



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



# Evaluation of the risk due to fluvial flooding in vehicles and road infrastructures at basin scale

**Autor: Ricardo A. Bocanegra**  
**Supervisores: Dr. Francisco J. Vallés**  
**Dr. Félix Francés**

*Programa de Doctorado en Ingeniería del Agua y Medioambiental*  
*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*



LABORATORIO DE HIDRÁULICA  
Y OBRAS HIDRÁULICAS  
Universitat Politècnica de València





1. Introducción
2. Objetivos
3. Inestabilidad de vehículos durante inundaciones
4. Riesgo de desestabilización de vehículos en llanuras de inundación
5. Riesgo de desestabilización de vehículos en sitios de intersección entre ríos y carreteras
6. Riesgo de fallo de puentes
7. Conclusiones
8. Futuras líneas de investigación

# 1. INTRODUCCIÓN

- ❑ Muchas personas **pierden sus vidas** al tratar de **cruzar zonas inundadas** con sus **vehículos** (*Drobot et al., 2007,...*)
- ❑ En **áreas urbanas** un alto porcentaje de las **víctimas** ocurre al interior de los **vehículos** (*Jonkman et al., 2005; ...*)
  - En 1989 en Nagasaki veinte personas murieron cuando sus coches fueron arrastrados por una crecida.
  - En 2019 fuertes lluvias en el SE de España provocaron la muerte de 4 personas atrapadas en sus coches
  - En 2020 en Brasil 7 personas murieron al interior de sus vehículos debido a inundaciones



Fuente: Floodcars (2014)



Fuente: Morell (2019)

# 1. INTRODUCCIÓN

- ❑ Al ser **arrastrados** los **vehículos** se **transforman** en **acarreos** que pueden causar daños adicionales (*Teo et al. 2012; ...*)
- ❑ Las **inundaciones** son la principal causa de **interrupción** de los sistemas de **transporte** (*Pregolato et al., 2017*), lo cual tiene un efecto cascada (*Suárez et al., 2005*)
- ❑ El **rescate** de personas atrapadas en sus vehículos demandan **inversiones** económicas y de tiempo



Fuente: Martínez (2018)



Fuente: Atlas (2016)

# 1. INTRODUCCIÓN

- ❑ El **fallo de puentes** tiene efectos tangibles e intangibles negativos: **pérdida de vidas, interrupción** de sistemas de **transporte y problemas** sociales y ambientales
- ❑ Un alto porcentaje de los **fallos** de los **puentes** a nivel mundial **se debe a las crecidas** de los ríos
- ❑ Se espera que la **probabilidad** de **desestabilización** de **vehículos** y de fallo de los **puentes se incremente**
- ❑ Existen **pocos estudios** orientados a **determinar el riesgo** de desestabilización de vehículos y de puentes



Fuente: Bradley (2005)



Fuente: ABC (2019)



Fuente: Bradley (2005)

### General

Desarrollar una **nueva metodología** para calcular a escala regional el **riesgo de desestabilización** y arrastre de vehículos y de **fallo de puentes** debido a inundaciones y crecidas fluviales

### Específicos

1. Analizar los **modelos de estabilidad** de vehículos durante inundaciones
2. Desarrollar una metodología para determinar el **riesgo** de inestabilidad de vehículos en **llanuras de inundación**
3. Definir una metodología para evaluar el **riesgo** de inestabilidad de coches en **intersecciones entre cauces fluviales y carreteras**
4. Establecer una metodología para calcular el **riesgo** de fallo de **puentes** debido a crecientes de los ríos

### 3. INESTABILIDAD DE VEHÍCULOS DURANTE INUNDACIONES



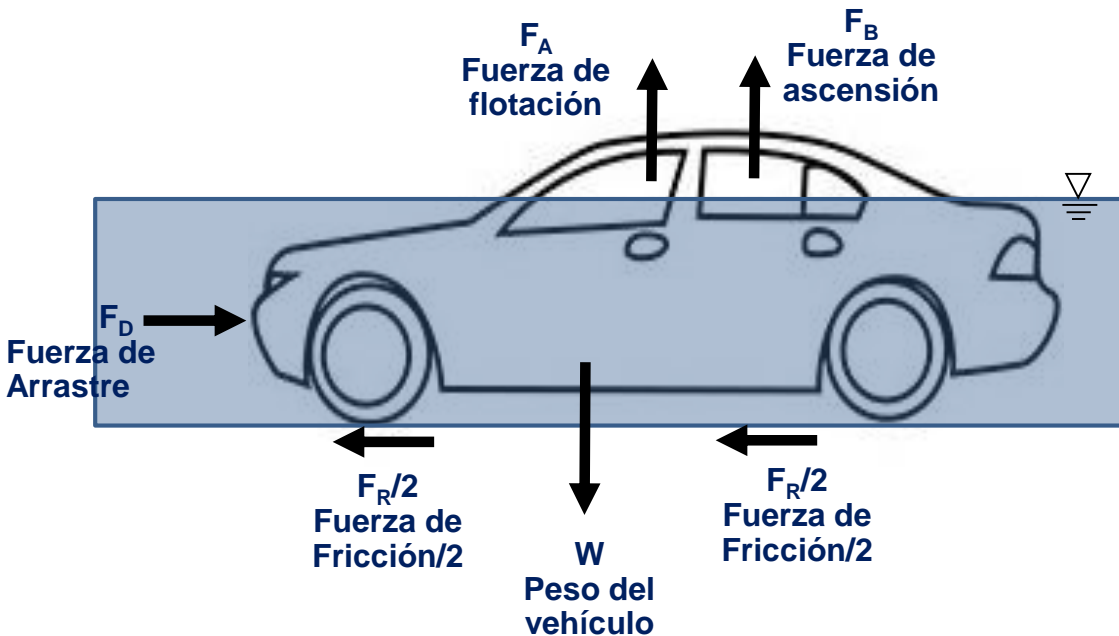
<https://www.youtube.com/watch?v=3HrdgaiM9sY>  
(Accessed 16/04/2019)



<https://www.youtube.com/watch?v=LC5ld79jola>  
(Accessed 16/04/2019)

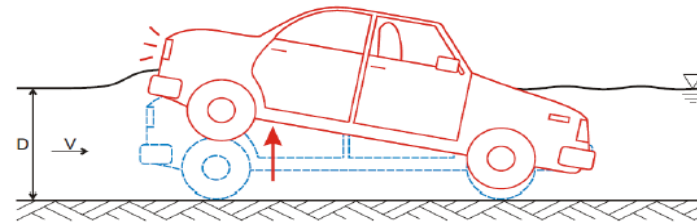
# Fuerzas y mecanismos que actúan en un vehículo parcialmente sumergido

## Fuerzas Actuantes

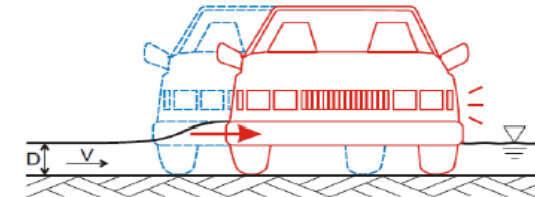


## Mecanismos de fallo

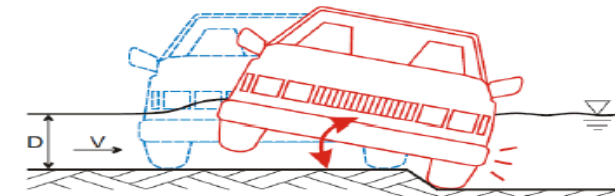
### Flotación



### Deslizamiento



### Vuelco





Existen cerca de una **docena de modelos** de estabilidad de vehículos con **diferentes hipótesis y simplificaciones**.

Se tienen 3 tipos diferentes de modelos:

1. Modelos que consideran que los **vehículos no son estancos**



Fuente: Cooper (2005)

2. Modelos que consideran que los **vehículos son estancos**

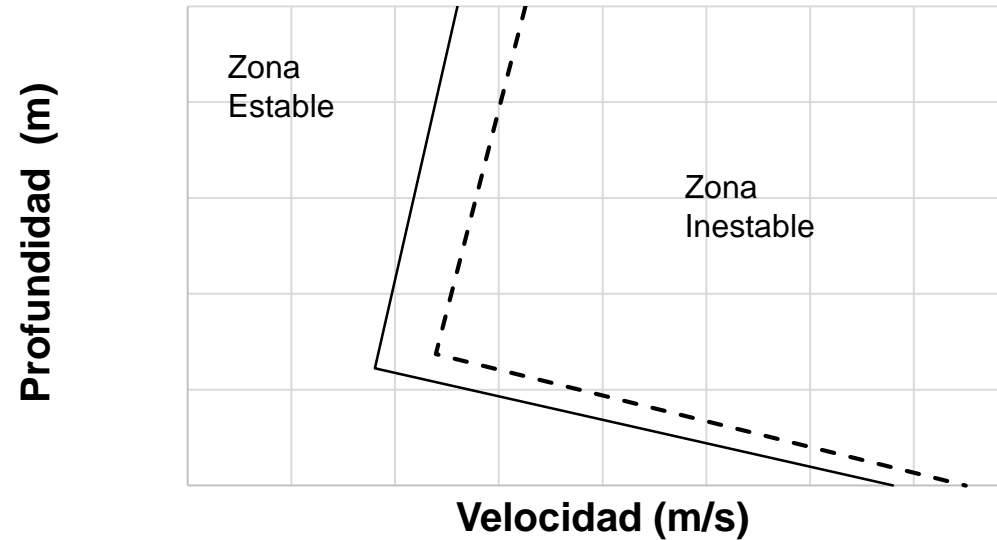


Fuente: Navarra (2019)

3. Modelos que consideran **vehículos estancos y no estancos**

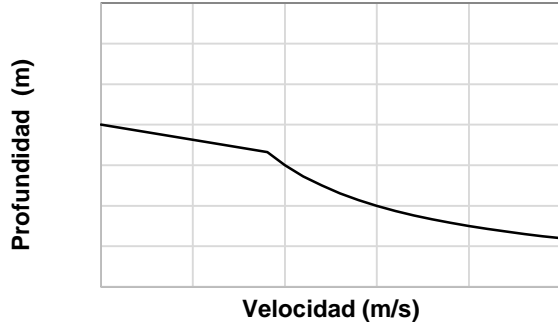
# Modelos que consideran que los vehículos no son estancos

Teo et al. (2012)

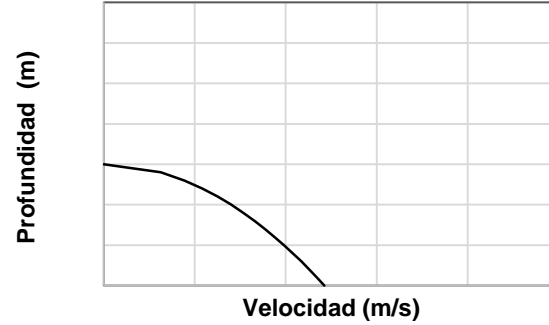


# Modelos que consideran que los vehículos son estancos

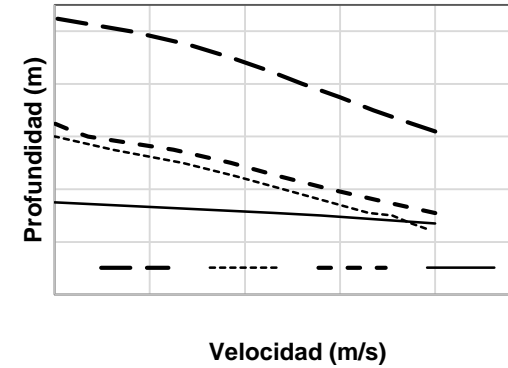
Moore and Power (2002)



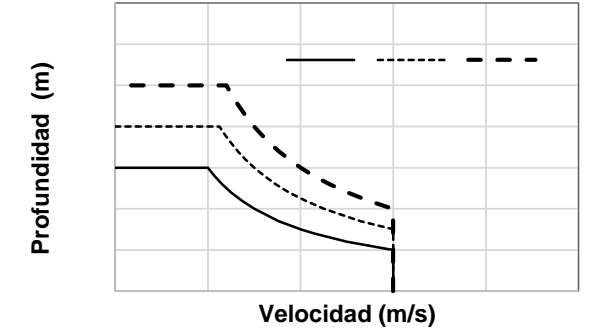
AUSROADS (2008)



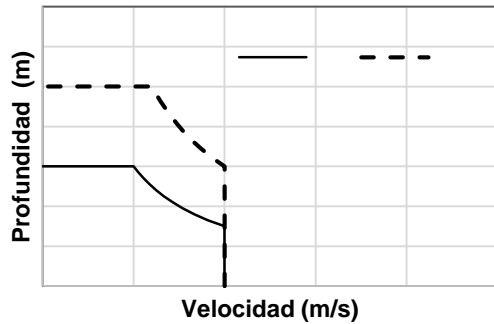
Mens et al. (2008)



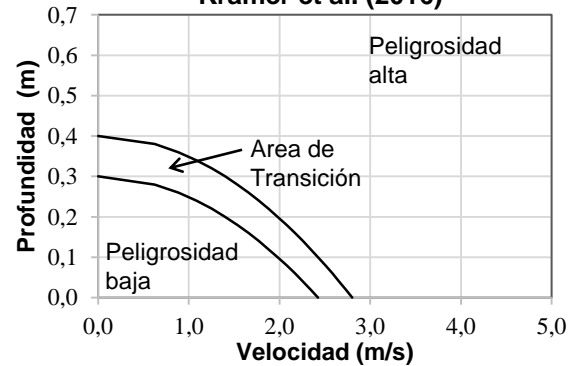
AR&R (2011)



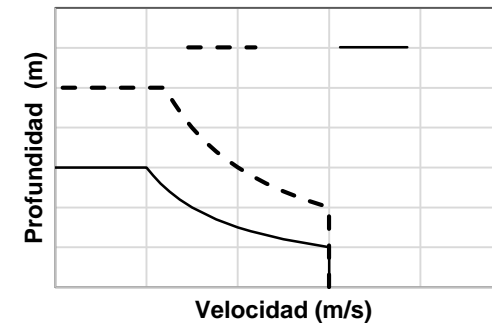
Smith et al. (2014)



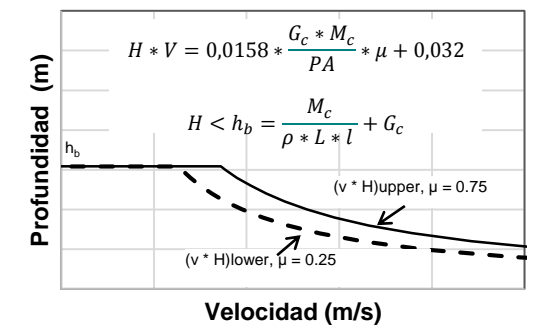
Kramer et al. (2016)



Smith et al. (2017)

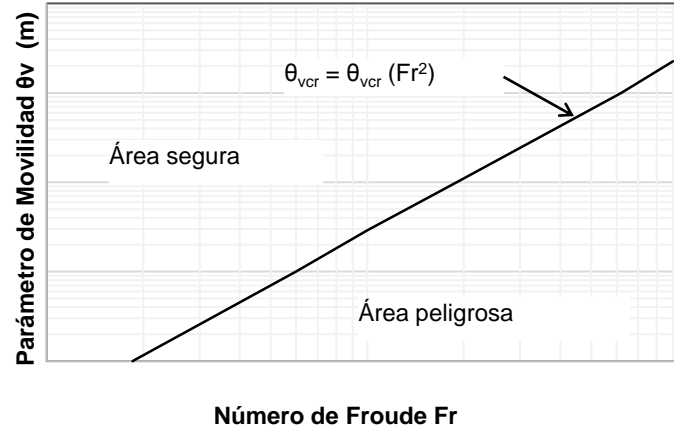


Martínez - Gomariz et al. (2016)

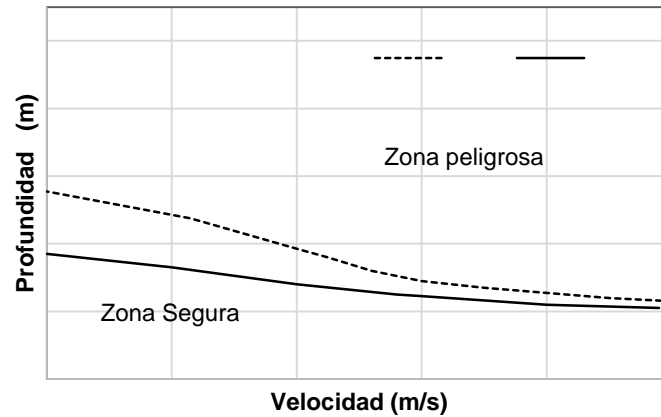


# Modelos que consideran estanqueidad y no estanqueidad de los vehículos

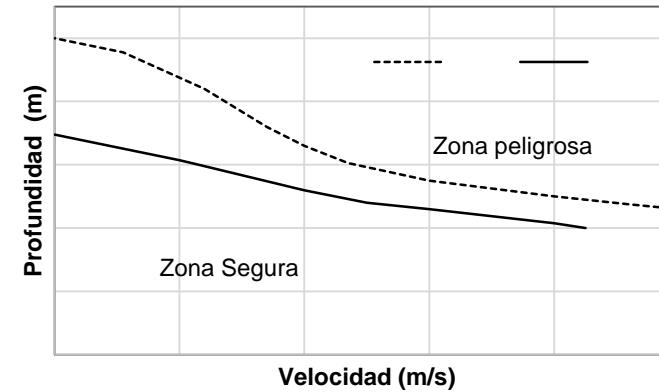
Arrighi et al. (2016)



