

UNIVERSIDAD NACIONAL DE EDUCACIÓN A DISTANCIA

Máster en Ingeniería Avanzada de Fabricación

Trabajo Fin de Máster

TÍTULO: EL CAMBIO CLIMÁTICO Y SUS CONSECUENCIAS: ANÁLISIS
DEL IMPACTO DE LAS INUNDACIONES EN LA
CONDUCCIÓN

AUTOR: NATALIA ALEMÁN CALCINES

TUTOR: FRANCISCO BROCAL FERNANDEZ

CO-TUTOR:

DEPARTAMENTO: Ingeniería de Construcción y Fabricación

UNIVERSIDAD NACIONAL DE EDUCACIÓN A DISTANCIA

Máster en Ingeniería Avanzada de Fabricación

DEPARTAMENTO: Ingeniería de Construcción y Fabricación

TÍTULO: EL CAMBIO CLIMÁTICO Y SUS CONSECUENCIAS: ANÁLISIS
DEL IMPACTO DE LAS INUNDACIONES EN LA
CONDUCCIÓN

AUTOR: NATALIA ALEMÁN CALCINES

TUTOR: FRANCISCO BROCAL FERNANDEZ

CO-TUTOR: -

DEPARTAMENTO: Ingeniería de Construcción y Fabricación

(A rellenar por la Comisión Evaluadora)

COMISIÓN EVALUADORA

PRESIDENTE: _____

VOCAL _____

SECRETARIO _____

FECHA DEFENSA ___ de _____ de _____

CALIFICACIÓN _____

Vocal

Presidente

Secretario

Fdo.: _____ Fdo.: _____ Fdo.: _____

CÓDIGOS UNESCO

--	--	--	--	--	--	--

--	--	--	--	--	--	--

--	--	--	--	--	--	--

LISTA DE SIGLAS Y ABREVIATURAS

AR&R	<i>Australian Rainfall and Runoff Guidelines</i>
EMA	<i>Emergency Management Australia</i>
ETSII	Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales
4WD	<i>Four Wheel Drive</i>
OMS	Organización Mundial de la Salud
TFM	Trabajo Fin de Máster
TP	Tutor del Trabajo
UNED	Universidad Nacional de Educación a Distancia
SUV	Vehículo utilitario deportivo

LISTA DE SÍMBOLOS

g	Aceleración debida a la gravedad
a	Aceleración media
\emptyset	Ángulo
A	Área sumergida proyectada normal al flujo
C_d	Coefficiente de arrastre
μ	Coefficiente de fricción
ρ	Densidad del agua
F_{d^1}	Fuerza de arrastre del flujo
F_{d^2}	Fuerza de arrastre motriz
F_b	Fuerza de flotación
F_r	Fuerza de fricción
R	Fuerza de reacción causada por la fuerza de rozamiento
F_{dv}	Fuerza motriz
F_n	Fuerza normal
m	Masa del vehículo
F_G	Peso neto del vehículo
F_{ro}	Resistencia a la rodadura
v	Velocidad del flujo
V	Volumen sumergido

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	3
Figura 2	4
Figura 3	5
Figura 4	6
Figura 5	7
Figura 6	8
Figura 7	8
Figura 8	9
Figura 9	10
Figura 10	10
Figura 11	11
Figura 12	14
Figura 13	18
Figura 14	20
Figura 15	29
Figura 16	35
Figura 17	44
Figura 18	52

LISTA DE TABLAS

Tabla 1	3
Tabla 2	15
Tabla 3	16
Tabla 4	33
Tabla 5	37
Tabla 6	38

ÍNDICE

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA	5
CAPÍTULO 3. ESTUDIO DEL IMPACTO DE LAS INUNDACIONES SOBRE EL VEHÍCULO	19
3.1. Introducción	19
3.2. Métodos para el estudio de la inestabilidad del vehículo	19
3.2.1. Estudios experimentales	21
3.2.1.1. Fuerzas hidrodinámicas actuantes en la estabilidad del vehículo.....	21
3.2.1.2. Condiciones de movimiento y orientación del vehículo.....	22
3.2.2. Estudios teóricos	24
3.2.2.1. Velocidad incipiente del vehículo	24
3.2.2.2. Procesos hidrodinámicos en condiciones de flujo de agua.....	25
3.2.3. Simulaciones numéricas	25
3.2.3.1. Orientación del vehículo en el flujo de agua	25
3.2.3.2. Fuerzas hidrodinámicas ejercidas por el flujo de agua	26
3.2.4. Otros métodos	26
3.2.4.1. Modelo conceptual adimensional	26
3.2.4.2. Método entrópico	27
3.2.4.3. Cartografía dinámica de riesgo por inundación.....	27
3.3. Criterios de estabilidad del vehículo.....	27
3.3.1. Criterios experimentales y analíticos.....	28
3.3.1.1. Fuerzas hidrodinámicas actuantes sobre el vehículo	28
3.3.1.2. Características físicas y espaciales del vehículo sumergido.....	31
3.3.2. Directrices de seguridad para vehículos	32
3.3.2.1. Directrices de seguridad previas (1986 – 2011)	32
3.3.2.2. Directrices actuales (2011 – 2022)	38
CAPÍTULO 4. ESTUDIO DEL IMPACTO DE LAS INUNDACIONES SOBRE EL CONDUCTOR	41
4.1. Introducción	41
4.2. Comportamiento y capacidad de detección del riesgo del conductor ante inundación	41

4.2.1. Comportamiento del conductor ante el riesgo	42
4.2.1.1. Perfil del conductor propenso al riesgo	42
4.2.2. Capacidad de detección del riesgo por parte del conductor	43
4.2.2.1. Factores influyentes en la toma de decisiones del conductor ante el riesgo..	43
4.3. Prevención e intervención para la reducción del riesgo del conductor ante inundación	
.....	44
4.3.1. Estrategias de prevención para la reducción del riesgo del conductor	45
4.3.1.1. Video infográfico.....	45
4.3.1.2. Intervención con imágenes	46
4.3.1.3. Desarrollo de planes “si-entonces”	46
4.3.1.4. Teoría de motivación a la protección (TMP).....	46
CAPÍTULO 5. DISCUSIÓN	49
CAPÍTULO 6. CONCLUSIÓN.....	53
BIBLIOGRAFÍA	55

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

Una de las principales consecuencias del cambio climático es el calentamiento global, que provoca precipitaciones extremas en numerosas partes del mundo (Huang y Cheng, 2013). Los recientes estudios sobre el cambio climático muestran que la frecuencia de las tormentas (Mitsakis et al., 2014) y las lluvias de alta intensidad (Intergovernmental Panel On Climate, 2014) serán en los próximos años cada vez más frecuentes en muchas zonas del planeta (Martínez-Gomariz et al., 2019). Estos cambios meteorológicos propician a su vez el aumento de la probabilidad de inundaciones (Smith, 2015). Diversas estadísticas muestran que el número de catástrofes por inundaciones a nivel mundial entre 2008 y 2018 representó el 43,41% del total de catástrofes naturales (Gou et al., 2022).

A su vez, las inundaciones ocupan el tercer lugar en la escala de gravedad de los daños, después de las sequías y el granizo. Un análisis realizado por el Centro de Investigación sobre la Epidemiología de los Desastres (UNISDR, 2015) estimó que entre 1995 y 2005 se perdieron 606.000 vidas y 4.100 millones de personas resultaron heridas, quedaron sin hogar o en situación de necesidad a causa de esta catástrofe natural (Smith et al., 2019). Se calcula que el coste mundial de las inundaciones es de 25.000 millones de dólares al año, lo que supone un tercio de todos los costes económicos derivados de las catástrofes naturales (Franklin et al., 2014).

En cuanto a las inundaciones, estas se clasifican en tres tipos: las inundaciones fluviales (en inglés *river floods*), las inundaciones repentinas (*flash floods*) y las inundaciones costeras (*coastal floods*) (World Health Organization, 2014a). La diferencia entre estos tres tipos de inundaciones es el origen del desplazamiento del agua y la velocidad con la que se producen (Franklin et al., 2014). Los diversos tipos de inundaciones se distribuyen de forma muy desigual. En el sur de Europa, incluido España, las inundaciones repentinas son las más frecuentes (Paprotny et al., 2018) constituyendo uno de los riesgos naturales más comunes y peligrosos, causantes tanto de un gran número de muertes (Jonkman y Kelman, 2005b) como de cuantiosos daños materiales (Barredo, 2009).

El transporte y sus infraestructuras, cruciales en muchas actividades socioeconómicas y en la seguridad de los viajeros, son especialmente vulnerables a estos fenómenos. Pese a que las

previsiones sobre el cambio climático son adversas, escasos son los estudios que ofrecen una visión global y cuantificada del impacto de las inundaciones repentinas, poco frecuentes y extremas, en la circulación e infraestructuras de los medios de transporte de las zonas afectadas (Diakakis et al., 2020).

Más exiguos aún son los estudios relativos al peligro de los vehículos expuestos a las inundaciones. La conducción durante las mismas es una actividad de alto riesgo que puede llevar a las peores consecuencias (Scarr et al., 2017). Cerca de la mitad de las personas que quedan atrapadas por las inundaciones en las carreteras son pasajeros de automóviles (Karnopp, 2004), representando más de la mitad del total de las víctimas causadas por las inundaciones (Sharif et al., 2012).

En cada país, entre el 25 y el 68% del total de víctimas mortales de las inundaciones se producen en vehículos que pierden la estabilidad durante la crecida de las aguas (Diakakis et al., 2017). Esto se debe a que los vehículos pueden ser fácilmente arrastrados por la corriente una vez que la velocidad y la profundidad del flujo alcanzan ciertos límites críticos, con probabilidades de muerte de casi el 50% (Al-Qadami et al., 2022). Más aún, son varios los estudios que han demostrado que los vehículos inundados pueden considerarse la primera causa de muerte durante las inundaciones (Al-Qadami et al., 2022). A su vez, autores como Diakakis (2016) recalcan que existen sólidas evidencias de que el número de víctimas mortales en las inundaciones relacionadas con la conducción de vehículos aumentará.

A continuación se muestra el porcentaje de víctimas mortales registradas en vehículos durante distintas inundaciones en Europa y América (Shah et al., 2018). En la siguiente tabla 1 elaborada por Jonkman y Kelman (2005a) se muestra la distribución de las causas de fallecimiento en trece eventos de inundación diferentes ocurridos entre 1989 y 2002.

Tabla 1

Distribución de las causas y circunstancias de fallecimiento en trece eventos distintos en Europa y América sucedidos entre 1989 y 2002

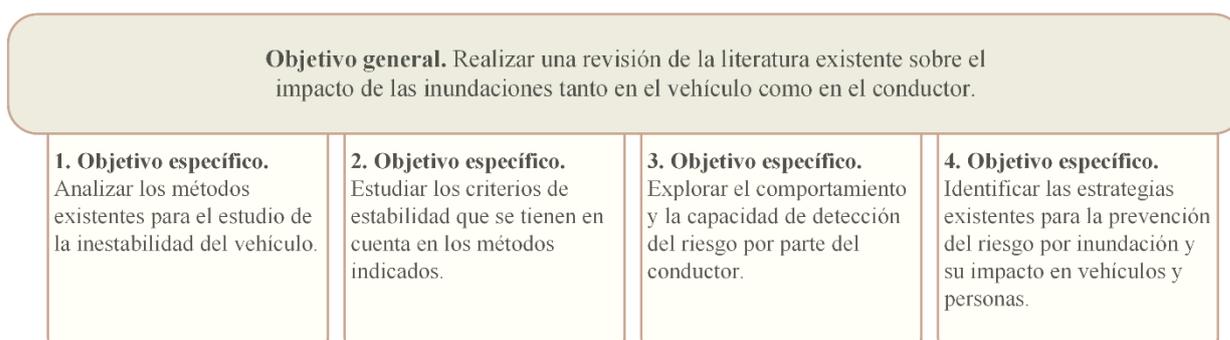
Causa de la muerte y circunstancias circundantes		Nº total de víctimas mortales	Porcentaje total de mortalidad	Cifra global
Ahogamiento	Como peatón	62	25.1%	Total de ahogamientos 167/247 (67.5%)
	En vehículo	81	32.8%	
	Desde barco	07	2.8%	
	Durante intento de rescate	02	0.8%	
	En vivienda	15	6.1%	

Nota. Adaptado de “An analysis of the causes and circumstances of flood disaster deaths” de S. N. Jonkman y I. Kelman, 2005, Disasters, 29(1), p. 75-97 (10.1111/j.0361-3666.2005.00275.x).

Teniendo en cuenta el creciente aumento del riesgo por inundación en vehículos y su impacto sobre estos y las personas, esta investigación se articula en torno a un objetivo general y cuatro objetivos específicos. El objetivo general consiste en realizar una revisión de la literatura existente sobre el impacto de las inundaciones tanto en el vehículo como en el conductor. En cuanto al primer objetivo específico, este trata de analizar los métodos existentes para el estudio de la inestabilidad del vehículo. El segundo de los objetivos específicos propone estudiar los criterios de estabilidad que se tienen en cuenta en los métodos indicados. El siguiente de los objetivos se basa en explorar el comportamiento y la capacidad de detección del riesgo por parte del conductor. El cuarto y último objetivo específico se centra en identificar las estrategias existentes para la prevención del riesgo por inundación y su impacto en vehículos y personas. La siguiente figura 1 ilustra los objetivos seguidos en esta investigación.

Figura 1

Objetivos tanto de carácter general como específico seguidos en la investigación



Este trabajo está conformado principalmente por seis capítulos: introducción; metodología; estudio del impacto de las inundaciones sobre el vehículo; estudio del impacto de las inundaciones sobre el conductor; discusión y conclusión. En el primero de ellos se introduce la temática de la investigación, justificando así la necesidad existente de revisión de la literatura. En el segundo capítulo se presenta la metodología seguida. Dado que es una temática en la que queda aún mucho por explorar, se va a enmarcar la investigación bajo el marco de la metodología denominada *Scoping review*. En los capítulos tres y cuatro se exponen los resultados obtenidos en la literatura con respecto al estudio del impacto de las inundaciones tanto en el vehículo como en el conductor. Por último, en los quinto y sexto capítulos se presenta tanto la discusión como la conclusión a partir de los resultados obtenidos. La siguiente figura 2 muestra de forma esquemática los capítulos que conforman este trabajo de investigación.

Figura 2

Capítulos que conforman el trabajo de investigación



Tal y como se ha indicado previamente, en el siguiente capítulo se presentará la metodología seguida y las fases que la conforman.

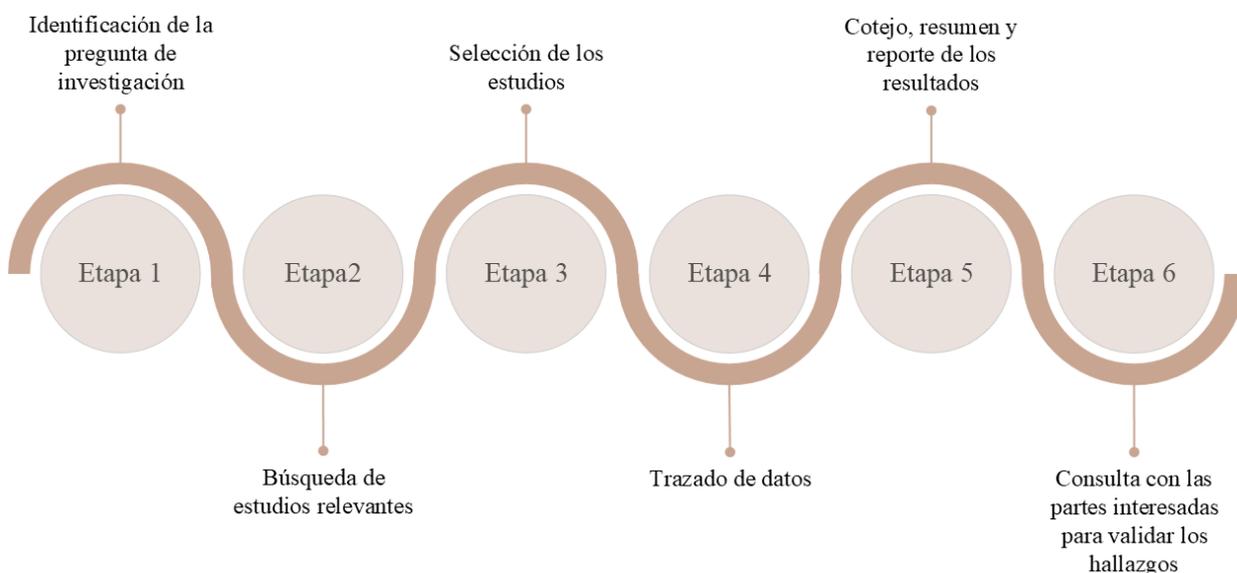
CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA

Scoping review es la metodología elegida para llevar a cabo esta investigación. Este método consiste en un estudio exploratorio en un campo concreto conducente a la publicación y difusión de los resultados. Esta metodología sirve para identificar tanto los estudios de base empírica publicados sobre una temática concreta como las carencias existentes en los mismos. Del mismo modo, sirve para el resumen y difusión de los resultados de la investigación, así como para identificar la relevancia de una investigación completa en un área específica (Arksey y O'Malley, 2005). La finalidad principal de este tipo de revisión de alcance es identificar las lagunas existentes en la literatura de la temática tratada que sirvan como guía para futuras líneas de trabajo.

En un esfuerzo por proporcionar una guía para emprender estudios exploratorios, Arksey y O'Malley (2005) desarrollaron un marco metodológico de seis etapas, tal y como indica la figura 3 (Levac et al., 2010).

