

## 3. Medidas de protección necesarias.





---

## 1. Estudio hidrológico

- ✓ **Caracterización hidrológica.**
- ✓ Tormenta de diseño.
- ✓ Modelación hidrológica.

## 2. Estudio hidráulico.

- ✓ Construcción del modelo.
- ✓ Cálculo de la lámina de agua.
- ✓ Análisis de sensibilidad.

## 3. Medidas de protección necesarias.



# 1.Estudio hidrológico

---

## Caracterización hidrológica

Conjunto de parámetros que definen hidrológicamente la cuenca:

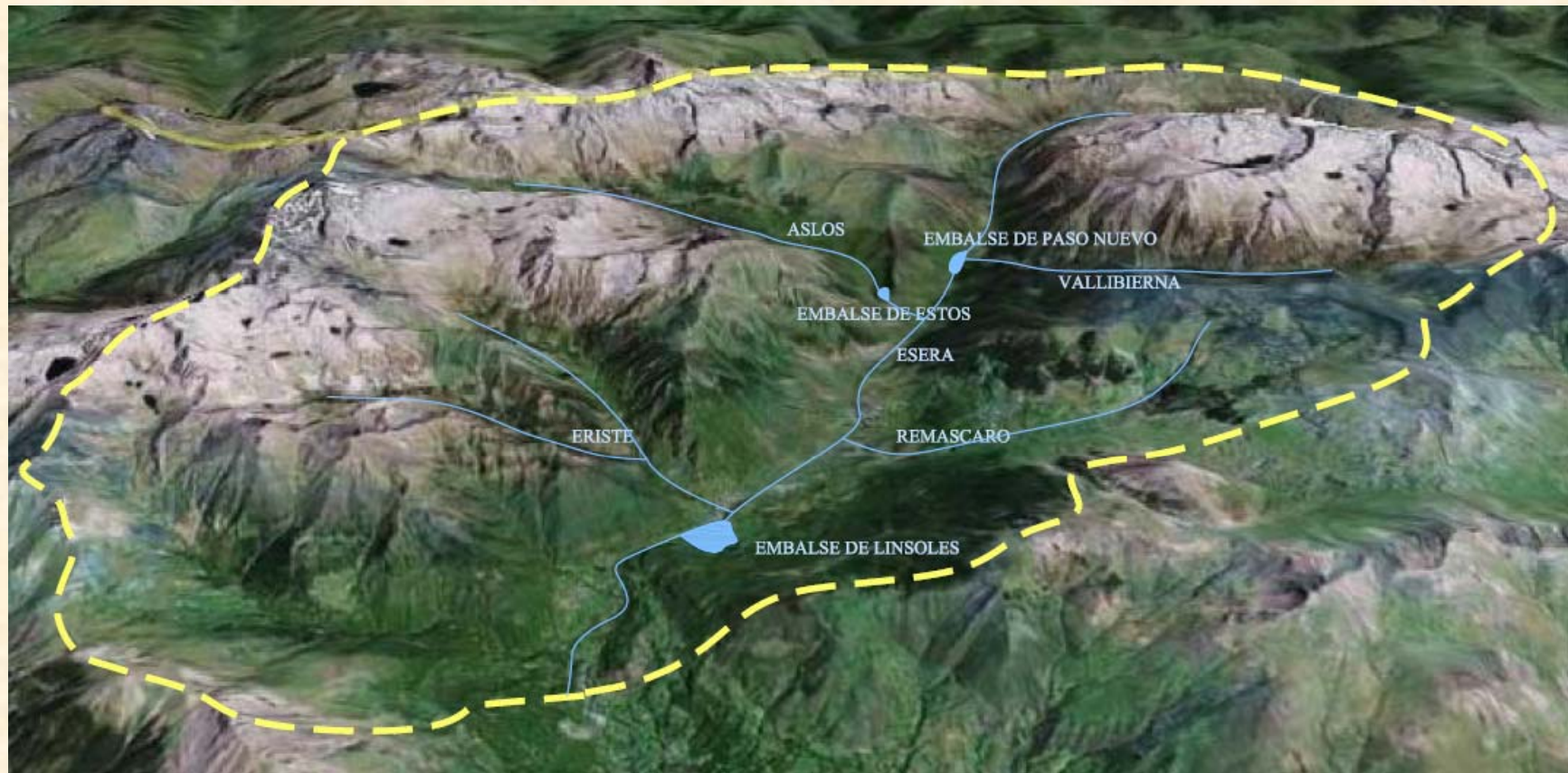
- Superficie
- Longitud, sección y pendiente de los cauces
- Tiempos de concentración y de desfase
- Longitud del recorrido principal
- Umbral de escorrentía



# 1. Estudio hidrológico

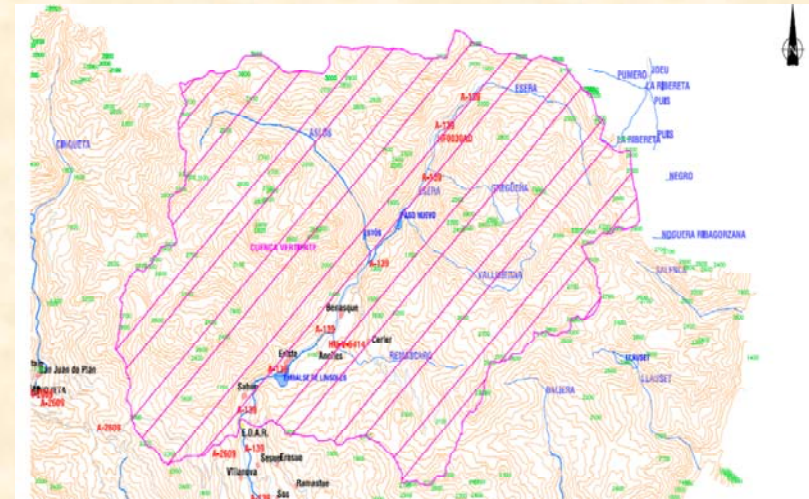
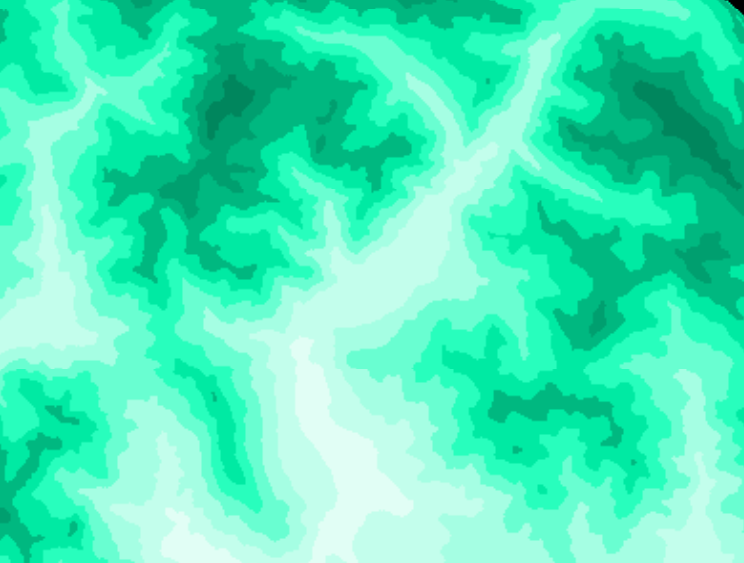
---

