



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



# Determinación del riesgo de colapso de puentes por inundaciones. Aplicación a un conjunto de puentes de carreteras españolas

Ricardo A. Bocanegra, Francisco J. Vallés y Félix Francés

*Grupo de Investigación de Modelación Hidrológica y Ambiental (GIMHA)  
Laboratorio de Hidráulica y de Obras Hidráulicas  
Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente (IIAMA)  
Universitat Politècnica de València*



- El fallo de los puentes tiene impactos tangibles altamente negativos e impactos intangibles, como la pérdida de vidas humanas y problemas sociales y ambientales
- Un alto porcentaje de los fallos de los puentes a nivel mundial se debe a las crecientes de los ríos
- Debido al cambio climático se espera que la probabilidad de fallo de los puentes debido a las crecientes de los ríos aumente (Khelifa et al., 2013)



Fuente: Sandoval (2018)



Fuente: FHWA (2005)

1. Desarrollar una metodología para determinar el riesgo de fallo de los puentes debido a las crecientes de los ríos
  - El objetivo principal de esta metodología consiste en realizar una ordenación del nivel de intervención necesario en un conjunto de puentes
  - Se han desarrollado muy pocos estudios que intenten determinar este riesgo
2. Aplicar la metodología desarrollada en un caso de estudio: 12 puentes fluviales españoles

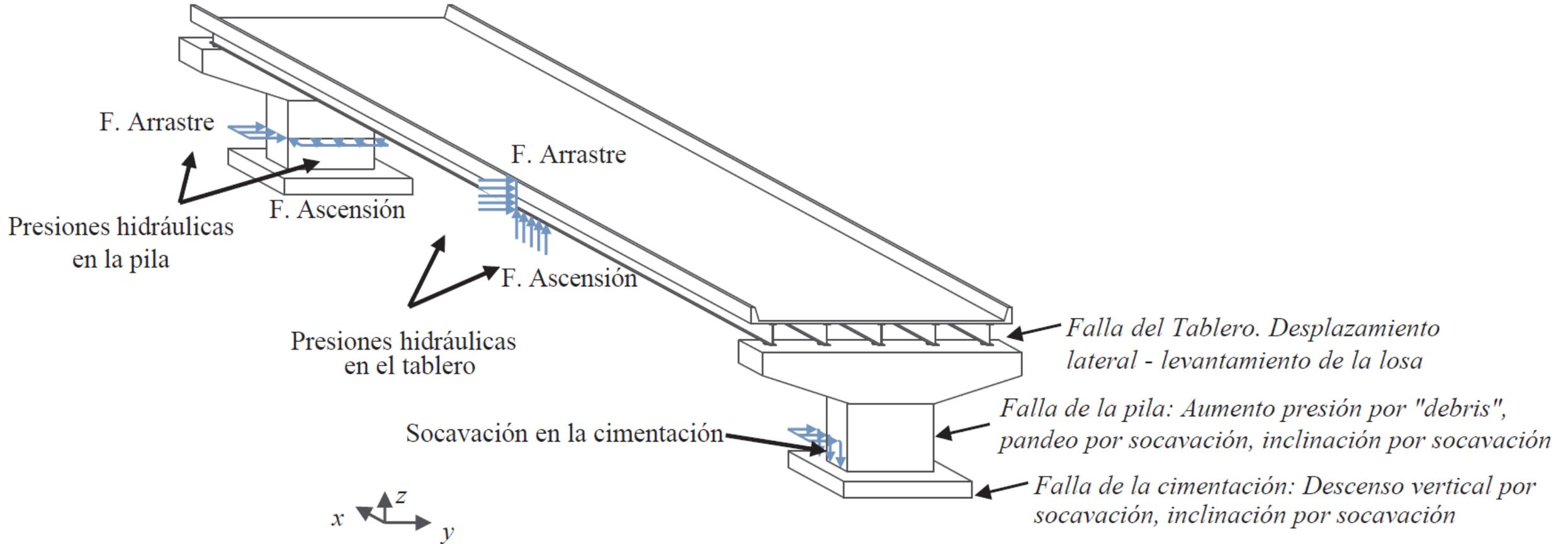
Corresponde a la imposibilidad del puente para trabajar como se diseñó y/o construyó, por lo cual no puede ser cruzado de forma segura (Whardana et al. 2003)