Figura 3

Etapas de la metodología “Scoping review”

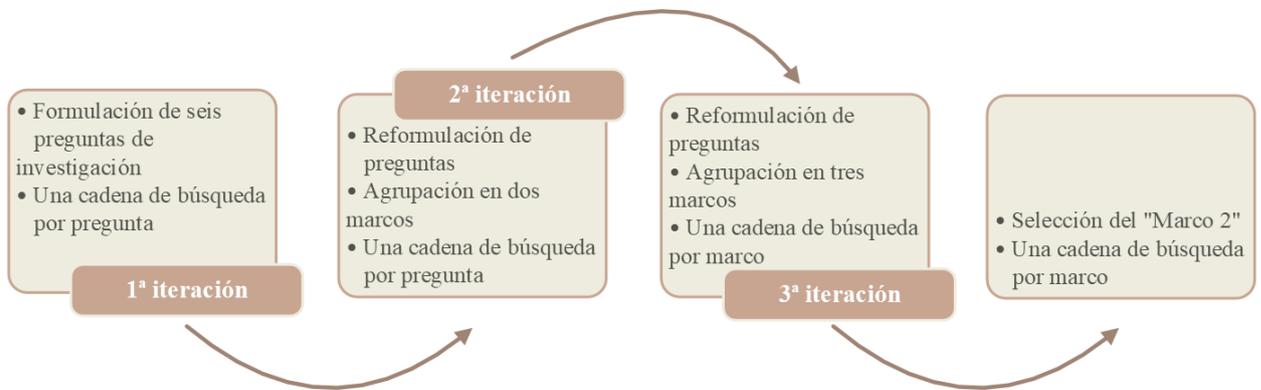


El proceso en esta metodología no es lineal sino iterativo, lo que obliga a abordar cada etapa de forma reflexiva y, en caso necesario, a repetir los pasos para asegurarse de que la bibliografía queda cubierta de forma exhaustiva.

Como se observa en la figura 3, el punto de partida es identificar la pregunta de investigación que se va a abordar como paso previo a la selección de las estrategias de búsqueda. En esta primera fase del marco metodológico se realizaron tres iteraciones hasta obtener resultados relevantes para la investigación. La siguiente figura 4 ilustra las iteraciones realizadas en la primera fase de la metodología. A continuación, se expondrá con mayor detenimiento cada una de las iteraciones efectuadas.

Figura 4

Iteraciones realizadas en la primera fase de la metodología



El primer paso consistió en identificar y formular las preguntas de investigación que se abordan en este trabajo. Se definieron seis preguntas con el objetivo de averiguar el impacto que tiene el aumento de las inundaciones en España, entender los efectos de esta catástrofe natural sobre la conducción y sobre el funcionamiento del vehículo así como conocer los sistemas de prevención que existen. Para cada una de las preguntas se formularon dos cadenas de búsqueda, tal y como se muestra en la figura 5.

Figura 5

Preguntas de investigación abordadas en el trabajo

1. ¿Qué tipos de catástrofes naturales se producen en España?
1. Cadena de búsqueda: (Natural disasters AND Spain) OR (Natural hazards AND Spain)
2. Cadena de búsqueda: (Climate change AND Spain)
2. ¿Cuáles son las zonas de riesgo elevado por inundación en el territorio español?
1. Cadena de búsqueda: (Flood risk AND Spain) OR (Flooding AND Spain)
2. Cadena de búsqueda: (Flood zones AND Spain) OR (Flooding AND Spanish territory)
3. ¿Qué impacto tienen las catástrofes naturales en los automóviles?
1. Cadena de búsqueda: (Natural disaster AND Vehicle) OR (Natural disaster AND Car)
2. Cadena de búsqueda: (Flood zones AND Spain) OR (Flooding AND Spanish territory)
4. ¿Qué riesgos suponen las inundaciones para el funcionamiento de los automóviles?
1. Cadena de búsqueda: (Flooding AND Vehicle operation) OR (Flooding AND Car operation)
2. Cadena de búsqueda: (Flood risk AND Vehicle operation) OR (Flood risk AND Car operation)
5. ¿Qué nivel de pérdidas materiales y económicas ocasionan las inundaciones con respecto a los automóviles?
1. Cadena de búsqueda: (Level losses AND Floods) OR (Losses AND Floods)
2. Cadena de búsqueda: (Floods AND Vehicle loss) OR (Floods, Vehicle damage)
6. ¿Qué sistemas de prevención y protección de vehículo existen en la actualidad ante el riesgo de inundación?
1. Cadena de búsqueda: (Flood prevention systems AND Vehicle) OR (Flood prevention systems AND Car)
2. Cadena de búsqueda: (Flood protection systems AND Vehicle) OR (Flood protection systems AND Car)

Este primer planteamiento no aportó resultados relevantes al ser una temática de gran amplitud que impedía acotar el campo de estudio. Por ello, se decide realizar una primera iteración de este proceso que consistió en la organización de estas preguntas en dos marcos principales y en la mejora y simplificación del número de cadenas de búsquedas. En el primero de los marcos se agruparon aquellas preguntas referentes al impacto climático y aumento de las catástrofes naturales tales como las inundaciones en España. En este marco se tratan además el impacto de este tipo de catástrofes sobre la conducción, el funcionamiento del vehículo, etc. El segundo marco tiene como objetivo analizar los sistemas de prevención y protección del vehículo, la estructura propia de este y el tipo de componentes tanto eléctricos como electrónicos que posee. Las siguientes figuras 6 y 7 reflejan los marcos planteados con sus respectivas preguntas y cadenas de búsquedas formuladas.

Figura 6

Preguntas y cadenas de búsquedas agrupadas en el primer marco

MARCO 01
1. ¿Qué tipos de catástrofes naturales se producen en España? Cadena de búsqueda: (Natural disasters AND Spanish territory) OR (Natural hazards AND Spanish region) OR (Climate change AND Spanish zone)
2. ¿Cuáles son las zonas de riesgo elevado por inundación en el territorio español? Cadena de búsqueda: (Flood risk AND Spanish territory) OR (Flooding AND Spanish region) OR (Flood zones AND Spanish zone)
3. ¿Cómo evolucionan las inundaciones en el territorio español a lo largo del tiempo? Cadena de búsqueda: (Evolution of floods AND Spanish region) OR (Evolution of floods AND Spanish territory)
4. ¿Qué impacto tienen las catástrofes naturales (especialmente las inundaciones) en los automóviles? Cadena de búsqueda: (Impact natural disaster AND Vehicle) OR (Impact flood AND Car)
5. ¿Qué información de siniestralidad vial existe en el territorio español con respecto a las inundaciones? Cadena de búsqueda: (Road accident AND Flood europe) OR (Road accident AND Floods Spain)
6. ¿Qué riesgos suponen las inundaciones para el funcionamiento de los automóviles? Cadena de búsqueda: (Flooding AND Vehicle System AND Damage) OR (Flood risk AND Car system AND Damage)
7. ¿Qué nivel de pérdidas materiales y económicas ocasionan las inundaciones con respecto a los automóviles? Cadena de búsqueda: (Level of material losses AND Floods AND Europe) OR (Material losses AND Floods AND Europe)

Figura 7

Preguntas y cadenas de búsquedas agrupadas en el segundo marco

MARCO 02
1. ¿Qué sistemas de prevención y protección de vehículos existen en la actualidad ante el riesgo de inundación? Cadena de búsqueda: (Flood prevention systems AND Vehicle) OR (Flood protection systems AND Car) OR (Flood protection systems AND Vehicle) OR (Flood protection systems AND Car)
2. Mapa del vehículo. ¿Cómo es la estructura general de un vehículo? ¿En qué partes estructurales y funcionales se conforma? Cadena de búsqueda: (Structure AND Car AND Mechanical Components AND Systems AND Analysis) OR (Structural parts AND Car AND Mechanical Components AND Systems AND Analysis) OR (Functional parts AND Car AND Mechanical Components AND Systems AND Analysis)
3. ¿Qué componentes conforman la parte eléctrica y electrónica del vehículo? Cadena de búsqueda: (Electrical components AND Models AND Systems AND Car) OR (Electronic components AND Models AND Systems AND Car)

Este segundo análisis tampoco fue concluyente. Por una parte, las búsquedas obtenidas continuaban abarcando una temática muy amplia siendo el número de resultados obtenidos muy superior al deseado, tal y como refleja la figura 8.

Figura 8

Resultados obtenidos en la primera búsqueda de artículos

MARCO 01				
Pregunta 1	Pregunta 2	Pregunta 3	Pregunta 4	Pregunta 5
Número de resultados: 104 artículos	Número de resultados: 55 artículos	Número de resultados: 8 artículos	Número de resultados: 132 artículos	Número de resultados: 3 artículos

MARCO 01		MARCO 02		
Pregunta 6	Pregunta 7	Pregunta 1	Pregunta 2	Pregunta 3
Número de resultados: 45 artículos	Número de resultados: 28 artículos	Número de resultados: 31 artículos	Número de resultados: 47 artículos	Número de resultados: 118 artículos

Por ello, se decidió realizar una segunda iteración del proceso volviendo a reorganizar las preguntas de búsqueda en tres marcos diferentes, tal y como refleja la figura 9. Para reducir el número de resultados a obtener se definió una cadena de búsqueda por marco, y no por pregunta, como lo realizado hasta ahora. El primero de los marcos agrupa las preguntas que hacen referencia al análisis, riesgos y consecuencias de las inundaciones en España. El segundo se centra en analizar el impacto de las inundaciones sobre la conducción, los vehículos, los riesgos que supone para su funcionamiento y el nivel de pérdidas materiales, económicas y humanas que ocasionan. Por último, el tercer marco se centra en los sistemas de prevención y protección del vehículo que existen en la actualidad ante el riesgo de inundación.

Figura 9

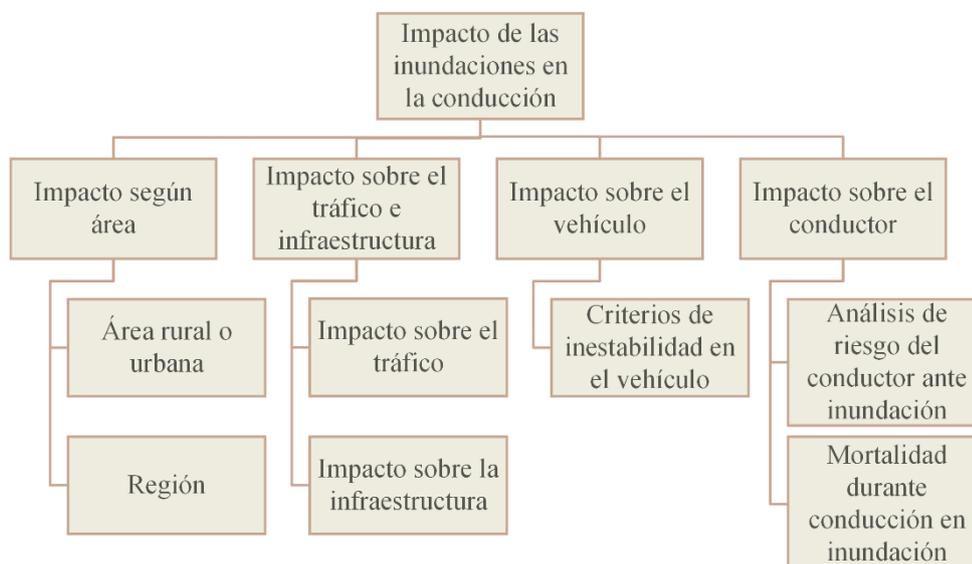
Reorganización de las preguntas de investigación y de sus correspondientes cadenas de búsqueda

MARCO 01
<ol style="list-style-type: none"> 1. ¿Qué tipos de catástrofes naturales se producen en España? 2. ¿Cuáles son las zonas de riesgo elevado por inundación el territorio español? 3. ¿Cómo evolucionan las inundaciones en el territorio español a lo largo del tiempo? Cadena de búsqueda: (Natural disasters AND Flood risk AND Spain) OR (Climate change AND Flooding evolution AND Spain)
MARCO 02
<ol style="list-style-type: none"> 1. ¿Qué impacto tienen las catástrofes naturales (especialmente las inundaciones) en los automóviles? 2. ¿Qué información de siniestralidad vial existe en el territorio español con respecto a las inundaciones? 3. ¿Qué riesgos suponen las inundaciones para el funcionamiento de los automóviles? 4. ¿Qué nivel de pérdidas materiales y económicas ocasionan las inundaciones con respecto a los automóviles? Cadena de búsqueda: (Flood AND Damage effect AND Car) OR (Flooding AND Damage effect AND Vehicle)
MARCO 03
<ol style="list-style-type: none"> 1. ¿Qué sistemas de prevención y protección de vehículo existen en la actualidad ante el riesgo de inundación? 2. Mapa del vehículo. ¿Cómo es la estructura general de un vehículo? ¿En qué partes estructurales y funcionales se conforma? 3. ¿Qué componentes conforman la parte eléctrica y electrónica del vehículo? Cadena de búsqueda: (Components AND Structure AND Parts AND System AND Car AND Vehicle)

Gracias a la redefinición de las cadenas de búsquedas, esta iteración aportó un número suficiente de resultados relacionados con la investigación. De los tres marcos, el segundo de ellos aportó un mayor número de estudios. Es por esto que se seleccionó el segundo marco para realizar una clasificación más detallada de los resultados obtenidos en él, tal y como refleja la figura 10.

Figura 10

Clasificación detallada del segundo marco



Las principales categorías en las que se clasificaron los resultados de búsqueda de este segundo marco fueron las siguientes:

1. **Impacto según área.** Artículos que tratan sobre el impacto directo e indirecto de las inundaciones según la región y el tipo de área (rural o urbana). En algunos de dichos artículos se analizan catástrofes por inundación sucedidas en diferentes partes del mundo tales como España, China o Arabia Saudí.
2. **Impacto sobre el tráfico e infraestructura.** Estudios sobre el impacto de las inundaciones en el sistema de transporte, la infraestructura y la circulación.
3. **Impacto sobre el vehículo.** Investigaciones de análisis de impacto de las inundaciones sobre los vehículos, donde se estudia la pérdida de estabilidad del vehículo y los criterios de análisis para ello.
4. **Impacto sobre el conductor, pasajero de vehículo o peatón.** Artículos en relación al impacto de las propias inundaciones en la conducción, con relación al conductor, pasajero del vehículo o peatón. En estos se analiza también el comportamiento del conductor ante este tipo de situación, su análisis del riesgo y las consecuencias de este.

De estas cuatro categorías, se seleccionaron dos por su relevancia para el objeto de estudio: el impacto de las inundaciones en el vehículo así como en el conductor, pasajero de vehículo o peatón. Conocidos los principales puntos de interés de esta investigación, se realiza una última iteración redefiniendo las cadenas de búsqueda e incluyendo en estas los términos clave establecidos en la búsqueda anterior. De esta manera se establecen dos nuevos marcos con sus correspondientes cadenas de búsqueda, tal y como se muestra en la figura 11.

Figura 11

Redefinición de los marcos y sus correspondientes cadenas de búsqueda

MARCO 01
Impacto de las inundaciones sobre el vehículo Cadena de búsqueda: (Vehicle AND Floodwater AND Instability) OR (Vehicle AND Floodwater AND Treshold)
MARCO 02
Impacto de las inundaciones sobre el conductor Cadena de búsqueda: (Driver AND Floodwater AND Safety) OR (Driving AND Floodwater AND Risk)

A partir de estas dos últimas cadenas definidas, se realizó una nueva búsqueda. Los resultados de esta búsqueda aportaron un gran número de artículos relevantes relacionados con el impacto de las inundaciones tanto sobre el vehículo como sobre el conductor. A partir de dichos resultados se elaboró el diagrama de flujo. Este diagrama representa el flujo de información a través de las diferentes fases de la revisión. En este se indica tanto el número de registros identificados (tanto incluidos como excluidos), así como los criterios de inclusión y exclusión.

Esta última búsqueda se llevó a cabo el 18 de mayo de 2022. La base de datos bibliográfica empleada para la búsqueda de estudios relevantes fue *Scopus*. Tal y como se indicó previamente, las cadenas de búsquedas que arrojaron mejores resultados en el buscador fueron las siguientes: *(vehicle AND floodwater AND instability) OR (vehicle AND floodwater AND treshold); (driver AND floodwater AND safety) OR (driving AND floodwater AND risk)*. Concretamente, se obtuvieron 36 resultados en *Scopus*. Antes de proceder a la selección de artículos, se definieron los criterios tanto de inclusión como de exclusión.

Criterios de inclusión

Se definieron los siguientes criterios de inclusión:

- Que sean artículos científicos y no revisiones, ponencias, libros o manuales.
- Que se analice el impacto de las inundaciones y los riesgos para el vehículo, estudiando tanto los criterios de estabilidad de los vehículos como los daños relacionados a estos.
- Que se evalúe el riesgo para el conductor, pasajero o peatón, estudiando tanto el riesgo como el daño vinculado a estos.
- Que se haya publicado entre 2000 y 2022, ambos inclusive.
- Que estén escritos en inglés y se encuentren en texto completo.

Criterios de exclusión

Se definieron los siguientes criterios de exclusión:

- No se tiene acceso al texto completo de la publicación ni a su descarga.
- No corresponde con la temática de la investigación.
- Aparece como resultado en ambas cadenas de búsquedas.
- Se centra en el análisis de riesgo de los peatones o equipos de rescate que actúan en las inundaciones.

