

INGENIERÍA CIVIL

Núm.: 202/2023
ISSN: 0213-8468



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE TRANSPORTES, MOVILIDAD
Y AGENDA URBANA

VICEPRESIDENCIA
TERCERA DE GOBIERNO

MINISTERIO
PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA
Y EL RETO DEMOGRÁFICO

CEDEX
CENTRO DE ESTUDIOS
Y EXPERIMENTACIÓN
DE OBRAS PÚBLICAS

ÁREAS TEMÁTICAS Y TECNOLÓGICAS DE ACTIVIDAD

Aguas

Estructuras y Materiales

Puertos y Costas

Transporte y Movilidad

Carreteras

Sostenibilidad

Transición Ecológica

Geotecnia

Interoperabilidad Ferroviaria

**Patrimonio Histórico de
Obras Públicas**

Economía Circular

**Transferencia de
Conocimiento**





COMITÉ DE REDACCIÓN

Presidenta

Elena Pérez Zabaleta

Vocales

Paula Pascual Bernáldez
José Manuel de la Peña Olivás
Pablo Mira McWilliams
Luis Pujol Terés
Rafael Jiménez Sáez
M^a Asunción Morales Hortelano
Alfredo Arroyo Puente
Dolores Romero Muñoz

Comisión Asesora

Luis Pujol Terés
José-Carlos Pacheco Díaz

Secretaría

Diana de la Lama Jiménez
M^a José de la Fuente Arenas
José-Carlos Pacheco Díaz

Colaboradores

Javier Plasencia Jiménez (Fotografía)

REDACCIÓN

Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas
(CEDEX)

C/ Alfonso XII, 3 y 5 - 28014 Madrid
Tels.: (+34) 91 335 72 16 / 72 85 / 73 10

E-mail: ingcivil@cedex.es

El Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) no se hace responsable de las opiniones, teorías o datos publicados en los artículos de *Ingeniería Civil*, siendo ello responsabilidad exclusiva de sus autores

COORDINACIÓN DE PUBLICIDAD

Cloudbridge SL

Tel.: (+34) 606 30 26 91 | dani@cloudbridge.es

PVP: 12,25 euros

ISSN: 0213-8468 - NIPO papel: 797-20-005-3

ISSN: 2659-7039 - NIPO línea: 797-20-006-9

NIPO html: 797-20-007-4

Depósito legal: M-28150-1971

NUESTRA PORTADA:

Fondo submarino del mar Mediterráneo:
gorgonia roja Paramuricea clavata con pez napoleón,
Cap de Creus, Costa Brava, Cataluña, España.

(Fuente: Shutterstock)



Sumario

Vehículo autónomo y conectado: casos de uso, pronósticos de adopción y adaptación de la infraestructura

Autonomous and Connected Vehicles: Use Cases, Adoption Forecasts and Infrastructure Adaptation

Alejandro Lanuza García

5

Análisis de los parámetros característicos para la correcta interpretación de ensayos CPTU en 'quick clays' y arcillas de alta sensibilidad en la obra E-6 Ranheim-Vaernes motorway de Noruega

Analysis of the Characteristic Parameters for the Correct Interpretation of CPTU Tests in Quick and High Sensitivity Clays in the E-6 Ranheim-Vaernes Motorway, Norway

Juan Alfonso Carcolé Galea, Ana María Aguilar Bauzá

21

Uso y costes del hidrógeno en transporte

Use and Costs of Hydrogen in Mobility

Carlos Merino, Jesús Ruiz de Pascual, Emilio Nieto

29

Investigación de los efectos hidrometeorológicos sobre los movimientos de masas en laderas de depósitos coluviales

Investigation of the Hydrometeorological Effects on Mass Movements on Slopes of Colluvial Deposits

Mario Patricio Ochoa Cañizares

41

La nevada de Filomena pone a prueba la norma de Acciones en la Edificación

Filomena Snowstorm Tests the Standard of Actions on Structures

Manuel Ignacio Guerra Romero, Julia García González,
Julia M.^a Morán del Pozo, Andrés Juan Valdés

59

Factores condicionantes de la dinámica litoral de la playa de La Isla de Mazarrón en la extracción del pecio fenicio

Conditioning Factors of the Coastal Dynamics of Mazarrón's Beach of the Island During the Extraction of the Phoenician Shipwreck