## Caracterización hidrológica.





## Caracterización hidrológica.



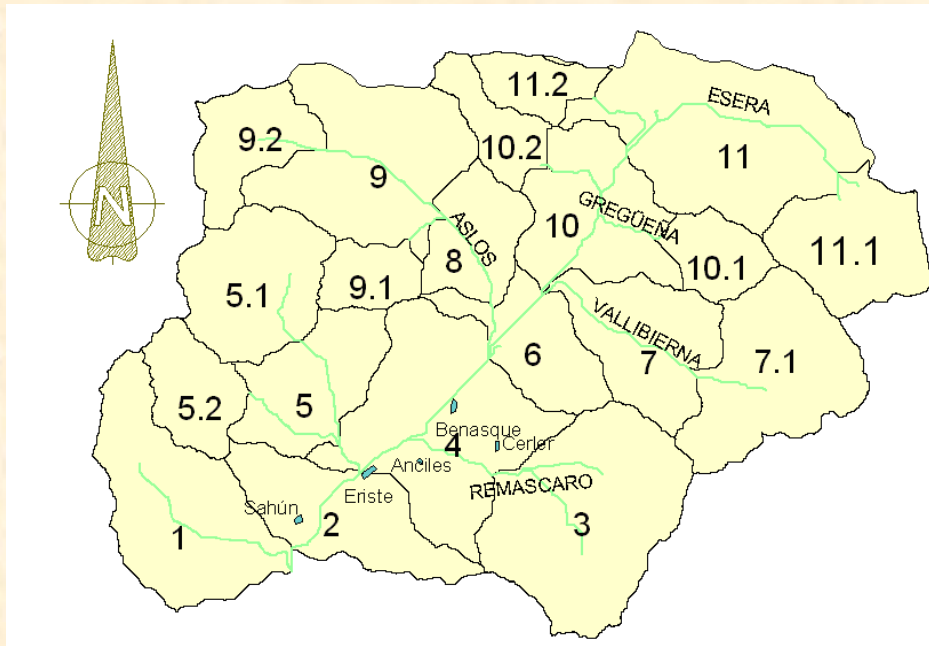
Área (Km2)	tc (h)	td (min)	J %	Lrppal (Km)
310,40	6,96	146,26	0,061	31,15

$$t_d = 0.35 \cdot t_c \quad t_c = 0.3 \cdot \left( \frac{L}{J^{1/4}} \right)^{0.76}$$



# 1. Estudio hidrológico

## Caracterización hidrológica.



Subcuenca	A (Km2)	Tc (h)	Td (min)	J( %)	Lrppal (m)
1	23,41	2,58	54,21	0,16	10756,19
10	17,07	1,99	41,85	0,12	7108,97
10.1	6,35	1,21	25,44	0,23	4327,06
10.2	6,22	1,49	31,30	0,20	5477,84
11	30,65	2,46	51,70	0,14	9759,04
11.1	14,54	1,58	33,19	0,15	5522,57
11.2	5,23	1,27	26,65	0,17	4288,48
2	15,59	2,30	48,27	0,13	8769,21
3	29,10	2,17	45,57	0,11	7746,78
4	28,62	2,05	43,05	0,17	8015,73
5	13,40	1,39	29,27	0,22	5156,17
5.1	16,22	1,50	31,43	0,26	5928,55
5.2	8,46	1,26	26,54	0,19	4355,76
6	11,06	1,54	32,32	0,23	5927,54
7	15,17	2,12	44,55	0,14	8050,63
7.1	20,74	1,98	41,49	0,12	7014,11
8	9,70	1,67	35,12	0,14	5824,95
9	23,79	2,08	43,73	0,15	7923,65
9.1	5,40	1,19	24,94	0,19	4024,87
9.2	9,68	1,52	32,02	0,23	5900,02

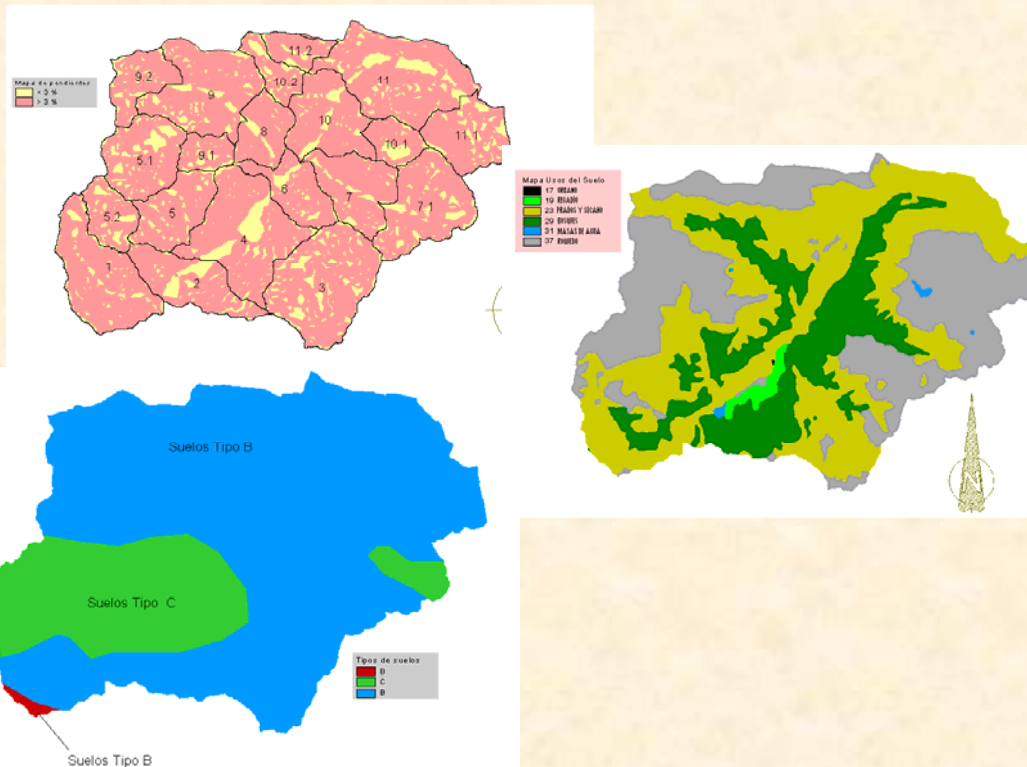
$$t_c = 0.3 \cdot \left( \frac{L}{J^{1/4}} \right)^{0.76} \quad t_d = 0.35 \cdot t_c$$