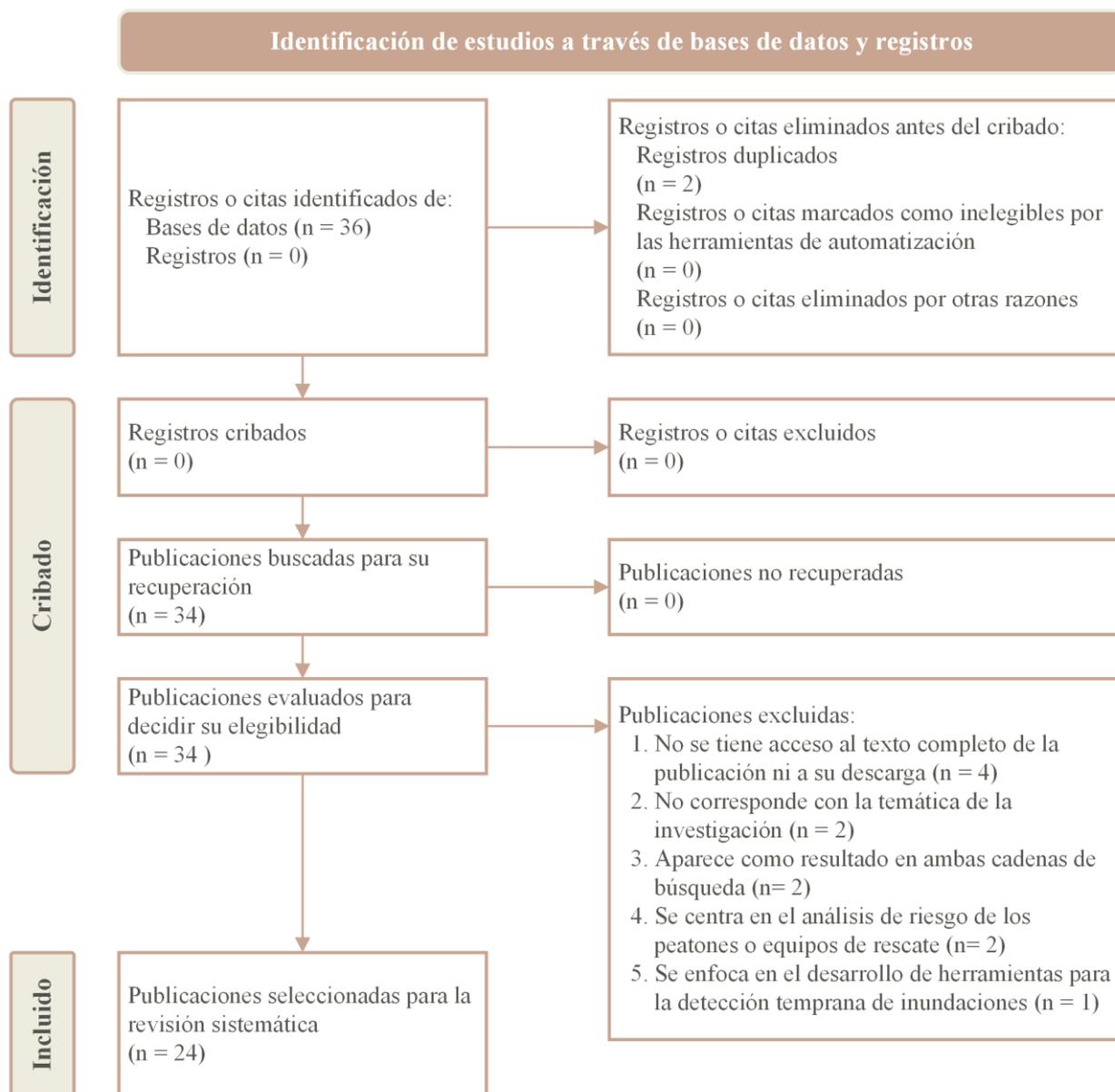
- Se enfoca en el desarrollo de herramientas para la detección temprana de inundaciones.

La siguiente figura 12 presenta el diagrama de flujo seguido hasta la obtención de dichos artículos. Según estos criterios, tras la lectura tanto del título como del resumen, se descartaron doce artículos. Principalmente por no permitir la lectura completa del texto ni su descarga ($n = 4$); no corresponderse con la temática de la investigación ($n = 2$); aparecer como resultado duplicado en ambas cadenas de búsqueda ($n = 2$); centrarse en el análisis de riesgo tanto de peatones como del equipo de rescate que actúa en las inundaciones ($n = 3$); como por enfocarse en el desarrollo de herramientas para a la detección temprana de esta clase de eventos ($n = 1$).

Finalmente, un total de 24 artículos cumplieron los criterios de inclusión y se seleccionaron para llevar a cabo la investigación. Los trece primeros artículos, se centran en la evaluación del riesgo para el vehículo, se obtuvieron a partir de la primera cadena de búsqueda y tratan aspectos tales como los métodos para el estudio de la inestabilidad del vehículo o los criterios de estabilidad de este. Las publicaciones restantes fueron resultado de la segunda cadena de búsqueda y se centran tanto en el análisis del comportamiento y capacidad de detección del riesgo del conductor ante una inundación como en la prevención e intervención para la reducción de dicho riesgo.

Figura 12

Diagrama de flujo



Una síntesis de los resultados de los estudios seleccionados puede consultarse en las siguientes tablas 2 y 3. Dichas tablas no solo indican el autor, año o nombre de la revista, sino que presentan el contenido de las investigaciones organizado en dos categorías. La categoría 1 es el impacto de las inundaciones sobre los vehículos y la categoría 2, el impacto de las inundaciones sobre el conductor. Las diversas subcategorías son designadas en la tabla mediante códigos. La leyenda para dichos códigos queda recogida en la figura 13.

Tabla 2

Estudios seleccionados a partir de la primera cadena de búsqueda

	Título	Autor	Año	Nombre revista	Categoría 1. Impacto de las inundaciones sobre los vehículos	Categoría 2. Impacto de las inundaciones sobre el conductor
1	Estimating the instability criterion of vehicles in urban flooding by an entropic method	Gou, L. et ál.	2022	Urban Clim.	0, 0A, 0A6, 0A6Y 0, 0B, 0B9, 0B9Z 0, 0B, 0B8, 0B8Y	-
2	Full-scale experimental investigations on the response of a flooded passenger vehicle under subcritical conditions	Al-Qadami, E.H.H. et ál.	2022	Nat. Hazards	0, 0A, 0A9, 0A9Y 0, 0B, 0B9, 0B9Z 0, 0B, 0B8, 0B8Y	-
3	A review of safety guidelines for vehicles in floodwaters	Shah, S.M.H. et ál.	2021	Int. J. River Basin Manag.	0, 0A, 0A9, 0A9Z 0, 0B, 0B8, 0B8Y	1, 1B, 1B9
4	Criterion of vehicle instability in floodwaters: past, present and future	Shah, S.M.H. et ál.	2021	Int. J. River Basin Manag.	0, 0A, 0A9, 0A9Z 0, 0B, 0B9, 0B9Z	-
5	Hydrodynamic effect on non-stationary vehicles at varying Froude numbers under subcritical flows on flat roadways	Shah, S.M.H. et ál.	2020	J. Flood Risk Manag.	0, 0A, 0A9, 0A9Z 0, 0B, 0B9, 0B9Z 0, 0B, 0B9, 0B9Y	-
6	Full-scale testing of stability curves for vehicles in flood waters	Smith, G.P. et ál.	2019	J. Flood Risk Manag.	0, 0A, 0A9, 0A9Z 0, 0A, 0A9, 0A9Y	-
7	Influence of forces on vehicle's instability in floodwaters	Shah, S.M.H. et ál.	2018	Ain Shams Eng. J.	0, 0A, 0A9, 0A9Z 0, 0A, 0A9, 0A9Y	-
8	Experimental studies on the threshold of vehicle instability in floodwaters	Shah, S.M.H. et ál.	2018	J. Teknol.	0, 0A, 0A9, 0A9Y 0, 0B, 0B9, 0B9Z	-
9	Criterion of vehicle stability in floodwaters based on theoretical and experimental studies	Xia, J. et ál.	2014	Nat. Hazards	0, 0A, 0A9, 0A9Y 0, 0B, 0B9, 0B9Z 0, 0B, 0B9, 0B9Y	-
10	Experimental studies on the interaction between vehicles and floodplain flows	Teo, F.Y. et ál.	2012	Int. J. River Basin Manag.	0, 0A, 0A9, 0A9Z 0, 0A, 0A8, 0A8Y	-

11	Incipient velocity for partially submerged vehicles in floodwaters	Shu, C. et ál.	2011	J. Hydraul. Res.	0, 0A, 0A9, 0A9Y 0, 0B, 0B9, 0B9Z	-
12	Formula of incipient velocity for flooded vehicles	Xia, J. et ál.	2011	Nat. Hazards	0, 0A, 0A9, 0A9Z 0, 0B, 0B9, 0B9Y 0, 0B, 0B8, 0B8Z	-
13	A numerical approach to understand the responses of passenger vehicles moving through floodwaters	Al-Qadami, E. H. H. et ál	2022	J. Flood Risk Manag.	0, 0A, 0A7, 0A7Z 0, 0A, 0A7, 0A7Y 0, 0B, 0B9, 0B9Z	-

Tabla 3

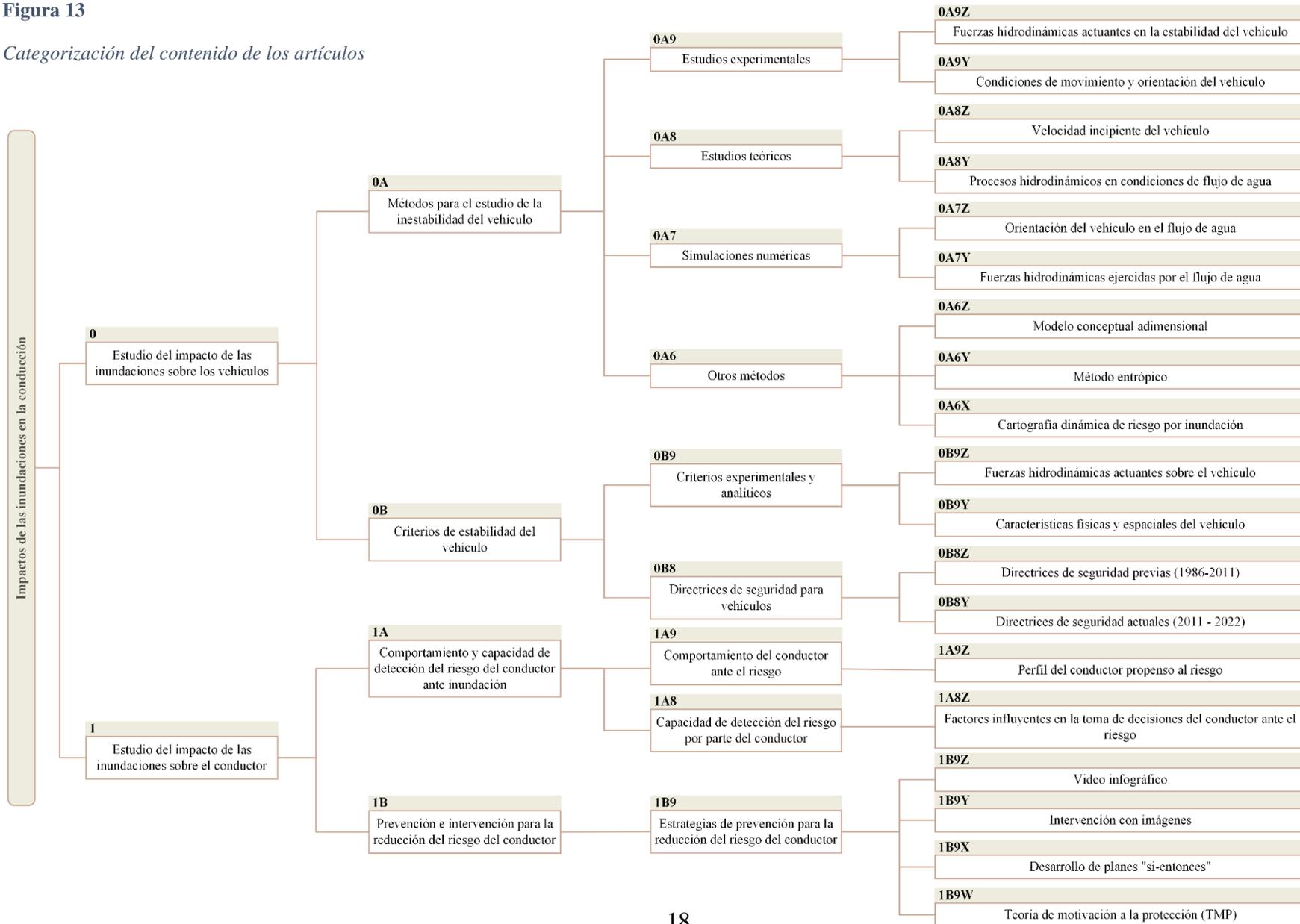
Estudios seleccionados a partir de la segunda cadena de búsqueda

	Título	Autor	Año	Nombre revista	Categoría 1. Impacto de las inundaciones sobre los vehículos	Categoría 2. Impacto de las inundaciones sobre el conductor
1	Analysis of flood fatalities in the United States, 1959–2019	Han, Z. y Sharif, H.O.	2021	Water (Switz.)	-	1, 1A, 1A9, 1A9Z
2	Changing driver behavior during floods: Testing a novel e-health intervention using implementation imagery	Hamilton, K. et ál.	2021	Saf. Sci.	-	1, 1A, 1A9, 1A9Z 1, 1B, 1B9
3	Physical Instability of Individuals Exposed to Storm-Induced Coastal Flooding: Vulnerability of New Yorkers During Hurricane Sandy	Wang, A. et ál.	2021	Water Resour. Res.	-	1, 1B, 1B9
4	Duty or safety? Exploring emergency service personnel's perceptions of risk and decision-making when driving through floodwater	Ahmed, M.A. et ál.	2020	Progress in Disaster Science	-	1, 1A, 1A9, 1A9Z 1, 1A, 1A8, 1A8Z
5	Influence of road characteristics on flood fatalities in Australia	Gissing, A. et ál.	2019	Environ. Hazards	-	1, 1A, 1A9, 1A9Z 1, 1A, 1A8, 1A8Z

6	Driving through floodwater: Exploring driver decisions through the lived experience	Hamilton, K. et ál.	2019	J. Disaster Risk Reduct	-	1, 1A, 1A9, 1A9Z 1, 1A, 1A8, 1A8Z 1, 1B, 1B9, 1B9Z
7	Protocol for developing a mental imagery intervention: A randomised controlled trial testing a novel implementation imagery e-health intervention to change driver behaviour during floods	Hamilton, K. et ál.	2019	BMJ Open	-	1, 1A, 1A9, 1A9Z 1, 1A, 1A8, 1A8Z 1, 1B, 1B9, 1B9Y
8	Drivers' experiences during floods: Investigating the psychological influences underpinning decisions to avoid driving through floodwater	Hamilton, K. et ál.	2018	J. Disaster Risk Reduct	-	1, 1A, 1A9, 1A9Z 1, 1A, 1A8, 1A8Z
9	Changing people's attitudes and beliefs toward driving through floodwaters: Evaluation of a video infographic	Hamilton, K. et ál.	2018	Transp. Res. F: Traffic Psychol. Behav.	-	1, 1A, 1A9, 1A9Z 1, 1A, 1A8, 1A8Z 1, 1B, 1B9, 1B9W
10	Stop there's water on the road! Identifying key beliefs guiding people's willingness to drive through flooded waterways	Hamilton, K. et ál.	2016	Saf Sci	-	1, 1A, 1A9, 1A9Z 1, 1A, 1A8, 1A8Z 1, 1B, 1B9, 1B9X
11	"Washed away"-assessing community perceptions of flooding and prevention strategies: A North Queensland example	Franklin, R.C. et ál.	2014	Nat. Hazards	-	1, 1A, 1A9, 1A9Z 1, 1A, 1A8, 1A8Z

Figura 13

Categorización del contenido de los artículos



CAPÍTULO 3. ESTUDIO DEL IMPACTO DE LAS INUNDACIONES SOBRE EL VEHÍCULO

3.1. Introducción

Durante los eventos de inundación, los cursos de agua pueden desbordarse causando graves perturbaciones en la circulación del tráfico (Al-Qadami et al., 2022). En estos casos, la estabilidad de los vehículos expuestos a una inundación en las carreteras no debe darse por sentada (Shah et al., 2021), dado que se pueden ver directamente afectados por la inundación y ser fácilmente arrastrados (Martínez-Gomariz et al., 2018)

Los vehículos, tanto estacionados como en movimiento, pueden perder la estabilidad pudiendo provocar lesiones mortales a los pasajeros del vehículo, a los peatones o a ambos (Shah et. al, 2021). En relación a esto, los datos sobre víctimas mortales de las inundaciones muestran que, a nivel mundial, la mortalidad relacionada con las inundaciones se asocia cada vez más a conductores que perecen en vehículos al conducir en zonas inundadas (Smith et al., 2019).

Este capítulo tiene como finalidad hacer un repaso de los métodos existentes para el estudio de la inestabilidad del vehículo, conocer los estudios de interés publicados hasta la fecha, analizar los criterios que afectan a la inestabilidad del vehículo y comprender las directrices propuestas para la seguridad de los vehículos en caso de inundación.

3.2. Métodos para el estudio de la inestabilidad del vehículo

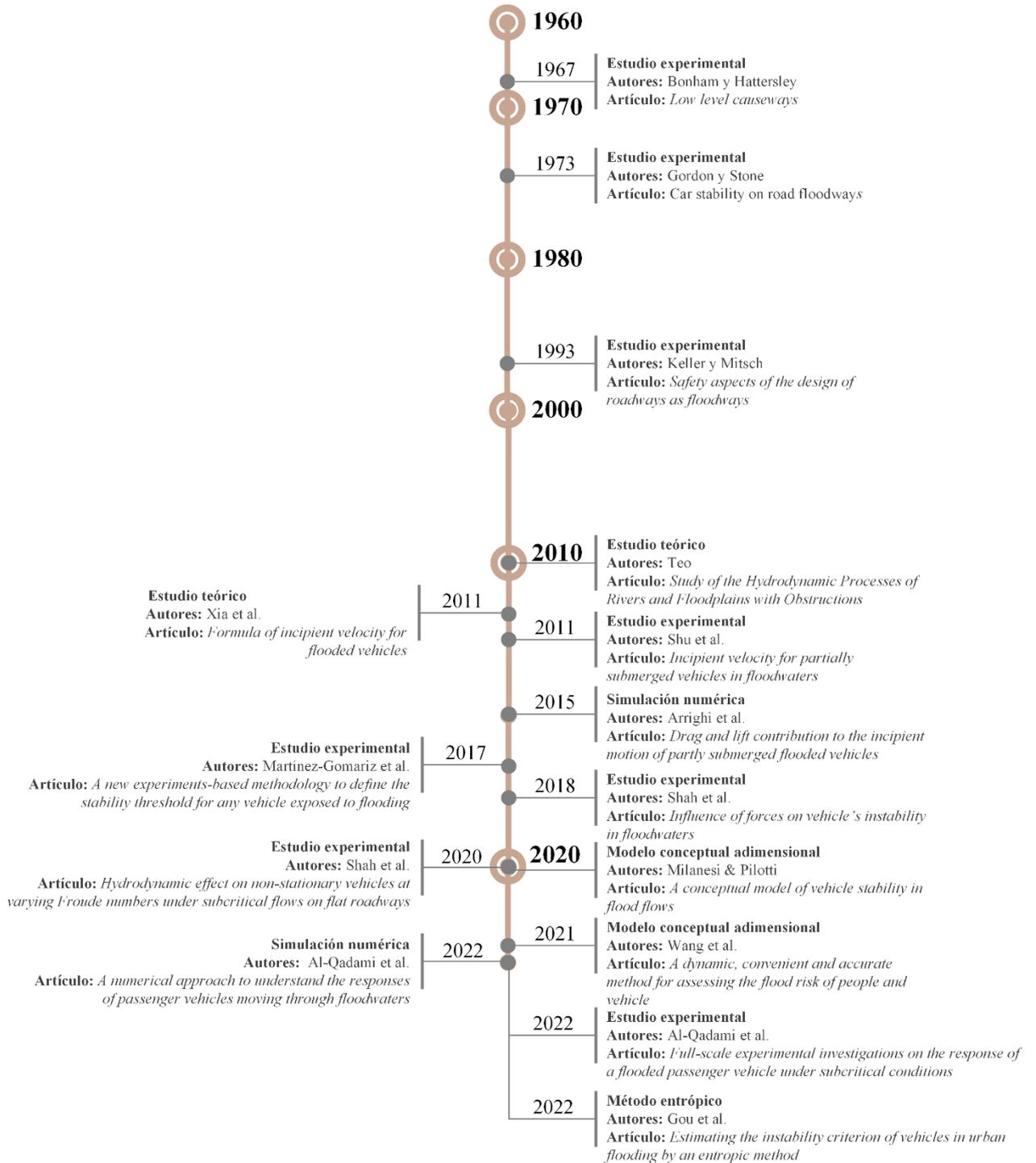
Entre 1967 y 2022 se han publicado numerosos estudios que investigan la pérdida de estabilidad de los vehículos en eventos de inundación. Dichos estudios se han llevado a cabo de diversas formas, siendo algunos de carácter experimental, teórico, o con ejecución de simulaciones numéricas entre otros (Al-Qadami et al., 2022). En los citados estudios se emplearon diferentes modelos de vehículos a distintas escalas y orientaciones bajo el flujo de agua.