El fallo puede deberse al colapso total de toda la estructura o parte de ella o a su deterioro o alguno de sus componentes

Se considera que la estructura ha fallado cuando ha fallado el tablero, las pilas o la fundación



Fuente: Deng et al. (2016)



Fuente: Mondoro y Frangopol (2018)

## Socavación



Fuente: Min. Fomento de España (2012)

## Inestabilidad del Cauce



Fuente: Muñoz (2002)

## Subpresión bajo el Tablero



Fuente: García (2001)

## Acumulación de Acarreos



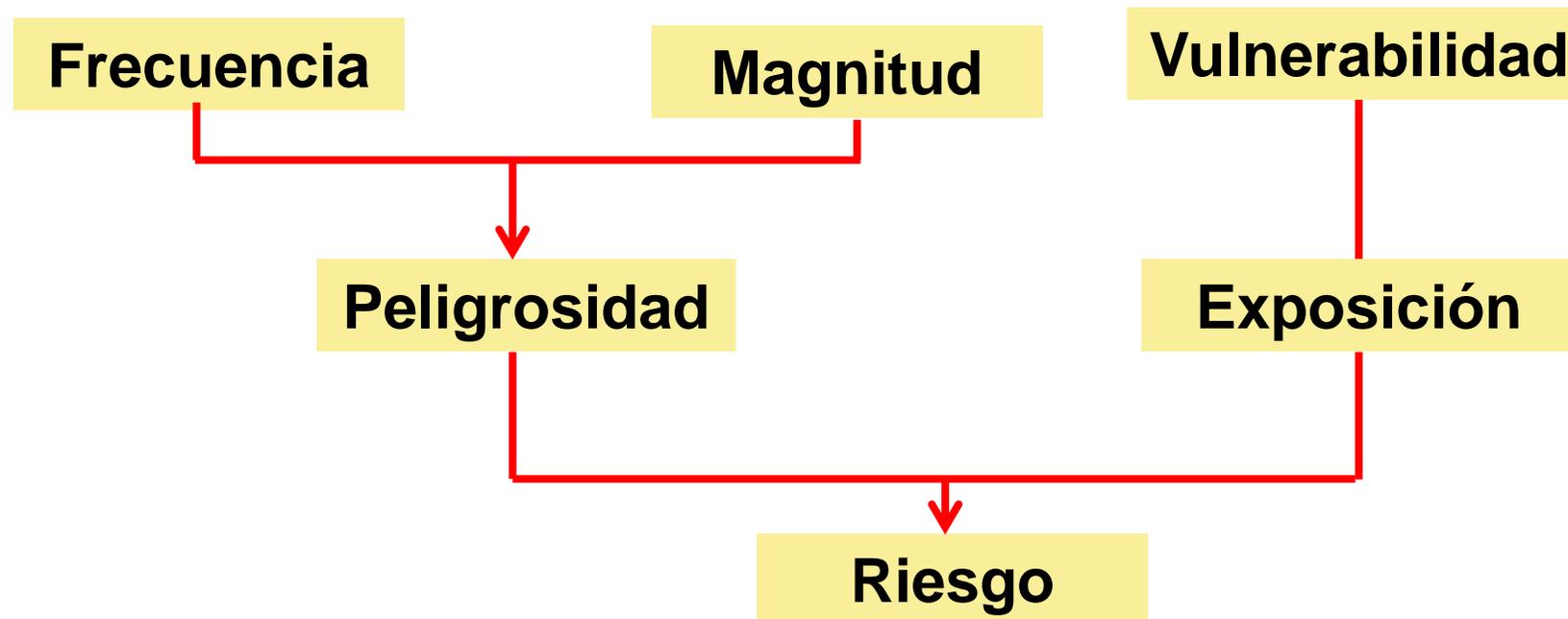
Fuente: FHWA (2005)