# 1. Estudio hidrológico

## Caracterización hidrológica.

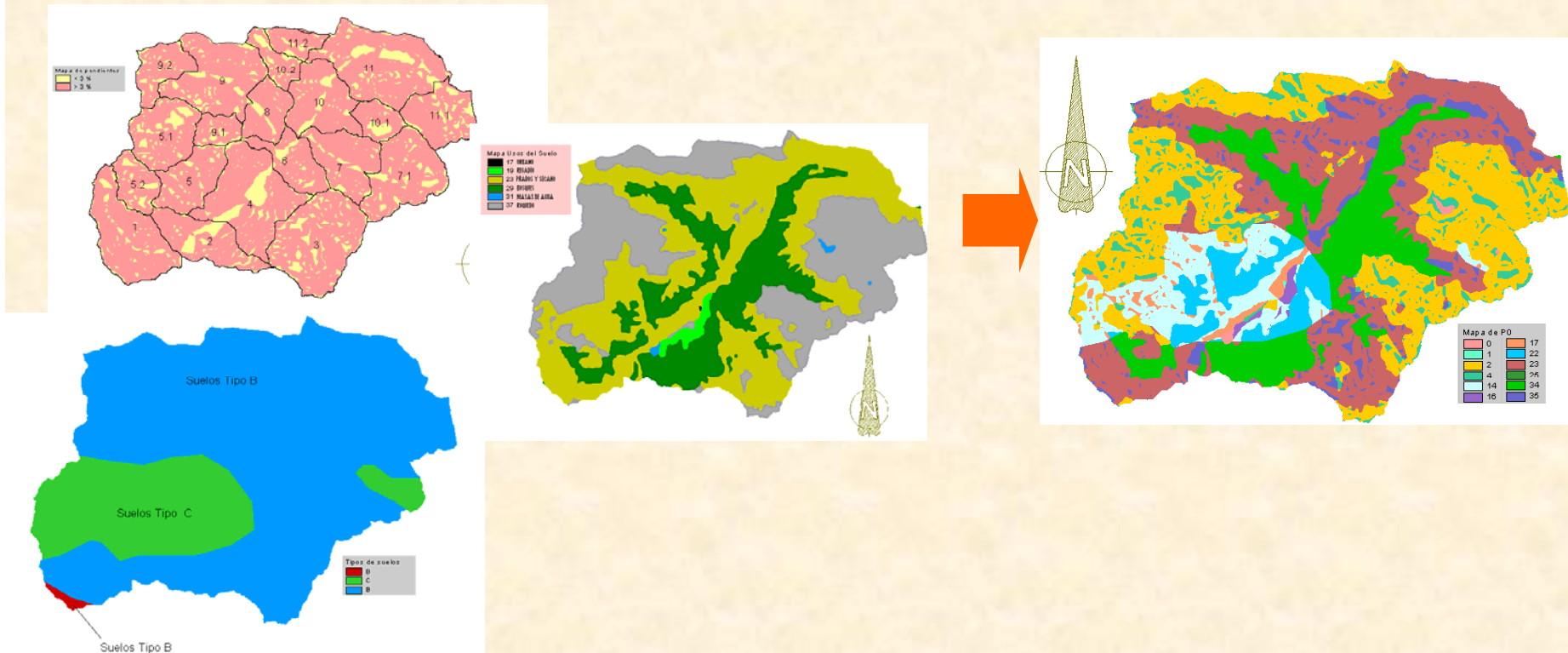
Umbral de escorrentía ( $P_0$ )



# 1.Estudio hidrológico

## Caracterización hidrológica.

Umbral de escorrentía ( $P_0$ )







# 1. Estudio hidrológico

## Caracterización hidrológica.

Umbral de escorrentía ( $P_0$ )

Subcuenca	1	10	10.1	10.2	11	11.1	11.2	2	3	4	5	5.1	5.2	6	7	7.1	8	9	9.1	9.2
P0	18,6	26,5	5,10	13,5	21,5	7,29	8,97	<b>25,0</b>	19,0	20,2	15,3	<b>5,1</b>	<b>6,6</b>	26,9	21,2	7,12	<b>27,7</b>	16,9	8,89	12,6
CN	73,1	65,6	90,8	78,9	70,2	87,4	84,9	67,0	72,7	71,4	76,8	90,8	88,9	65,3	70,4	87,7	64,7	75,0	85,1	80,0

$$CN = \frac{5080}{P0 + 50,8}$$



---

## 1. Estudio hidrológico

- ✓ Caracterización hidrológica.
- ✓ **Tormenta de diseño.**
- ✓ Modelación hidrológica.

## 2. Estudio hidráulico.

- ✓ Construcción del modelo.
- ✓ Cálculo de la lámina de agua.
- ✓ Análisis de sensibilidad.

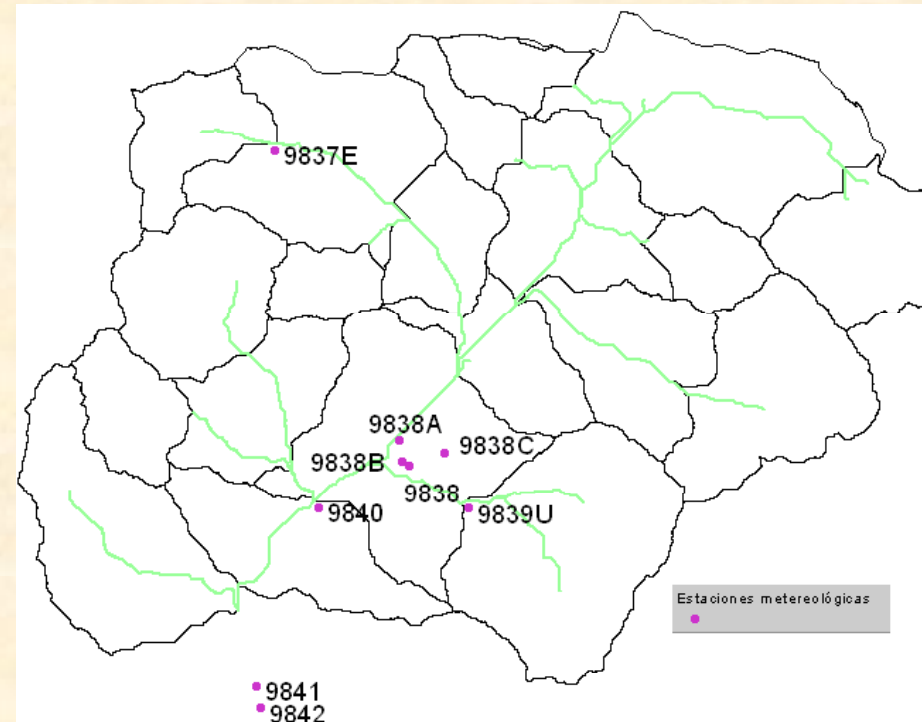
## 3. Medidas de protección necesarias.



# 1. Estudio hidrológico

## Tormenta de diseño.

- Relación de la lluvia con la altura
- Precipitación anual media máxima diaria
- Curvas IDF
- Hietograma



# 1. Estudio hidrológico

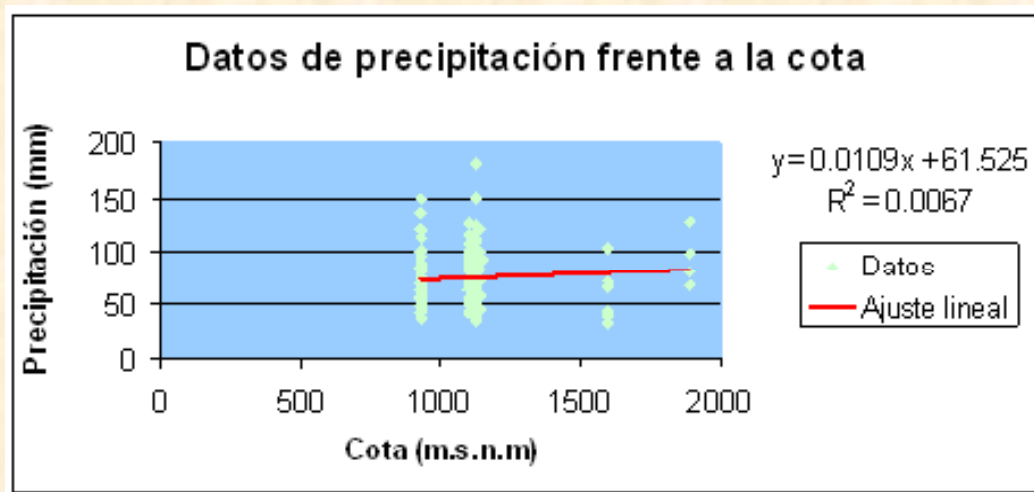
## Tormenta de diseño.

Datos de 9 estaciones distintas.

La longitud de las series es de 95 años.

Desnivel máximo entre estaciones es de 900 m.