La mayoría de estas investigaciones se centra únicamente en el umbral de estabilidad de los vehículos estacionados, siendo escasos los estudios realizados en base a vehículos en movimiento en una inundación (Shah et al., 2019).

La siguiente figura 14 presenta una recopilación de los estudios relevantes llevados a cabo hasta la fecha en relación al estudio de la pérdida de estabilidad de los vehículos en caso de inundación.

Figura 14

Línea del tiempo de los estudios sobre la pérdida de estabilidad de los vehículos en caso de inundación



3.2.1. Estudios experimentales

Los estudios experimentales hacen referencia a los ensayos de inestabilidad hidrodinámica de diversos modelos de vehículos en un canal de control. Estos ensayos tienen como fin estudiar qué profundidad de agua y qué velocidad de flujo conducen a la inestabilidad del vehículo en términos de movimiento de deslizamiento o movimiento de flotación (Gou et al., 2022; Shah et al., 2021). Basándose en estos datos experimentales, se proponen relaciones empíricas entre las variables hidráulicas y el umbral de inestabilidad del vehículo. Estos estudios experimentales se clasifican en dos grandes grupos: los que se centran en el estudio de las fuerzas hidrodinámicas que afectan a la estabilidad del vehículo y aquellos que tienen en cuenta tanto las condiciones de movimiento como de orientación del vehículo en una inundación.

3.2.1.1. Fuerzas hidrodinámicas actuantes en la estabilidad del vehículo

Estudios experimentales tales como los desarrollados por Bonham y Hattersley (1967), Shu et al. (2011), Martínez-Gomariz et al. (2017) o Shah et al. (2020) se centraron en la evaluación de las fuerzas hidrodinámicas en vehículos inundados, determinando así los valores a partir de los cuales se produce la pérdida de estabilidad de los vehículos.

Bonham y Hattersley (1967) llevaron a cabo el estudio experimental denominado *Low level causeways* para evaluar las fuerzas hidrodinámicas en el modelo Ford Falcon a escala (1:25). Estos ensayos se ejecutaron en 46 combinaciones distintas de profundidad de agua (0,11m – 0,57m) y velocidad de flujo (0,48 m/s – 3,09 m/s). En los ensayos se emplearon finos hilos para sujetar el prototipo en las direcciones tanto horizontal como vertical con el fin de evaluar las fuerzas horizontales (F_H) y verticales (F_V) (Al-Qadami et al., 2022). De esta forma, los autores constataron que la inestabilidad flotante de los vehículos se produce con una profundidad de agua superior a 0,57 m, y estimaron que el coeficiente de fricción (μ) entre los neumáticos del vehículo y el suelo mojado era de 0,3 y 0,5 mediante la medición de las fuerzas verticales y horizontales (Gou et al., 2022).

Shu et al. (2011) realizaron una serie de ensayos experimentales en el estudio titulado *Incipient velocity for partially submerged vehicles in floodwaters* para conocer tanto las condiciones de profundidad del agua como la velocidad correspondiente al umbral de inestabilidad del vehículo parcialmente sumergido. A partir de dichos ensayos, los autores desarrollaron una fórmula de

velocidad incipiente, en la que se introdujo la profundidad de flotación, y su precisión fue validada por los datos obtenidos en los ensayos de laboratorio relativos a la inestabilidad de tres tipos de modelos de vehículos a escala (1: 18): Ford Focus, Ford Transit y Volvo XC90 (Gou et al., 2022).

En la investigación experimental *A new experiments-based methodology to define the stability threshold for any vehicle exposed to flooding*, Martínez-Gomariz et al. (2017) desarrollaron una nueva metodología para obtener el umbral de estabilidad de cualquier vehículo real expuesto a inundaciones. Los experimentos se llevaron a cabo con tres escalas de modelo diferentes (1:14, 1:18 y 1:24) e incluyeron el análisis de los efectos de la fricción y la flotabilidad (Martínez-Gomariz et al., 2017). A partir del estudio se propuso un nuevo coeficiente de estabilidad del vehículo (SC_{mod}) con el que se pueden clasificar los vehículos por su estabilidad frente a las corrientes de agua y se pueden determinar sus funciones de estabilidad. Además de ello, se descubrió que el umbral de inestabilidad (velocidad del flujo multiplicada por la profundidad del agua) tiene una buena relación de ajuste lineal con este coeficiente (Gou et al., 2022).

Por último, en la investigación denominada *Hydrodynamic effect on non-stationary vehicles at varying Froude numbers under subcritical flows on flat roadways* los autores Shah et al. (2020) emplearon el modelo de vehículo Perodua Viva (a escala 1:10) para investigar las fuerzas hidrodinámicas que intervienen en la inestabilidad de un vehículo en movimiento en una inundación. Los datos experimentales se probaron mediante ecuaciones teóricas basadas en los modos de fallo de la inestabilidad. La fórmula de la velocidad incipiente propuesta aquí ha sido validada a través de los datos experimentales. Entre las principales conclusiones, se observó que la fuerza de flotación rige el peso del vehículo a profundidades mayores e iguales a 0,0457 m para el modelo a escala (Shah et al., 2020). A su vez, se descubrió que la velocidad crítica del vehículo, correspondiente a su inestabilidad, está estrechamente relacionada con la velocidad de la corriente de inundación y la profundidad del agua (Gou et al., 2022).

3.2.1.2. Condiciones de movimiento y orientación del vehículo

Son varios los estudios experimentales (Gordon y Stone, 1973; Shah et al., 2018 y Al-Qadami et al., 2022) en los que se tienen en cuenta las diversas condiciones de movimiento del propio vehículo y las distintas orientaciones con respecto al flujo en las que se puede encontrar el coche

durante una inundación. A continuación se presentan cada uno de estos estudios con mayor detenimiento.

En el estudio *Car stability on road floodways* realizado por Gordon y Stone (1973) se analizó la inestabilidad de un vehículo modelo Morris Mini sedán a pequeña escala (1: 16). Se siguieron los ensayos experimentales de Bonham y Hattersley (1967) y se consideraron tres condiciones de movimiento del vehículo. Por ejemplo, la condición de ruedas bloqueadas: ruedas delanteras bloqueadas, ruedas traseras bloqueadas y todas las ruedas bloqueadas. Los autores estimaron que el coeficiente de fricción era de 0,3 y 1,0 para la condición de ruedas delanteras bloqueadas y la condición de ruedas traseras bloqueadas respectivamente (Gou et al., 2022). Se comprobó también que los límites de estabilidad eran mayores en la condición de neumáticos delanteros bloqueados debido a la existencia del motor en la parte delantera del coche (Al-Qadami et al., 2022).

Por otra parte, en la investigación *Influence of forces on vehicle's instability in floodwaters* los autores Shah et al. (2018) estudiaron la inestabilidad hidrodinámica del modelo de vehículo Volkswagen Scirocco R a escala 1: 24 en un canal de laboratorio controlado. En este estudio, se prestó especial atención al efecto de la orientación del vehículo en relación con la corriente de inundación entrante en la inestabilidad del vehículo (Gou et al., 2022).

Por último, en el trabajo *Full-scale experimental investigations on the response of a flooded passenger vehicle under subcritical conditions* de Al-Qadami et al. (2022) se investigaron las fuerzas hidrodinámicas en un vehículo de pasajeros a escala real que estaba parcialmente sumergido y expuesto a flujos subcríticos. Este es uno de los primeros trabajos en los que se realizan ensayos mediante un vehículo a escala real en dos orientaciones (90° y 0°) y en dos situaciones (estática y en movimiento). Los resultados experimentales revelaron que el vehículo orientado a 90° con respecto al flujo de agua es una orientación crítica en ambas situaciones (tanto en reposo como en marcha). En este caso, en condiciones hidrostáticas, el vehículo experimentó la inestabilidad de flotación a 0,40 m de profundidad cuando se le impuso una fuerza de flotación de aproximadamente 11 kN (Gou et al., 2022).

3.2.2. Estudios teóricos

Los estudios teóricos tienen como fin proponer una expresión matemática para las condiciones de flujo en relación con el umbral de inestabilidad del vehículo. En esta investigación se tienen en cuenta todas las fuerzas ejercidas por el flujo sobre el vehículo y sus relaciones de equilibrio. A medida que la fuerza de arrastre sobre el vehículo supera a la fuerza de fricción, el vehículo experimenta un movimiento de deslizamiento. Mientras que, a medida que la fuerza de flotación supera a la fuerza reactiva vertical, se produce la inestabilidad de flotación del vehículo a una determinada profundidad (Gou et al., 2022). Estos estudios teóricos se clasifican en dos grandes grupos: aquellos que se centran en el estudio de la velocidad incipiente del vehículo en caso de inundación y aquellos otros que tratan los procesos hidrodinámicos que se dan en condiciones de flujo de agua.

3.2.2.1. Velocidad incipiente del vehículo

Los autores Keller y Mitsch (1993) y Xia et al. (2011) llevaron a cabo una serie de estudios con enfoque teórico para determinar la velocidad incipiente de los vehículos en caso de inundación.

Keller y Mitsch (1993) condujeron el estudio teórico titulado *Safety aspects of the design of roadways as floodways* a partir de cuatro modelos distintos de vehículos. En este proporcionaron un enfoque teórico para determinar la velocidad incipiente del vehículo inundado, considerando todas las fuerzas ejercidas por el flujo de agua sobre el vehículo y analizando la condición mecánica de inestabilidad por deslizamiento del vehículo (Gou et al., 2022). En este caso, se dedujo que la inestabilidad del vehículo en una inundación se produce cuando las fuerzas de flotación y elevación superan el peso del vehículo en condiciones de sequedad. Asimismo, el modo de fallo por deslizamiento se produce cuando la fuerza de arrastre supera la fuerza de fricción entre los neumáticos y la superficie de la carretera. También se propuso que el coeficiente de arrastre fuera 1 cuando la profundidad del flujo es menor que la distancia al suelo del vehículo, mientras que es 1,15 cuando la profundidad del flujo es mayor que la distancia al suelo del vehículo (Al-Qadami et al., 2022).

Por otra parte, en el estudio *Formula of incipient velocity for flooded vehicles* realizado por Xia et al. (2011), se elaboró una fórmula de velocidad incipiente de vehículos inundados mediante el concepto de movimiento incipiente de las partículas de sedimento que yacen en el fondo del río,

dado que es en este tipo de dinámica donde se introduce por primera vez la fuerza de sustentación (Gou et al., 2022). En esta investigación se llevaron a cabo una serie de experimentos mediante tres tipos de modelos de vehículos a dos escalas distintas. Se constató que, para un vehículo determinado, el valor de la velocidad incipiente alcanza su mínimo cuando la profundidad del flujo se aproxima a la altura del vehículo. De los diferentes modelos de vehículo, el más pequeño y ligero, en este caso, el Mini Cooper, es el que más fácilmente comienza a deslizarse a través de la corriente de agua (Xia et al., 2011).

3.2.2.2. Procesos hidrodinámicos en condiciones de flujo de agua

El objetivo del estudio teórico *Study of the Hydrodynamic Processes of Rivers and Floodplains with Obstructions* desarrollado por Teo (2010) consistió en mejorar la comprensión y la representación de los procesos hidrodinámicos de una variedad de condiciones de flujo de ríos y llanuras de inundación (es decir, descargas fluviales, corrientes de marea y tsunamis) y la interacción hidráulica asociada con distintos tipos de obstrucción seleccionados, como manglares y vehículos (Teo, 2010). Para ello se estudió la inestabilidad en tres tipos de modelos de vehículos a pequeña escala (1:43): Mini Cooper, BMW M5 y Mitsubishi Pajero en condiciones tanto de inmersión parcial como total (Gou et al., 2022).

3.2.3. Simulaciones numéricas

Las simulaciones numéricas aplicadas a la mecánica de fluidos son denominadas en la literatura CFD (*Computational Fluid Dynamics*). En la actualidad se llevan a cabo simulaciones tanto unidimensionales (1D), como bidimensionales (2D) e incluso tridimensionales (3D). En este apartado se presentan las simulaciones llevadas a cabo para el análisis de la estabilidad de los vehículos clasificadas en dos categorías, las que se centran en el estudio de la orientación del vehículo en el flujo de agua y aquellas otras que analizan las fuerzas hidrodinámicas que son ejercidas por el propio flujo de agua.

3.2.3.1. Orientación del vehículo en el flujo de agua

En el estudio titulado *Drag and lift contribution to the incipient motion of partly submerged flooded vehicles* los autores Arrighi et al. (2015) realizaron simulaciones numéricas para estudiar el flujo que transporta a un modelo de vehículo de pasajeros durante una inundación. Esta simulación numérica tiene como fin aclarar el papel que desempeña la orientación del flujo en las

fuerzas hidrodinámicas. Se probaron cuatro orientaciones del vehículo, incluyendo $\beta = 0^\circ, 180^\circ$ y $\beta = 65^\circ, 90^\circ$. Basándose en las combinaciones de fuerzas hidrodinámicas obtenidas, se confirmó que las orientaciones de flujo laterales son más críticas para el movimiento del vehículo en una inundación en comparación con las orientaciones frontal y trasera (Al-Qadami et al., 2022).

3.2.3.2. Fuerzas hidrodinámicas ejercidas por el flujo de agua

En el estudio denominado *A numerical approach to understand the responses of passenger vehicles moving through floodwaters* llevado a cabo por los autores Al-Qadami et al. (2022), se desarrolló un marco numérico para investigar las respuestas de un turismo de tamaño medio a escala real que se desplaza a través del flujo de una inundación. Todas las ejecuciones numéricas se realizaron bajo seis grados de libertad y condiciones de movimiento acopladas para observar directamente la inestabilidad del vehículo y controlar las coordenadas del centro de masa del vehículo durante su movimiento. Se obtuvieron y calcularon las fuerzas hidrodinámicas ejercidas por el flujo sobre la carrocería del vehículo en ambas direcciones, horizontal y vertical. Finalmente, se observó que la profundidad crítica del flujo era de 0,38 m, mientras que la función de umbral de profundidad por velocidad mínima era de $0,39 \text{ m}^2/\text{s}$, para el vehículo probado (Al-Qadami et al., 2022).

3.2.4. Otros métodos

En los últimos años se han desarrollado y aplicado nuevos métodos para estudiar la inestabilidad de los vehículos en caso de inundación. Aparte de los tipos de investigaciones mencionadas previamente, se han aplicado también modelos conceptuales adimensionales (Milanesi y Pilotti, 2020), el método entrópico (Gou et al., 2022) y la cartografía dinámica de riesgo por inundación (Wang et al., 2021).

3.2.4.1. Modelo conceptual adimensional

En el trabajo *A conceptual model of vehicle stability in flood flows* desarrollado por Milanesi y Pilotti (2020) se proporciona un modelo conceptual adimensional de la estabilidad de un vehículo impactado por el flujo, que tiene en cuenta el papel de la pendiente y requiere una cantidad limitada de parámetros geométricos e hidrodinámicos. En este, se ha calibrado un conjunto de parámetros a partir de datos experimentales, con el fin de reproducir los límites medios de estabilidad de una amplia gama de vehículos ensayados en condiciones de laboratorio. Los valores obtenidos se

utilizaron para calcular el umbral de estabilidad dimensional de cada vehículo ensayado (Milanesi y Pilotti, 2020). Estos parámetros también pueden utilizarse para representar las condiciones medias de estabilidad de una amplia variedad de vehículos en circulación.

3.2.4.2. Método entrópico

En el estudio titulado *Estimating the instability criterion of vehicles in urban flooding by an entropic method* llevado a cabo por Gou et al. (2022), se deriva una expresión explícita para la velocidad incipiente de un vehículo inundado en relación con la profundidad del agua, basada en los conceptos de entropía de Shannon y Tsallis. Dicha expresión puede imitar la tendencia a la disminución de la velocidad incipiente con la profundidad del agua desde aguas poco profundas hasta aguas profundas. Tomando dos tipos de vehículos (el turismo Audi Q7 y la ambulancia Ford V348), este estudio ilustra la zonificación del grado de vulnerabilidad de los vehículos inundados, que sirven para la evaluación del peligro de inundación y la gestión de emergencias por inundación (Gou et al., 2022). Este estudio indica el potencial del método basado en la entropía como un buen complemento a los modelos empíricos y semiempíricos existentes para caracterizar el umbral de inestabilidad de los vehículos estacionados en una carretera o calle en caso de inundación urbana.