José Manuel de la Peña Olivás

69

Caminos de Innovación en Ingeniería Civil

Uso de fotometría tridimensional e inteligencia artificial en el estudio de ecosistemas marinos: Proyecto VirtualMAR

Elena Prado, Adolfo Cobo, Sergio Sierra, Ángela Domingo, Carla Quiles-Pons,
Luis Rodríguez, David Díaz, Pablo Roldán, Pedro Anuarbe, Francisco Sánchez

75

Últimos avances en modelización climática

José Antonio Parodi Perdomo, Esteban Rodríguez Guisado

81

Ediciones del CEDEX

87

Exposiciones

93

Normas de redacción

También disponibles en la página web del CEDEX: <http://cedex.es>

98



Ingeniería Civil,
por su compromiso
con la innovación y
la transferencia
de conocimiento.

Carreteras y Movilidad

Líneas de Actividad

Caracterización de
Materiales

Funcionalidad y
Durabilidad de las
Carreteras

Sostenibilidad y Cambio
Climático

Seguridad Vial y Movilidad

Adaptación de la
Carretera al Vehículo
Autónomo y Conectado

Carreteras Inteligentes:
Digitalización e Innovación
Tecnológica

.....

Fields of Activity

Road Materials

*Road Pavement Durability
and Condition*

*Sustainability and Climate
Change*

Traffic and Road Safety

*Connected and Automated
Mobility*

*Smart Roads Technology:
Digitalisation and
Innovation*



Más información en
<http://www.cedex.es>

CEDEX

Centro de Estudios y Experimentación
de Obras Públicas

Vehículo autónomo y conectado: casos de uso, pronósticos de adopción y adaptación de la infraestructura

Autonomous and Connected Vehicles: Use Cases, Adoption Forecasts and Infrastructure Adaptation

Alejandro Lanuza García^{1*}

Resumen

Este artículo expone los casos de uso y los pronósticos de adopción del vehículo autónomo y conectado con objeto de identificar y priorizar las posibles opciones de inversión que podrían tener que hacer las administraciones de carreteras. Para ello, se comienza describiendo de forma general la tecnología en la que se basa el vehículo autónomo y conectado, los niveles de automatización en los que se clasifica y el marco legal que actualmente le afecta. A continuación, se exponen los casos de uso del vehículo autónomo, informando sobre las principales empresas del sector, y se recogen pronósticos globales y opiniones de expertos sobre el calendario de penetración del vehículo autónomo en la flota circulante. Por último, se exponen las opciones de inversión en infraestructura física y digital que facilitarían la implantación del vehículo autónomo, esbozando una priorización de estas actuaciones en función de su valor estratégico y viabilidad económica.

Palabras clave: vehículo autónomo, vehículo conectado, conducción automatizada, regulación, casos de uso, penetración en el mercado, infraestructura física, infraestructura digital.

Abstract

This article presents the use cases and adoption forecasts of the autonomous and connected vehicle to identify and prioritize the possible investment options that road administrations may have to make. To do so, this article begins by describing in general terms the technology on which the autonomous and connected vehicle is based, the levels of automation in which it is classified, and the legal framework that currently affects it. Afterwards, it gathers use cases for the autonomous vehicle, reporting on the main companies in the sector, and global forecasts and expert opinions on the schedule for the penetration of the autonomous vehicle in the circulating fleet. Finally, investment options in physical and digital infrastructure that would facilitate the implementation of the autonomous vehicle are explained, outlining a prioritization of these actions based on their strategic value and economic viability.

Keywords: Autonomous vehicle, connected vehicle, automated driving, regulation, use cases, market penetration, physical infrastructure, digital infrastructure.

1. INTRODUCCIÓN

Es extraordinario que una nueva tecnología tenga tanto potencial para influenciar nuestra economía y movilidad como tendrá el **vehículo autónomo y conectado** (VAC). Se prevé que genere nuevas oportunidades de negocio por valor de miles de millones de euros en múltiples segmentos de transporte, por lo que compañías tecnológicas, *startups*, fabricantes de automóviles y muchas otras empresas están realizando inversiones millonarias para colocarse a la cabeza de esta carrera.