### Relación Precipitación-cota





# 1. Estudio hidrológico

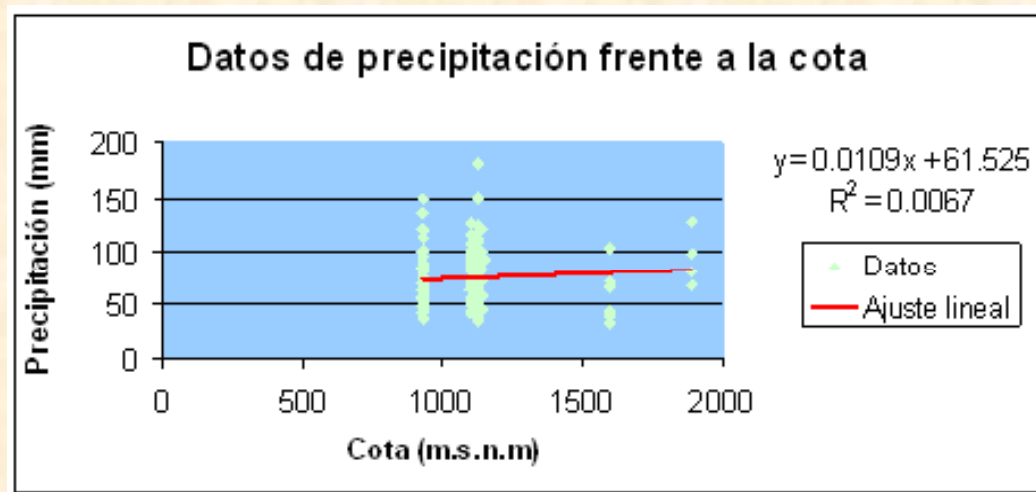
## Tormenta de diseño.

Datos de 9 estaciones distintas.

La longitud de las series es de 95 años.

Desnivel máximo entre estaciones es de 900 m.

### Relación Precipitación-cota



$$\beta = 0,0109$$



# 1. Estudio hidrológico

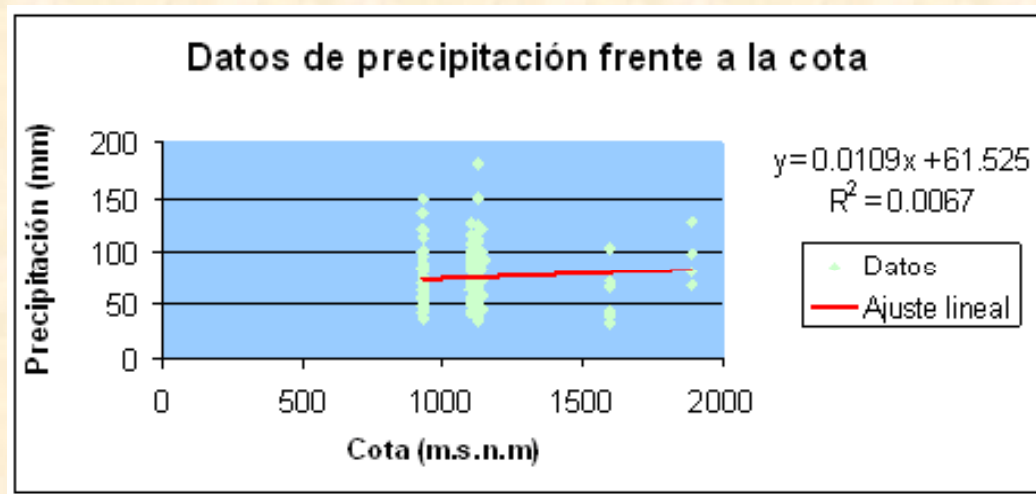
## Tormenta de diseño.

Datos de 9 estaciones distintas.

La longitud de las series es de 95 años.

Desnivel máximo entre estaciones es de 900 m.

### Relación Precipitación-cota



$$\beta = 0,0109$$

### Precipitación media máxima diaria

$$P_i = \sum W_j \cdot [P_j + (Z_i - Z_j) \cdot \beta]$$

$$K_A = 1 - \frac{\log A}{15} \quad K_A = 0.8338$$

Subcuenca	PMDA (mm)
1	63,64
2	62,16
3	62,39
4	62,19
5	63,09
6	62,28
7	62,75
8	63,05
9	64,18
10	62,65
11	61,41



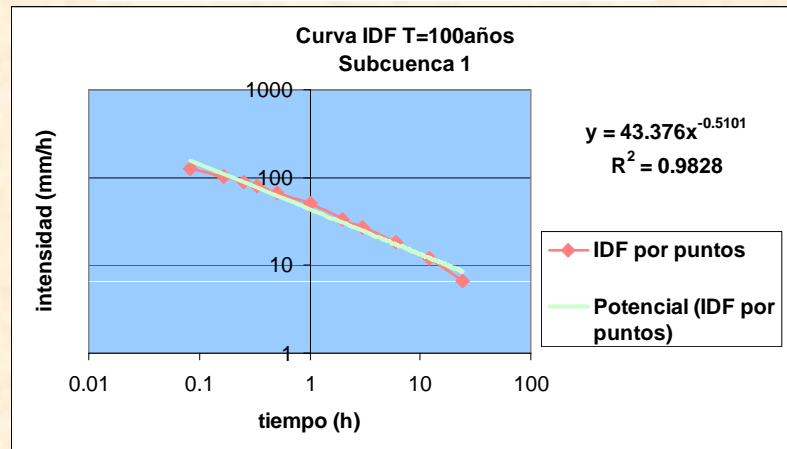
# 1. Estudio hidrológico

## Tormenta de diseño.

### Curva IDF

Obtenida del reciente estudio de Salas (2006), “Estimación de la intensidad máxima anual para una duración y período de retorno determinados en la España peninsular mediante la aplicación informática Maxin”, Universidad Politécnica de Madrid, E.U.I.T. Forestal.

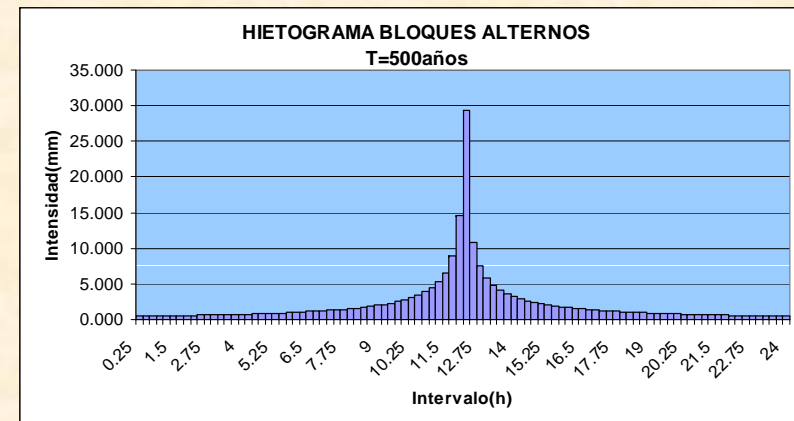
$$I(d,T) = \frac{\overline{PMDA}}{24} \cdot F \cdot CA(T)_{FERRER} \cdot g(d) \cdot \begin{cases} h_L(T) \\ h_C(T) \end{cases}$$



### Hietograma

Calculados mediante el método de bloques alternos que supone la intensidad media más desfavorable para cada intervalo de tiempo.

Se fijó un intervalo de 15 minutos para el cálculo del hietograma.



---

## 1. Estudio hidrológico

- ✓ Caracterización hidrológica.
- ✓ Tormenta de diseño.
- ✓ **Modelación hidrológica.**

## 2. Estudio hidráulico.

- ✓ Construcción del modelo.
- ✓ Cálculo de la lámina de agua.
- ✓ Análisis de sensibilidad.