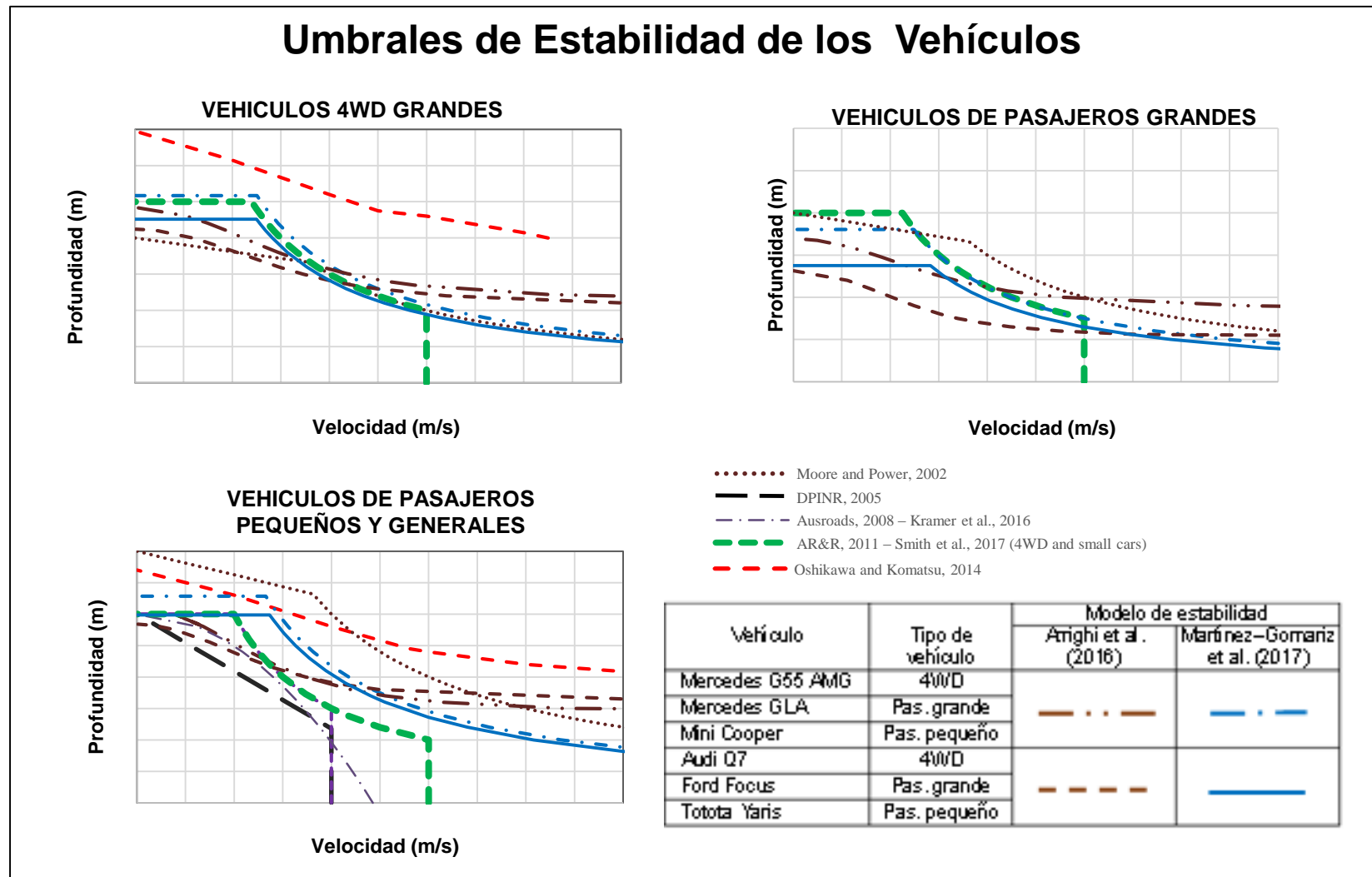
Oshikawa and Komatsu (2014) Compact Cars



Oshikawa and Komatsu (2014) 4WD Cars



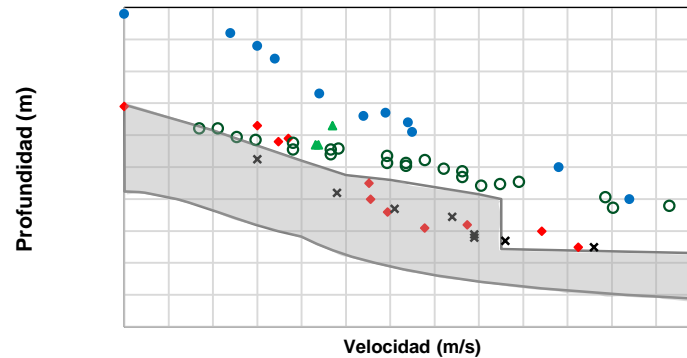
# Umbrales de estabilidad de vehículos



# Umbrales de estabilidad de vehículos

## Umbrales de Estabilidad vs Datos Experimentales

VEHICULOS 4WD GRANDES

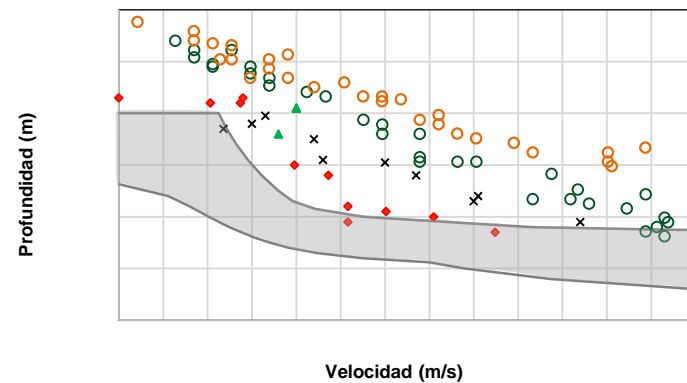


Datos Experimentales

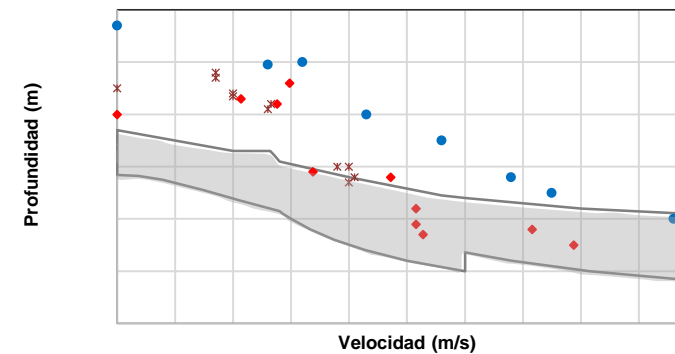
Autor	Tipo de vehículos		
	4WD Large	Pasajeros grande	Pasajeros pequeño
Shu et al. (2011)	○ Volvo XC90	○ Ford Transit ● Ford Focus	
Toda et al. (2013)	▲ Minivan	▲ Sedan	
Xia et al. (2013)	✱ Audi Q7	✱ Honda Accord	
Martínez-Gomariz et al. (2017)	◆ Mercedes G55 AMG	◆ Mercedes GLA	◆ Mini Cooper
Kramer et al. (2016)			✱ VW Golf III
Smith et al. (2017)	● Nissan Pat. GRII		● Toyota Yaris

Rango en el cual fluctúan los umbrales de estabilidad propuestos

VEHICULOS DE PASAJEROS GRANDES



VEHICULOS DE PASAJEROS PEQUEÑOS



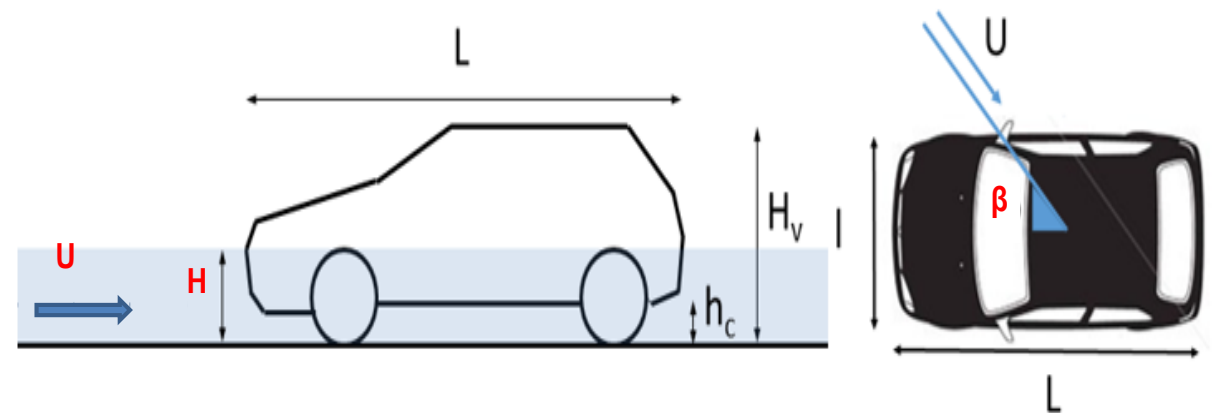
El modelo de **Arrighi et al. (2016)** puede ser considerado uno de los **más robustos** debido a que:

- ❑ Tiene **una base teórica sólida**
- ❑ Considera el **número de Froude**
- ❑ Considera simultáneamente **estanqueidad y no estanqueidad** de los vehículos
- ❑ Calcula la estabilidad para **cualquier tipo de vehículo**

## Parámetro de Movilidad $\theta_v$

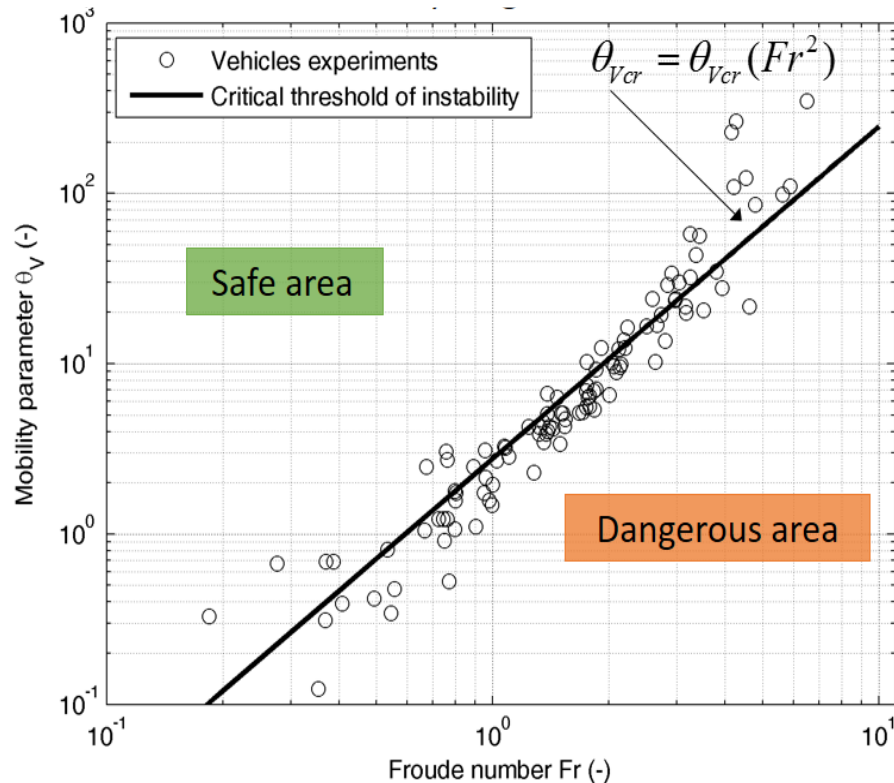
Se define a partir de las características de la inundación (**H**) y del vehículo y del ángulo de incidencia del flujo  **$\beta$**

$$\theta_v = \frac{2L}{(H_v - h_c)} * \frac{l}{l * \cos\beta + L * \sin\beta} * \left( \frac{\rho_c * (H_v - h_c)}{\rho * (H - h_c)} - 1 \right)$$



## Umbral crítico $\theta_{Vcr}$ (H, U)

$$\theta_{Vcr} = 8.2 * Fr^2 - 14.1 * Fr + 5.4$$



Fuente: Arrighi et al. (2016)

## Índice de estabilidad del vehículo

$$S_i = \frac{\theta_{Vcr}}{\theta_V} = \begin{cases} \geq 1 & \text{Movimiento por deslizamiento} \\ \in [0, 1[ & \text{Estabilidad} \\ < 0 & \text{Movimiento por flotación} \end{cases}$$





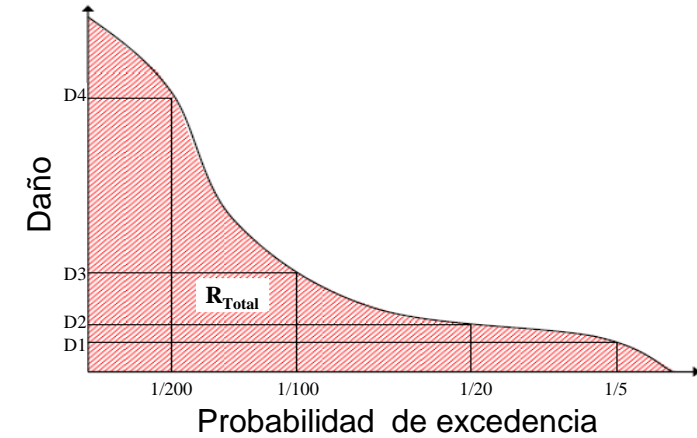
## 4. RIESGO DE DESESTABILIZACIÓN DE VEHÍCULOS EN LLANURAS DE INUNDACIÓN



Fuente: Padilla (2018)

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

## Curva Daño - Probabilidad



Fuente: Meyer et al.2009

$$R = \int_0^1 V(y) dF_y = \int_0^{\infty} V(y) f_y(y) dy$$

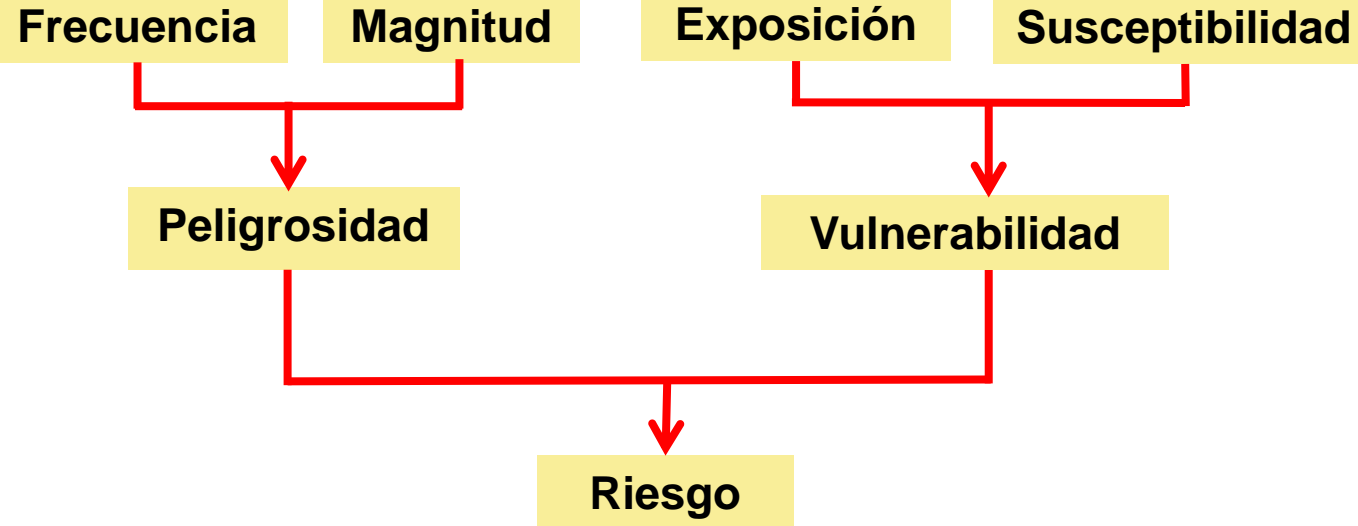
donde:

R = Riesgo

V = Vulnerabilidad

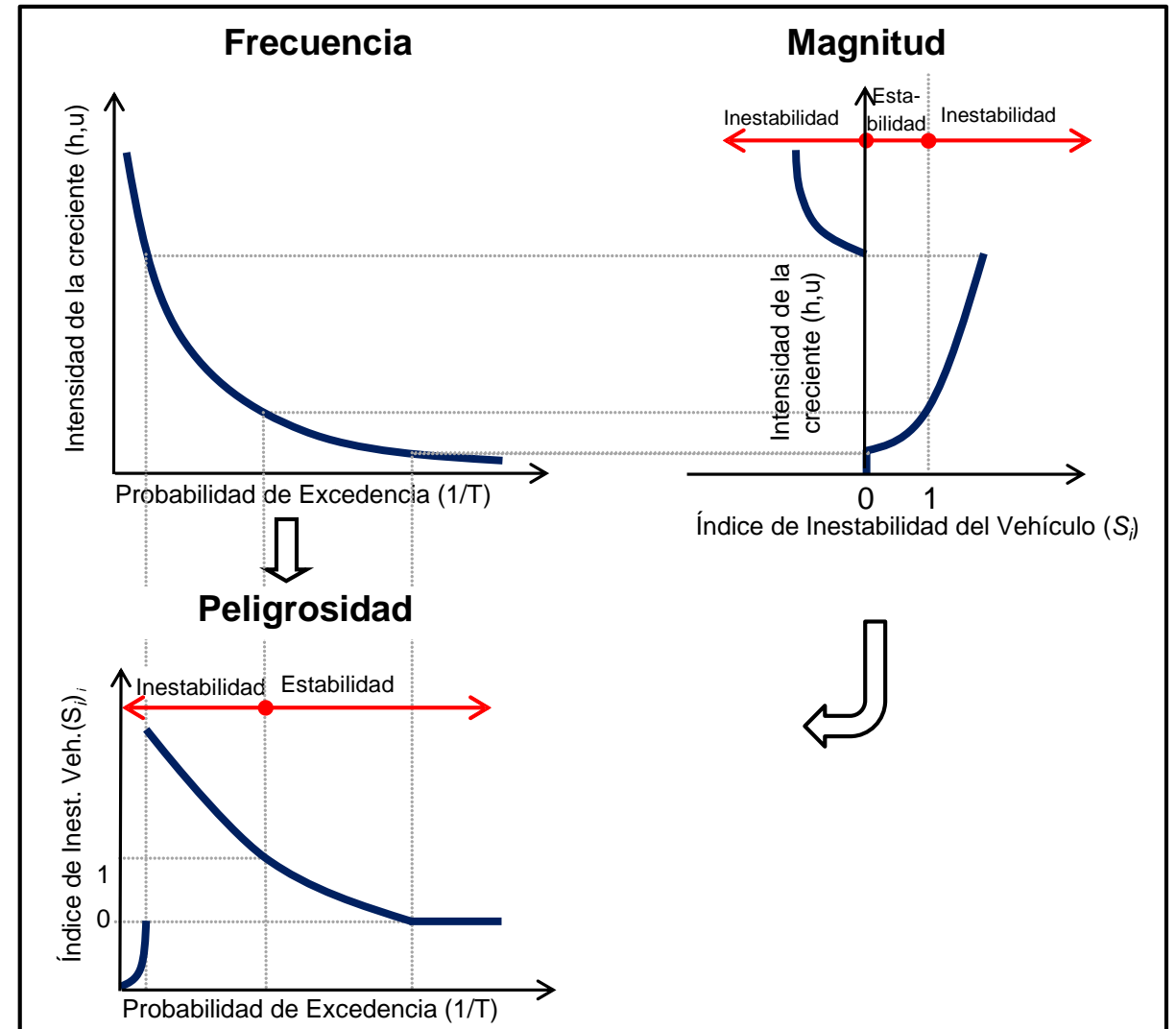
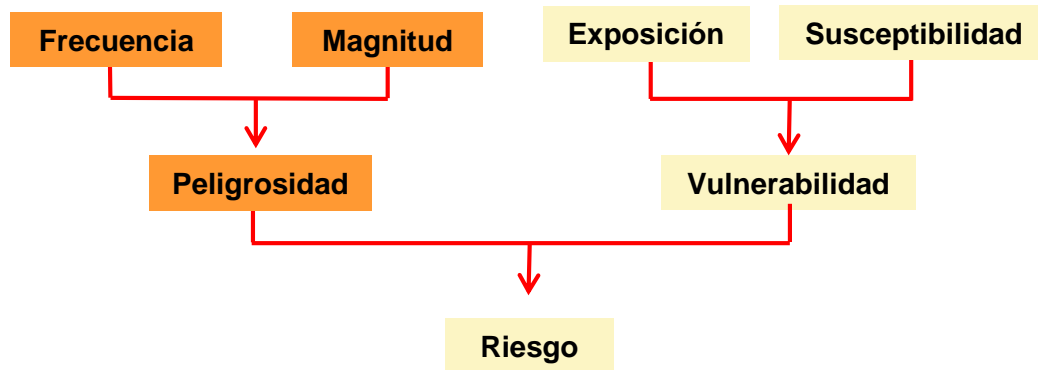
$F_y$  = Función de distribución acumulativa de  $y$

$f_y$  = Función de densidad de probabilidad de  $y$



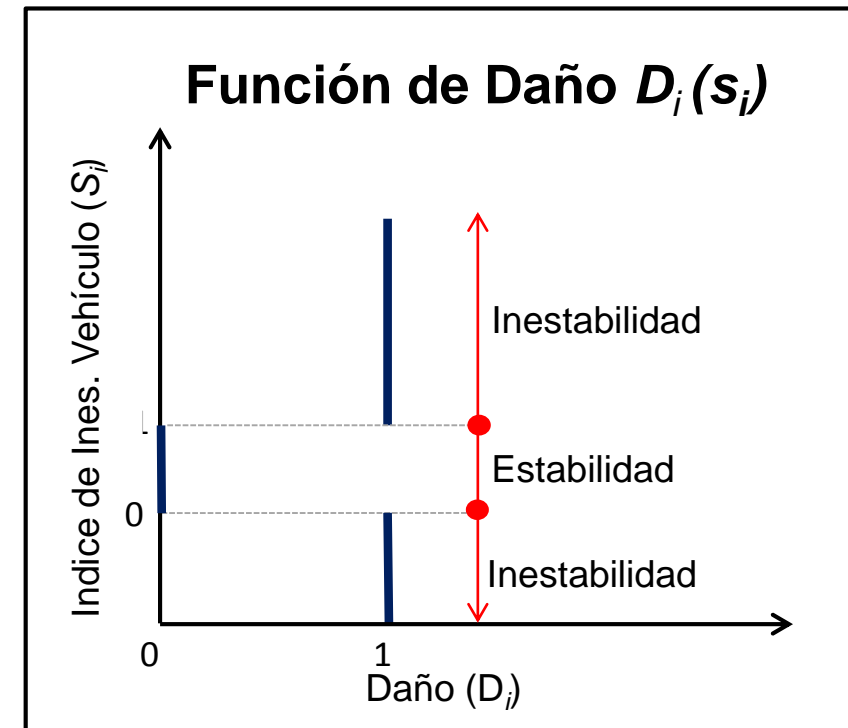
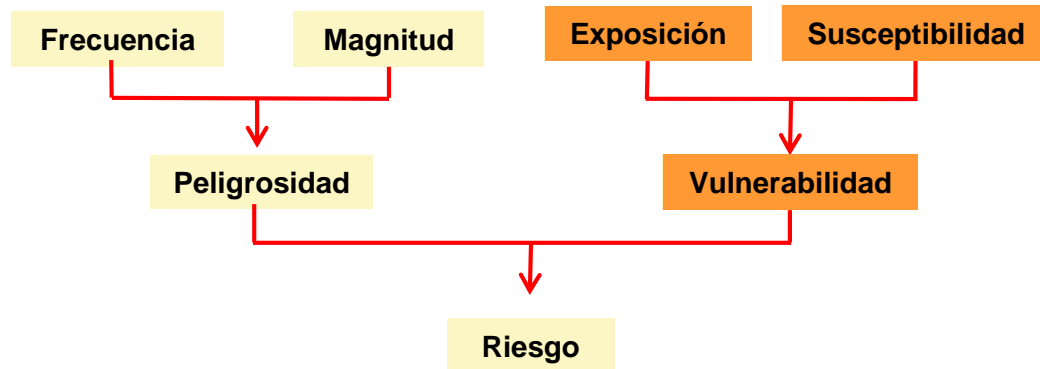
# Peligrosidad de inundación para vehículos

- **Probabilidad** de que se presenten **condiciones** que causen la **desestabilización** de los vehículos => depende del **tipo de coche  $i$**



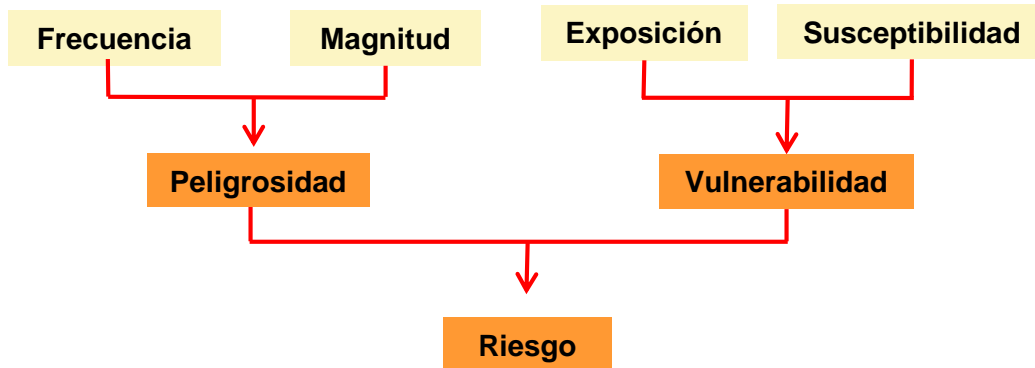
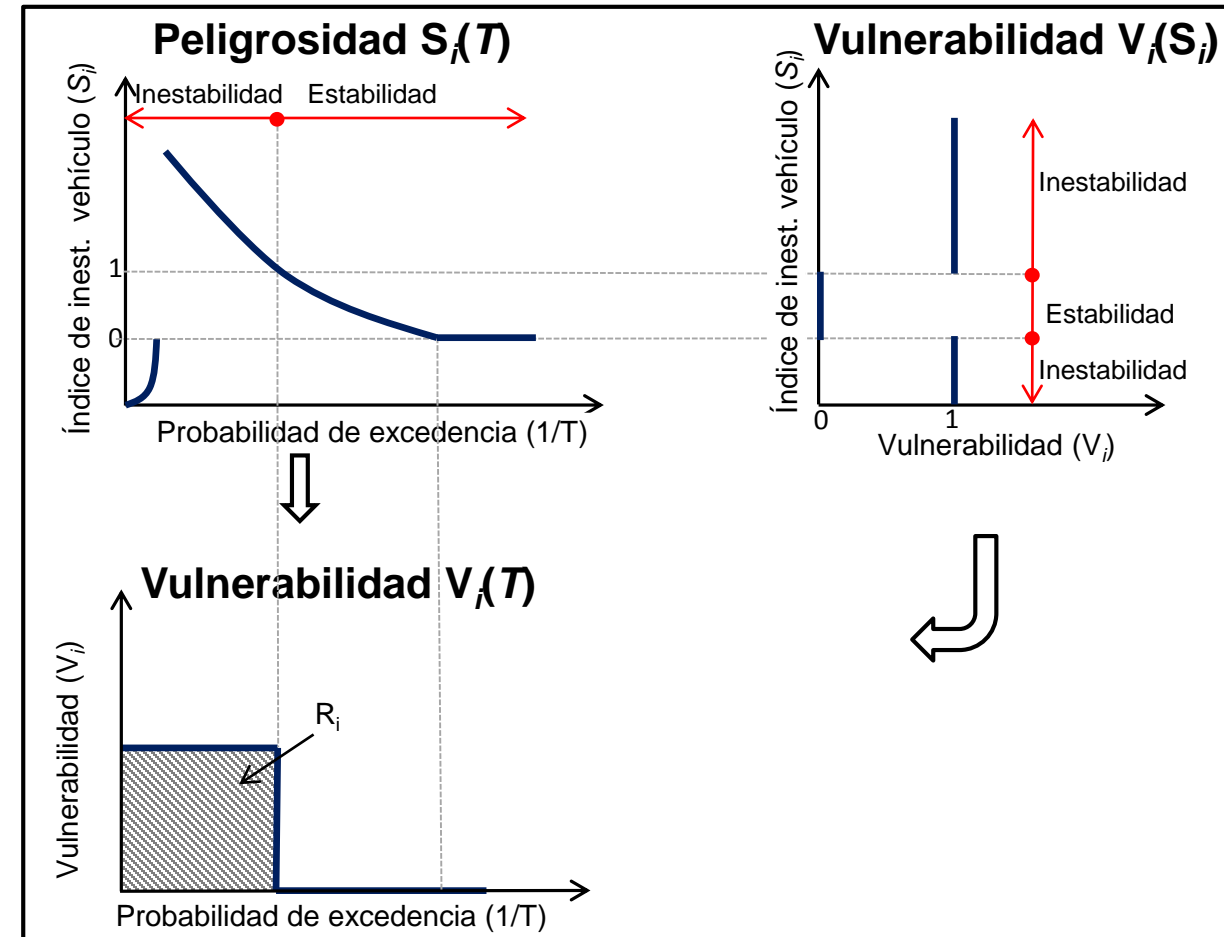
- La vulnerabilidad es **función** de la **exposición** y la **susceptibilidad** de los vehículos

- Exposición = Densidad de coches
- La susceptibilidad se establece a través de la función de daño  $D_i(s_i)$



# Riesgo de un vehículo tipo $i$

- Corresponde al **número medio de vehículos que perdería su estabilidad anualmente por unidad de área**



- El riesgo puede ser estimado a través de la siguiente expresión:

$$R = \sum_{i=1}^K d g_i \int_0^1 D(s_i) dF_{S_i} = \sum_{i=1}^K d g_i \int_0^{\infty} D(s_i) f_{S_i}(s) ds$$

donde:

$D(s_i)$  = función de daño para el vehículo tipo  $i$ ,

$i = 1, \dots, K$

$d$  = densidad de vehículos

$g_i$  = proporción del coche tipo  $i$  en la flota

- Y puede ser aproximado por :

$$R = \sum_{i=1}^K d g_i \sum_{j=T_{min}}^N \bar{D}(s_i) \left( \frac{1}{T_{j-1}} - \frac{1}{T_j} \right)$$

donde:

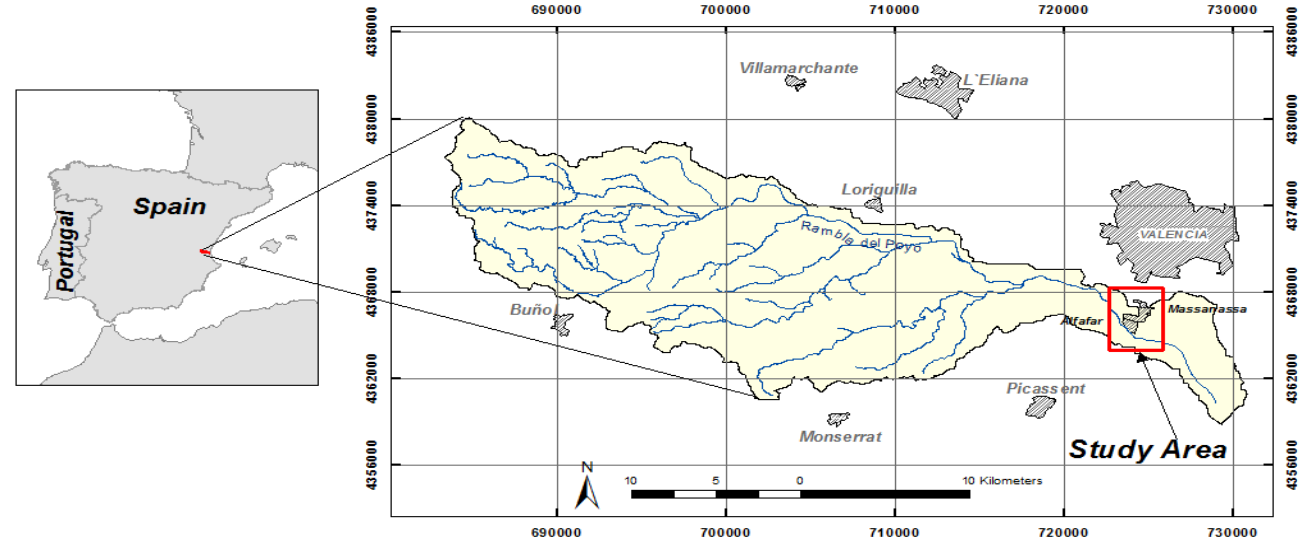
$\bar{D}(s_i)$  = valor medio de la función de daño para  $T_{j-1}$  y  $T_j$

$T_j$  = mapa de peligrosidad de inundación para el período de retorno  $T_j$ ,  $j = 1, \dots, N$

**Tmin** = período de retorno más bajo a partir del cual se inicia la afectación de los vehículos

# Caso de estudio: Rambla del Poyo

- Área de la cuenca = 430 Km<sup>2</sup>
- Clima semi-árido mediterráneo con tormentas en otoño
- Corriente efímera que desaparece en la planicie de inundación
- Caso de estudio: municipios de Alfafar y Massanassa (Valencia)
- Riesgo directo en 2007: 550,338 €/año
- 18,205 coches pueden ser afectados



# Características de los vehículos

Parámetro	Vehículo <i>i</i>			
	Utilitario Seat Ibiza	Compacto Seat León	SUV pequeño Peugeot 2008	SUV Mediano Volkswagen Tiguan
Longitud (m)	3.683	4.184	4.159	4.433
Ancho (m)	1.610	1.742	1.739	1.809
Altura (m)	1.421	1.439	1.556	1.665
Altura libre al suelo (m)	0.124	0.12	0.165	0.175
Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	108.00	125.86	104.41	115.26
<b>Proporción gi*</b>	<b>0.262</b>	<b>0.322</b>	<b>0.148</b>	<b>0.268</b>