Es fundamental que los legisladores y administradores de infraestructura tengan un conocimiento de este reto tecnológico y tomen decisiones con la suficiente perspectiva e información, de forma que se evite tanto lastrar el desarrollo tecnológico debido a la falta de acción, como hacer un uso desproporcionado de recursos como consecuencia de

sumarse a una fantasía colectiva alimentada por las constantes promesas disruptivas del sector. Bajo esta óptica, el presente artículo busca reflexionar sobre preguntas: ¿cómo se utilizará el VAC? y ¿cuándo será una realidad en nuestras carreteras?

Este artículo se divide en cuatro secciones en las que se repasa (1) en qué consiste la tecnología del coche autónomo, (2) qué casos de uso plantea, (3) la escala temporal de su posible adopción, y (4), de qué forma las administraciones de carreteras pueden prepararse para su adopción.

2. VEHÍCULO AUTÓNOMO

Un vehículo autónomo y conectado (VAC) es un vehículo diseñado para conducir por su entorno sin la necesidad de un conductor humano. Existe un creciente interés en esta tecnología debido al impacto que puede tener en la movilidad por su potencial para mejorar la seguridad en las carreteras, reducir la congestión del tráfico y mejorar la accesibilidad de personas con discapacidad o mayores.

La tecnología de los VAC se basa en una combinación de sensores, algoritmos de inteligencia artificial y sistemas de comunicación. Los sensores mostrados en la figura 1,

* Email: alejandro.lanuza@cedex.es

¹ Ingeniero de caminos, canales y puertos. Centro de Estudios del Transporte (CET), del CEDEX.

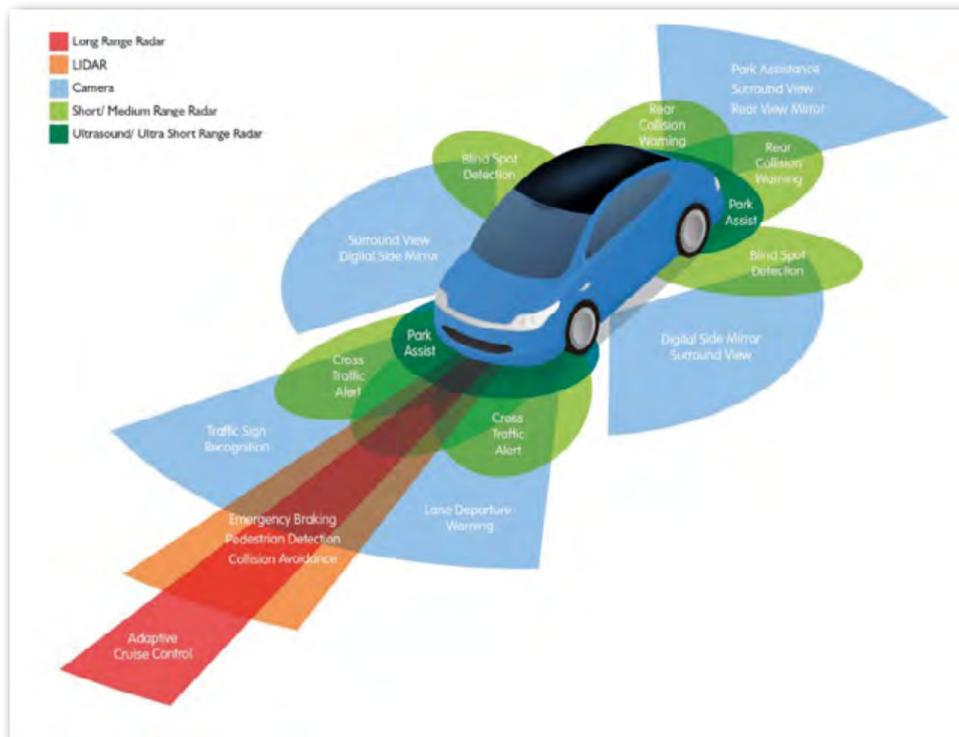


Figura 1. Sensores a bordo del VAC (Rablau, 2019).

como cámaras, radares y los LiDAR, recopilan información sobre el entorno del vehículo. Los algoritmos de inteligencia artificial utilizan esta información para tomar decisiones sobre la conducción, como el control de velocidad y la elección de rutas. Los sistemas de comunicación permiten que el vehículo se comunique con otros vehículos y con la infraestructura de la carretera y sus equipamientos.