## 3. Medidas de protección necesarias.





# 1. Estudio hidrológico

## Modelación hidrológica.

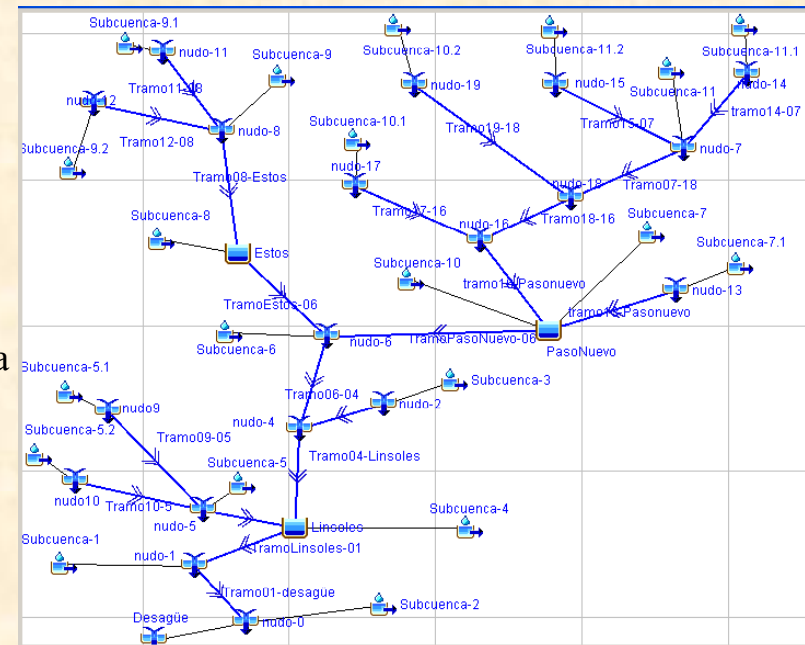
Características del modelo

Calibración del modelo

- Metodología y motivación
- Análisis estadístico de los datos de aforo
- Cuantiles obtenidos
- Ajuste de los ( $P_0$ )

Simulación y cálculo de cuantiles de caudales de crecida

Análisis de sensibilidad



# 1. Estudio hidrológico

---

## Modelación hidrológica.

### Características del modelo

Se ha realizado un modelación hidrológica pseudo-distribuida basada en la utilización de hidrogramas unitarios.

El modelo general está compuesto de submodelos:

- Infiltración → Método del Número de Curva del “US Soil Conservation Service”
- Transformación de lluvia-escorrentía → Método del Hidrograma Unitario del “US Soil Conservation Service”
- Propagación en cauce → Onda cinemática
- Modelización de los embalses → Método Puls Modificado con curvas de descarga
- Modelo meteorológico → Hietogramas de diseño



# 1. Estudio hidrológico

---

## Modelación hidrológica.

Calibración del modelo → Metodología y motivación

### Metodología:

- Análisis de los caudal medio diario máximo anual, en cada escenario posible.
- Ajuste de diversas funciones de distribución.
- Elección de una función según el ajuste gráfico y el principio de parsimonia.
- Ajuste del valor de  $P_0$  en el modelo para obtener el mismo valor del cuantil de 25 años de periodo de retorno que la función de distribución.

### Motivación

Reducir incertidumbre en el modelo por:

- Errores del modelo
- Estado de humedad inicial
- Gestión de los embalses



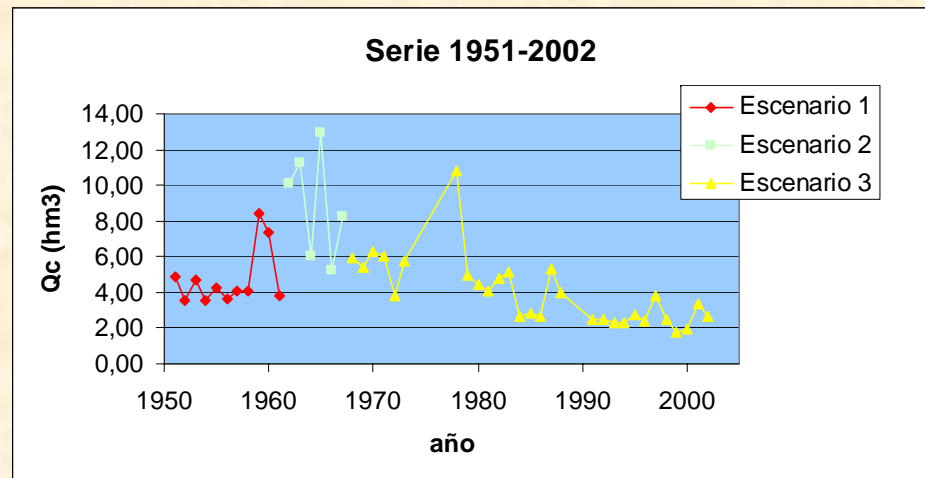
# 1.Estudio hidrológico

## Modelación hidrológica.

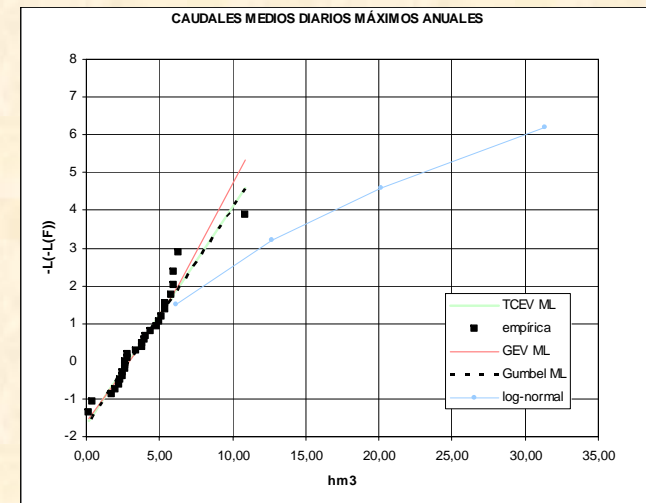
Calibración del modelo → Análisis estadístico de los datos de aforo

Se barajaron tres niveles de embalse posibles

	Embalse		
Nivel (m.s.n.m)	Estós	Paso Nuevo	Linsoles
Umbral Aliviadero	1360	1356	1072
Razonable	1355	1340,5	1069,5
Derivación	1350	1325	1060



Se eligió el ajuste Gumbel en el escenario 3.





# 1.Estudio hidrológico

---

## Modelación hidrológica.

Calibración del modelo → Cuantiles obtenidos

→ Ajuste de los  $P_0$

### Cuantiles obtenidos

Nivel	Cuantil Estadístico (Gumbel)	Simulación Hec-Hms
Umbral Aliviadero	8,43	17,151
Razonable	8,43	14,98
Derivación	8,43	14,2



# 1.Estudio hidrológico

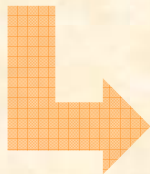
## Modelación hidrológica.

Calibración del modelo → Cuantiles obtenidos

→ Ajuste de los  $P_0$

### Cuantiles obtenidos

Nivel	Cuantil Estadístico (Gumbel)	Simulación Hec-Hms
Umbral Aliviadero	8,43	17,151
Razonable	8,43	14,98
Derivación	8,43	14,2



Nivel	$\beta$
Umbral Aliviadero	2,35
Razonable	1,9
Derivación	1,75



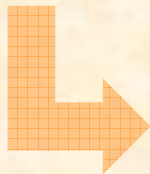
# 1. Estudio hidrológico

## Modelación hidrológica.

Calibración del modelo → Cuantiles obtenidos  
→ Ajuste de los  $P_0$

### Cuantiles obtenidos

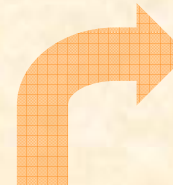
Nivel	Cuantil Estadístico (Gumbel)	Simulación Hec-Hms
Umbral Aliviadero	8,43	17,151
Razonable	8,43	14,98
Derivación	8,43	14,2