## Deterioro de los Materiales

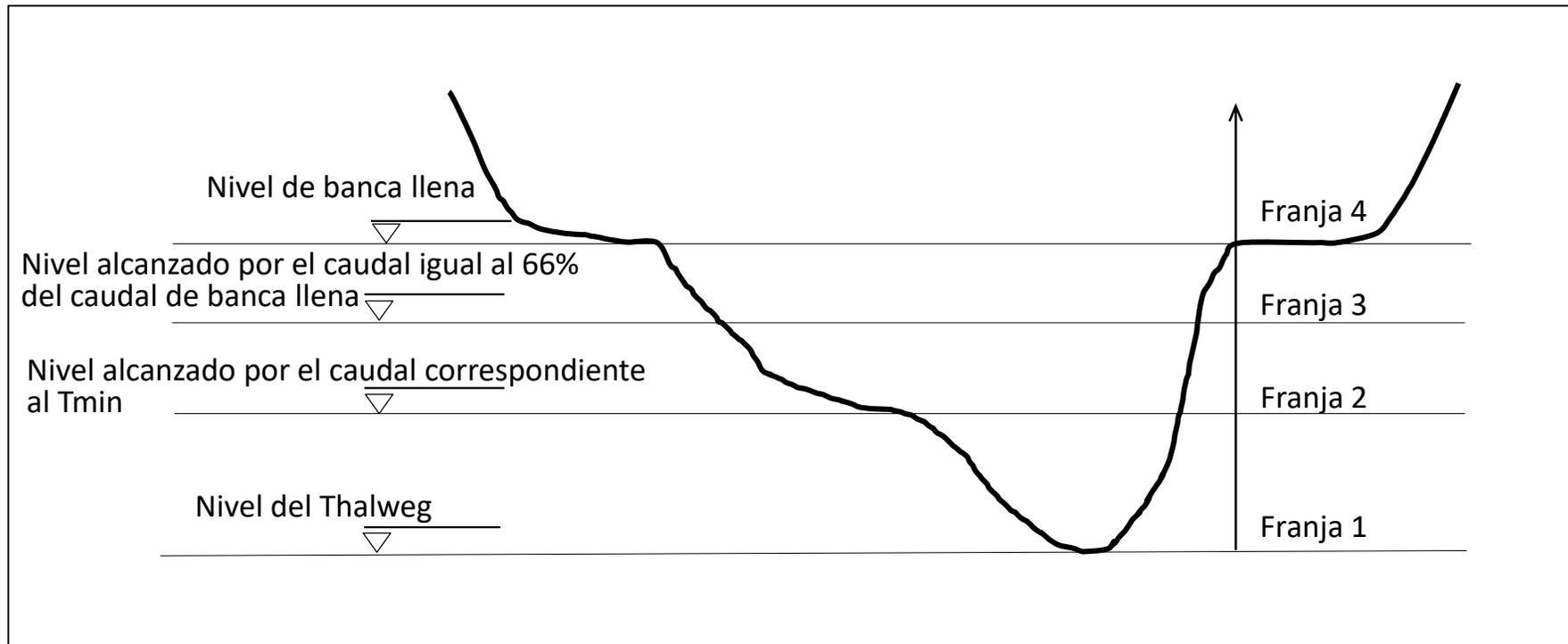


Fuente: Min. Fomento de España (2012)

- Combinación de la probabilidad de que ocurra un evento potencialmente dañino y sus posibles consecuencias negativas



- Probabilidad de que el caudal se encuentre en cada una de las cuatro franjas en las cuales se dividió la sección transversal



$T_{min}$ : Caudal que no genera daño en la estructura

- ❑ Características de la estructura que definen su susceptibilidad a ser dañada
- ❑ Se determinó inicialmente una vulnerabilidad base de la subestructura y superestructura con base en el estado de las mismas
- ❑ El impacto de la estabilidad de la corriente, la acumulación de acarreo y el deterioro de los materiales se estableció a través de factores multiplicadores

Vulnerabilidad de la subestructura  $V_b$

$$V_b = V_{Bb} F_s F_d F_t$$

Vulnerabilidad de la superestructura  $V_s$

$$V_s = V_{Bs} F_d F_t$$

donde:

$V_{Bb}$  = Vulnerabilidad base de la subestructura

$V_{Bs}$  = Vulnerabilidad base de la superestructura

$F_s$  = Factor mult. por estabilidad de la corriente

$F_d$  = Factor mult. potencial acum. acarreo

$F_t$  = Factor mult. deterioro de la estructura

Estado de la estructura (Vallés, 2011)		Vulnerabilidad				
		$V_b$			$V_s$	
Cod.	Descripción	Franja			Simple- mente apoyada	Empotrada
		2	3	4		
0	Fallo	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
1	Fallo inminente	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
2	Crítica	0.5	0.8	0.9	0.9	0.8
3	Seriamente deficiente	0.3	0.6	0.7	0.8	0.7
4	Pobre	0.15	0.4	0.6	0.6	0.5
5	Aceptable	0.075	0.15	0.2	0.3	0.2
6	Satisfactoria	0.04	0.10	0.15	0.15	0.1
7	Buena	0.03	0.075	0.1	0.1	0.075
8	Muy Buena	0.005	0.03	0.05	0.05	0.03
9	Excelente	0.002	0.005	0.01	0.01	0.005
N	No aplicable	-	-	-	-	-