Los mapas de alta definición (mapas HD) son también muy relevantes para el funcionamiento de los VAC, ya que proporcionan información precisa y detallada sobre el entorno en el que se mueven. Estos mapas incluyen información como la ubicación exacta de carreteras, señales de tráfico, límites de velocidad, marcas de carril y posibles obstáculos. Esta información es utilizada por el sistema de navegación del vehículo para tomar decisiones y conducir de manera segura y eficiente. No obstante, no todos los sistemas de conducción automatizada cuentan con estos elementos (Tesla en su estrategia tecnológica ha decidido optar por usar únicamente sensores visuales, prescindiendo de los LiDAR y los Mapas HD).

2.1. Niveles de automatización

A medida que la tecnología de los vehículos autónomos avanza, se están desarrollando varios niveles de automatización que van desde sistemas avanzados de asistencia al conductor (*Advanced Driver Assistance Systems, ADAS*) hasta la conducción completamente autónoma. La tabla 1 mostrada a continuación ha sido elaborada por la Sociedad de Ingenieros de Automoción (SAE) usada para clasificar el grado de automatización de los vehículos en 6 niveles (Jiménez, 2017):

- L0 (Sin automatización): todas las tareas de conducción recaen sobre el conductor humano (vehículo convencional).

- L1 (Asistencia al conductor): nivel pensado para mejorar la comodidad y seguridad de la conducción, en el que el vehículo cuenta con algún sistema ADAS, como por ejemplo mantenimiento de carril o controles de velocidad adaptativos. Actualmente, todos los coches de nueva homologación deben incorporar de serie ocho sistemas ADAS: asistente de velocidad inteligente, detector de fatiga y somnolencia, frenado de emergencia, cámara trasera con alerta de tráfico cruzado, alerta de cambio involuntario de carril, alerta de cinturón en plazas traseras, caja negra y alcoholímetro integrado.
- L2 (Automatización parcial): el vehículo controla la velocidad y el movimiento longitudinal y lateral, aunque no tiene detección y respuesta ante objetos, por lo que es necesario un conductor humano que realice los aspectos restantes de la tarea de conducción, vigilando el tráfico y controlando el vehículo en cualquier situación. Algunos ADAS, como el asistente de velocidad inteligente sitúan a los coches de nueva homologación dentro de esta categoría (De la Torre, 2022).
- L3 (Automatización condicionada): el sistema toma el control del vehículo en el movimiento longitudinal y lateral y en la detección y respuesta ante objetos, pero el conductor humano tiene que vigilar permanentemente el entorno y el sistema para poder retomar el control del vehículo en cualquier situación. Debido a los problemas de responsabilidad que esto suscita, algunas voces del sector señalan la conveniencia de saltarse este nivel de automatización y poner en funcionamiento el nivel 4 directamente después del nivel 2.
- L4 (Automatización alta): ya no es necesario que el conductor humano supervise permanentemente el sistema, pues recibirá el aviso para retomar el control

Tabla 1. Niveles de automatización según SAE

	SAE LEVEL 0	SAE LEVEL 1	SAE LEVEL 2	SAE LEVEL 3	SAE LEVEL 4	SAE LEVEL 5
What does the human in the driver's seat have to do?	You are driving whenever these driver support features are engaged – even if your feet are off the pedals and you are not steering. You must constantly supervise these support features; you must steer, brake or accelerate as needed to maintain safety.			You are <i>not</i> driving when these automated driving features are engaged – even if you are seated in “the driver's seat”. When the feature requests, you must drive. These automated driving features will not require you to take over driving.		
What do these features do?	These are driver support features			These are automated driving features		
	These features are limited to providing warnings and momentary assistance.	These features provide steering OR brake/acceleration support to the driver.	These features provide steering AND brake/acceleration support to the driver.	These features can drive the vehicle under limited conditions and will not operate unless all required conditions are met.	This feature can drive the vehicle under all conditions.	
Example Features	• automatic emergency braking • blind spot warning • lane departure warning	• lane centering OR • adaptive cruise control	• lane centering AND • adaptive cruise control at the same time	• traffic jam chauffeur	• local driverless taxi • pedals/steering wheel may or may not be installed	• same as level 4, but feature can drive everywhere in all conditions.