Nivel	$\beta$
Umbral Aliviadero	2,35
Razonable	1,9
Derivación	1,75



$$P_0^* = P_0 \cdot \beta$$



### Ajuste de los $P_0$

Subcuencia	$P_0^*$	CN
1	35,44	58,90
10	50,51	50,14
10.1	9,69	83,97
10.2	25,71	66,40
11	40,90	55,40
11.1	13,85	78,57
11.2	17,05	74,87
2	47,55	51,65
3	36,18	58,40
4	38,50	56,89
5	29,15	63,54
5.1	9,75	83,90
5.2	12,68	80,03
6	51,17	49,82
7	40,42	55,69
7.1	13,52	78,98
8	52,66	49,10
9	32,13	61,26
9.1	16,89	75,05
9.2	24,07	67,86



# 1. Estudio hidrológico

---

## Modelación hidrológica.

Simulación y cálculo de cuantiles de caudales de crecida

Periodo de retorno (años)	Q <sub>máx</sub> (m <sup>3</sup> /seg)
500	2418,92
100	1256,69
25	577,10

### Análisis de sensibilidad

Parámetros a evaluar:

- Propagación en cauce: Número de Manning, ancho de los cauces y el talud del cauce
- Efecto laminador de los embalses
- Coeficiente de descarga en los vertederos



# 1.Estudio hidrológico

## Modelación hidrológica.

### Análisis de sensibilidad

Efecto laminador de los embalses

Q <sub>máx</sub> (m <sup>3</sup> /seg) T=500años	
Sin embalses	Con embalses llenos
2552,39	2418,92

Propagación en cauce: Número de Manning,  
ancho del cauce y talud del cauce

Q <sub>máx</sub> (m <sup>3</sup> /seg) T=500años		
Escenario desfavorable	Escenario propuesto	Escenario favorable
2453,93	2418,92	2377,76

Coefficiente de descarga de los vertederos

C <sub>w</sub>	Q <sub>máx</sub> (m <sup>3</sup> /seg) T=500años
1,25	2477,65
0,6	2418,92
0,25	2258,89





---

# 1. Estudio hidrológico

- ✓ Caracterización hidrológica.
- ✓ Tormenta de diseño.
- ✓ Modelación hidrológica.

# 2. Estudio hidráulico.

- ✓ **Construcción del modelo.**
- ✓ Cálculo de la lámina de agua.
- ✓ Análisis de sensibilidad.

# 3. Medidas de protección necesarias.



## 2.Estudio hidráulico

### Construcción del modelo

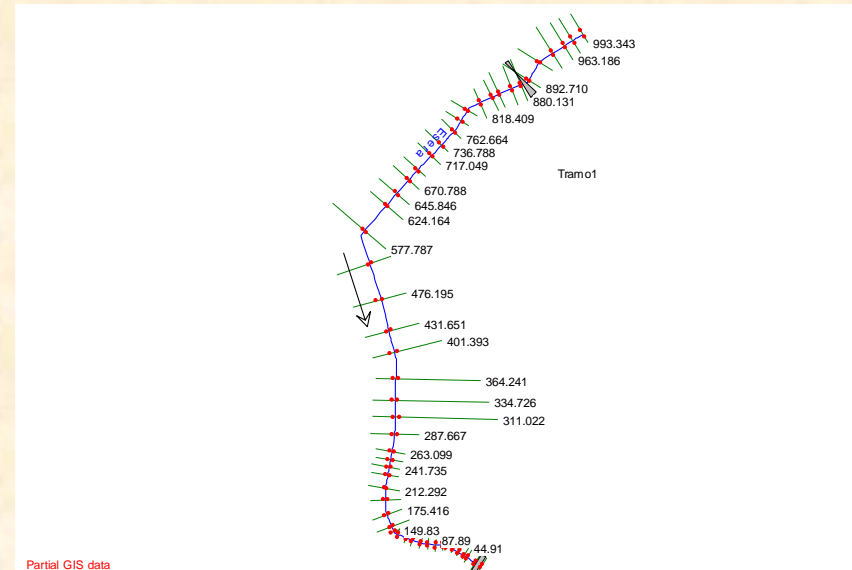
#### Geometría del cauce

- A partir del mapa topográfico con curvas de nivel cada 5m.
- Cuatro secciones obtenidas in-situ
- Longitud del tramo de 1 Kilómetro

#### Hipótesis consideradas

- Flujo unidimensional, variado y estacionario.
- Pendiente de la línea de energía  $S = 5\%$
- Números de Manning  $n = 0.05$  y  $n = 0.06$

#### Infraestructuras en la zona de estudio



---

# 1. Estudio hidrológico

- ✓ Caracterización hidrológica.
- ✓ Tormenta de diseño.
- ✓ Modelación hidrológica.

# 2. Estudio hidráulico.

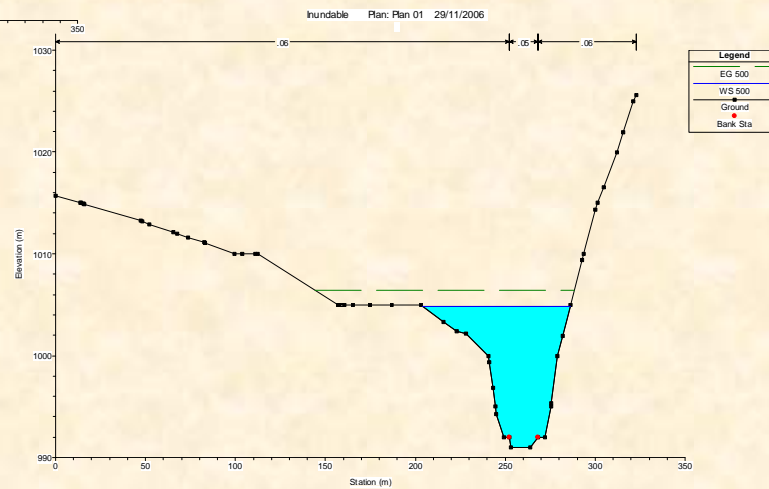
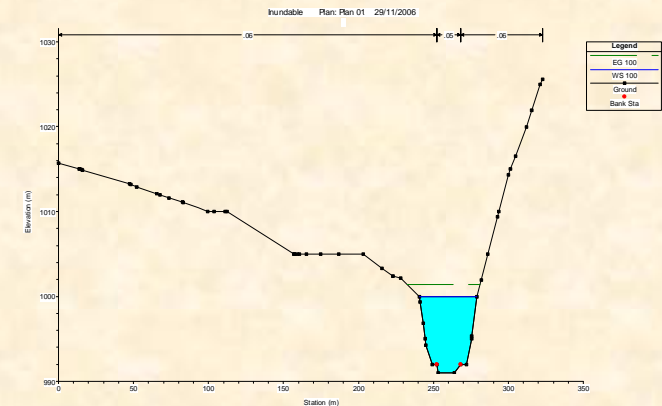
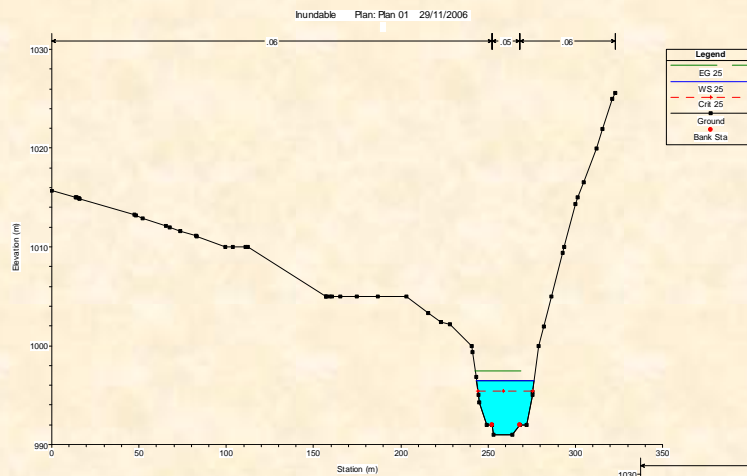
- ✓ Construcción del modelo.
- ✓ **Cálculo de la lámina de agua.**
- ✓ Análisis de sensibilidad.