\* Fuente: ANFAC (2018)

**Seat Ibiza**



**Seat León**



**Peugeot 2008**



**Volkswagen Tiguan**

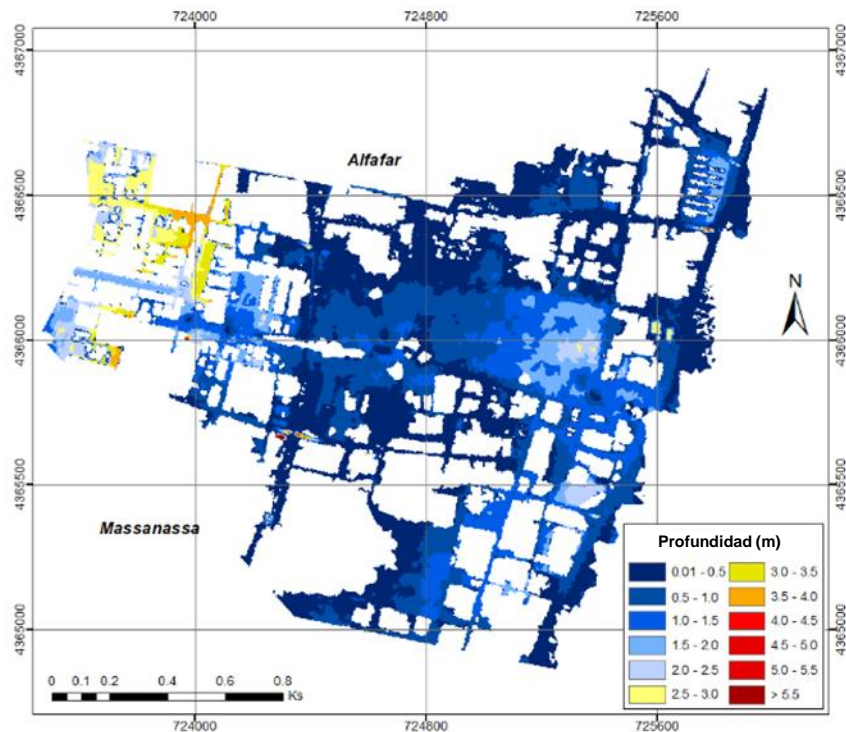




# Mapas de peligrosidad de inundación disponibles

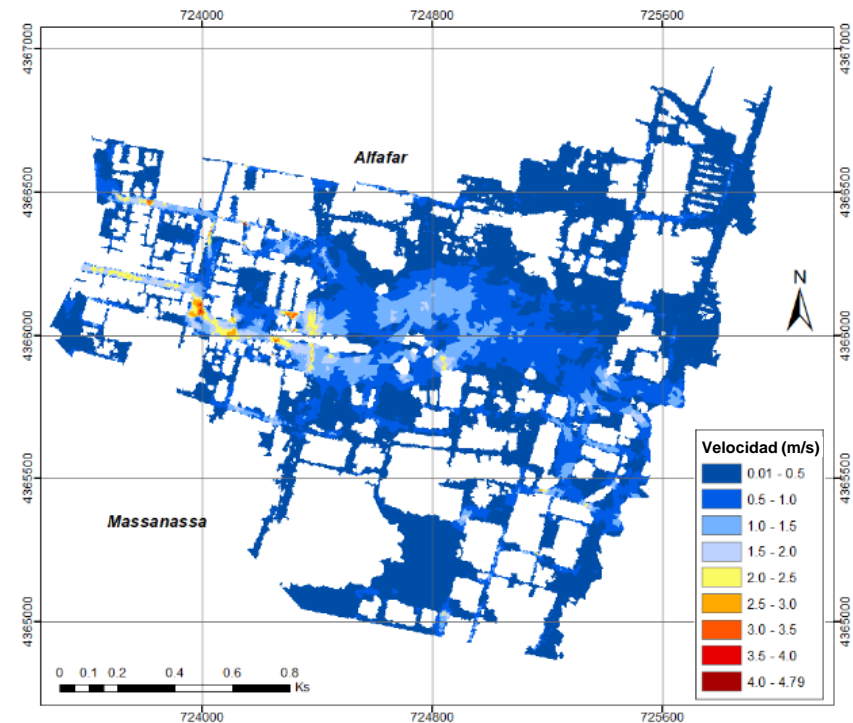
Mapas disponibles para periodos de retorno de 10, 25, **50, 100 y 500 años**

Inundación para T 100 años



Profundidad (**H**)

Fuente: CHJ (2011)

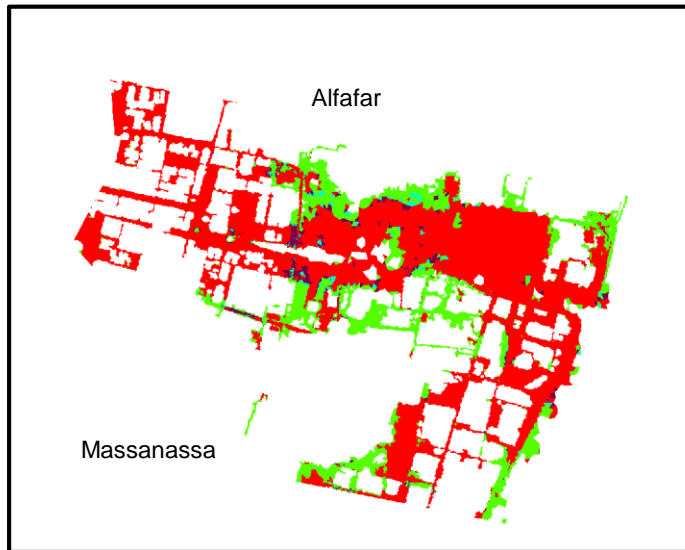


Velocidad (**U|h**)

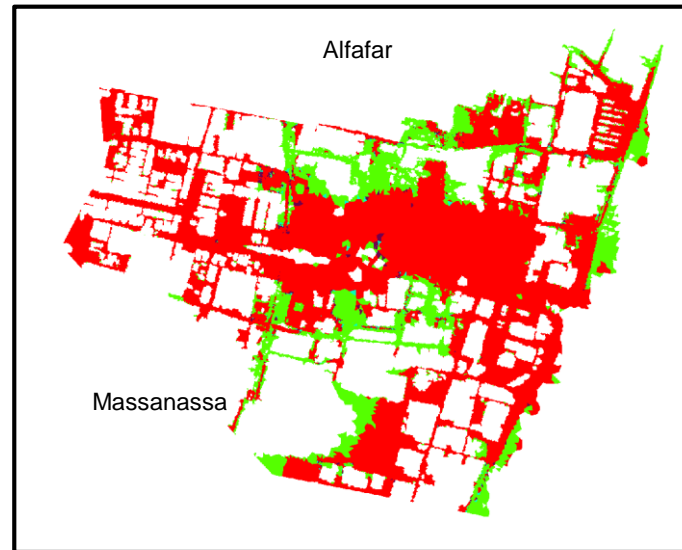
# Resultados: mapas de peligrosidad de inundación de vehículos

## Mapa de peligrosidad de inundación para un coche utilitario Índice de estabilidad de vehículos $S_i(h,u)$

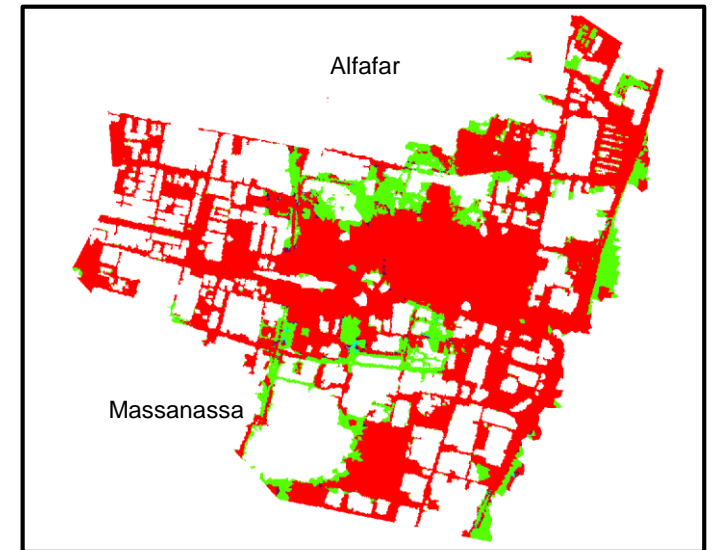
T = 50 años



T = 100 años

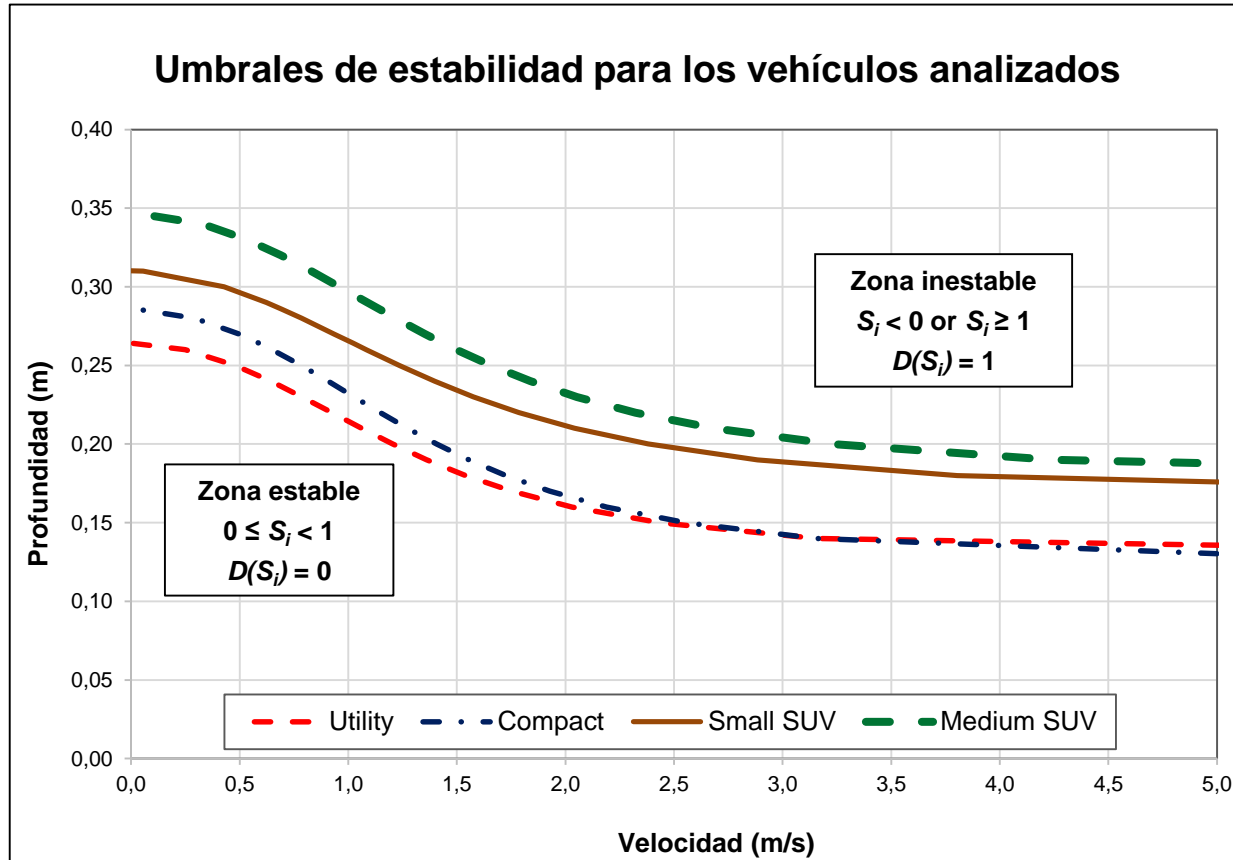


T = 500 años



Pérdida de estabilidad por flotación	Zonas seguras		Pérdida de estabilidad por deslizamiento	
< 0	0 – 0.5	0.5 – 1.0	1.0 – 1.5	> 1.5

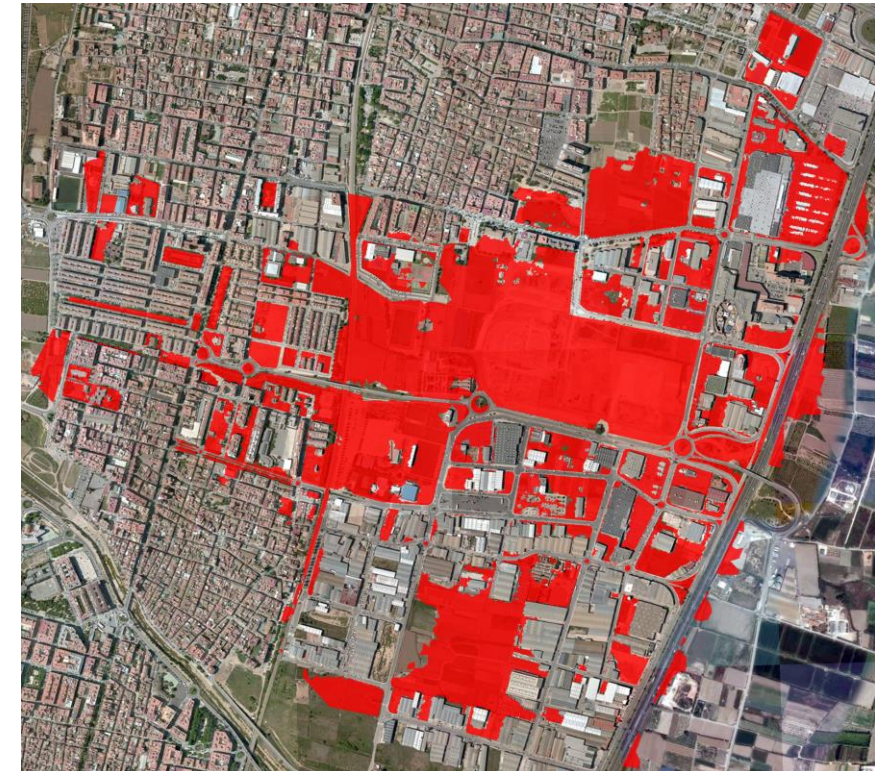
## Susceptibilidad



## Exposición

Densidad baja (en rojo) = 5.4 Coches/Ha

Densidad alta = 313.8 Coches/Ha



# Resultados: Mapa de riesgo de inundación de vehículos

UTILITARIO



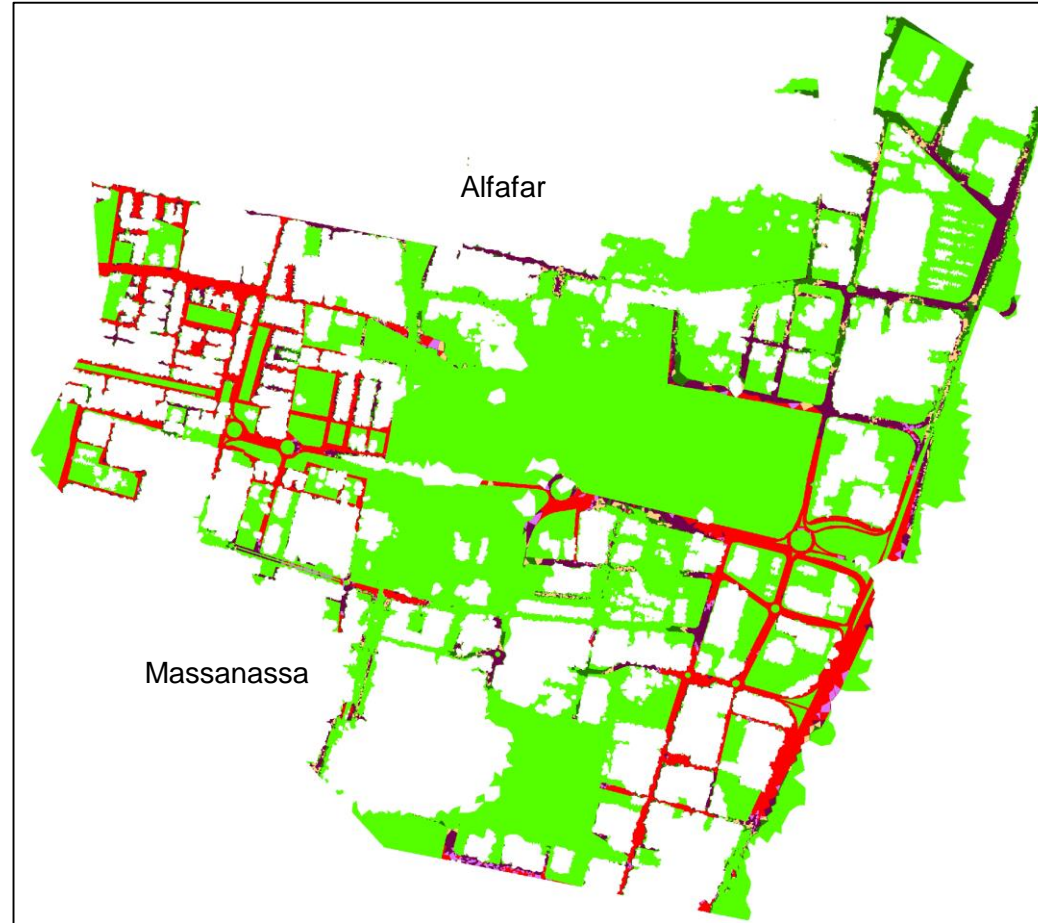
COMPACTO



SUV PEQUEÑO



SUV MEDIANO



Riesgo Vehículos/Ha/año	
	0.0 – 1.4
	1.4 – 2.8
	2.8 – 4.2
	4.2 – 5.6
	5.6 – 7.0
	7.0 – 8.4