For a more complete description, please download a free copy of SAE J3016: https://www.sae.org/standards/content/J3016_201806/.

del vehículo con suficiente margen de tiempo. Los VAC L4 pueden funcionar en áreas específicas que generalmente están definidas por límites geográficos. Esto se define a través de los “Dominios de Diseño Operativo” (ODD), que consisten en un conjunto de reglas y restricciones que definen el comportamiento del vehículo con respecto a la seguridad (límites a la velocidad, distancia de seguimiento, límites de rutas permitidas, normas de seguridad y restricciones legales) y al rendimiento (consumo de combustible o impacto ambiental). Este nivel de automatización también incluye rutas fijas preprogramadas, como las rutas de los autobuses locales, rutas de campus y viajes similares, generalmente a baja velocidad.

- L5 (Automatización completa): el sistema toma el control total y la figura del conductor como tal no existe, por lo que el vehículo podrá carecer de vo-

lante, pedales, mandos, etc. al estar automatizado a todos los niveles. Los VAC L5 podrán funcionar en cualquier lugar dentro de un país.

2.2. Datos VAC para la gestión de carreteras

Algunas empresas de vehículos autónomos están aprovechando la información que recopilan los VAC a través de sus sensores y mapas HD para ofrecer servicios de datos a los gestores de infraestructura, como por ejemplo los mostrados en la figura 2: inventarios de elementos viales, inspección dinámica, monitorización del estado del pavimento o la obtención de datos de movilidad (<https://ims.mobileye.com/data/en/>). Toda esta información puede ayudar a mejorar la gestión de carreteras, aunque todavía es necesario validar y estudiar su aplicabilidad de forma complementaria a las técnicas existentes.



Figura 2. Servicio de datos para la inspección de carreteras asistida por IA (Fuente: <https://ims.mobileye.com/data/en/>).

2.3. Normativa sobre conducción autónoma

2.3.1. Reglamentos y Estrategias de la Comisión Europea

El marco regulatorio del vehículo autónomo y conectado ha experimentado una gran evolución en los últimos años conforme se ha ido desarrollando la tecnología. Las principales normativas y estrategias dedicadas al vehículo autónomo son las siguientes (CCAM, 2023):

- 2016: Estrategia europea en Sistemas Inteligentes de Transporte Cooperativos (C-ITS).
- 2017-2018: Europa en movimiento: la Comisión Europea toma medidas en pro de una movilidad limpia, competitiva y conectada.
- 2018: Camino a una movilidad automatizada: una estrategia de la UE para la movilidad del futuro.
- 2019: El Pacto Verde Europeo.
- 2019: Reglamento (UE) 2019/2144 sobre la Seguridad General de los Vehículos: introduce una serie de sistemas avanzados de asistencia al conductor (ADAS) con carácter obligatorio, desde su entrada en vigor el 6 de julio de 2022, en todos los coches de nueva homologación con el fin de mejorar la seguridad vial. Además, es la primera regulación en todo el mundo que establece el marco jurídico para la homologación de tipo de vehículo totalmente autónomo (nivel 4). Este reglamento faculta a la Comisión para completar el marco jurídico de los vehículos automatizados y conectados.
- 2020: Estrategia Europea de Movilidad Sostenible e Inteligente.
- 2022: Proyecto de Reglamento de la Unión Europea sobre Sistemas de Conducción Automatizada (ADS) (EU) 2022/1426 (IGARR, 2022): establece la normativa para aplicar el Reglamento (UE) 2019/2144 antes mencionado, en lo que respecta a la homogeneización de procedimientos y especificaciones técnicas para la homologación de tipos de Sistemas de Conducción Automatizada (*Automated Driving Systems*, ADS) de los vehículos totalmente automatizados.

Este proyecto de Reglamento establece las especificaciones técnicas, los requisitos de evaluación y ensayo, así como los requisitos administrativos necesarios para la homologación de tipo del sistema de conducción automatizada de los vehículos totalmente automatizados para tres casos de uso:

- a) Vehículos totalmente automatizados diseñados y fabricados para el transporte de pasajeros o mercancías en una zona predefinida en un entorno urbano o suburbano.
- b) “Hub-to-hub”: vehículos totalmente automatizados o vehículos bimodo autónomo-manual, diseñados y fabricados para el transporte de pasajeros o mercancías en una ruta predefinida con puntos fijos de inicio y final de un viaje, que pueden incluir un entorno urbano, suburbano o de autopista.

- c) “Servicio de aparcacoches automatizado”: vehículos de modo bimodo autónomo-manual con un modo de conducción totalmente automatizado para aplicaciones de estacionamiento dentro de instalaciones de estacionamiento predefinidas.