# 3. Medidas de protección necesarias.



## 2.Estudio hidráulico

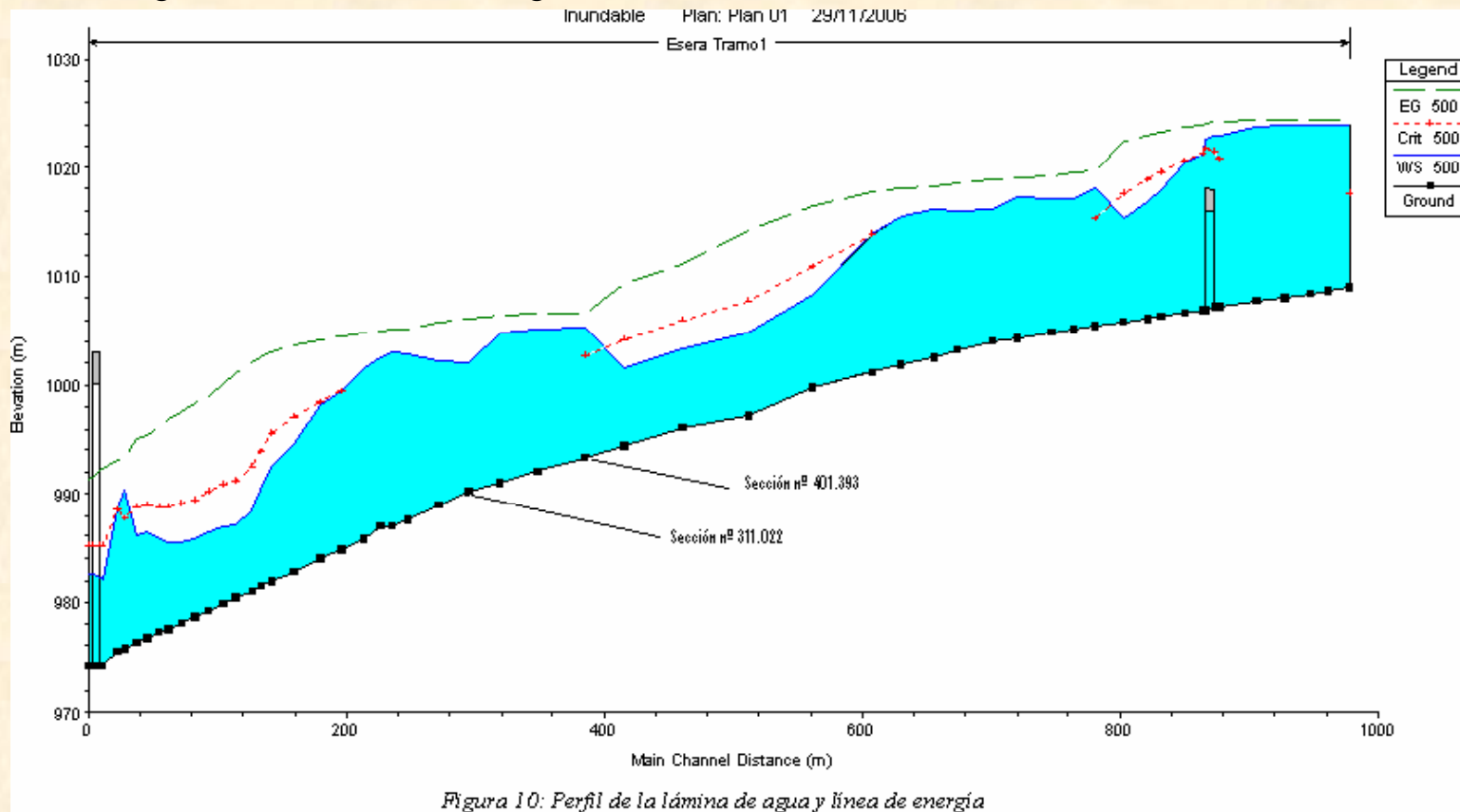
### Cálculo de la lámina de agua



## 2.Estudio hidráulico

### Cálculo de la lámina de agua

Perfil longitudinal de la lámina de agua





## 2.Estudio hidráulico

### Cálculo de la lámina de agua

Sección	T (años)	Q Total (m3/s)	Solera (m)	Cota del agua (m)	Línea de energía (m)
401.393	25	577.1	993.37	996.42	999.65
	100	1256.69	993.37	997.88	1003.37
	500	2418.92	993.37	1005.34	1006.72
364.241	25	577.1	992.06	996.83	998.46
	100	1256.69	992.06	999.95	1001.71
	500	2418.92	992.06	1005.1	1006.56
334.726	25	577.1	990.98	996.43	997.46
	100	1256.69	990.98	999.99	1001.42
	500	2418.92	990.98	1004.86	1006.44
311.022	25	577.1	990.16	995.13	997.13
	100	1256.69	990.16	997.91	1001.06
	500	2418.92	990.16	1001.98	1006.06



---

## 1. Estudio hidrológico

- ✓ Caracterización hidrológica.
- ✓ Tormenta de diseño.
- ✓ Modelación hidrológica.

## 2. Estudio hidráulico.

- ✓ Construcción del modelo.
- ✓ Cálculo de la lámina de agua.
- ✓ **Análisis de sensibilidad.**

## 3. Medidas de protección necesarias.



## 2.Estudio hidráulico

---

### Análisis de sensibilidad

Parámetros a considerar:

- Condiciones de control: pendiente de la línea de energía aguas arriba y aguas abajo
- Número de Manning



## 2.Estudio hidráulico

### Análisis de sensibilidad

Parámetros a considerar:

- **Condiciones de control: pendiente de la línea de energía aguas arriba y aguas abajo**
- Número de Manning

Sección	S=7%		S=5%		S=3%	
	Energía (m)	Cota lamina agua (m)	Energía (m)	Cota lamina agua (m)	Energía (m)	Cota lamina agua (m)
401.393	999.65	996.42	999.65	996.42	999.65	996.42
	1003.37	997.88	1003.37	997.88	1003.37	997.88
	1006.72	1005.34	1006.72	1005.34	1006.72	1005.34
364.241	998.46	996.83	998.46	996.83	998.46	996.83
	1001.71	999.95	1001.71	999.95	1001.71	999.95
	1006.56	1005.1	1006.56	1005.1	1006.56	1005.1
334.726	997.46	996.43	997.46	996.43	997.46	996.43
	1001.42	999.99	1001.42	999.99	1001.42	999.99
	1006.44	1004.86	1006.44	1004.86	1006.44	1004.86
311.022	997.13	995.13	997.13	995.13	997.13	995.13
	1001.06	997.91	1001.06	997.91	1001.06	997.91
	1006.06	1001.98	1006.06	1001.98	1006.06	1001.98



## 2.Estudio hidráulico

### Análisis de sensibilidad

Parámetros a considerar:

- Condiciones de control: pendiente de la línea de energía aguas arriba y aguas abajo
- Número de Manning

Sección	S=7%		S=5%		S=3%	
	Energía (m)	Cota lamina agua (m)	Energía (m)	Cota lamina agua (m)	Energía (m)	Cota lamina agua (m)
401.393	999.65	996.42	999.65	996.42	999.65	996.42
	1003.37	997.88	1003.37	997.88	1003.37	997.88
	1006.72	<b>1005.34</b>	1006.72	<b>1005.34</b>	1006.72	<b>1005.34</b>
364.241	998.46	996.83	998.46	996.83	998.46	996.83
	1001.71	999.95	1001.71	999.95	1001.71	999.95
	1006.56	<b>1005.1</b>	1006.56	<b>1005.1</b>	1006.56	<b>1005.1</b>
334.726	997.46	996.43	997.46	996.43	997.46	996.43
	1001.42	999.99	1001.42	999.99	1001.42	999.99
	1006.44	<b>1004.86</b>	1006.44	<b>1004.86</b>	1006.44	<b>1004.86</b>
311.022	997.13	995.13	997.13	995.13	997.13	995.13
	1001.06	997.91	1001.06	997.91	1001.06	997.91
	1006.06	<b>1001.98</b>	1006.06	<b>1001.98</b>	1006.06	<b>1001.98</b>