## Estab. de la Corriente $F_s$

Est. del cauce Jonson (2005)		Condición del canal Item 61 del FHWA (1995)		$F_s$
Valor	Desc..	Cod	Descripción	
> 120	Pobre	0	Puente cerrado. Debe ser reemplazado	1.3
		1	Puente cerrado. Requiere reparacion	
		2	Fallo inminente	
86 - 120	Aceptable	3	Fallo de la protección de la banca	1.2
		4	Banca muy afectada	
		5	Protección de la banca erodada	
50 - 85	Buena	6	La banca empieza a erodarse	1.1
		7	La protec. de banca requiere reparac.	
12 - 49	Excelente	8	Bancas protegidas o bien vegetadas	1.0
		9	Canal estable sin afectaciones	
-	-	N	No aplicable	-

## Acumulación de Acarreos $F_d$

Elemento de la estructura		Localizac.	Potencial producir y transport. acarreos	Potencial para acum. acarreos	$F_d$	
Tipo	Clasificación					
Vano	-	Protegida	-	Bajo	1.0	
	Ancho Mayor a long. tronco de diseño	-	-			
	Ancho Menor a long. tronco de diseño	Planicie de inundación	Bajo			
			Canal	Bajo		
	Ancho Menor a long. tronco de diseño	Sector transporte acarreos	Bajo	Medio	1.1	
		Planicie de inundación	Alto			
	Ancho Menor a long. tronco de diseño	Canal	Alto	Alto	1.2	
	Ancho Menor a long. tronco de diseño	Sector transporte acarreos	Alto	Alto - Crónico	1.3	

## Deterioro Estruct. $F_t$

Características de la Estructura			$F_t$
Tipo	Ambiente	Edad (años)	
Hormigón Armado	No marinos y sin sales de deshielo	0-20	1.0
		20-40	1.1
		40-75	1.2
		>75	1.3
	Marinos sales de deshielo	0-10	1.0
		10-20	1.1
20-40		1.2	
	>40	1.3	
Metálico	Rural o urbano	< 50	1.0
		> 50	1.2
	Marino o industrial	< 50	1.1
		> 50	1.3
Puentes de Fábrica	Rural	-	1.0
	Urbano	-	1.2
	Industrial	-	1.1
	Urbano	-	1.3

- El riesgo indica la probabilidad anual de fallo del puente

$$Riesgo = \int_0^{\infty} V(y) * f(y) dy$$

donde  $V$  = la vulnerabilidad, la cual fluctúa entre 0 y 1, y  $f$  = función de densidad de probabilidad de la magnitud  $y$