2.3.2. Normativa del Comité Europeo de Normalización (CEN)

En el marco del Comité Técnico CEN/TC 226 “Equipamientos Viales” existe un Grupo de Trabajo (WG 12) relativo a la interacción entre la carretera y los sistemas avanzados de ayuda al conductor (ADAS) y los vehículos autónomos. Dentro de este Grupo de Trabajo se ha elaborado un Informe Técnico (*Technical Report*), el CEN/TR 17828:2022 titulado “Road infrastructure - Automated vehicle interactions - Reference Framework Release 1” que analiza las acciones de estandarización que son necesarias para el despliegue de aplicaciones y casos de uso prioritarios a corto plazo en el contexto del despliegue de vehículos automatizados desde el nivel 1 de SAE hasta el nivel 5 de SAE.

Por otra parte, cabe destacar el CEN/TC 278 “Estandarización de ITS” gestiona la preparación de normas en el campo de los Sistemas Inteligentes de Transporte (ITS) en Europa. Sirve como plataforma para que las partes interesadas europeas intercambien conocimientos, información, mejores prácticas y experiencias en ITS. Y el Comité UNE/CTN 159 “Sistemas inteligentes de transporte” se dedica a la normalización de la telemática aplicada al transporte y circulación por carretera en España.

2.3.3. Normativa española

En el ámbito nacional destaca la siguiente regulación:

- 2021: Estrategia de Movilidad Segura, Sostenible y Conectada 2030 del MITMA (Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana): establece en el Eje 5 “Movilidad Inteligente” la Línea de Actuación 5.3., dedicada al impulso de los vehículos conectados y autónomos.
- 2022: Instrucción VEH 2022/07 sobre “Autorización de pruebas o ensayos de investigación realizados con vehículos de conducción automatizada en vías abiertas al tráfico en general” (DGT–Ministerio del Interior): establece un procedimiento para solicitar autorización a la Dirección General de Tráfico para la realización de una prueba o ensayo de investigación extraordinarios en vías de uso público.
- 2022: Anteproyecto de Ley de Movilidad Sostenible (MITMA): su Título V sobre “Innovación, digitalización y formación en el transporte y la movilidad”, y más concretamente el Capítulo I de espacio controlado de pruebas para la movilidad y el Capítulo II de vehículo automatizado, contemplan la regulación del vehículo autónomo y establece un procedimiento para la realización de pruebas en vías públicas.

3. CASOS DE USO

La adopción de los VAC depende de cuatro factores principales: la regulación, la preparación tecnológica, el atractivo del caso de negocio y la preferencia del cliente. A su vez, la preferencia del cliente depende en gran medida del coste de estos servicios VAC en comparación con otros modos de transporte (Heineke *et al.*, 2022).

Tradicionalmente se ha señalado la mejora de la seguridad en las carreteras y la reducción de la congestión del tráfico como los principales beneficios de la conducción automatizada. Sin embargo, estos beneficios sólo se conseguirán en fases tardías, cuando los porcentajes de penetración del VAC circulante sean altos. A modo de ejemplo, L3Pilot, el proyecto europeo que busca probar la viabilidad de la conducción autónoma a través de pruebas piloto a gran escala prevé que la conducción autónoma reduzca los accidentes de circulación hasta un 15 % cuando el 30 % de los vehículos circulantes utilice esta tecnología (Cassauwers, 2022). Además, el vehículo autónomo probablemente se desplegará primero en las vías de gran capacidad, que son las que menos accidentes tienen (el 25 % de los accidentes se producen en autopistas y autovías (OTLE-MITMA, 2022).

La implantación y despliegue de servicios de transporte con VAC, por tanto, va a depender principalmente del valor comercial de su implantación, es decir, de su capacidad de reducir el coste repercutido en el usuario final (fundamentalmente proveniente de la mano de obra en conductores). En los casos en los que el coste del conductor repercute de forma significativa en el usuario final, como por ejemplo en el taxi, el beneficio de automatizarlo será mayor. Por el contrario, los modos de transporte colectivo en los que el coste del conductor constituye un pequeño porcentaje del coste repercutido al usuario, como en trenes o autobuses interurbanos, la automatización no genera un gran beneficio. Un ejemplo claro es el metro de Barcelona, que a pesar de que su Línea 9 del metro es autónoma desde su creación en 2009 (es decir, existe la tecnología para automatizarlo), el poco peso que representa el coste del conductor en el transporte, unido al riesgo que supone un posible fallo tecnológico, disuaden de la automatización en el resto de líneas convencionales.