## 2.Estudio hidráulico

### Análisis de sensibilidad

Parámetros a considerar:

- Condiciones de control: pendiente de la línea de energía aguas arriba y aguas abajo
- **Número de Manning**

	n		
	favorable	propuesto	desfavorable
Cauce	0.01	0.05	0.07
Márgenes	0.02	0.06	0.08

Sección	Favorable		Propuesto		Desfavorable	
	Energía (m)	Cota lamina agua (m)	Energía (m)	Cota lamina agua (m)	Energía (m)	Cota lamina agua (m)
401.393	1011.1	995.13	999.65	996.42	999.18	998.25
	1012.22	996.59	1003.37	997.88	1002.36	1000.91
	1017.47	998.43	1006.72	1005.34	1007.26	1006.23
364.241	1010.51	994.29	998.46	996.83	998.42	996.81
	1011.95	996.12	1001.71	999.95	1001.89	1000.41
	1017.28	998.17	1006.56	1005.1	1007.05	1006.1
334.726	1009.98	992.9	997.46	996.43	997.61	996.74
	1011.62	994.58	1001.42	999.99	1001.53	1000.2
	1017.03	996.76	1006.44	1004.86	1006.8	1005.07
311.022	1009.56	992.35	997.13	995.13	997.11	995.12
	1011.44	994.21	1001.06	997.91	1001.01	997.89
	1016.9	996.71	1006.06	1001.98	1006.14	1002.99



## 2.Estudio hidráulico

### Análisis de sensibilidad

Parámetros a considerar:

- Condiciones de control: pendiente de la línea de energía aguas arriba y aguas abajo
- **Número de Manning**

	n		
	favorable	propuesto	desfavorable
Cauce	0.01	0.05	0.07
Márgenes	0.02	0.06	0.08

Sección	Favorable		Propuesto		Desfavorable	
	Energía (m)	Cota lamina agua (m)	Energía (m)	Cota lamina agua (m)	Energía (m)	Cota lamina agua (m)
401.393	1011.1	995.13	999.65	996.42	999.18	998.25
	1012.22	996.59	1003.37	997.88	1002.36	1000.91
	1017.47	998.43	<b>1006.7</b>	<b>1005.3</b>	<b>1007.3</b>	<b>1006.2</b>
364.241	1010.51	994.29	998.46	996.83	998.42	996.81
	1011.95	996.12	1001.71	999.95	1001.89	1000.41
	1017.28	998.17	<b>1006.5</b>	<b>1005.1</b>	<b>1007.05</b>	<b>1006.1</b>
334.726	1009.98	992.9	997.46	996.43	997.61	996.74
	1011.62	994.58	1001.42	999.99	1001.53	1000.2
	1017.03	996.76	<b>1006.4</b>	<b>1004.86</b>	<b>1006.8</b>	<b>1005.07</b>
311.022	1009.56	992.35	997.13	995.13	997.11	995.12
	1011.44	994.21	1001.06	997.91	1001.01	997.89
	1016.9	996.71	<b>1006.0</b>	<b>1001.98</b>	<b>1006.14</b>	<b>1002.99</b>



## 2.Estudio hidráulico

---

### Análisis de sensibilidad

Se aceptan los valores propuestos para “n” y la pendiente de la línea de energía.

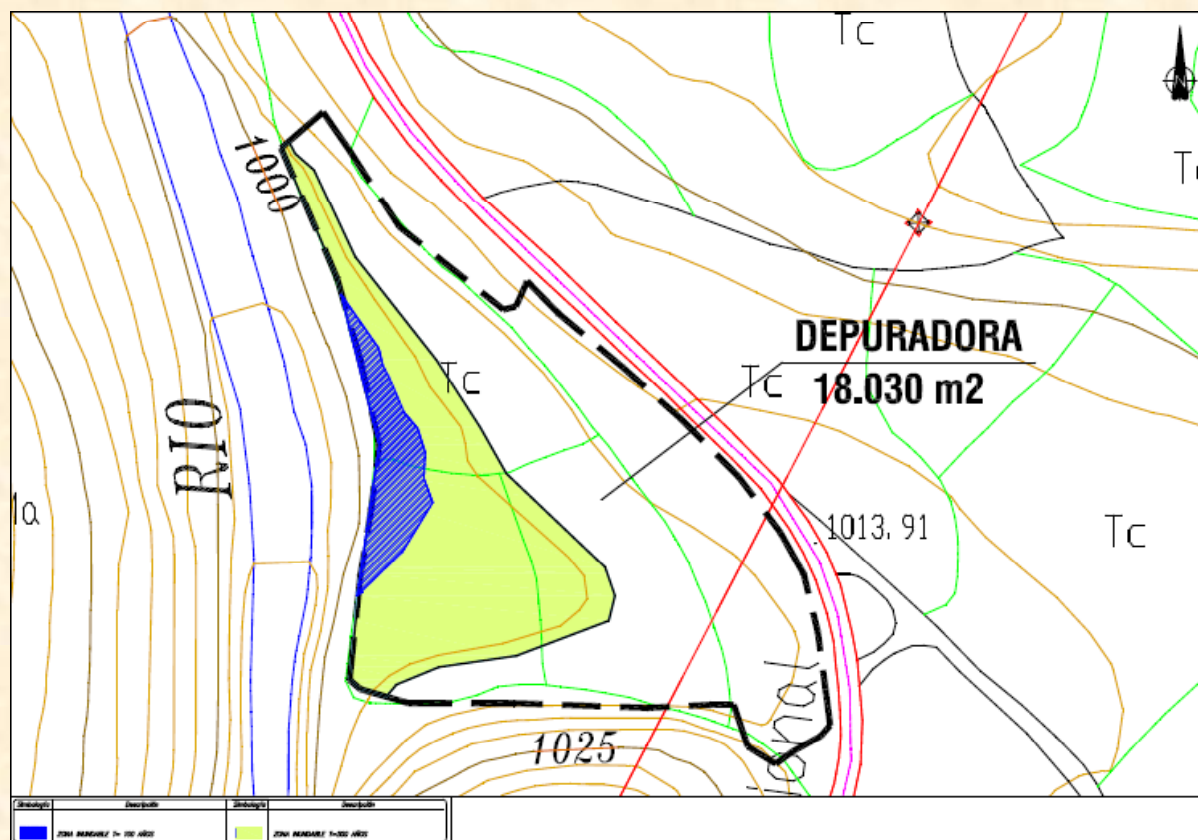
Se fija la cota de la línea de energía como nivel de la explanada de la E.D.A.R:

- Sufre menos variaciones que el calado cuando aumenta “n”
- Menor importancia del termino de velocidad frente al de calado en la ecuación de la Energía
- Está del lado de la seguridad



### 3. Medidas de protección necesarias

#### Zonas afectadas



T (años)	Superficie ocupada (m <sup>2</sup> )	Porcentaje %
25	0	0
100	1076,86	5,97
500	6584,76	36,5

Se fija como cota mínima de la explanada de la E.D.A.R 1006 m.s.n.m





# **ESTUDIO DE INUNDABILIDAD DE LA E.D.A.R. DE SAHÚN (HUESCA).**

**Proyecto Final de Carrera Tipo II**

**Titulación: Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos**

**Especialidad: Hidráulica y Medio Ambiente**

**Autor: Ignacio Marcos Ramón**

**Tutor: D. Félix R. Francés García**



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA**  
E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos