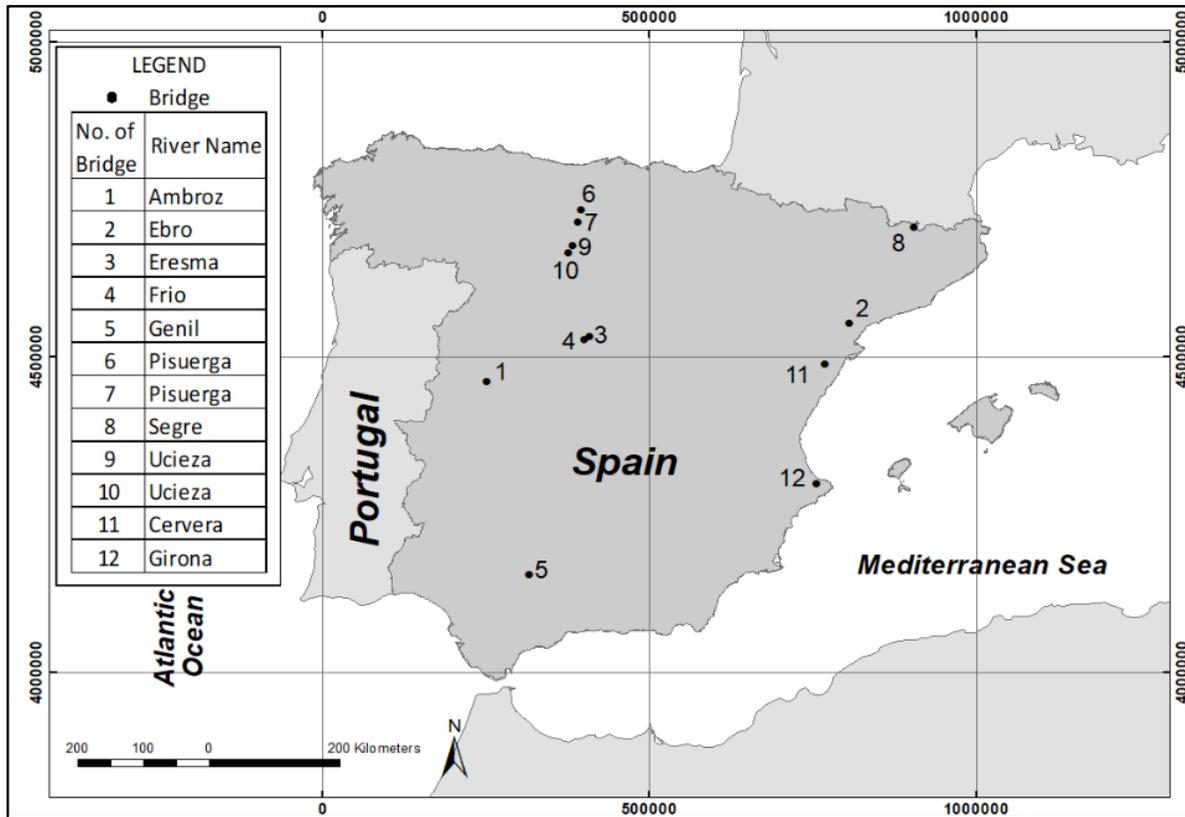
Resolviendo en forma discreta:

$$Riesgo = \sum_{i=2}^4 V_{bi} \Delta P_i + V_s P_s$$

donde  $V_{bi}$  = Vuln. de subestructura en franja  $i$ ,  $\Delta P_i$  = Prob. de ocurrencia de caudales en franja  $i$ ,  $V_s$  = Vuln. de la superestructura y  $P_s$  = Prob. de que la creciente alcance la superestructura

Al reemplazar las expresiones para  $V_b$  y  $V_s$  se tiene que:

$$Riesgo = \sum_{i=2}^4 V_{Bbi} F_s F_d F_t \Delta P_i + V_{Bs} F_d F_t P_s$$



- ❑ El 25% son puentes de grandes dimensiones, el 50% tienen una luz mayor a 10 m y el restante 25% son pontones con una luz menor a 10 m
- ❑ El 58 % corresponden a estructuras de hormigón armado y el 42 % a puentes de fábrica
- ❑ El 33% son estructuras convencionales (vigas, losa, etc.), el 25% puentes de arco y el 42% son puentes de fábrica

Estado del puente	No.	Río	Caudal Banca Llena (m³/s)	Vulnerabilidad base de la estructura $V_B$ / Probabilidad de ocurrencia de caudales P				Factores multiplicadores			Riesgo	
				Parámetro	$V_{Bb}$			$V_{Bs}$	$F_s$	$F_d$		$F_t$
					Franjas Sec. Transv.							
				2	3	4						
En Funcionamiento	1	Ambroz	383	$V_B$	0.04	0.10	0.15	0.10	1.1	1.3	1.3	0.01
				P	0.24	0.01	0.00	0.00				
	2	Ebro	8798	$V_B$	0.15	0.40	0.60	0.50	1.1	1.0	1.1	0.04
				P	0.21	0.03	0.01	0.01				
	3	Eresma	2724	$V_B$	0.05	0.15	0.20	0.20	1.0	1.0	1.1	0.01
				P	0.25	0.00	0.00	0.00				
	4	Frío	39	$V_B$	0.30	0.60	0.70	0.70	1.1	1.3	1.3	0.09
				P	0.25	0.00	0.00	0.00				
	5	Genil	1522	$V_B$	0.15	0.40	0.60	0.50	1.1	1.1	1.1	0.09
				P	0.13	0.07	0.05	0.05				
6	Pisuerga	1207	$V_B$	0.15	0.40	0.60	0.50	1.0	1.0	1.3	0.03	
			P	0.25	0.00	0.00	0.00					
7	Pisuerga	648	$V_B$	0.15	0.40	0.60	0.50	1.1	1.0	1.1	0.03	
			P	0.23	0.02	0.00	0.00					
8	Segre	323	$V_B$	0.30	0.60	0.70	0.70	1.1	1.1	1.1	0.10	
			P	0.17	0.05	0.03	0.03					
9	Ucieza	94	$V_B$	0.15	0.40	0.60	0.50	1.1	1.1	1.1	0.06	
			P	0.16	0.07	0.02	0.02					
10	Ucieza	710	$V_B$	0.15	0.40	0.60	0.50	1.0	1.1	1.1	0.08	
			P	0.11	0.11	0.03	0.03					
Colapsado	11	Cervera	300	$V_B$	0.30	0.60	0.70	0.70	1.3	1.1	1.3	0.11
				P	0.19	0.02	0.03	0.03				
12	Girona	147	$V_B$	0.30	0.60	0.70	0.70	1.3	1.1	1.3	0.14	
			P	0.12	0.05	0.08	0.08					

La franja 1 está localizada por debajo de  $T_{min}$ .

$T_{min} = 7$  años, el cual, de acuerdo con Martín Vide (2003), es el límite superior del rango de los  $T_r$  en el que podrían fluctuar los caudales dominantes de los ríos españoles

Estado del puente	Río	Riesgo
En Funcionamiento	Ambroz	0.01
	Ebro	0.04
	Eresma	0.01
	Frío	0.09
	Genil	0.09
	Pisuerga	0.03
	Pisuerga	0.03
	Segre	0.10
	Ucieza	0.06
	Ucieza	0.08
Colapsado	Cervera	0.11
	Girona	0.14

- ❑ Puentes colapsados:
  - Los puentes en los ríos Cervera y Girona tienen riesgos de 0.11 y 0.14, respectivamente. Requerían intervención urgente
- ❑ Puentes en funcionamiento:
  - El 50% tienen un riesgo alto (entre 0.05 y 0.10). Requieren atención inmediata
  - El 30% tienen un riesgo medio (entre 0.03 y 0.04). Requieren atención en el corto plazo
  - El 20% tienen riesgo bajo (igual a 0.01). No requieren atención extraordinaria
- ❑ Los factores multiplicadores incrementaron la vulnerabilidad base en casi el 86% en los ríos Ambroz, Frío, Cervera y Girona

- Sensibilidad a la vulnerabilidad: Se estudiaron valores iguales al 200, 150, 75 y 50% de los valores adoptados
- Sensibilidad al Tmin: Se estudiaron valores de Tmin iguales a 1.5, 4, 15 y 50 años
- El riesgo es muy sensible a los valores de vulnerabilidad y de Tmin, pero el orden de los ríos prácticamente no presentó cambios

River	Riesgo (Probabilidad de fallo/ año)								
	Metod. Propuesta	Análisis de sensibilidad							
		Tmin (años)				Vulnerabilidad			
		1.5	4	15	50	Metod. *2.0	Metod.* 1.5	Metod. *0.75	Metod *0.5
Eresma	0.008	0.037	0.014	0.004	0.001	0.016	0.012	0.006	0.004
Ambroz	0.013	0.051	0.021	0.007	0.003	0.025	0.019	0.009	0.006
Pisuerga	0.028	0.130	0.049	0.013	0.004	0.056	0.042	0.021	0.014
Pisuerga	0.035	0.130	0.054	0.021	0.011	0.068	0.052	0.026	0.018
Ebro	0.044	0.139	0.063	0.030	0.014	0.079	0.062	0.034	0.023
Ucieza	0.064	0.168	0.085	0.042	0.017	0.110	0.090	0.049	0.034
Ucieza	0.079	0.174	0.098	0.044	0.018	0.136	0.109	0.061	0.042
Genil	0.086	0.191	0.108	0.055	0.018	0.127	0.111	0.069	0.049
Frío	0.087	0.379	0.146	0.044	0.018	0.132	0.122	0.067	0.045
Segre	0.100	0.309	0.143	0.060	0.020	0.143	0.122	0.080	0.057
Cervera	0.105	0.398	0.165	0.063	0.020	0.143	0.129	0.089	0.065
Girona	0.135	0.427	0.195	0.067	0.020	0.143	0.140	0.124	0.095