3.2.4.3. Cartografía dinámica de riesgo por inundación

El estudio *A dynamic, convenient and accurate method for assessing the flood risk of people and vehicle*, elaborado por Wang et al. (2021) se centra en el desarrollo de un método para elaborar mapas de riesgo de inundación dinámico y de utilidad, tanto para las personas como para los vehículos, simulándose la escorrentía superficial mediante un modelo de flujo de agua superficial acelerado (modelo GAST). A partir de esta investigación, se obtienen los siguientes resultados: este método puede evaluar el riesgo de inundación de personas y vehículos de forma dinámica, conveniente y precisa; el riesgo de inundación de personas es menor que el de vehículos, para el mismo peligro de inundación, tiempo y lugar; y, por último, el efecto adverso de la profundidad del agua en el riesgo de inundación de vehículos es mayor que en el de las personas (Wang et al., 2021).

3.3. Criterios de estabilidad del vehículo

Los modos de inestabilidad por deslizamiento y flotación son los modos de fallo comunes que pueden experimentar los vehículos inundados (Martínez-Gomariz et al., 2018). A continuación, se

van a exponer los criterios experimental actuantes en los distintos modos de inestabilidad del vehículo y las directrices de seguridad propuestas para la seguridad de estos.

3.3.1. Criterios experimentales y analíticos

Los criterios experimentales y analíticos que afectan a la estabilidad del vehículo son por una parte las fuerzas hidrodinámicas actuantes sobre este y por otra, las directrices de seguridad establecidas a partir de los estudios realizados.

3.3.1.1. Fuerzas hidrodinámicas actuantes sobre el vehículo

Generalmente, un vehículo en una inundación está sometido a varias fuerzas hidrodinámicas (debidas al flujo), y a las fuerzas de reacción (debidas al peso del vehículo y a su contacto con el suelo). Sin embargo, cada situación del vehículo da lugar a diferentes combinaciones de fuerzas hidrodinámicas (Al-Qadami et al., 2022). La estabilidad de un vehículo se ve comprometida cuando las variables hidráulicas superan un determinado límite (Shah et al., 2021). Es necesario comprender las fuerzas relevantes que intervienen en este fenómeno para determinar los umbrales de inestabilidad de los vehículos en una inundación (Shah et al., 2020).

Fuerzas hidrodinámicas actuantes sobre vehículo estático y en movimiento

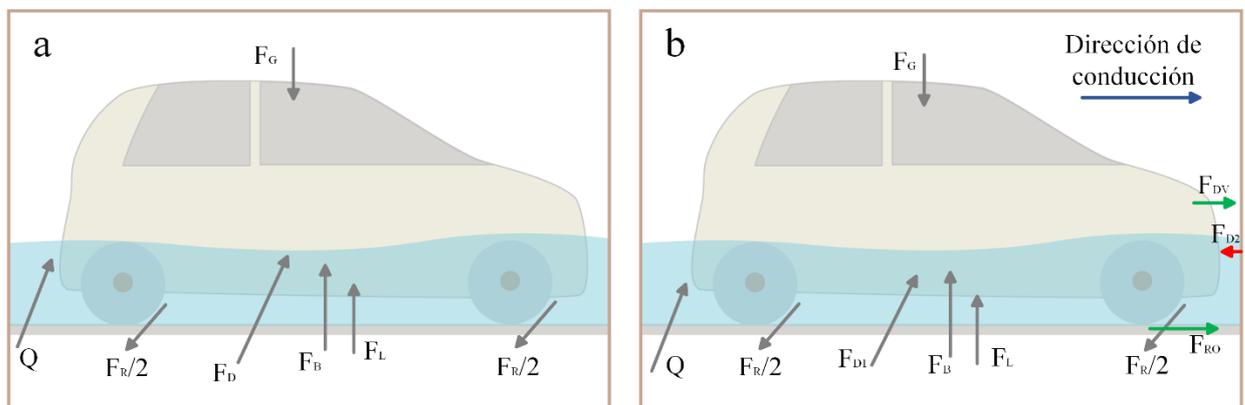
Para un vehículo estático inundado, las fuerzas de flujo que actúan son la flotabilidad (F_b), la sustentación (F_l) y la resistencia (F_d); y las fuerzas de reacción son las fuerzas de fricción (F_r) y el peso efectivo del vehículo (F_g). El modo de inestabilidad por deslizamiento se produce cuando la fuerza de arrastre es igual o mayor que la fuerza de fricción. Por otro lado, el modo de inestabilidad flotante puede ocurrir en dos escenarios: inestabilidad flotante en condiciones hidrostáticas, lo que significa que el nivel del agua puede aumentar pero no hay velocidad del agua; e inestabilidad flotante en condiciones hidrodinámicas. La fuerza de sustentación contribuye a empujar el coche hacia arriba reduciendo su peso efectivo (Al-Qadami et al., 2022).

Para un vehículo inundado en movimiento, las fuerzas debidas al flujo son la fuerza de arrastre motriz (F_{d2}), la fuerza de arrastre del flujo (F_{d1}) y la fuerza de flotación (F_b), mientras que las fuerzas de reacción son la fuerza de fricción (F_r), la resistencia a la rodadura (F_{ro}), la fuerza motriz (F_{dv}) y la fuerza normal (F_n). El modo de inestabilidad flotante se produce bajo la misma condición del vehículo estático, es decir, la fuerza de empuje vertical (F_b y F_l) es igual o mayor

que el peso del vehículo. En Shah et. al (2018), el modo de inestabilidad de deslizamiento se produce una vez que las fuerzas de arrastre de conducción y de flujo son iguales o mayores que la suma de las fuerzas de conducción, de rodadura y de fricción (Al-Qadami et al., 2022). La siguiente figura 15 indica las fuerzas hidrodinámicas que actúan sobre un vehículo inundado colocado perpendicularmente al flujo entrante tanto de forma estática como en movimiento.

Figura 15

Fuerzas hidrodinámicas sobre un vehículo inundado colocado perpendicularmente al flujo entrante (90°); a) vehículo estático y b) vehículo en movimiento



Nota. Adaptado de “Full-scale experimental investigations on the response of a flooded passenger vehicle under subcritical conditions” de E. H. H. Al-Qadami et al., 2022, Nat. Hazards, 110 (1), 325-348, (doi:10.1007/s11069-021-04949-6).

Fuerza (F_d) y coeficiente de arrastre (C_d)

Cuando un vehículo concreto se expone a un flujo de agua, la fuerza de arrastre suele provocar una inestabilidad por deslizamiento, que se rige principalmente por la velocidad del flujo y el área sumergida del vehículo frente a la dirección del flujo (Al-Qadami et al., 2022). La fuerza de arrastre puede definirse como la resistencia al movimiento a través de un fluido (Poirot, 2012). Esta fuerza depende del área de cambio de momento, de la velocidad del fluido y de su densidad (Shah et al., 2021).

La fuerza de arrastre se genera por la interacción entre el flujo de agua y la forma del vehículo, y viene dada por la siguiente expresión Teo et. al (2012a):

$$F_D = \frac{1}{2} \rho C_D A v^2 \quad (1)$$

Donde C_D es el coeficiente de arrastre, que está relacionado con el patrón de flujo y las dimensiones del vehículo; A es el área sumergida proyectada normal al flujo; y v es la velocidad del flujo.

El coeficiente de arrastre es un parámetro que tiene un efecto significativo sobre la fuerza de arrastre y el límite de estabilidad del vehículo (Al-Qadami et al., 2022).

Fuerza de flotación (F_b)

La fuerza de flotación es la fuerza de presión ejercida por el flujo en dirección ascendente, y provoca el modo de inestabilidad flotante una vez que su valor alcanza el peso del vehículo (Al-Qadami et al., 2022). Según Keller y Mitsch (1993) la fuerza de flotación puede ser expresada de la siguiente manera (Teo et. al, 2012b):

$$F_B = \rho g V \quad (2)$$

Donde ρ es la densidad del agua, g es la aceleración debida a la gravedad; y V es el volumen sumergido.

Fuerza de fricción, F_r

La resistencia a la fricción es básicamente el movimiento relativo de dos objetos sólidos, que es proporcional a la rugosidad de la superficie y a la fuerza normal que presiona las superficies entre (Shah et al., 2021). La resistencia a la fricción entre los neumáticos y la superficie del suelo es la principal fuerza que mantiene estable el vehículo inundado y resiste las fuerzas de arrastre. La fuerza de fricción depende de varios parámetros, como el estado de los neumáticos (viejos/nuevos), la rugosidad de la superficie, el peso del vehículo, el modo de frenado y la pendiente del terreno (Al-Qadami et al., 2022). La fórmula general de la fuerza de fricción, F_R puede expresarse como:

$$F_R = \mu F_G \quad (3)$$

Donde, μ es el coeficiente de fricción y F_G es el peso neto del vehículo. No existe ninguna fuerza de fricción una vez que el vehículo se separa de la superficie (Teo et al., 2012).

Fuerza motriz, FDV

El motor del coche proporciona una fuerza motriz cuando empieza a moverse; esta fuerza motriz es mayor que la fuerza opuesta en las ruedas. Por tanto, el vehículo acelera en la dirección de la

fuerza resultante (Shah et al., 2021). La fuerza motriz (F_{DV}) generada por el motor del vehículo puede expresarse de la siguiente forma:

$$F_{DV} = ma \quad (4)$$

Donde, m es la masa del vehículo y a es la aceleración media.

Resistencia de rodadura (F_{ro})

La resistencia de rodadura se define como la energía que consume un neumático al rodar con una carga determinada. La resistencia está influenciada por la fricción entre la banda de rodadura del neumático y la superficie de la carretera, y la cantidad de energía consumida por la flexión de los flancos del neumático cuando éste rueda sobre la carretera (Ejsmont et al., 2017). La resistencia de rodadura se expresa de la siguiente forma:

$$R \sin \emptyset = F_{RO} \quad (5)$$

Donde, R es la fuerza de reacción causada por la fuerza de rozamiento, \emptyset es el ángulo y F_{RO} es la fuerza necesaria para mantener el neumático rodando.

3.3.1.2. Características físicas y espaciales del vehículo sumergido

La pérdida de estabilidad de un vehículo en una inundación no sólo depende de factores como la profundidad del agua y la velocidad del flujo, sino también de las propiedades físicas y geométricas del objeto sumergido (Shah et al., 2021).

La inestabilidad del vehículo está influenciada por varios parámetros que implican la posición del vehículo (paralela, perpendicular o lateral a la corriente), el grado de inmersión (parcial o totalmente sumergido), el peso neto, la forma aerodinámica del vehículo (Arrighi et al., 2016), la distancia al suelo y el grado de estanqueidad (Mustaffa et al., 2020).

La orientación del vehículo es una de las condiciones críticas que sirven como desencadenante inicial de la inestabilidad del vehículo. La posición del vehículo es un parámetro influyente ya que la fuerza de arrastre está relacionada con el área proyectada normal al flujo (Teo et al., 2012). Del mismo modo, un vehículo se comporta de manera diferente en función del nivel de inmersión, por ejemplo, si el vehículo está parcialmente sumergido, entonces la velocidad umbral aumenta para una disminución de la profundidad del flujo, pero si el vehículo está totalmente sumergido, entonces el fenómeno es completamente inverso (Shah et al., 2021).

Asimismo, el peso del vehículo es otro parámetro importante cuando se trata de la estabilidad del vehículo durante una inundación. La distribución del peso de los vehículos modernos no es análoga, ya que la mayor parte del peso del vehículo se concentra en la parte inferior frontal (Arrighi et al., 2015). Un vehículo con mayor peso aumenta su nivel de estabilidad, ya que se necesita un mayor volumen de agua para que el vehículo se vuelva flotante. Del mismo modo, los vehículos con mayor distancia al suelo tienen más estabilidad, ya que se necesita una altura mayor de agua para alcanzar el chasis del vehículo (Martínez-Gomariz et al., 2017).

Una de las razones por las que los coches modernos son arrastrados con tanta facilidad incluso por las aguas menos profundas es el grado de estanqueidad (es decir, la capacidad de sellado). El grado de estanqueidad de los vehículos actuales es realmente alto, disminuyendo así la exposición a contaminantes externos, tales como el monóxido de carbono, el ruido, la lluvia y el viento. En condiciones de inundación, un mayor nivel de estanqueidad evita que el agua se filtre en el interior del coche y, por tanto, proporciona un mayor volumen sumergido para que la fuerza de flotación surta efecto. Por lo tanto, incluso a menor profundidad, un vehículo de pasajeros más ligero podría comprometer inmediatamente la estabilidad y salir a flote una vez que la base del vehículo entre en contacto con el agua (Smith et al., 2017).

3.3.2. Directrices de seguridad para vehículos

Las características de la inestabilidad de los vehículos en las inundaciones deben ser comprendidas para elaborar las directrices de seguridad (Shah et al., 2021). Actualmente, las directrices de seguridad existentes requieren importantes modificaciones basadas en las características de los coches modernos, así como en el impacto de las fuerzas hidrodinámicas en los vehículos que intentan conducir a través de vías inundadas (Shah et al., 2021). A continuación, se exponen las principales directrices elaboradas hasta la fecha.

3.3.2.1. Directrices de seguridad previas (1986 – 2011)

En este apartado se exponen las directrices desarrolladas en el periodo de 1986 a 2011.

▪ **Directrices de seguridad basadas en estudios empíricos y analíticos**

Las directrices de seguridad para la estabilidad de los vehículos en inundación se basan en las funciones de profundidad de flotación y de velocidad límite constante \times profundidad ($v \cdot y$), obtenidas durante las investigaciones empíricas llevadas a cabo a finales de la década de 1960 y principios de la de 1970; y el análisis teórico realizado a principios de la década de 1990. Estas recomendaciones, que se centran principalmente en los vehículos estáticos, se siguen cumpliendo sobre todo porque no se han realizado investigaciones significativas entre el trabajo de Keller y Mitsch (1993) y el de Teo (2010).

La siguiente tabla 4 elaborada por Shah et al. (2021) presenta un resumen de los resultados obtenidos en las principales investigaciones realizadas entre 1967 y 1993.

Tabla 4

Resumen de las investigaciones empíricas y teóricas

Referencia	Bonham y Hattersley (1967)	Gordon y Stone (1973)	Keller y Mitsch (1993)
Tipo de estudio	Experimental	Experimental	Teórico
Vehículos sometidos a ensayo	Ford Falcon Resultados a escala de otros modelos	Morris Mini Sedan	Toyota Corolla, Suzuki Swift, Ford Laser, Honda Civic, Ford LTD
Edad del vehículo	De mediados a finales de la década de 1960	Principios de la década de 1970	Principios de la década de 1970
Distancia al suelo (m) - Prototipo	0,18	0,15	0,155; 0,17; 0,15; 0,10; 0,16
Escala	1: 25	1: 16	-
Orientación	Perpendicular al flujo	Paralela al flujo	Perpendicular al flujo
Inmersión	Parcial	Parcial	Parcial
Tipo de superficie	-	-	-
Pendiente del terreno	Plana	Plana	-
Intervalo profundidades (m) ensayadas - Prototipo	0,11 a 0,57	0,12 a 0,57	0,025 a 0,375
Rango de velocidades ensayadas (m/s) - Prototipo	0,48 a 3,09	0,5 a 3,69	0,6 a > 3,5
Profundidad de flotabilidad (m) - Prototipo	0,57	0,42 (parte posterior) y 0,5 (parte delantera)	Entre 0,34 y 0,4 para diferentes modelos

Ecuación de estabilidad resultante	$\mu = F_H/F_v$	$\mu = F_H/F_v$	$v = 2 \cdot \left(\frac{\mu F_G}{\rho C_D A_D}\right)^{\frac{1}{2}}$
Coefficiente de fricción asumido	Varios, recomendado 0,3	Varios, entre 0,3 – 1,0	0,3

Nota. Adaptado de “A Review of Safety Guidelines for Vehicles in Floodwaters” de S. M. H. Shah et al., 2021, Intl. J. River Basin Management, 19(1), 25-41, (doi:10.1080/15715124.2019.1687487).

▪ **Department of Public Works, New South Wales (DPW, 1986)**

Este manual sigue únicamente los límites de estabilidad desarrollados a partir del trabajo de Gordon y Stone (1973). Las relaciones presentadas en este manual establecen los límites tanto en la profundidad como en la velocidad. En el caso de los vehículos, los límites de estabilidad permitidos se aseguran con una profundidad máxima de agua y de velocidad del flujo de 0,3 m y 2,0 m/s, respectivamente (Shah et al., 2021).

▪ **Australian Rainfall and Runoff Guidelines (AR&R, 1987)**

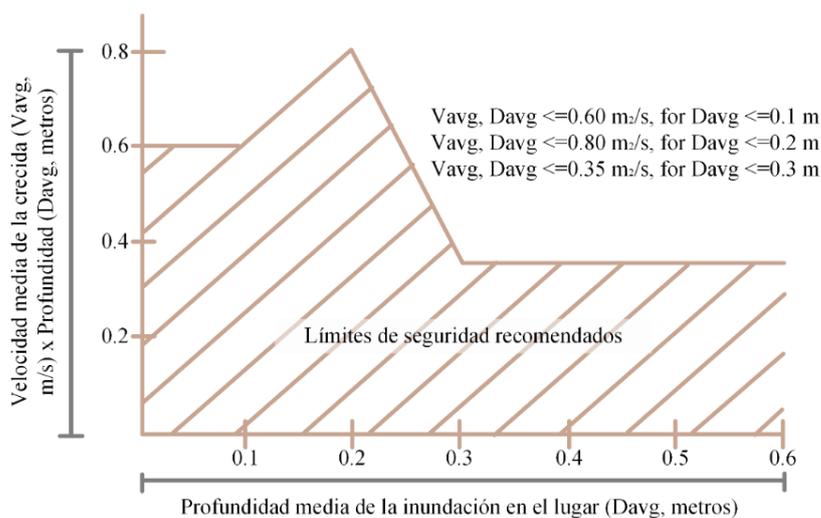
El criterio relativo a la estabilidad de los vehículos que se destaca en esta directriz indica una relación velocidad-profundidad ($v \cdot y$) constante. En el caso de los vehículos, se propuso un producto ($v \cdot y$) de 0,6 o 0,7 m²/s⁻¹ en función del tipo, es decir, turismo pequeño, vehículo utilitario deportivo (SUV), etc. (Shah et al., 2021).