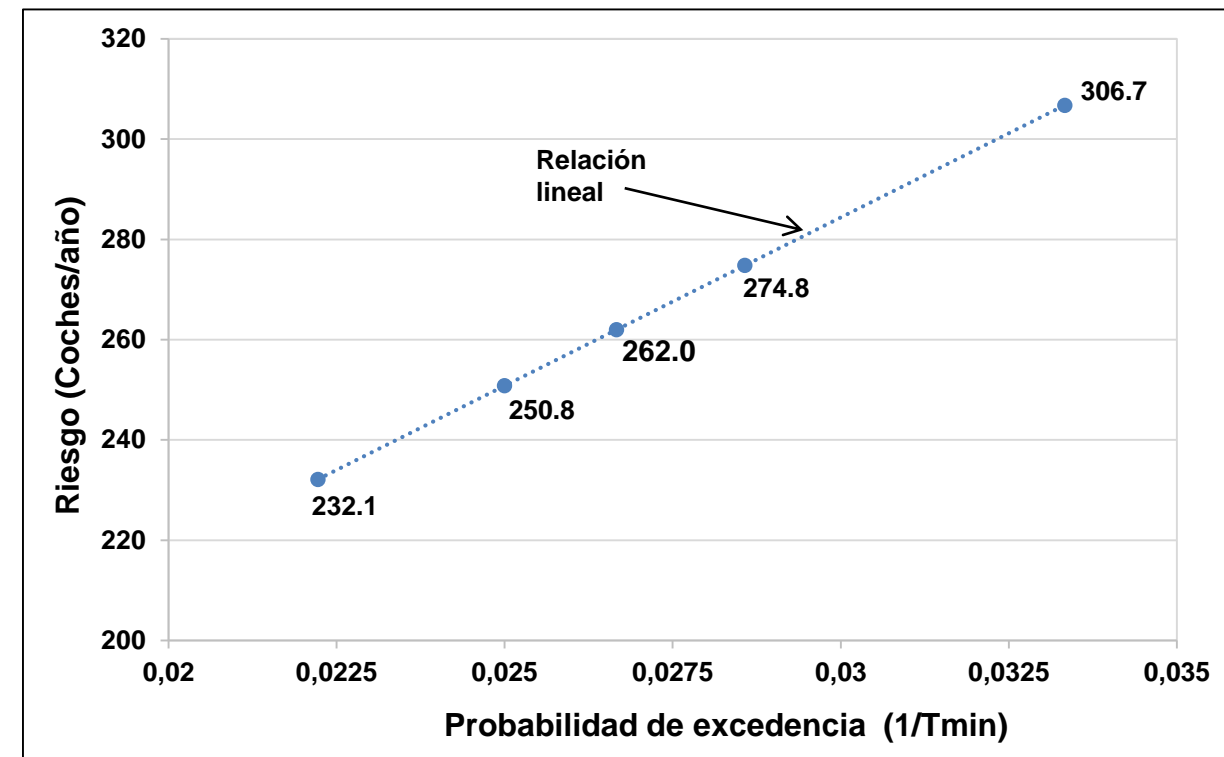
## Número medio de vehículos desestabilizados por año

Tipo de coche	gi	Coches/año
Utilitario	0.262	71.9
Compacto	0.322	86.3
SUV Pequeño	0.148	37.9
SUV Mediano	0.268	65.9
<b>Flota</b>		<b>262.0</b>

**Tmin= 37.5 años**

**18,205 coches en el área inundada**

## Sensibilidad al Tmin



## 5. RIESGO DE DESESTABILIZACIÓN DE VEHÍCULOS EN SITIOS DE INTERSECCIÓN ENTRE RÍOS Y CARRETERAS



Fuente: La Vanguardia (2019)

# Puntos de intersección entre ríos y carreteras

## Badenes



Fuente: Kellerman (2010)

## Badenes con ODT



Fuente: Tanjala (2010)

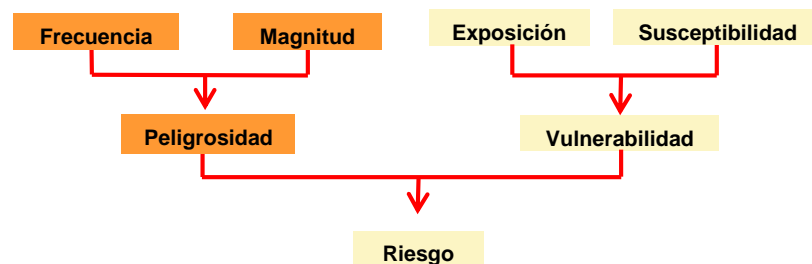
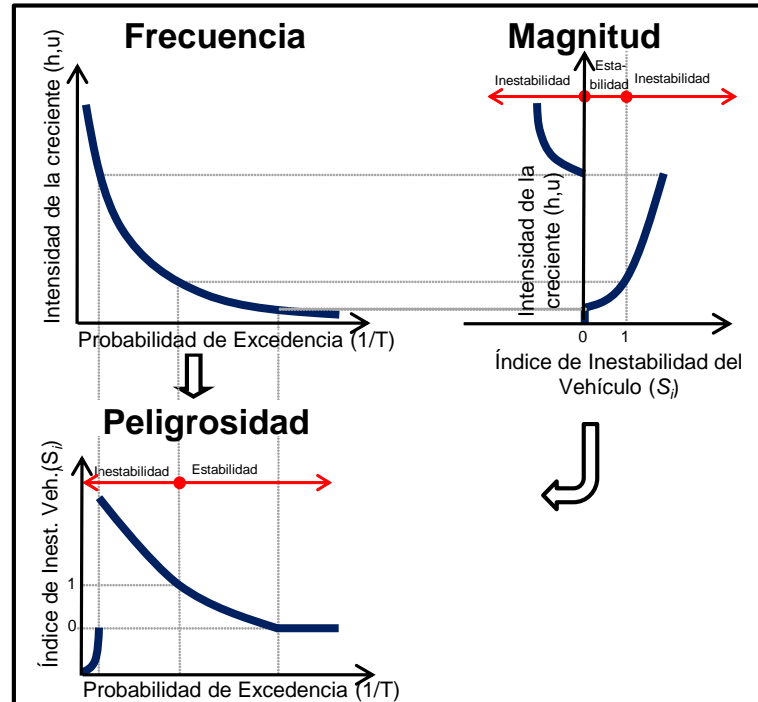
## Puentes



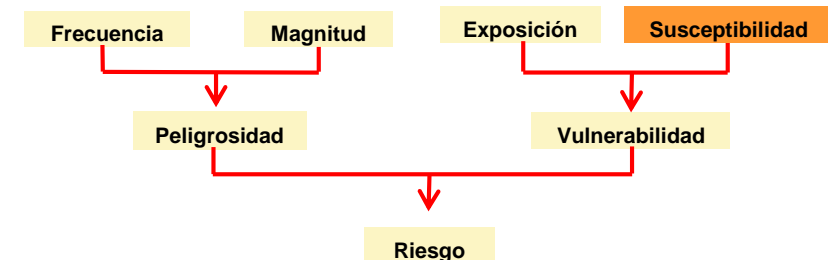
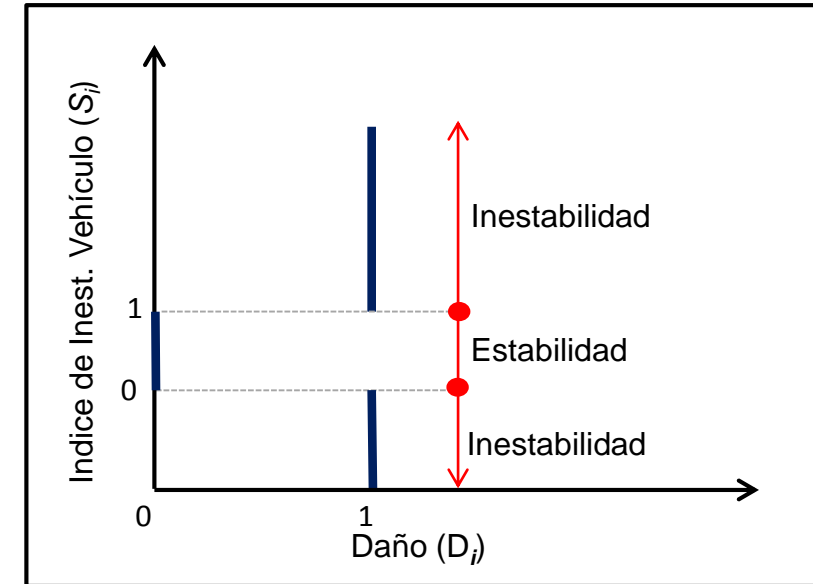
Fuente: Seidel (2020)

**Esta parte de la metodología es aplicable a badenes  
y badenes con obra de drenaje transversal (ODT)**

## Peligrosidad de inundación



## Función de Daño $D_i(S_i)$





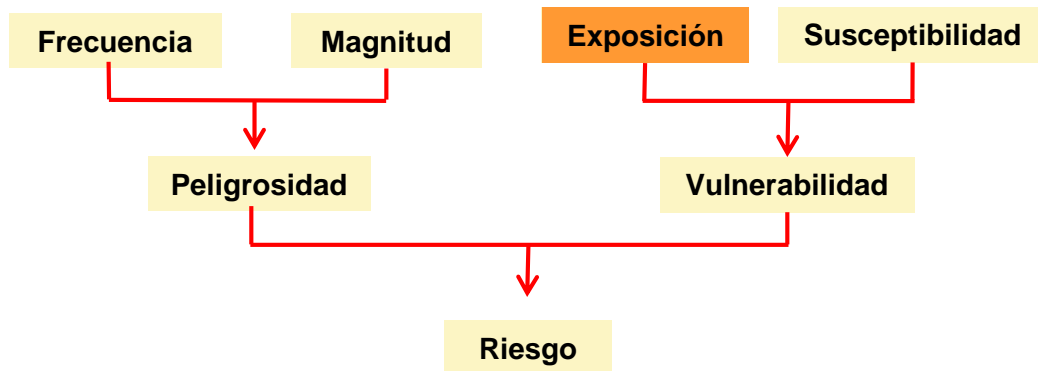
# Vulnerabilidad: exposición

Número medio de vehículos tipo  $i$ ,  $N_i$ , que circularán por la intersección durante el intervalo  $\Delta t_i$

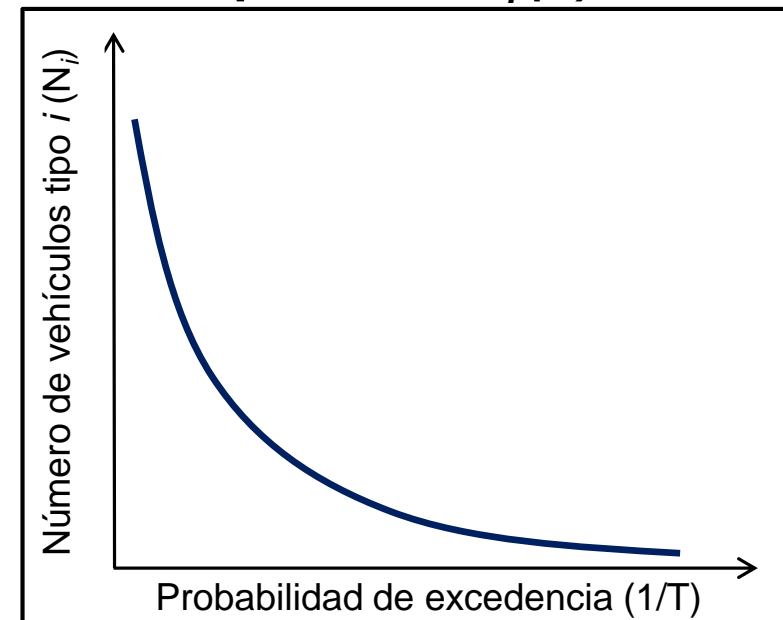
Si la distribución del paso de vehículos es de tipo Poisson se tiene que:

$$N_i = q_i \Delta t_i (T)$$

donde  $q_i$  es el intensidad media de vehículos tipo  $i$



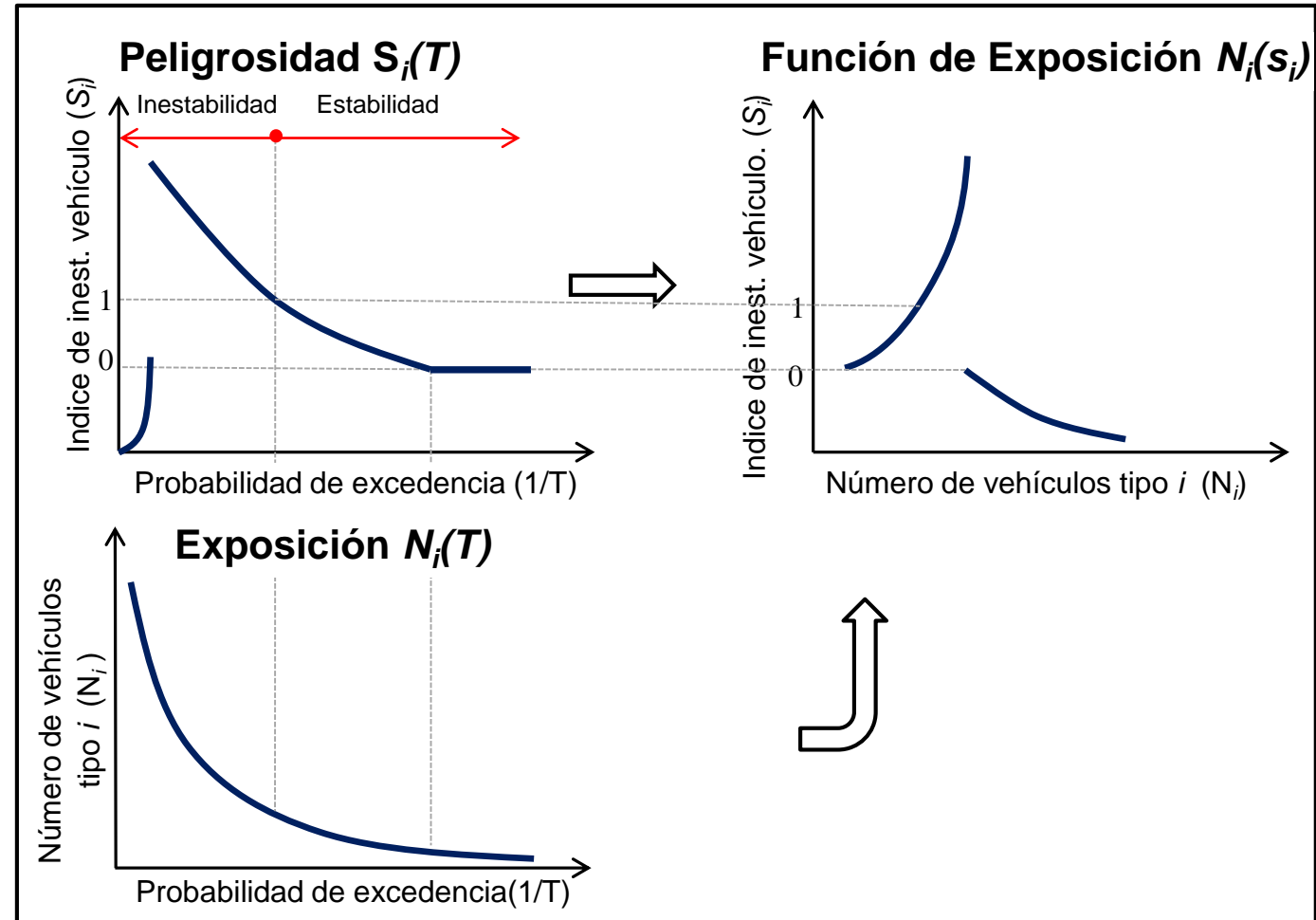
**Exposición  $N_i(T)$**



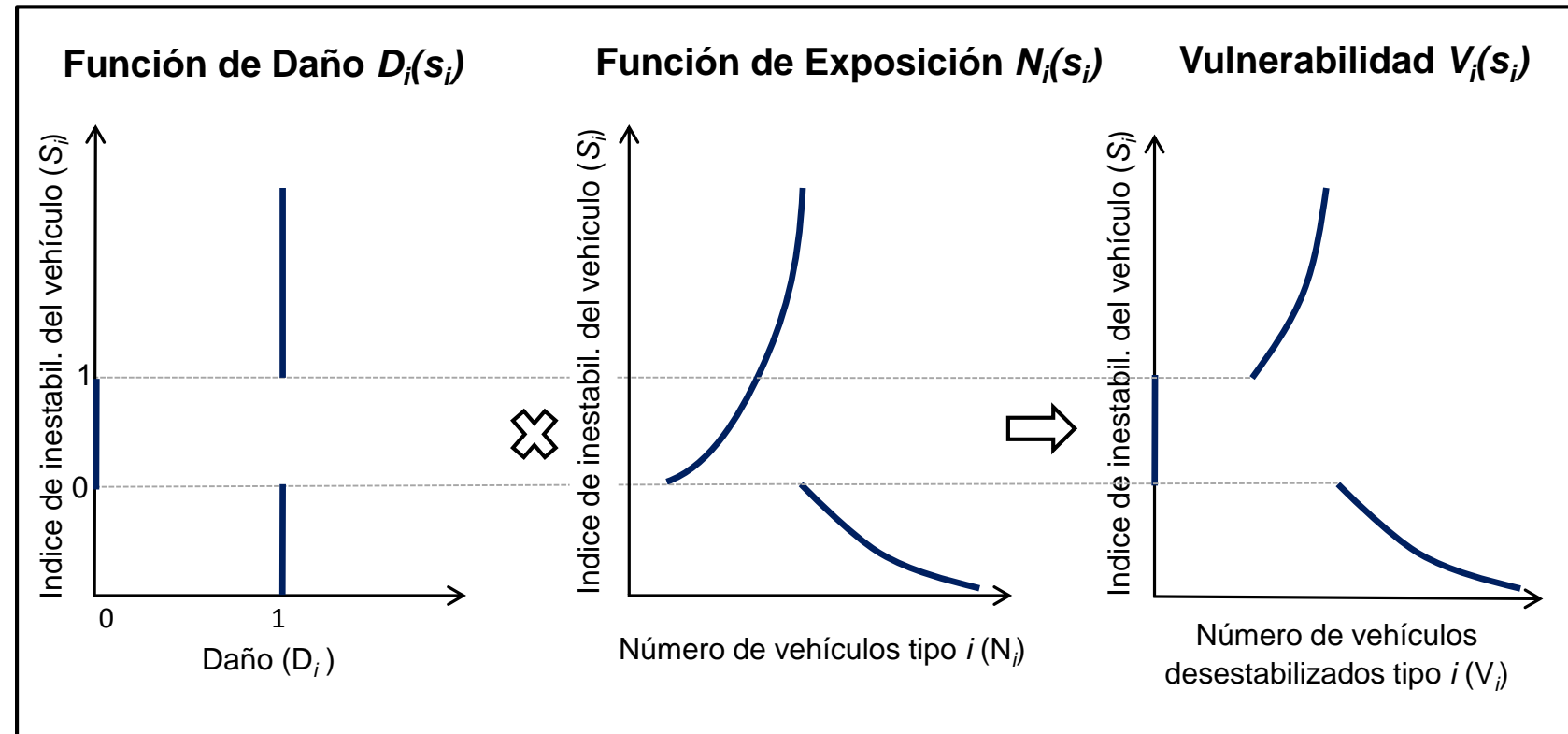
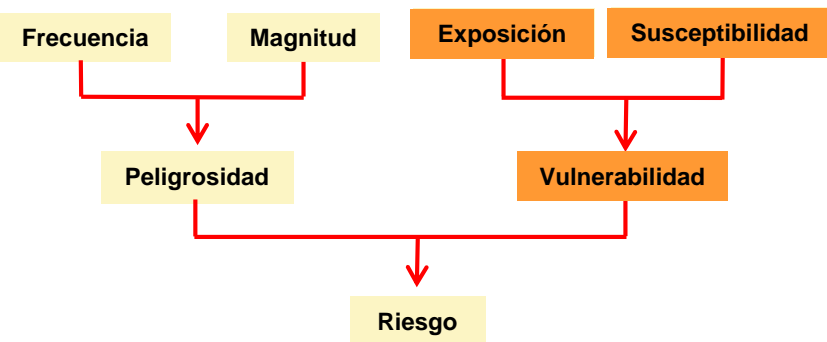
# Función de exposición (instrumental)

Para calcular el riesgo se requiere expresar la **vulnerabilidad** en función de la **peligrosidad**

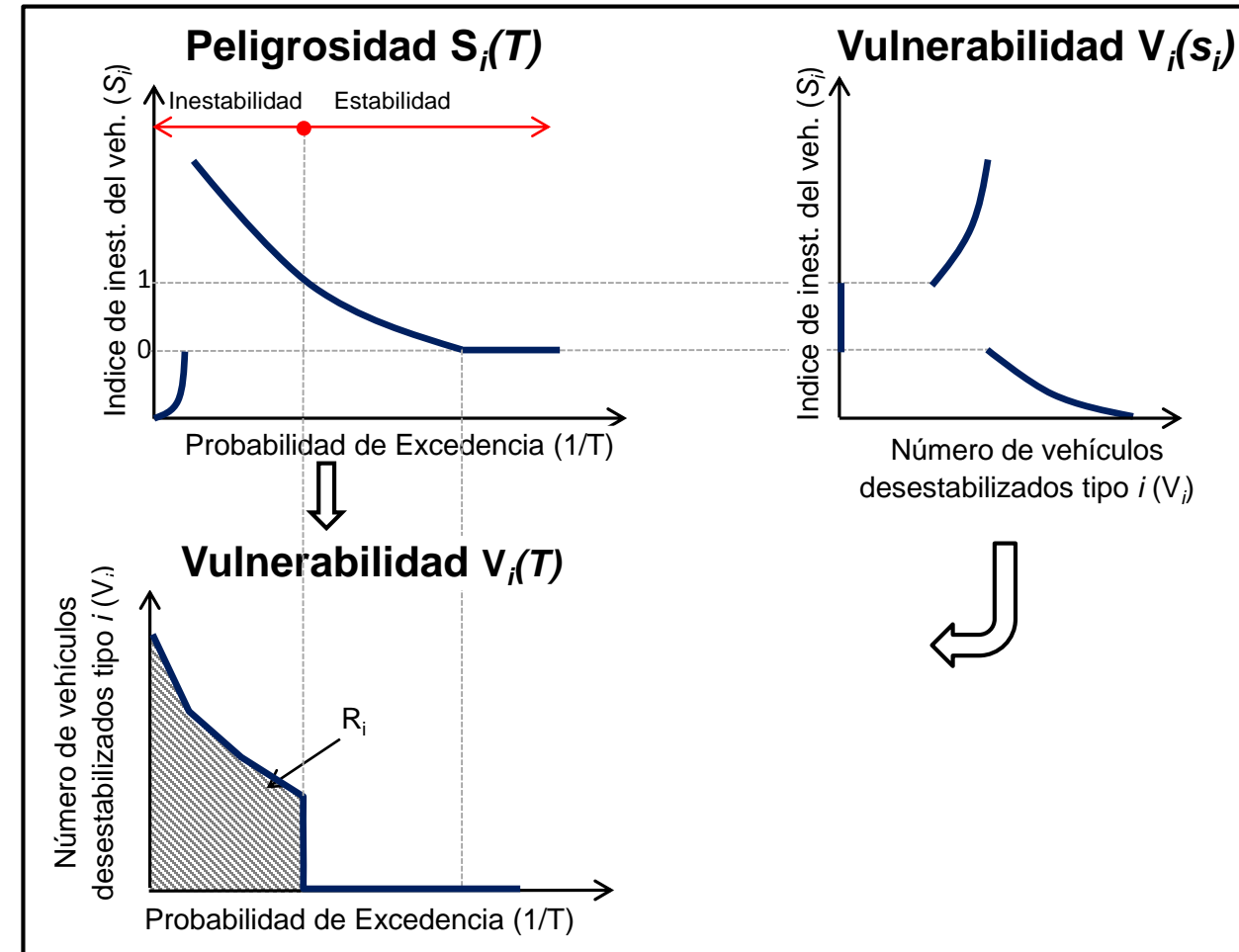
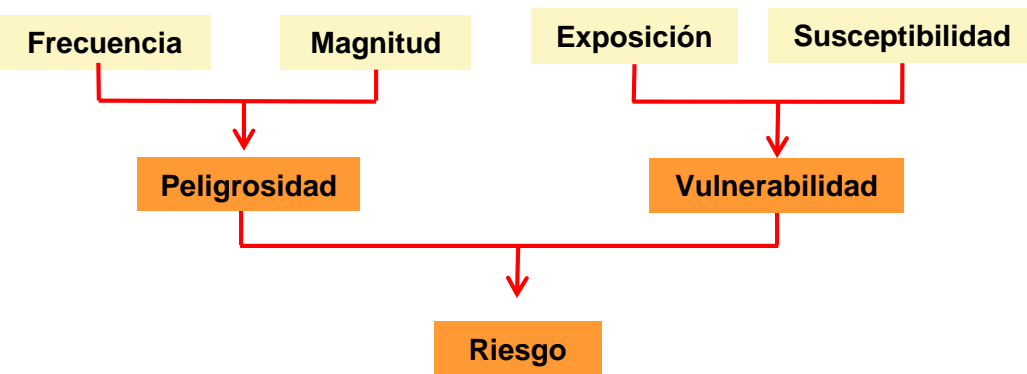
Se necesita una **función instrumental**, que se denomina función de exposición de los vehículos tipo  $i$ ,  $N_i(s_i)$



- La vulnerabilidad se obtiene al combinar la exposición y la susceptibilidad



- Número medio anual de vehículos que perdería su estabilidad en los sitios de intersección entre los ríos y las vías



# Riesgo de inestabilidad de vehículos: R

$$R_i = \int_0^1 V(s_i) dF_{S_i} = \int_0^{\infty} V_i(s) f_{S_i}(s) ds$$

donde:

$V(s_i)$  = vulnerabilidad

$F_{S_i}$  = función de distribución acumulada

$f_{S_i}$  = función de densidad de probabilidad

El riesgo total puede calcularse así:

$$R = \sum_{i=1}^K R_i = \sum_{i=1}^K \int_0^{\infty} V_i(s) f_{S_i}(s) ds$$

□ Y puede aproximarse de la siguiente forma:

$$R = \sum_{i=1}^K \left\{ \left[ \sum_{j=0}^{M-1} \frac{V_i(s_{i,j}) + V_i(s_{i,j+1})}{2} \left( \frac{1}{T_j} - \frac{1}{T_{j+1}} \right) \right] + V_i(s_{i,T_M}) \left( \frac{1}{T_M} \right) \right\}$$

donde:

J = número de orden de los mapas de inundación, desde T<sub>min</sub> (j=0) to T<sub>max</sub> (j=M)

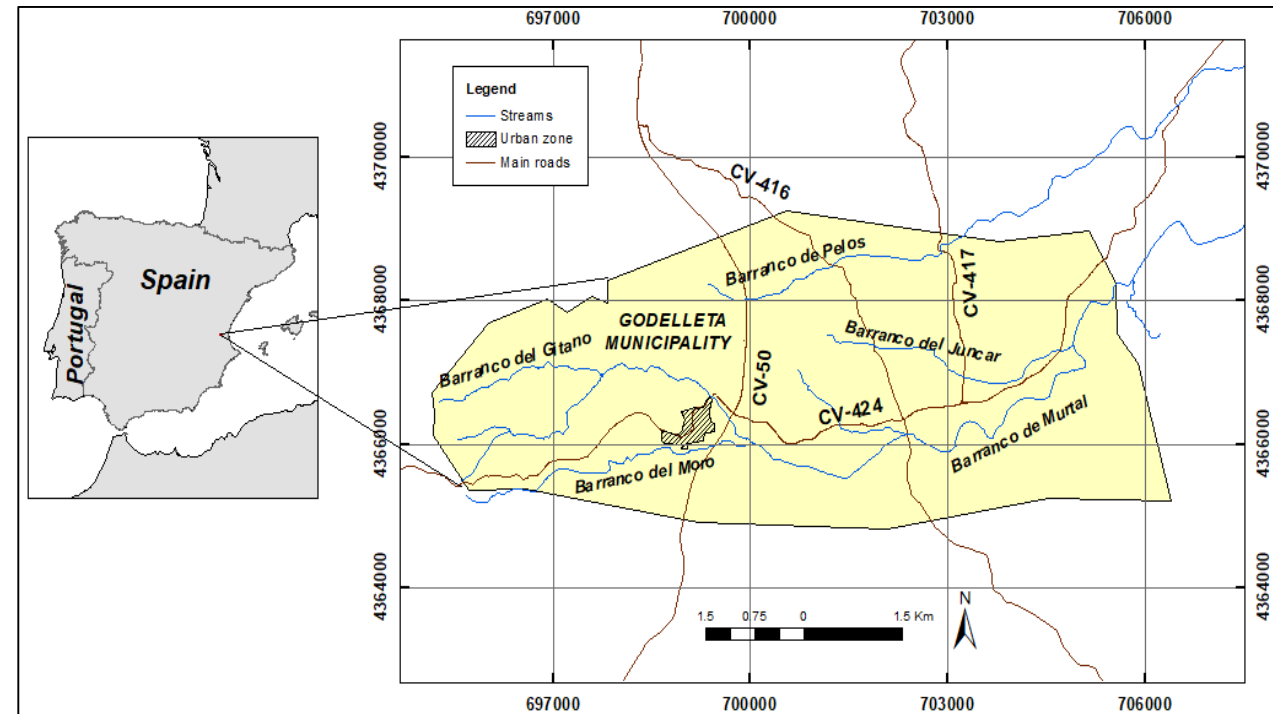
T<sub>min</sub> = T más bajo que puede afectar los vehículos

T<sub>max</sub> = T más alto con mapa de peligrosidad de inundación

$V_i(s_{i,j})$  = vulnerabilidad del vehículo  $i$  basada en el índice de estabilidad,  $S_j$ , y el período de retorno  $T_j$

# Caso de estudio: Municipio de Godelleta (Valencia)

- ❑ Localizado en la parte media de la cuenca de la Rambla del Poyo
- ❑ Área del municipio = 37.5 Km<sup>2</sup>
- ❑ Red de drenaje conformada por ríos efímeros de régimen torrencial
- ❑ Red de carreteras relativamente densa y conformada por vías en buen estado
- ❑ 26 puntos de intersección: 18 badenes con ODT y 8 badenes



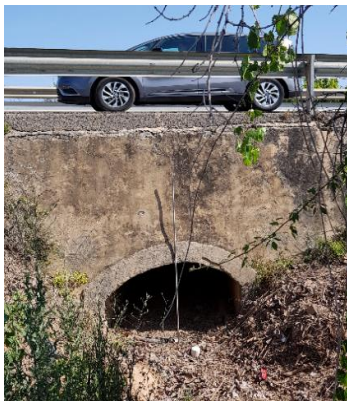
# Peligrosidad de inestabilidad de vehículos

## Puntos de Intersección entre ríos y carreteras

### Badenes



### Badenes con ODT



- Se calcularon  $Q$  para  $T$  de 1, 2, 5, 10, 25, 50, 100 y 500 años con la siguiente ecuación:

$$Q = 0.4929 A_d^{0.75} T^{0.6512}$$

- Las secciones transversales se obtuvieron del DEM generado por el CNIG
- Los calados y velocidades se calcularon utilizando HEC – RAS V 5.0.7 (USACE, 2019)
- Se calcularon índices de inestabilidad  $S_i$  para cada tipo de vehículo y para cada  $T$