- ❑ Se desarrolló una metodología de tipo probabilística que permite evaluar el riesgo al fallo de los puentes debido a las crecientes de los ríos. El resultado final es la probabilidad de fallo anual de la estructura
- ❑ La metodología permite realizar una ordenación del nivel de intervención necesaria en un determinado conjunto de puentes
- ❑ La metodología demanda relativamente poca información y es fácil de implementar. Podría constituir una herramienta de soporte para la toma de decisiones
- ❑ Se evaluó el riesgo de fallo de 12 puentes españoles, 10 en funcionamiento y 2 colapsados. Se encontró que el 50 % de los puentes en funcionamiento presentan un alto riesgo de fallo y requieren de atención urgente



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



iiama

Instituto de Ingeniería del  
Agua y Medio Ambiente

GRACIAS POR SU ATENCIÓN



**Iia**  
2019



Estabilidad del cauce Johnson scale (2005)		Condición del canal Item 61 del FHWA coding system (1995)		$F_s$
Rating	Descripción	Cod.	Descripción	
> 120	Pobre	0	Puente cerrado. Debe ser reemplazado	1.3
		1	Puente cerrado. Requiere reparaciones	
		2	Fallo inminente	
86 -120	Aceptable	3	Fallo de la protección de la banca	1.2
		4	Banca seriamente afectada	
		5	Protección de la banca erodada	
50 – 85	Buena	6	La banca empieza a erodarse	1.1
		7	La protec. de banca requiere reparac. menores	
12 – 49	Excelente	8	Bancas protegidas o bien begetadas	1.0
		9	Canal estable sin afectaciones	
-	-	N	Not applicable	-

Elemento de la estructura		Localización	Potencial para producir y transportar acarreos	Potencial para acumular acarreos	$F_d$
Tipo	Clasificación				
Vano	-	Protegida	-	Bajo	1.0
	Ancho Mayor a longit. del Tronco de diseño	-	-		
	Ancho Menor a longit. del Tronco de diseño	Planicie de inundación	Bajo		
		Canal	Bajo	Medio	1.1
	Ancho Menor a longitud del Tronco de diseño	Sector en el que se transportan acarreos	Bajo		
		Planicie de inundación	Alto	Alto	1.2
	Ancho Menor a longitud del Tronco de diseño	Canal	Alto		
	Ancho Menor a longitud del Tronco de diseño	Sector en el que se transportan acarreos	Alto	Alto – Crónico	1.3

Elemento		Localización	Produc. Poten. acarreos	Acumul. Poten. acarreos	$F_d$
Tipo	Clasificación				
Pila	-	Protegida	-	Bajo	1.0
	Sólida	Plan. de inundación	-		
		Canal	Bajo		
	Con Aberturas	Plan. de inundación	Bajo	Medio	1.1
	Sólida	Canal	Alto		
		Zona transp. acarreos	Bajo		
	Con Aberturas	Plan. de inundación	Alto		
		Canal	Bajo		
	Sólida	Zona transp. acarreos	Alta	Alto	1.2
	Con Aberturas	Zona transp. acarreos	Baja		
		Canal	Alta		
Con Aberturas	Zona transp. acarreos	Alta	Alto - Crónico	1.3	

Características de la Estructura			$F_t$
Tipo	Localización	Edad (años)	
<b>Hormigón Armado</b>	Ambientes no marinos y sin sales de deshielo	0-20	1.0
		20-40	1.1
		40-75	1.2
		>75	1.3
	Ambientes marinos o sales de deshielo	0-10	1.0
		10-20	1.1
		20-40	1.2
		>40	1.3
<b>Metálico</b>	Ambiente rural o urbano	< 50	1.0
		> 50	1.2
	Ambiente marino o industrial	< 50	1.1
		> 50	1.3
<b>Puentes de Fábrica</b>	Materiales de piedra	Ambiente rural	1.0
		Ambiente urbano o industrial	1.1
	Materiales cerámicos	Ambiente rural	1.2
		Ambiente urbano o industrial	1.3