▪ **Melbourne Water Land Development Manual: Flood Safety Criteria (MWLDM, 1996)**

Los límites de seguridad para los vehículos mencionados en este manual se basan en los valores constantes ($v \cdot y$) que varían en función de la profundidad de la inundación a lo largo del lugar. Las recomendaciones aquí propuestas se han adaptado a partir de los resultados de las investigaciones realizadas por Keller y Mitsch (1993). La siguiente figura 16 muestra los límites admisibles para la estabilidad de los vehículos indicados en el manual:

Figura 16

Límites de seguridad recomendados para la estabilidad del vehículo



Nota. Adaptado de “A Review of Safety Guidelines for Vehicles in Floodwaters” de S. M. H. Shah et al., 2021, Intl. J. River Basin Management, 19(1), 25-41, (doi:10.1080/15715124.2019.1687487).

▪ **Emergency Management Australia (EMA, 1997)**

La *Emergency Management Australia* es la agencia estatal que gestiona las condiciones de las catástrofes en Australia. La EMA, es una guía sobre el funcionamiento de los vehículos con tracción a cuatro ruedas (4WD, *Four Wheel Drive*). En este manual se recomienda colocar una lona o un toldo en la parrilla para evitar que el agua entre en el compartimento del motor. Además, se aconseja colocar una extensión de snorkel en la entrada de aire del motor y rociar el sistema de encendido con un líquido deshidratante (Shah et al., 2021).

▪ **Emergency Management Australia (EMA, 1999)**

Esta versión posterior es una actualización del manual de la EMA de 1997, donde se recoge los principios de buenas prácticas para la gestión de las llanuras de inundación en Australia. Se ha subrayado que estos principios son directrices (normas no específicas) y no directivas. En cuanto a los riesgos de inundación relacionados con los vehículos, el manual destaca que "los vehículos de motor pequeños, ligeros y bajos que cruzan las calzadas de flujo rápido pueden volverse inestables cuando las profundidades del agua superan los 0,3 m, mientras que la evacuación por parte de sedanes más grandes y altos generalmente sólo es posible y segura cuando las profundidades del agua son inferiores a 0,4 m". El manual indica además que cuando la

profundidad del caudal supera los $1,2\text{ m}$ y la velocidad en aguas poco profundas supera los $0,8\text{ m/s}$, el vadeo a través del flujo de agua resulta difícil (Shah et al., 2021).

▪ **Moore and Power (2002)**

Los límites de estabilidad propuestos por Moore y Power (2002) sugieren que la fuerza de flotación domina la estabilidad a altas profundidades y bajas velocidades de flujo. Según estos la forma funcional de los límites de estabilidad cambia en la transición entre las condiciones de flujo subcríticas y supercríticas. Basándose en esta justificación, se aconseja una tasa constante de profundidad-velocidad ($D \cdot V$) para el régimen supercrítico (domina el arrastre; $V > 1,81$), mientras que se propone una relación lineal para el régimen subcrítico (dominan las fuerzas boyantes; $V < 1,81$) (Russo et al., 2013)

▪ **Floodplain Development Manual (DIPNR, 2005)**

Este manual se basa en las categorías provisionales de peligro hidráulico, es decir, las zonas de riesgo alto y bajo. Las categorías de peligrosidad baja y alta propuestas en este manual son provisionales dado que no reflejan los efectos de otros factores que pueden influir en la peligrosidad. Por lo tanto, cuando se califiquen e identifiquen dichos factores, las categorías provisionales de peligro deberán modificarse obteniendo así categorías de riesgo más precisas (Shah et al., 2021).

▪ **Austroroads Guide to Road Design (2008)**

En esta guía se recomienda que "en función de la longitud de la vía de inundación y de la velocidad del flujo, las profundidades de las aguas de inundación $\leq 300\text{ mm}$ se consideran transitables para los turistas". Además, menciona que si la elevación total, que equivale a la profundidad del agua más la cantidad de energía cinética por unidad de peso del fluido, supera los 300 mm por encima de la superficie de una carretera, ésta debería cerrarse impidiendo así la circulación de los vehículos (Austroroads, 2018)

La siguiente tabla 5, hace un resumen de las directrices en cuanto a la limitación de las velocidades del flujo y las profundidades del agua propuestas para la estabilidad de los vehículos en las zonas inundadas.

Tabla 5

Recopilación de las recomendaciones proporcionadas por las directrices de seguridad (1986 - 2011)

Directriz/Recomendación	Profundidad máxima (y;m)	Velocidad máxima (v; m/s)	Máximo (v.y; m2/s)	Otro
<i>Department of Public Works (DPW, 1986)</i>	0,3	2,0	-	-
<i>Australian Rainfall and Runoff Guidelines (AR&R, 1987)</i>	-	-	0,6– 0,7 según el tamaño del vehículo	-
<i>Melbourne Water Land Development Manual: Floodway Safety Criteria (MWLDM, 1986)</i>	0,6	-	$\leq 0,6$ for $yav \leq 0,1$ m; $\leq 0,80$ for $yav = 0.2$ m; $\leq 0,35$ for $yav \geq 0,3$ m	-
<i>Emergency Management Australia (EMA, 1997)</i>	-	-	-	Hacer frente a las olas de proa para mantener el agua fuera del motor
<i>Emergency Management Australia (EMA, 1999)</i>	0,3 (coches pequeños, bajos); 0,4 (coches más grandes, altos)	-	-	-
<i>Moore and Power (2002)</i>	-	-	-	$v \cdot y \leq 0,6$ para $> 1,81$ m/s – 1; $y \leq (0,4 - 0,376 v)$ para $v \leq 1.81$ m/s – 1
<i>Floodplain Development Manual (DIPNR, 2005)</i>	0.3	2.0	-	-
<i>Austrroads Guide to Road Design (2008)</i>	-	-	-	$d + (V_2/2g) \leq 0,3$ m

Nota. Adaptado de “A Review of Safety Guidelines for Vehicles in Floodwaters” de S. M. H. Shah et al., 2021, Intl. J. River Basin Management, 19(1), 25-41, (doi:10.1080/15715124.2019.1687487).

▪ **Australian Rainfall and Runoff (AR&R, 2011)**

La directriz *Australian Rainfall and Runoff* (AR&R, 2011) recopila los criterios actualizados sobre la estabilidad de los vehículos en las inundaciones. No incluye la evaluación de estudios posteriores realizados en vehículos estáticos modernos, que se publicaron muy cerca o después de su lanzamiento.

En la siguiente tabla 6, se muestra el resumen de esta directriz en cuanto a las velocidades de flujo límite y las profundidades de agua propuestas para la estabilidad de los vehículos en las vías inundadas.

Tabla 6

Recomendaciones proporcionadas por la directriz Australian Rainfall and Runoff (2011)

Profundidad máxima (y;m)	Velocidad máxima (v; m/s)	Máximo (v.y; m2/s)	Otros
0,3 (turismo pequeño); 0,4 (turismo grande); 0,5 (gran 4WD)	3.0	≤ 0,3 (turismo pequeño); ≤ 0,45 (turismo grande); ≤ 0,6 (gran 4WD)	-

Nota. Adaptado de “A Review of Safety Guidelines for Vehicles in Floodwaters” de S. M. H. Shah et al., 2021, Intl. J. River Basin Management, 19(1), 25-41, (doi:10.1080/15715124.2019.1687487).

En general, para la mayoría de los vehículos estáticos, los umbrales de limitación superan los límites de seguridad propuestos en la directriz AR&R del 2011. Por lo tanto, esta directriz sigue siendo válida y segura para la variedad de coches probados en los últimos años, lo que garantiza que la seguridad de las personas no se vea comprometida una vez que abandonen sus coches inundados en caso de fallo del vehículo (Shah et al., 2021).

3.3.2.2. Directrices actuales (2011 – 2022)

Desde mediados de la década de 1980 hasta 2011 se ha aconsejado una serie de recomendaciones y directrices para la estabilidad de los vehículos. Desde entonces, los vehículos modernos han experimentado numerosas mejoras, sobre todo en lo que respecta al grado de estanqueidad, la naturaleza geométrica del vehículo, el peso y la distancia al suelo.

En consecuencia, es poco probable que los umbrales de limitación propuestos anteriormente para los coches antiguos puedan aplicarse directamente a los vehículos modernos. Por lo tanto, es necesario revisar el criterio relativo a la estabilidad de los vehículos en las inundaciones (Shah et al., 2021). El diseño de las carreteras y las dimensiones de los vehículos también han mejorado con el tiempo, por lo que se ha notificado una diversidad de formas de vehículos desde aquellos estudios. Es más, los diseños de vehículos modernos hacen que existan diferentes valores para los límites de estabilidad en caso de inmersión parcial o total con diferentes condiciones de frenado, orientaciones y pendientes del terreno (2010-2017) (Shah et al., 2021).

Tal y como se ha indicado anteriormente, entre 1993 y 2010 no se realizó ningún estudio significativo en el ámbito de los vehículos inundados. Por lo tanto, los límites relativos al equilibrio de los vehículos en las inundaciones se basan en las funciones limitantes destacadas en las investigaciones previas a ese periodo (1967 - 1993). A partir del año 2010 son varios los autores que desarrollan nuevos estudios de análisis de los criterios de estabilidad para los vehículos modernos (Hall, 2015).

CAPÍTULO 4. ESTUDIO DEL IMPACTO DE LAS INUNDACIONES SOBRE EL CONDUCTOR

4.1. Introducción

A día de hoy se siguen produciendo de forma regular ahogamientos mortales y no mortales debido a la conducción en zonas o vías inundadas (Hamilton et al., 2019). Las investigaciones realizadas a nivel internacional sobre la mortalidad en la conducción durante una inundación sugieren que la evaluación incorrecta de las condiciones de la inundación (Ashley y Ashley, 2008) y la subestimación de los riesgos (Maples y Tiefenbacher, 2009) llevan a los conductores a tomar decisiones inadecuadas que pueden provocar incidentes mortales (Ahmed et al., 2020). Actualmente, conducir o caminar intencionadamente a través de una inundación representa más del 86% del total de víctimas mortales en estos eventos (Han y Sharif, 2021). Es más, según FitzGerald et al. (2010) el 48,5% de estas muertes están relacionadas con la conducción en las inundaciones, y el 26,5% se produjeron por un comportamiento inadecuado o de alto riesgo durante estos eventos (Al-Qadami et al., 2022).

Estos hechos hacen que el comportamiento al volante y los ahogamientos sean un grave problema de salud pública. Por ello mismo, la Organización Mundial de la Salud (2014b) recomienda, en su primer informe mundial sobre ahogamientos, la prevención, dado que es vital para combatir las tasas expuestas de ahogamiento (Hamilton et al., 2018).

4.2. Comportamiento y capacidad de detección del riesgo del conductor ante inundación

Se presupone que aquellos conductores que acceden a vías inundadas es debido a la falta de conocimiento con respecto al riesgo asociado a la conducción a través de una inundación (Shevellar y Riggs, 2015). En cambio, son varias las investigaciones que han demostrado que las personas pueden recordar y comprender los riesgos de conducir a través una inundación (Hamilton et al., 2016); sin embargo, son muchos los conductores que siguen ignorando las advertencias de seguridad y llevando a cabo este tipo de comportamientos (Shevellar y Riggs, 2015).

A continuación, se expone con mayor detenimiento el comportamiento del conductor ante el riesgo de inundación; el perfil habitual de dicho conductor propenso a este riesgo; la capacidad de

detección del riesgo por parte de este; y por último, los factores que influyen en su toma de decisiones ante este tipo de riesgo.

4.2.1. Comportamiento del conductor ante el riesgo

Según Drobot et al. (2007), las personas que no toman un alto nivel de advertencia son más propensas a cruzar las vías inundadas. Es por esto que el comportamiento de los conductores es la primera de las causas de los accidentes con vehículos en inundaciones (Enríquez-de-Salamanca, 2020). Comportamientos tales como la subestimación del riesgo, el exceso de confianza en sí mismo o en las autoridades, la sobrevaloración de sus habilidades de conducción, o el desconocimiento de los riesgos de arrastre y flotación del vehículo pueden dar lugar a situaciones fatales (Al-Qadami et al., 2022). Otro aspecto que puede dar lugar a la disminución de la sensación de riesgo del conductor son las características del vehículo. Aspectos tales como el tamaño, el tipo o el control de conducción operativo, también pueden dar a los conductores confianza en su capacidad, lo que puede minimizar la percepción del riesgo al que están expuestos (Hamilton et al., 2021)

4.2.1.1. Perfil del conductor propenso al riesgo

Según Hamilton et al. (2018) existen diferencias de género en el comportamiento de los individuos a la hora de enfrentarse a un evento de inundación. Concretamente, los hombres muestran una mayor disposición a favor de la conducción a través de la inundación en comparación con las mujeres (Hamilton et al., 2018). Son varios los estudios que respaldan esta afirmación (Alderman et al., 2012), dado que muestran como los varones están sobrerrepresentados en las estadísticas de ahogamientos (Franklin et al., 2010), incluidos aquellos relacionados con la conducción (Doocy et al., 2013).

Esta discrepancia puede deberse a que los varones tienen una mayor propensión a asumir riesgos en las inundaciones y un mayor grado de exposición a las mismas en comparación con las mujeres (Salvati et al., 2018), además de ser más propensos a atravesar las inundaciones y a realizar actividades de ocio (por ejemplo, nadar en el agua de las inundaciones) que los exponen a un mayor riesgo de ahogamiento (Peden et al., 2018).

El tipo de personalidad del conductor puede aumentar también este riesgo. Krahe y Fenske (2002) descubrieron que la personalidad machista (aprobación exagerada del estilo masculino y de los estereotipos masculinos) (Mosher y Sirkin, 1984), sirve para predecir el comportamiento agresivo y arriesgado al volante (poca consideración de las normas de circulación y disposición a asumir riesgos) (Hamilton et al., 2018).

4.2.2. Capacidad de detección del riesgo por parte del conductor

Existe un vacío de conocimiento en cuanto a la comprensión de por qué los individuos deciden conducir a través de una inundación y las decisiones que pueden llevar a tales acciones (Hamilton et al., 2019). Los conductores pueden desarrollar una falsa sensación de seguridad mientras están dentro de un vehículo (Diakakis et al., 2013) y es posible que no aprecien plenamente el riesgo al que se enfrentan ni la influencia que la profundidad y la velocidad del agua pueden tener tanto en la estabilidad del vehículo como en su seguridad (Yale et al., 2003). Según Pearson & Hamilton (2014), los conductores pueden reconocer este riesgo pero no relacionarlo con ellos mismos, lo que indica un "sesgo optimista" (Hamilton et al., 2018). A continuación, se va a profundizar en los factores que pueden influir en la toma de decisiones ante este tipo de eventos.

4.2.2.1. Factores influyentes en la toma de decisiones del conductor ante el riesgo

Investigaciones recientes han intentado comprender los mecanismos psicológicos que pueden guiar las decisiones de los individuos en adoptar comportamientos que comprometen la seguridad en torno al agua (Hamilton et al., 2016). Uno de los estudios realizados, ha aportado pruebas emergentes sobre los factores psicológicos que influyen en la decisión del individuo de conducir a través del agua de la inundación (Zaalberg et al., 2009).

La siguiente figura 17 expone los resultados obtenidos a partir de dicha investigación:

Figura 17

Mapa temático sobre las influencias en la decisión de conducir a través de vías fluviales inundadas.



Nota. Adaptado de “Driving through floodwater: Exploring driver decisions through the lived experience” de K. Hamilton et al., 2019, *BMJ Open*, 9(2), (doi:10.1080/15715124.2019.1687487).

Tal y como se muestra, el estudio determina que una serie de creencias incluyendo la experiencia pasada, las actitudes, la presión social, las creencias de autoeficacia y las percepciones de riesgo puede influir en la toma de decisiones del conductor a la hora de decidir conducir a través de la inundación, o no (Hamilton et al., 2019). Otros factores que pueden influir en la toma de decisiones de los conductores son las presiones para llegar a un destino; la percepción de que una situación es diferente a la descrita en las advertencias; el miedo al aislamiento; la presión de los otros conductores; el estímulo de los pasajeros; la seguridad de otras personas en el coche si se necesitara un rescate, etc. (Hamilton et al., 2019).

4.3. Prevención e intervención para la reducción del riesgo del conductor ante inundación

Dado que cada año se siguen perdiendo vidas humanas por conducir a través de cursos de agua inundados, es necesario seguir esforzándose por comprender mejor y reducir este tipo de comportamiento (Hamilton et al., 2016). Por ello, es esencial desarrollar estrategias para detener

o reducir la incidencia de las personas que conducen a través del agua de las inundaciones (Ahmed et al., 2020).

Son muchas las personas que, pese a haber sido expuestas a campañas de comunicación dirigidas al comportamiento de conducción en eventos de inundación, siguen conduciendo a través de zonas inundadas (Hamilton et al., 2019). Peden et al. (2004) llegaron a la conclusión de que estas campañas de seguridad vial podían influir en el comportamiento únicamente cuando se utilizaban junto con la legislación y la aplicación de la ley, pero, de forma aislada, no solían producir reducciones tangibles y sostenidas de la mortalidad o las lesiones graves (Gissing et al., 2019). De ahí que sean varios los estudios centrados en el desarrollo de nuevas estrategias de prevención para influir sobre el comportamiento y la capacidad de detección del riesgo del conductor ante eventos de inundación.

4.3.1. Estrategias de prevención para la reducción del riesgo del conductor

Las estrategias desarrolladas para la concienciación del conductor ante los riesgos a los que se expone en una inundación son de diversas clases. A continuación, se exponen las estrategias o métodos encontrados en la literatura.

4.3.1.1. Video infográfico

Los autores Hamilton et al. (2021) desarrollaron un vídeo infográfico al estilo de los medios de comunicación que incluye métodos de cambio de conducta basados en la teoría, para reducir la brecha entre el conocimiento de los riesgos y las intenciones de conducir en una inundación (Hamilton et al., 2018). Aunque la infografía influye sobre las actitudes del conductor, los efectos de subjetividad, la susceptibilidad y la gravedad percibida después de la intervención, solo se mantuvieron hasta cuatro semanas después de la intervención en las mujeres participantes (Hamilton et al., 2021). Se sospecha que las diferencias de sexo en los efectos de la intervención pueden ser debidas a que las mujeres auto refuerzan los mensajes por su tendencia a utilizar estilos de pensamiento rumiante (Johnson y Whisman, 2013).

Una intervención eficaz destinada a promover una conducta de conducción segura durante las inundaciones puede beneficiarse del uso de este método de cambio de conducta. Este puede ser de ayuda para el desarrollo de un plan y en qué momento aplicarlo (Hagger et al., 2016).

4.3.1.2. Intervención con imágenes

Esta estrategia consiste en realizar una intervención a los conductores mediante imágenes de tal forma que se concientice sobre los riesgos y formas más seguras de reaccionar en caso de inundación. Una vez se realiza la intervención a los conductores, se realiza un seguimiento de cuatro semanas. Según los autores, esta intervención redujo las intenciones de conducir en una inundación. Los resultados de esta investigación apoyan que una intervención en línea, basada en la teoría, que utiliza imágenes de implementación, es un enfoque potencialmente prometedor para crear cambios duraderos, al menos a corto plazo, en las construcciones psicológicas que están asociadas con la conducción en una inundación, en particular para las personas con una modesta intención de exponerse a este riesgo (Hamilton et al., 2021).

Según Noar (2006), las intervenciones basadas en la teoría, en comparación con las intervenciones ateóricas, son más eficaces para promover el cambio de conductas de salud (Webb et al., 2010).

4.3.1.3. Desarrollo de planes “si-entonces”

Otra forma útil de concienciar sobre los riesgos de inundación consiste en enseñar a las personas a crear planes "si-entonces", también conocidos como intenciones de aplicación (Gollwitzer, 1999). Estas iniciativas sirven para mejorar el comportamiento seguro de los conductores en diferentes situaciones (Brewster et al., 2016). Para facilitar la eficacia de los planes "si-entonces", la intención debe estar vinculada a un contexto situacional adecuado (por ejemplo, una carretera inundada) o a una señal ambiental (por ejemplo, una lluvia intensa). Los avances tecnológicos han allanado el camino para que las señales se distribuyan a los conductores en forma de información enviada a los sistemas de navegación de los coches (Gissing et al., 2016) o de mensajes de texto que han demostrado actuar como señales exitosas en otros entornos (Prestwich et al., 2010).

4.3.1.4. Teoría de motivación a la protección (TMP)

La teoría de motivación a la protección (TMP) sirve para ayudar a explicar cómo aquello que despierta el miedo en una persona puede conducir a un cambio de comportamiento en materia de salud. Esta misma teoría ha sido aplicada recientemente para investigar el comportamiento de las

personas en relación con los peligros naturales tales como los riesgos por inundación (Milne et al., 2000).

Grothmann y Reusswig (2006) aplicaron la TMP para evaluar por qué sólo algunos residentes de una zona urbana propensa a las inundaciones en Alemania toman medidas de precaución para evitar daños en caso de inundación. Sus resultados sugieren que la TMP es un modelo útil para evaluar la vulnerabilidad a las inundaciones.

En definitiva, emplear la TMP sirve para ayudar a las personas a entender de forma intuitiva la importancia de los mecanismos de afrontamiento apropiados durante los eventos por fenómenos naturales (Franklin et al., 2014).

CAPÍTULO 5. DISCUSIÓN

En esta investigación se seleccionaron en total veintitrés estudios, trece de los cuales abarcan la temática del umbral de estabilidad de los vehículos en eventos de inundación mientras que los diez restantes se centran en el impacto de las inundaciones sobre el conductor. Todos estos artículos fueron publicados entre 2011 y 2022.

Con respecto a los artículos sobre el umbral de estabilidad de los vehículos ante inundaciones, se ha de recalcar que este tipo de investigaciones se encuentra aún en un estado incipiente o de carácter inicial (Al-Qadami et al., 2022). La mayor parte de las investigaciones se centran en el estudio de los vehículos estacionados, siendo escasas las investigaciones realizadas a partir de vehículos en movimiento (Shah et al., 2019). A su vez, los ensayos llevados a cabo en los estudios experimentales suelen ser a partir de modelos de vehículos a pequeña escala, siendo pocos los ensayos realizados a partir de vehículos a escala real (Al-Qadami et al., 2022). La clasificación aplicada a estos vehículos de ensayo es simple, dado que se enmarcan bajo los conceptos de turismo pequeño, turismo grande o vehículo utilitario deportivo (SUV). Así mismo, los estudios realizados hasta ahora han sido con casuísticas reducidas, considerando limitadas condiciones de orientación del vehículo; de estado de sumersión (parcial o completo); de condiciones de flujo; de grado de pendiente de la vía, etc. Por último, los enfoques adoptados en las diferentes investigaciones no responden a un mismo patrón, por lo que sigue siendo de gran dificultad proponer una metodología que sirva para determinar el límite de inestabilidad de cualquier vehículo, dado entre otras, al reducido número de modelos de vehículos ensayados (Martínez-Gomariz et al., 2017). El uso de herramientas para las simulaciones hidrodinámicas tridimensionales esta aún poco extendido en este campo, pero su aplicación puede ser de gran ayuda dado que se trata de herramientas computacionales de gran alcance.

Teniendo en cuenta el estado actual de estos estudios, las directrices de seguridad propuestas hasta ahora requieren también de importantes modificaciones (Shah et al., 2021). Dichas modificaciones se han de basar en las características de los coches modernos, así como en el impacto de las fuerzas hidrodinámicas en los vehículos que intentan conducir a través de vías inundadas, dado que los límites del umbral de estabilidad propuestos hasta ahora se basan

mayoritariamente en las funciones limitantes destacadas en las investigaciones previas (1967 – 1993).

Los hallazgos en la literatura con respecto al impacto de las inundaciones en el conductor indican que, a pesar de conocer los riesgos, son muchos los conductores que tienden a ignorar las advertencias de seguridad y conducir a través de ellas (Shevellar y Riggs, 2015). Según los datos aportados, los varones están sobrerrepresentados en las estadísticas de ahogamientos en inundación, incluida en la conducción (Doocy et al., 2013). Son varias las investigaciones que han tratado de entender los mecanismos psicológicos que pueden influir en la toma de decisiones de riesgo y han desarrollado métodos para la concienciación de los conductores ante estos riesgos (Zaalberg et al., 2009). Las estrategias de prevención desarrolladas hasta ahora tienen un nivel de efectividad de carácter en el conductor, por lo que es otro campo de interés a seguir investigando.

Este trabajo tiene ciertas limitaciones. Para llevar a cabo esta revisión de forma factible solo se tuvieron en cuenta como resultados los artículos científicos obtenidos en las búsquedas en la base de datos bibliográfica *Scopus*. De esta forma, se dejaron fuera cualquier tipo de publicación de conferencia, revista o libro relacionada con el tema. Además, tampoco se realizaron búsquedas en la literatura gris, y en ningún otro idioma que no fuese inglés. Por lo tanto, los resultados aquí expuestos sólo hacen referencia a los artículos científicos resultantes de *Scopus*. Es posible que exista un mayor número de estudios referentes a esta temática, pero, debido a las propias limitaciones establecidas, no ha podido ser comprobado.

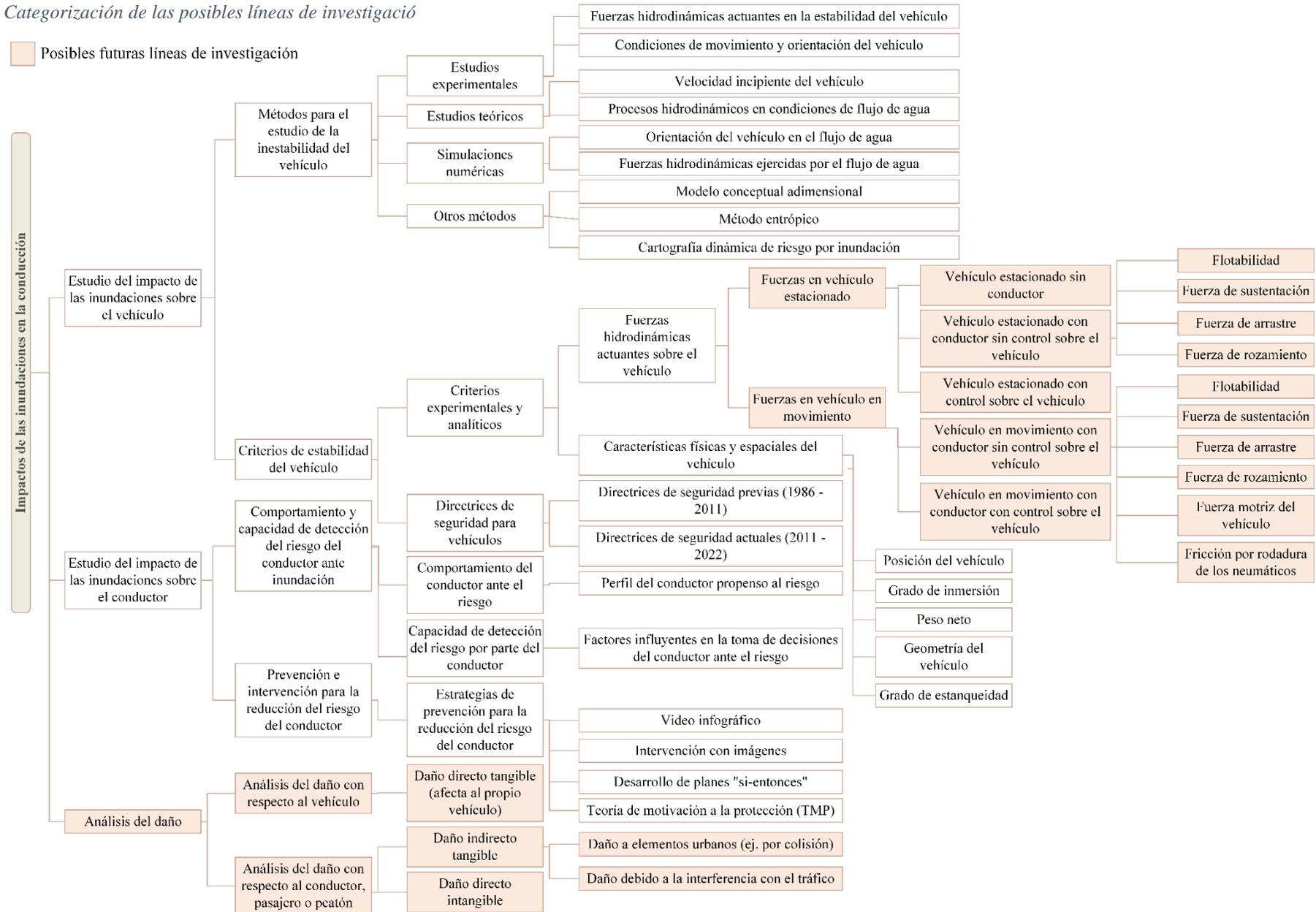
En cuanto a los resultados del presente trabajo, de estos se obtienen varias líneas de investigación o posibles trabajos futuros. En la figura 17 expuesta al final de este capítulo, se esquematiza el contenido de la narrativa junto con las posibles líneas de investigación a seguir. En primer lugar, a la hora de clasificar el estado del vehículo, se distingue únicamente entre estacionado o en movimiento. En ninguno de estos casos se tiene en cuenta si el conductor se encuentra dentro del vehículo y si este tiene o no control sobre él. Por lo que puede ser de interés añadir estos aspectos a la casuística aplicada.

Otra línea de investigación de interés es el análisis del daño en relación tanto al vehículo como al conductor o pasajero. En esta clase de eventos se producen una serie de daños tanto directos

como indirectos, tangibles e intangibles. La profundización en el conocimiento y la categorización de esos daños pueden servir para la mejora de la comprensión sobre cómo reacciona el vehículo en caso de inundación y a que factores externos suele estar expuesto tanto el vehículo como el propio conductor.

Figura 18

Categorización de las posibles líneas de investigación



CAPÍTULO 6. CONCLUSIÓN

El calentamiento global, como una de las principales consecuencias del cambio climático, es un fenómeno de gran importancia en la actualidad que afecta a la sociedad y supone un gran impacto en numerosos aspectos de la vida en el planeta. Este estudio ha servido para analizar con mayor detenimiento los efectos ejercidos por uno de los principales desencadenantes del calentamiento global, en este caso, el aumento de las precipitaciones y la generación de inundaciones en la acción de conducir.

A partir de la metodología *Scoping review* seguida se ha analizado con detenimiento el estado actual de la literatura referente al impacto de las inundaciones, tanto en el vehículo como en el propio conductor. Por una parte, se han estudiado detenidamente los métodos existentes para el análisis del umbral de estabilidad del vehículo y los criterios de estabilidad y directrices de seguridad seguidas a la hora de estudiar el comportamiento del vehículo durante esta clase de eventos. Por otra parte, se ha investigado el tipo de perfil de conductor con mayor riesgo ante este tipo de eventos y la capacidad humana de detección de dichos eventos, además de las estrategias existentes actualmente para su prevención.

Mediante esta revisión de la literatura, se ha detectado que los estudios realizados hasta el momento están aún en fase temprana y, por tanto, se requiere de mayor indagación en esta temática. En primer lugar, los métodos existentes para el análisis del umbral de estabilidad de vehículos no son de carácter general, por lo que no pueden ser aplicados a cualquier tipo de vehículo. A su vez, los criterios de estabilidad que se tienen en cuenta en los métodos mencionados son de carácter limitado. Por otra parte, es necesario profundizar en el análisis del comportamiento y la capacidad de detección del riesgo ante una inundación por parte del conductor dada la complejidad a la hora de identificar los criterios en la toma de decisiones ante dicho riesgo. Por último, no se ha podido comprobar la efectividad de las estrategias de prevención y reducción de riesgos del conductor ante eventos reales de inundación.

Se han identificado distintas líneas de investigación, tal y como se muestra en la figura 17, entre las que destacan ampliar la casuística del estado del vehículo a la hora de estudiar su inestabilidad

en inundaciones o analizar el daño generado durante este tipo de eventos tanto sobre el vehículo como sobre el propio conductor o pasajero.

Teniendo en cuenta que la exposición al riesgo por inundación producido por precipitación se encuentra en aumento, resulta esencial continuar investigando con el objetivo de proteger la seguridad del conductor o del pasajero durante la conducción de un vehículo.

BIBLIOGRAFÍA

- Ahmed, M. A., Haynes, K., Tofa, M., Hope, G., & Taylor, M. (2020). Duty or safety? exploring emergency service personnel's perceptions of risk and decision-making when driving through floodwater. *Progress in Disaster Science*, 5 doi:10.1016/j.pdisas.2020.100068
- Alderman, K., Turner, L. R., & Tong, S. (2012). Floods and human health: A systematic review. *Environment International*, 47, 37-47.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.envint.2012.06.003>
- Al-Qadami, E. H. H., Mustafa, Z., Al-Atroush, M. E., Martinez-Gomariz, E., Teo, F. Y., & El-Husseini, Y. (2022). A numerical approach to understand the responses of passenger vehicles moving through floodwaters. *Journal of Flood Risk Management*, doi:10.1111/jfr3.12828
- Al-Qadami, E. H. H., Mustafa, Z., Shah, S. M. H., Matínez-Gomariz, E., & Yusof, K. W. (2022). Full-scale experimental investigations on the response of a flooded passenger vehicle under subcritical conditions. *Natural Hazards*, 110(1), 325-348. doi:10.1007/s11069-021-04949-6
- Arksey, H., & O'Malley, L. (2005). Scoping studies: Towards a methodological framework. *Null*, 8(1), 19-32. doi:10.1080/1364557032000119616
- Arrighi, C., Alcèrreca-Huerta, J. C., Oumeraci, H., & Castelli, F. (2015). Drag and lift contribution to the incipient motion of partly submerged flooded vehicles. *Journal of Fluids and Structures*, 57, 170-184.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2015.06.010>
- Arrighi, C., Castelli, F., & Oumeraci, H. (2016). Effects of flow orientation on the onset of motion of flooded vehicles. Paper presented at the 837-841.
doi:10.1201/b21902-140
- Ashley, S. T., & Ashley, W. S. (2008). Flood fatalities in the united states. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 47(3), 805-818. doi:10.1175/2007JAMC1611.1
- Austroroads. (2018). *Guide to road design part 5: Drainage design*
- Barredo, J. I. (2009). Normalised flood losses in europe: 1970-2006. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9(1), 97-104. doi:10.5194/nhess-9-97-2009
- Bonham, A. J., & Hattersley, R. T. (1967). *Low level causeways*. Water Research Laboratory, University of New South Wales, Australia: Technical report 100.
- Brewster, S. E., Elliott, M. A., McCartan, R., McGregor, B., & Kelly, S. W. (2016). Conditional or unconditional? the effects of implementation intentions on driver behavior. *Journal of Experimental Psychology. Applied*, 22(1), 124-133. doi:10.1037/xap0000072

- Change, Intergovernmental Panel On Climate. (2014). *Ippc. Climate Change*,
- Diakakis, M., Boufidis, N., Salanova Grau, J. M., Andreadakis, E., & Stamos, I. (2020). A systematic assessment of the effects of extreme flash floods on transportation infrastructure and circulation: The example of the 2017 mandra flood. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 47 doi:10.1016/j.ijdr.2020.101542
- Diakakis, M., & Deligiannakis, G. (2017). Flood fatalities in greece: 1970–2010. *Journal of Flood Risk Management*, 10(1), 115-123. doi:<https://doi.org/10.1111/jfr3.12166>
- Diakakis, M. (2016). Have flood mortality qualitative characteristics changed during the last decades? the case study of greece. *Null*, 15(2), 148-159. doi:10.1080/17477891.2016.1147412
- Diakakis, M., & Deligiannakis, G. (2013). Vehicle-related flood fatalities in greece. *Environmental Hazards*, 12(3-4), 278-290. doi:10.1080/17477891.2013.832651
- Doocy, S., Daniels, A., Murray, S., & Kirsch, T. D. (2013). The human impact of floods: A historical review of events 1980-2009 and systematic literature review. *PLoS Currents*, 5 doi:10.1371/currents.dis.f4deb457904936b07c09daa98ee8171a
- Drobot, S. D., Benight, C., & Grunfest, E. C. (2007). Risk factors for driving into flooded roads. *Null*, 7(3), 227-234. doi:10.1016/j.envhaz.2007.07.003
- Ejsmont, J. A., Ronowski, G., Świczko-Żurek, B., & Sommer, S. ł. (2017). Road texture influence on tyre rolling resistance. *Null*, 18(1), 181-198. doi:10.1080/14680629.2016.1160835
- Enríquez-de-Salamanca, Á. (2020). Victims crossing overflowing watercourses with vehicles in spain. *Journal of Flood Risk Management*, 13(4), e12645. doi:<https://doi.org/10.1111/jfr3.12645>
- FitzGerald, G., Du, W., Jamal, A., Clark, M., & Hou, X. (2010). Flood fatalities in contemporary australia (1997–2008). *Emergency Medicine Australasia*, 22(2), 180-186. doi:<https://doi.org/10.1111/j.1742-6723.2010.01284.x>
- Franklin, R. C., King, J. C., Aitken, P. J., & Leggat, P. A. (2014). "Washed away"-assessing community perceptions of flooding and prevention strategies: A north queensland example. *Natural Hazards*, 73(3), 1977-1998. doi:10.1007/s11069-014-1180-x
- Franklin, R. C., Scarr, J. P., & Pearn, J. H. (2010). Reducing drowning deaths: The continued challenge of immersion fatalities in australia. *Medical Journal of Australia*, 192(3), 123-126. doi:<https://doi.org/10.5694/j.1326-5377.2010.tb03448.x>
- Gissing, A., Opper, S., Tofa, M., Coates, L., & McAneney, J. (2019). Influence of road characteristics on flood fatalities in australia. *Environmental Hazards*, 18(5), 434-445. doi:10.1080/17477891.2019.1609407

- Gissing, A., Haynes, K., & Coates, L. (2016). Motorist behaviour during the 2015 shoalhaven floods. *Australian Journal of Emergency Management*, 31(2), 25-30.
- Gollwitzer, P. M. (1999). Implementation intentions. *The American Psychologist*, 54(7), 493-503. doi:10.1037/0003-066X.54.7.493
- Gordon, A. D., & Stone, P. B. (1973). *Car stability on road floodways*. Water Research Laboratory, University of New South Wales, Australia: National Capital Development Commission, Report no. 73/12.
- Gou, L., Liu, Y., Zhang, Y., Zhu, Z., Peng, D., & Dou, J. (2022). Estimating the instability criterion of vehicles in urban flooding by an entropic method. *Urban Climate*, 41 doi:10.1016/j.uclim.2021.101069
- Gou, L., Liu, Y., Zhang, Y., Zhu, Z., Peng, D., & Dou, J. (2022). Estimating the instability criterion of vehicles in urban flooding by an entropic method. *Urban Climate*, 41, 101069. doi:<https://doi.org/10.1016/j.uclim.2021.101069>
- Grothmann, T., & Reusswig, F. (2006). People at risk of flooding: Why some residents take precautionary action while others do not. *Natural Hazards (Dordrecht)*, 38(1-2), 101-120. doi:10.1007/s11069-005-8604-6
- Hagger, M. S., Luszczynska, A., de Wit, J., Benyamini, Y., Burkert, S., Chamberland, P., . . . Gollwitzer, P. M. (2016). Implementation intention and planning interventions in health psychology: Recommendations from the synergy expert group for research and practice. *Null*, 31(7), 814-839. doi:10.1080/08870446.2016.1146719
- Hall, N. (2015). The lift equation. Retrieved from <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/lifteq.html>
- Hamilton, K., Keech, J. J., Peden, A. E., & Hagger, M. S. (2019). Protocol for developing a mental imagery intervention: A randomised controlled trial testing a novel implementation imagery e-health intervention to change driver behaviour during floods. *BMJ Open*, 9(2) doi:10.1136/bmjopen-2018-025565
- Hamilton, K., Keech, J. J., Peden, A. E., & Hagger, M. S. (2021). Changing driver behavior during floods: Testing a novel e-health intervention using implementation imagery. *Safety Science*, 136 doi:10.1016/j.ssci.2020.105141
- Hamilton, K., Peden, A. E., Keech, J. J., & Hagger, M. S. (2018). Changing people's attitudes and beliefs toward driving through floodwaters: Evaluation of a video infographic. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 53, 50-60. doi:10.1016/j.trf.2017.12.012
- Hamilton, K., Peden, A. E., Keech, J. J., & Hagger, M. S. (2019). Driving through floodwater: Exploring driver decisions through the lived experience. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 34, 346-355. doi:10.1016/j.ijdr.2018.12.019

- Hamilton, K., Peden, A. E., Pearson, M., & Hagger, M. S. (2016). Stop there's water on the road! identifying key beliefs guiding people's willingness to drive through flooded waterways. *Safety Science*, *89*, 308-314. doi:10.1016/j.ssci.2016.07.004
- Hamilton, K., Price, S., Keech, J. J., Peden, A. E., & Hagger, M. S. (2018). Drivers' experiences during floods: Investigating the psychological influences underpinning decisions to avoid driving through floodwater. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, *28*, 507-518. doi:10.1016/j.ijdr.2017.12.013
- Hamilton, K., Peden, A. E., Keech, J. J., & Hagger, M. S. (2019). Driving through floodwater: Exploring driver decisions through the lived experience. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, *34*, 346-355. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2018.12.019>
- Hamilton, K., Peden, A., Keech, J., & Hagger, M. (2016). Deciding to drive through floodwater: A qualitative analysis through the lived experience.
- Han, Z., & Sharif, H. O. (2021). Analysis of flood fatalities in the united states, 1959–2019. *Water (Switzerland)*, *13*(13) doi:10.3390/w13131871
- Huang, Y., & Cheng, H. (2013). The impact of climate change on coastal geological disasters in southeastern china. *Natural Hazards*, *65*(1), 377-390. doi:10.1007/s11069-012-0370-7
- Johnson, D. P., & Whisman, M. A. (2013). Gender differences in rumination: A meta-analysis. *Personality and Individual Differences*, *55*(4), 367-374. doi:<https://doi.org/10.1016/j.paid.2013.03.019>
- Jonkman, S. N., & Kelman, I. (2005a). An analysis of the causes and circumstances of flood disaster deaths. *Disasters*, *29*(1), 75-97. doi:<https://doi.org/10.1111/j.0361-3666.2005.00275.x>
- Jonkman, S. N., & Kelman, I. (2005b). An analysis of the causes and circumstances of flood disaster deaths. *Disasters*, *29*(1), 75-97. doi:10.1111/j.0361-3666.2005.00275.x
- Karnopp, D. (2004). *Vehicle stability* Marcel Dekker Inc.
- Keller, R. J., & Mitsch, B. (1993). *Safety aspects of the design of roadways as floodways*. Urban Water Research Association of Australia: Research report; no. 69.
- Krahé, B., & Fenske, I. (2002). Predicting aggressive driving behavior: The role of macho personality, age, and power of car. *Aggressive Behavior*, *28*(1), 21-29. doi:<https://doi.org/10.1002/ab.90003>
- Levac, D., Colquhoun, H., & O'Brien, K. K. (2010). Scoping studies: Advancing the methodology. *Implementation Science*, *5*(1), 69. doi:10.1186/1748-5908-5-69

- Maples, L. Z., & Tiefenbacher, J. P. (2009). Landscape, development, technology and drivers: The geography of drownings associated with automobiles in texas floods, 1950–2004. *Applied Geography*, 29(2), 224-234. doi:<https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2008.09.004>
- Martínez-Gomariz, E., Gómez, M., Russo, B., & Djordjević, S. (2017). A new experiments-based methodology to define the stability threshold for any vehicle exposed to flooding. *Urban Water Journal*, 14(9), 930-939. doi:10.1080/1573062X.2017.1301501
- Martínez-Gomariz, E., Gómez, M., Russo, B., & Djordjević, S. (2018). Stability criteria for flooded vehicles: A state-of-the-art review. *Journal of Flood Risk Management*, 11, S817-S826. doi:<https://doi.org/10.1111/jfr3.12262>
- Martínez-Gomariz, E., Locatelli, L., Guerrero, M., Russo, B., & Martínez, M. (2019). Socio-economic potential impacts due to urban pluvial floods in badalona (spain) in a context of climate change. *Water (Switzerland)*, 11(12) doi:10.3390/W11122658
- Milanesi, L., & Pilotti, M. (2020). A conceptual model of vehicles stability in flood flows. *Null*, 58(4), 701-708. doi:10.1080/00221686.2019.1647887
- Milne, S., Sheeran, P., & Orbell, S. (2000). Prediction and intervention in health-related behavior: A meta-analytic review of protection motivation theory. *Journal of Applied Social Psychology*, 30(1), 106-143. doi:10.1111/j.1559-1816.2000.tb02308.x
- Mitsakis, E., Stamos, I., Maria Salanova Grau, J., & Aifadopoulou, G. (2014). Optimal allocation of emergency response services for managing disasters. *Disaster Prevention and Management*, 23(4), 329-342. doi:10.1108/DPM-10-2013-0182
- Moore, K. A., & Power, R. K. (2002). Safe buffer distances for offstream earth dams. *Null*, 6(1), 1-15. doi:10.1080/13241583.2002.11465206
- Mosher, D. L., & Sirkin, M. (1984). Measuring a macho personality constellation. *Journal of Research in Personality*, 18(2), 150-163. doi:[https://doi.org/10.1016/0092-6566\(84\)90026-6](https://doi.org/10.1016/0092-6566(84)90026-6)
- Mustaffa, Z., Al-Qadami, E., Shah, S., & Wan Yusof, K. (2020). Impact and mitigation strategies for flash floods occurrence towards vehicle instabilities. (pp. 1-19) doi:10.5772/intechopen.92731
- Noar, S. M. (2006). A 10-year retrospective of research in health mass media campaigns: Where do we go from here? *Null*, 11(1), 21-42. doi:10.1080/10810730500461059
- Paprotny, D., Sebastian, A., Morales-Nápoles, O., & Jonkman, S. N. (2018). Trends in flood losses in europe over the past 150 years. *Nature Communications*, 9(1), 1985. doi:10.1038/s41467-018-04253-1

- Pearson, M., & Hamilton, K. (2014). Investigating driver willingness to drive through flooded waterways. *Accident Analysis & Prevention*, 72, 382-390. doi:<https://doi.org/10.1016/j.aap.2014.07.018>
- Peden, A. E., Franklin, R. C., & Leggat, P. (2018). The flood-related behaviour of river users in australia. *PLOS Curr.: Disasters*, doi:<https://doi.org/10.1371/currents.dis.89e243413a0625941387c8b9637e291b>
- Peden, M., Scurfield, R., Sleet, D., Mohan, D., Hyder, A. A., Jarawan, E., & Mathers, C. (2004). World report on road traffic injury prevention. *Geneva: World Health Organisation*,
- Poirot, S. (2012). *Handbook of fluid dynamics and fluid hydromomics*. United Kingdom: Auris Reference Ltd.
- Prestwich, A., Perugini, M., & Hurling, R. (2010). Can implementation intentions and text messages promote brisk walking? A randomized trial. *Health Psychology*, 29(1), 40-49. doi:10.1037/a0016993
- Russo, B., Gómez, M., & Macchione, F. (2013). Pedestrian hazard criteria for flooded urban areas. *Natural Hazards*, 69(1), 251-265. doi:10.1007/s11069-013-0702-2
- Salvati, P., Petrucci, O., Rossi, M., Bianchi, C., Pasqua, A. A., & Guzzetti, F. (2018). Gender, age and circumstances analysis of flood and landslide fatalities in italy. *Science of the Total Environment*, 610-611, 867-879. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.064>
- Sanyal, J., & Lu, X. X. (2006). GIS-based flood hazard mapping at different administrative scales: A case study in gangetic west bengal, india. *Singapore Journal of Tropical Geography*, 27(2), 207-220.
- Scarr, J., Scarr, J., Peden, A. E., & Mahony, A. (2017). Australian water safety council.
- Shah, S. M. H., Mustaffa, Z., Martinez-Gomariz, E., Kim, D. K., & Yusof, K. W. (2021). Criterion of vehicle instability in floodwaters: Past, present and future. *International Journal of River Basin Management*, 19(1), 1-23. doi:10.1080/15715124.2019.1566240
- Shah, S. M. H., Mustaffa, Z., Martínez-Gomariz, E., Yusof, K. W., & Al-Qadami, E. H. H. (2021). A review of safety guidelines for vehicles in floodwaters. *International Journal of River Basin Management*, 19(1), 25-41. doi:10.1080/15715124.2019.1687487
- Shah, S. M. H., Mustaffa, Z., Matínez-Gomariz, E., & Yusof, K. W. (2020). Hydrodynamic effect on non-stationary vehicles at varying froude numbers under subcritical flows on flat roadways. *Journal of Flood Risk Management*, 13(4) doi:10.1111/jfr3.12657

- Shah, S. M. H., Mustaffa, Z., & Yusof, K. W. (2018). Experimental studies on the threshold of vehicle instability in floodwaters. *Jurnal Teknologi*, 80(5), 25-36.
doi:10.11113/jt.v80.11198
- Shah, S. M. H., Mustaffa, Z., Yusof, K. W., & Nor, M. F. M. (2018). Influence of forces on vehicle's instability in floodwaters. *Ain Shams Engineering Journal*, 9(4), 3245-3258.
doi:10.1016/j.asej.2018.01.001
- Shah, S. M. H., Mustaffa, Z., Kim, D. K., & Yusof, K. W. (2018). Instability criteria for vehicles in motion exposed to flood risks. Paper presented at the *International Conference on Civil, Offshore & Environmental Engineering 2018 (ICCOEE 2018)*,
doi:<https://doi.org/10.1051/mateconf/201820307003>
- Shah, S. M. H., Mustaffa, Z., Matínez-Gomariz, E., Yusof, K. W., & Al-Qadami, E. H. H. (2019). Hazard risks pertaining to partially submerged non-stationary vehicle on low-lying roadways under subcritical flows. *Results in Engineering*, 3, 100032.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.rineng.2019.100032>
- Sharif, H. O., Hossain, M. M., Jackson, T., & Bin-Shafique, S. (2012). Person-place-time analysis of vehicle fatalities caused by flash floods in texas. *Null*, 3(4), 311-323.
doi:10.1080/19475705.2011.615343
- Shevellar, L., & Riggs, R. (2015). Understanding resistance to emergency and disaster messaging. *Australian Journal of Emergency Management*, 30(3), 31-35.
- Shu, C., Xia, J., Falconer, R. A., & Lin, B. (2011). Incipient velocity for partially submerged vehicles in floodwaters. *Journal of Hydraulic Research*, 49(6), 709-717.
doi:10.1080/00221686.2011.616318
- Smith, G. P. (2015). *Expert opinion: Stability of people, vehicles and buildings in flood water*
- Smith, G. P., Modra, B. D., & Felder, S. (2019). Full-scale testing of stability curves for vehicles in flood waters. *Journal of Flood Risk Management*, 12 doi:10.1111/jfr3.12527
- Smith, G. P., Modra, B. D., Tucker, T. A., & Cox, R. J. (2017). *Vehicle stability testing for flood flows*. (). University of New South Wales, Australia: Water Research Laboratory, School of Civil and Environmental Engineering, Technical Report 2017/07.
- Teo, F. Y., Xia, J., Falconer, R. A., & Lin, B. (2012a). Experimental studies on the interaction between vehicles and floodplain flows. *International Journal of River Basin Management*, 10(2), 149-160. doi:10.1080/15715124.2012.674040
- Teo, F. Y., Xia, J., Falconer, R. A., & Lin, B. (2012b). Experimental studies on the interaction between vehicles and floodplain flows. *International Journal of River Basin Management*, 10(2), 149-160. doi:10.1080/15715124.2012.674040

- Teo, F. Y. (2010). Study of the hydrodynamic processes of rivers and floodplains with obstructions. Paper presented at the
- UNISDR. (2015). The human cost of weather related disasters (1995 -2015). *Cred*, Retrieved from http://www.unisdr.org/2015/docs/climatechange/COP21_WeatherDisastersReport_2015_FINAL.pdf
- Wang, N., Hou, J., Du, Y., Jing, H., Wang, T., Xia, J., . . . Huang, M. (2021). A dynamic, convenient and accurate method for assessing the flood risk of people and vehicle. *Science of the Total Environment*, 797, 149036. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149036>
- Webb, T. L., Joseph, J., Yardley, L., & Michie, S. (2010). Using the internet to promote health behavior change: A systematic review and meta-analysis of the impact of theoretical basis, use of behavior change techniques, and mode of delivery on efficacy. *J Med Internet Res*, 12(1), e4. doi:10.2196/jmir.1376
- World Health Organization. (2014a). *Global report on drowning: Preventing a leading killer* Retrieved from <https://www.who.int/publications/i/item/global-report-on-drowning-preventing-a-leading-killer>
- World Health Organization. (2014b). *Global report on drowning: Preventing a leading killer*. Retrieved from http://www.who.int/violence_injury_prevention/publications/drowning_global_report/Final_report_full_web.pdf
- Xia, J., Teo, F. Y., Lin, B., & Falconer, R. A. (2011). Formula of incipient velocity for flooded vehicles. *Natural Hazards*, 58(1), 1-14. doi:10.1007/s11069-010-9639-x
- Yale, J. D., Cole, T. B., Garrison, H. G., Runyan, C. W., & Ruback, J. K. R. (2003). Motor vehicle-related drowning deaths associated with inland flooding after hurricane floyd: A field investigation. *Traffic Injury Prevention*, 4(4), 279-284. doi:10.1080/714040485
- Zaalberg, R., Midden, C., Meijnders, A., & McCalley, T. (2009). Prevention, adaptation, and threat denial: Flooding experiences in the netherlands. *Risk Analysis*, 29(12), 1759-1778. doi:<https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2009.01316.x>