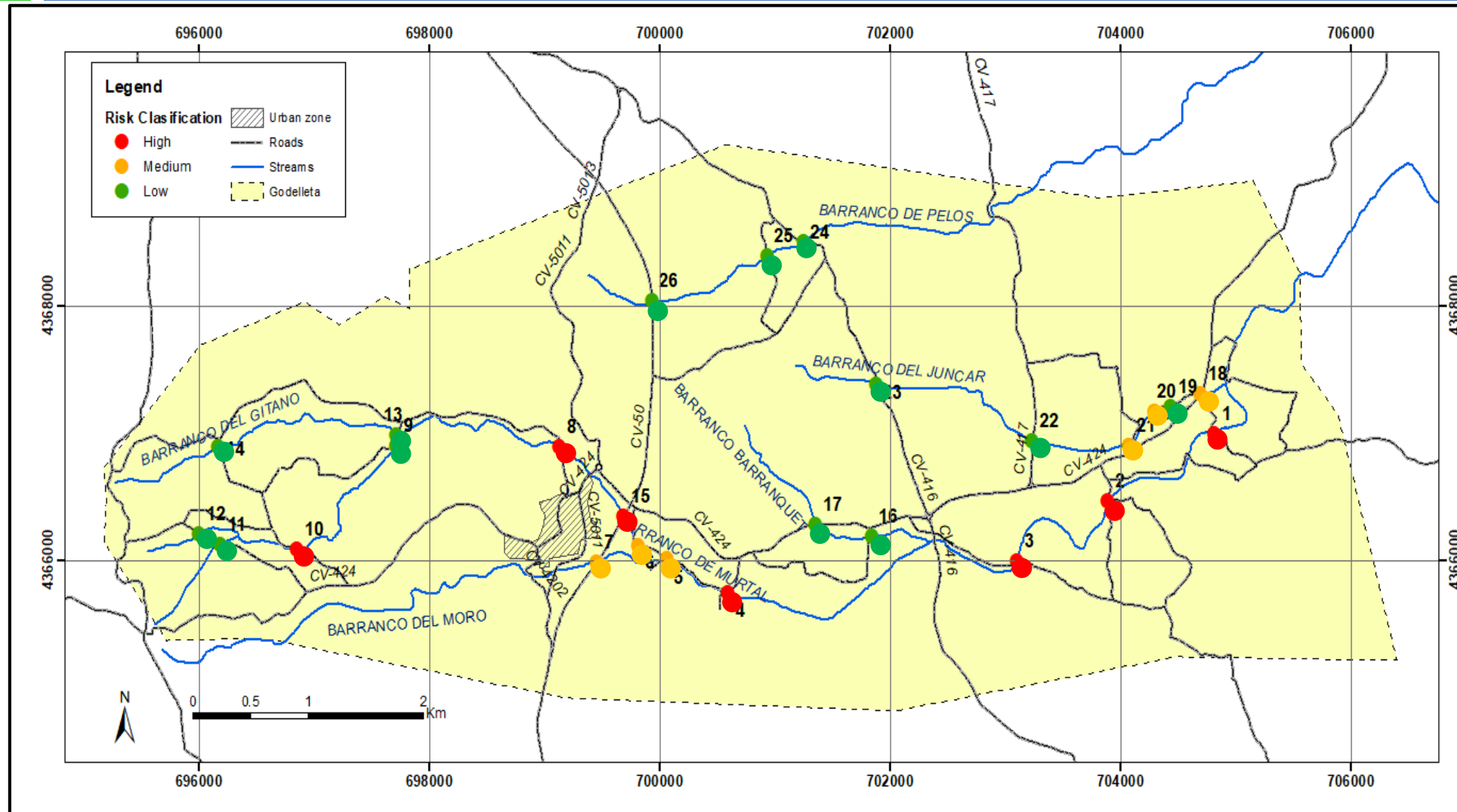
# Riesgo de inestabilidad de vehículos

Punto de Intersección	Corriente	Badén con ODT	Intensidad de tráfico (Coches/hora)	Crecida T 50 años					Riesgo de Inestabilidad (Coches/año)	
				Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Índice de inestabilidad $S_i$				Real estimado	Potencial
					Tipo de Vehículo					
					Utilitarios	Compactos	SUVs pequeños	SUVs medianos		
1	Barranco Del Murtal	Si	45.32	73.71	-0.42	-0.43	-0.45	-0.52	0.35	4.67
2		Si	0.50	70.80	-0.14	-0.14	-0.14	-0.15	0.21	1.85
3		Si	1.51	67.68	-0.26	-0.25	-0.26	-0.28	0.22	3.80
4		No	1.01	53.55	-0.86	-0.82	-0.86	-0.90	1.12	2.37
5		Si	1.51	47.71	-0.22	-0.21	-0.22	-0.23	0.11	2.99
6		No	0.21	33.13	-0.13	-0.12	-0.13	-0.13	0.11	0.46
7		Si	214.21	32.96	0.00	0.00	0.00	0.00	0.16	2.21
8		Si	4.03	25.72	-0.21	-0.20	-0.21	-0.23	0.65	2.13
9		Si	6.04	13.41	-0.22	-0.21	-0.22	-0.24	0.08	1.56
10		No	3.02	8.58	-74.99	26.73	7.79	3.80	0.39	0.48
11		No	0.33	2.87	-0.72	-0.89	-1.14	-4.20	0.01	0.02

- Riesgo real estimado : Los conductores deciden dejar de circular por las áreas inundadas cuando el calado alcanza un valor de 0,3 m

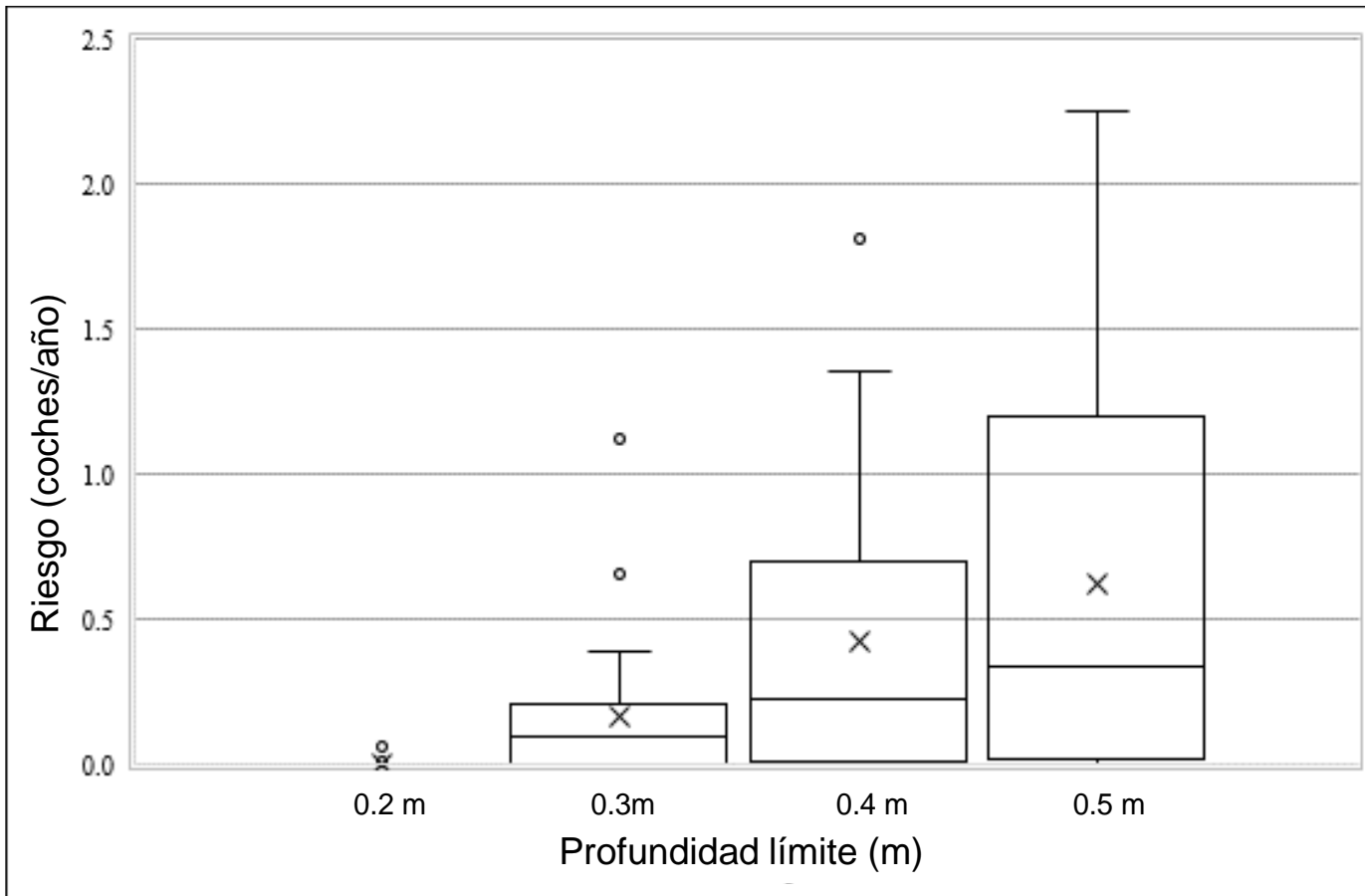


# Riesgo de inestabilidad de vehículos



Puntos de intersección	Riesgo de inestabilidad de vehículos (Coches/año)	
	Real estimado	Potencial
1	0.35	4.67
2	0.21	1.85
3	0.22	3.80
4	1.12	2.37
5	0.11	2.99
6	0.11	0.46
7	0.16	2.21
8	0.65	2.13
9	0.08	1.56
10	0.39	0.48
11	0.01	0.02
12	$<10^{-4}$	$<10^{-4}$
13	0.02	0.29
14	0.00	0.01
15	0.20	1.15
16	$2 \cdot 10^{-4}$	0.004
17	$5 \cdot 10^{-4}$	0.001
18	0.18	3.71
19	0.04	0.25
20	0.18	0.52
21	0.12	0.42
22	0.02	0.20
23	$3 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$
24	0.04	0.33
25	0.003	0.04
26	$<10^{-4}$	$<10^{-4}$

## Sensibilidad a la profundidad limite



## Sensibilidad al grado de obstrucción de la ODT

Puntos de Intersección ODT Diam. < 1,0 m	Riesgo de inestabilidad de vehículos (Vehículos/año)	
	Grado de obstrucción	
	Despejado	Completamente obstruido
3	0.34	0.39
4	0.22	0.47
8	0.11	0.13
12	0.65	0.87
13	0.08	0.26
18	$2 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-6}$
19	0.02	0.07
27	0.035	0.042
30	0.017	0.018
31	0.0003	0.0004

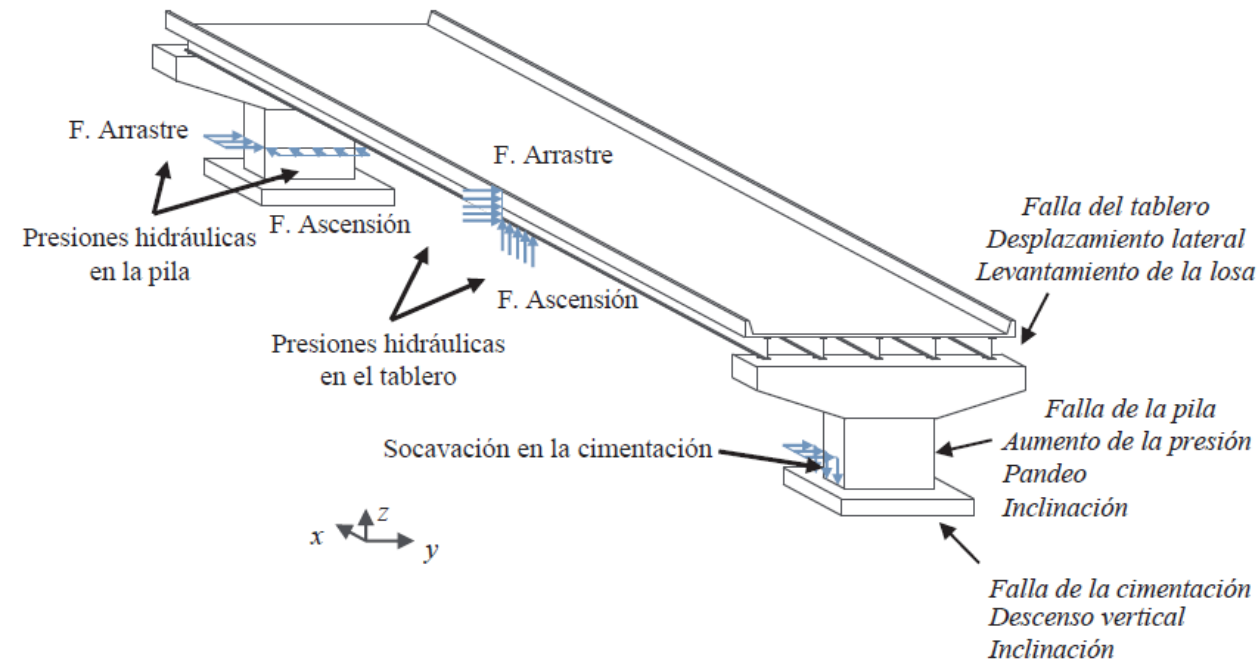
## 6. RIESGO DE FALLO DE PUENTES



Fuente: Caters (2018)

- ❑ **Imposibilidad** del puente para **trabajar** como se **diseñó y/o construyó**, por lo cual **no puede ser cruzado**
- ❑ El fallo puede deberse al **deterioro o colapso total de toda la estructura o parte de ella**
- ❑ Se considera que la **estructura ha fallado** cuando ha fallado **el tablero, las pilas o la cimentación**

## Acciones hidráulicas en puentes y tipos de fallos



Adaptado de Mondoro y Frangopol (2018)

## Socavación



Fuente: Ingeniería geotécnica (2020)

## Inestabilidad del Cauce



Fuente: Muñoz (2002)

## Subpresión bajo el Tablero



Fuente: García (2001)

## Acumulación de Acarreos



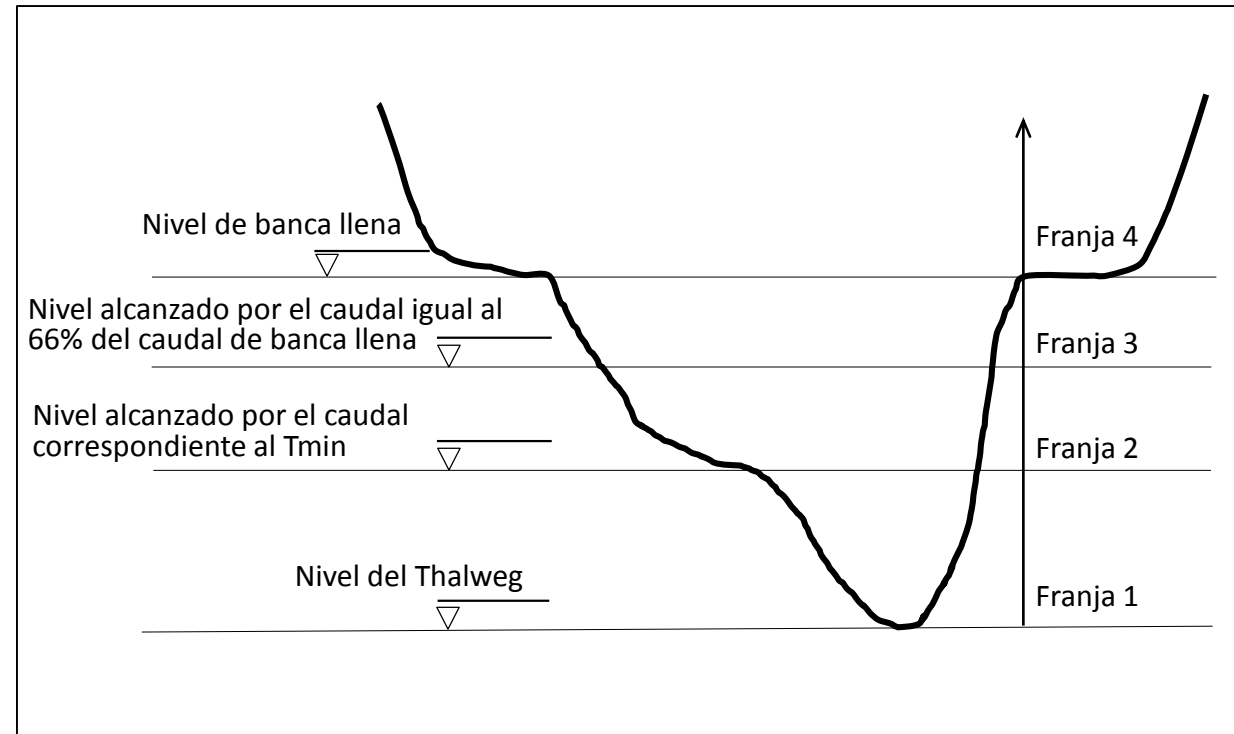
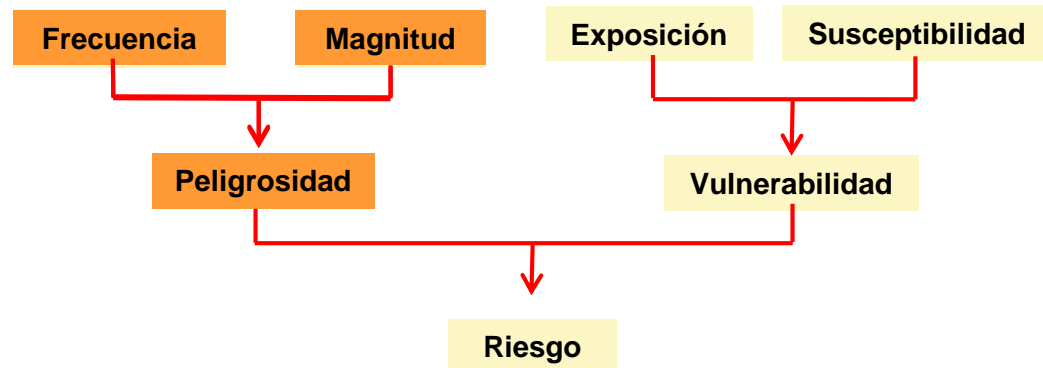
Fuente: FHWA (2005)

## Deterioro de los Materiales



Fuente: Min. Fomento de España (2012)

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



T<sub>min</sub>: Caudal que no genera daño en la estructura

- Se determinó inicialmente una **vulnerabilidad base de la subestructura y superestructura**
- El impacto de la **estabilidad** de la corriente, la acumulación de **acarreo**s 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:

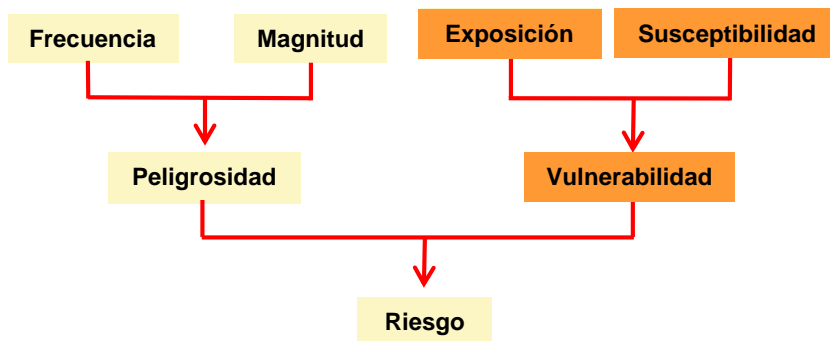
$V_{Bb}$  = Vulnerabilidad base de la subestructura

$V_{Bs}$  = 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



# Vuln. base subestruct. (VBb) y superestruct. (VBs)

Estado de la estructura (Vallés, 2011)		Vulnerabilidad				
		VBb			VBs	
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	-	-	-	-	-



# Factores multiplicadores $F_s$ , $F_d$ , $F_t$

## 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	Exce-lente	8	Bancas protegidas o bien vegetadas	1.0
		9	Canal estable sin afectaciones	
-	-	N	No aplicable	-

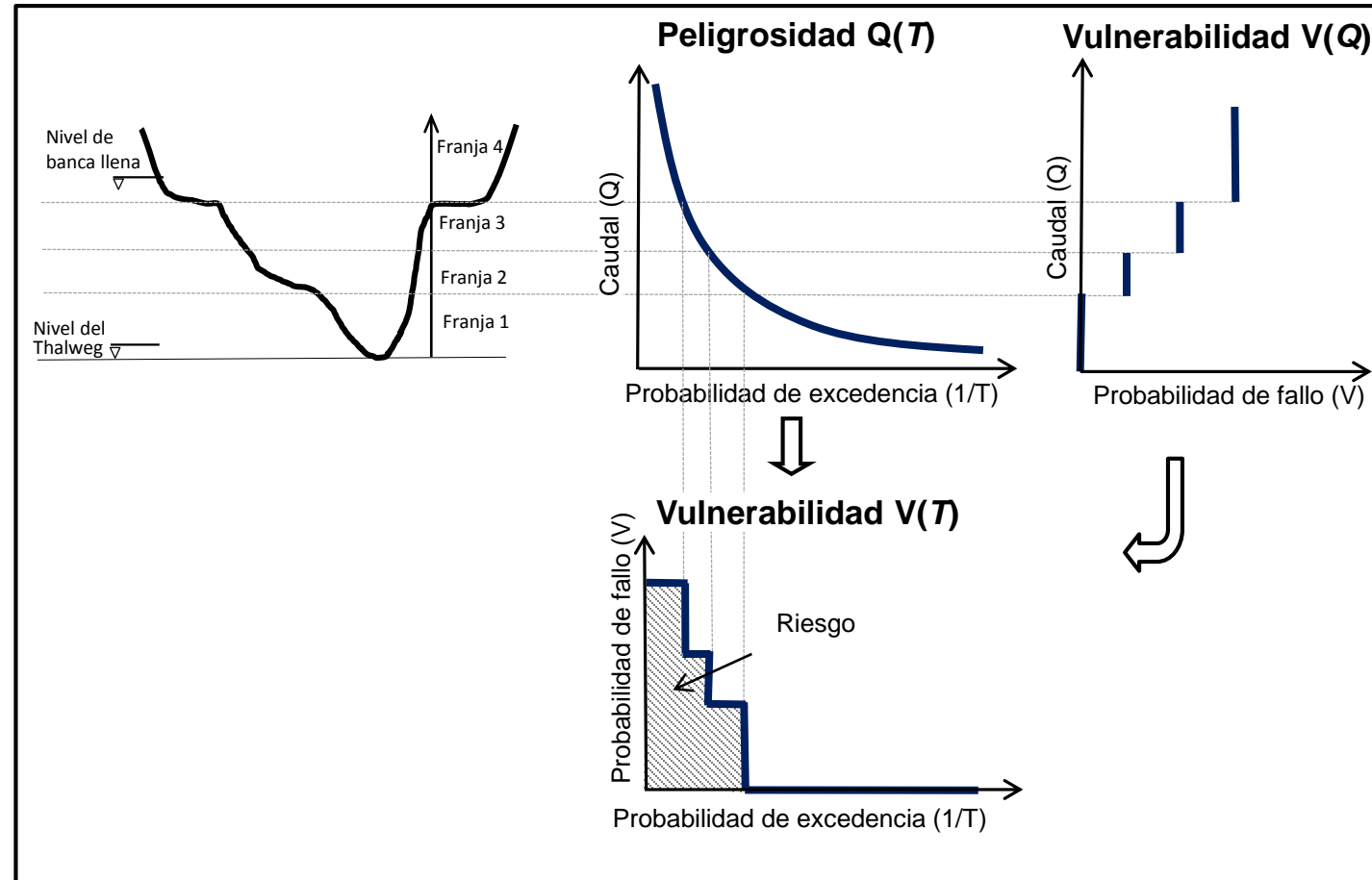
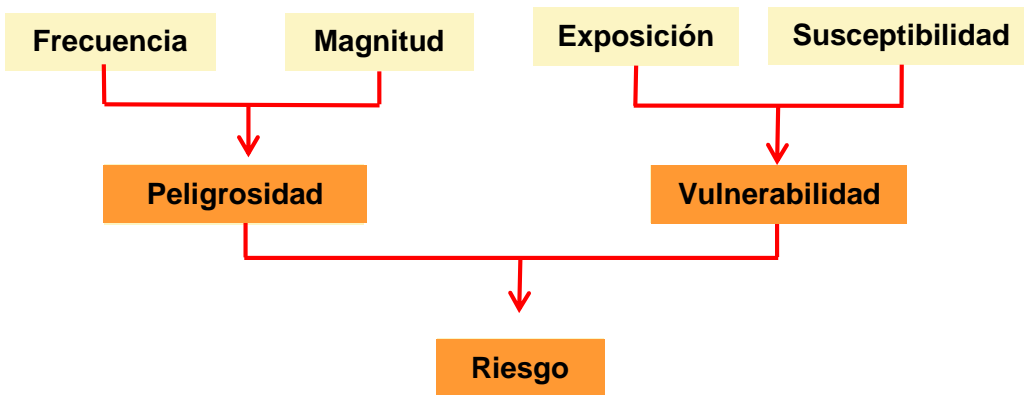
## Acumulación de Acarreos $F_d$

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			
	Ancho Menor a long. tronco de diseño	Sector transporte acarreos	Canal	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	
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 corresponde a la probabilidad de fallo anual de la estructura



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

donde:

V = vulnerabilidad

f = función de densidad de probabilidad de y

Resolviendo en forma discreta:

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

donde:

$V_{bi}$  = vulnerabilidad de la subestructura en franja i,

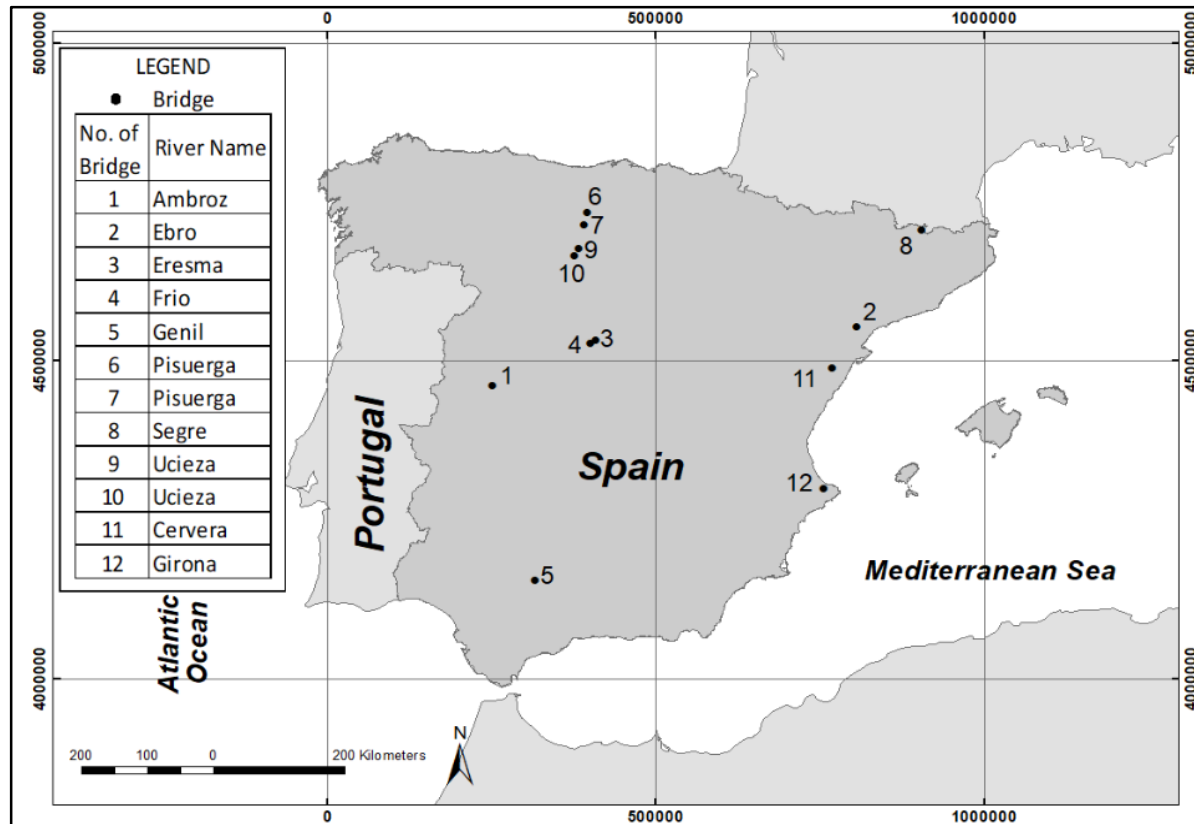
$\Delta P_i$  = probabilidad de ocurrencia de caudales en franja i

$V_s$  = vulnerabilidad de la superestructura

$P_s$  = probabilidad de que la crec. alcance la superest.

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

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



- 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 % son estructuras de hormigón armado y el 42 % a puentes de fábrica
- El 33% son estructuras convencionales, el 25% puentes de arco y el 42% son puentes de fábrica

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						
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				
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 en el que podrían fluctuar los caudales dominantes de los ríos españoles

Los caudales de los T fueron tomados de la SNCZI

**Actualmente colapsados**

- ❑ Vulnerabilidad: Se estudiaron valores iguales al 200, 150, 75 y 50% de los valores adoptados
- ❑ Tmin: Se estudiaron valores de Tmin iguales a 1.5, 4, 15 y 50 años
- ❑ El riesgo es sensible a los valores de vulnerabilidad y de Tmin, pero **el orden de los casos prácticamente no cambia**

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

## CONCLUSIONES GENERALES

- ❑ Se desarrolló una **nueva metodología** para estimar el **riesgo** que generan las **crecidas de los ríos** en una red vial en **tres escenarios**: llanuras de inundación, intersecciones entre ríos y carreteras y puentes
- ❑ En los **tres escenarios** se utilizó una **metodología común** basada en la integración estadística de la peligrosidad de inundación y la vulnerabilidad de los elementos expuestos
- ❑ La implementación de la metodología propuesta ha arrojado **resultados satisfactorios**, por lo cual su aplicación puede ayudar a disminuir los efectos negativos de las inundaciones
- ❑ La metodología puede ser usada por **instituciones** encargadas de la **planificación urbana** y la **protección civil** para implementar acciones que minimicen el impacto de las inundaciones

## MODELOS DE ESTABILIDAD DE VEHÍCULOS

- ❑ Los modelos disponibles actualmente generan **resultados que difieren entre sí**, debido a que parten de **premisas diferentes**: estanqueidad de los coches, criterios para establecer estabilidad...
- ❑ El modelo de **Arrighi et al. (2016)** es uno de los **más robustos** ya que considera diferentes condiciones de estanqueidad y el número de Froude, tiene una base teórica sólida y puede ser aplicado a cualquier tipo de coche



## RIESGO DE DESESTABILIZACIÓN DE VEHÍCULOS EN LLANURAS DE INUNDACIÓN

- ❑ La metodología desarrollada permite estimar el **número medio anual de coches en riesgo** de desestabilización por unidad de área
- ❑ Para la implementación de la metodología se requiere conocer los **calados y velocidades máximos** de las inundaciones con diferentes T y las **características de los vehículos**
- ❑ El riesgo es **sensible al T** a partir del cual **inicia la afectación** de los vehículos y a la **representación** que se realice de la **flota**
- ❑ La metodología se aplicó en los municipios de **Alfafar y Massanassa**, encontrando que el **riesgo** de inestabilidad en las **calles** es **relativamente alto** con valores hasta de 8,4 vehículos/Ha/año

## RIESGO DE DESESTABILIZACIÓN DE VEHÍCULOS EN INTERSECCIONES RÍOS - VÍAS

- ❑ La metodología desarrollada indica el **número medio anual** de vehículos que perdería su **estabilidad** al circular por estos cruces
- ❑ Para calcular el riesgo **se necesitan** las **características** de las **crecidas** con diferentes T, las características de los **vehículos** y la **intensidad de tráfico**
- ❑ El número de vehículos en riesgo es **sensible** a la **profundidad** a la cual los conductores **dejan de circular** y al grado de **obstrucción de los badenes**
- ❑ La metodología fue aplicada en **Godelleta** y se encontró que en el **25%** de las **intersecciones** el riesgo **es relativamente alto**

## RIESGO DE FALLO DE PUENTES

- ❑ La metodología propuesta indica la **probabilidad de fallo anual de la estructura** debido a las crecientes de los ríos
- ❑ Para implementar la metodología se requiere **conocer los calados y velocidades máximas** de las crecidas; el **estado, edad y localización** de los puentes, y las **características de los cauces y sus cuencas**
- ❑ Se evaluó el **riesgo** de fallo de **12 puentes**, 10 en funcionamiento y 2 colapsados. Se encontró que el **50 % de los puentes** en funcionamiento presentan un **alto riesgo** de fallo

## 8. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

### ESTABILIDAD DE VEHÍCULOS PARCIALMENTE SUMERGIDOS

- ❑ Estandarizar los **criterios de decisión** que deben ser adoptados para definir los umbrales de **estabilidad**
- ❑ Realizar **experimentos** con un **mayor número de vehículos** y experimentación a **escala real**, para determinar coeficientes de fricción suelo – neumático y para encontrar umbrales de estabilidad
- ❑ Desarrollar **modelación 3-D** para estudiar mejor los fenómenos que causan la pérdida de estabilidad de los vehículos

## RIESGO DE DESESTABILIZACIÓN DE COCHES Y DE FALLO DE PUENTES:

- ❑ Establecer funciones de estabilidad para **coches en movimiento**
- ❑ Definir el **efecto** que tienen la **duración de la creciente** y la **intensidad de tráfico** en el **riesgo** tanto en las zonas urbanas como en los sitios de cruce entre los ríos y las vías
- ❑ Analizar en profundidad las variables que influyen en la **toma de decisiones** de los conductores
- ❑ Para el cálculo del riesgo de **fallo de puentes** considerar aspectos adicionales como: **vulnerabilidad de los vehículos**, **impactos económicos** por el fallo del puente, efecto en el **tráfico**...

## ❑ Artículos en Revistas JCR (4 artículos)

1. Bocanegra R. A., Vallés – Morán F. J., Francés F. (2020). Review and analysis of vehicle stability models during floods and proposal for future improvements. *J Flood Risk Management*, 13 (suppl.1):e12551. DOI.org/10.1111/jfr3.12551.
2. Bocanegra R. A., Francés F. (2020). Assessing the risk of vehicle instability due to flooding. *J Flood Risk Management*. Aceptado para publicación.
3. Bocanegra R. A., Francés F. (2020). Determining the vehicle instability risk in stream crossings. *J Flood Risk Management*. En evaluación.
4. Bocanegra R. A., Vallés – Morán F. J., Francés F. (2020). Risk assessment of bridge failure due to river floods. En preparación

## ❑ Capítulos de Libro

1. Bocanegra R. A., Francés F. (2019) Evaluating and mapping the hazard and risk of vehicle instability within a flood prone area. In: *Advances in natural hazards and hydrological risks: Meeting the challenge*, 2000. Editorial Springer

## □ Ponencias en Congresos (6 ponencias)

1. Bocanegra R. A., Vallés – Morán F. J., Francés F. (2018). Análisis de la estabilidad de vehículos frente a inundaciones. El caso de la rambla del poyo. *XXVIII Congreso latinoamericano de hidráulica*. Presentación oral. Buenos Aires.
2. Bocanegra R. A., Francés F. (2019). Evaluation of the stability of vehicles during floods State of the art review. *General Assembly European Geosciences Union*. Poster. Viena.
3. Bocanegra R. A., Francés F. (2019). Evaluating and mapping the hazard and risk of vehicle instability within flood prone area. *Workshop on natural hazard NATHAZ'19*. Presentación oral. Azores.
4. Bocanegra R. A., Francés F. (2019). Determination of the risk of vehicles instability exposed to flooding. *General Assembly European Geosciences Union*. Poster. Viena.
5. Bocanegra R. A., Vallés – Morán F. J., Francés F. (2019). Determinación del riesgo de colapso de puentes por inundaciones. Aplicación a un conjunto de puentes de carreteras españolas. *Jornadas de Ingeniería del Agua, JIA 2019*. Presentación oral. Toledo.
6. Bocanegra R. A., Francés F. (2020). Assessment of the risk of destabilization of vehicles at crossing points between streams and roads. *General Assembly European Geosciences Union*. Presentación oral. Viena.



**MUCHAS GRACIAS  
POR SU ATENCIÓN**