En la figura 3 se muestran las tipologías de casos de uso que se explican a continuación.

	Personas	Mercancías
Urbano	 <p>Robotaxis (Baidu Apollo robotaxi)</p>  <p>Autobús autónomo (Alsa)</p>	 <p>Vehículos de entrega de último kilómetro (Starship)</p>
Interurbano	 <p>Vac para particulares (Tesla)</p>	 <p>Transporte de mercancías (Waymo)</p>

Figura 3. Casos de uso de VAC.

3.1. Transporte de viajeros

3.1.1. Robo-taxi

El taxi, como se puede apreciar en la figura 4, es el medio de transporte con mayores costes para el usuario final y, por tanto, donde la implantación del vehículo autónomo tiene mayor importancia comercial. Al eliminar al conductor de la ecuación las ganancias de los robo-taxis se dispararían, y es por esto por lo que el robo-taxi puede ser el gran protagonista de la conducción autónoma.

Las principales empresas que compiten en desarrollar la conducción autónoma se están centrando en este servicio de transporte:

- Uber: empresa pionera en el desarrollo del VAC, trabajaba desde 2015 en un sistema llamado “Uber Advanced Technologies Group” (ATG) para investigar y desarrollar la tecnología. Su estrategia de negocio se centra en el desarrollo de robotaxis, dado que su especialización en servicios VTC (Vehículo de Transporte con Conductor) apenas obtiene ganancias, y su financiación depende de su credibilidad a la hora de convencer al inversor de su capacidad de desarrollar esta tecnología. Aun así, varios contratiempos costosos, y la trágica muerte de un peatón de Arizona en 2018, llevaron a Uber a vender en 2020 su operación VAC a Aurora, alineada con Toyota.
- Aurora: *startup* creada en 2017, compró en 2020 la división de desarrollo VAC de Uber y está asociada con fabricantes como Volvo, entre otros. Centra sus soluciones comerciales en dos líneas de producto: Aurora Horizon, especializada en camiones autónomos, y Aurora Connect, solución de robo-taxi. Esta empresa centrada en suministrar la “Conducción como Servicio” planea disponer de soluciones comerciales a partir de 2024.
- Waymo: una subsidiaria de Alphabet (el grupo empresarial de Google), Waymo ha estado trabajando en tecnología de vehículos autónomos desde 2009 y se

ha convertido en el líder indiscutible en la carrera de los taxis robotizados de EE. UU. Ha recaudado miles de millones de capital privado y opera una flota de unos 600 taxis robotizados nivel 4 sin conductor en Phoenix, Arizona, con el objetivo de expandirse por Los Ángeles y San Francisco, en California.

- Apollo Go: es el programa de taxis autónomos del gigante chino Baidu (el “Google” usado en el país asiático). Para 2023 se espera que haya una flota de más de 3000 vehículos nivel 4 de prueba en 23 ciudades chinas. Este país cuenta con un marco regulatorio más favorable para los empresarios y con menos limitaciones en cuanto a la seguridad, lo cual favorece el desarrollo del ecosistema empresarial y tecnológico del coche autónomo VAC, posicionándose como un fuerte competidor.
- Mobileye: antiguo socio de Tesla, Mobileye es una empresa israelí comprada por Intel por \$15 mil millones en 2017. Su estrategia se centra en otorgar licencias de su hardware y software autónomo a fabricantes de automóviles como BMW, Volkswagen y Nissan, lo que resuelve problemas como la producción en masa y la comercialización de vehículos. Una de las grandes ventajas es que sus desarrollos se podrían utilizar tanto en vehículos privados como en modelos públicos de viajes compartidos.

3.1.2. Autobús autónomo (robo-shuttle)

A modo de servicio híbrido entre el microbús urbano y el taxi, algunas empresas están desarrollando vehículos de 4 a 12 plazas destinados a proporcionar un servicio de transporte sin conductor, más flexible que el transporte público regular y sin los altos gastos generales de la propiedad de un automóvil privado. Este modelo de vehículo dirigido al servicio de transporte compartido permite a los fabricantes instalar los sensores LiDAR más recientes y costosos, mientras que, si se instalaran en turismos convencionales, quedarían fuera del rango de precios asumible por los consumidores.

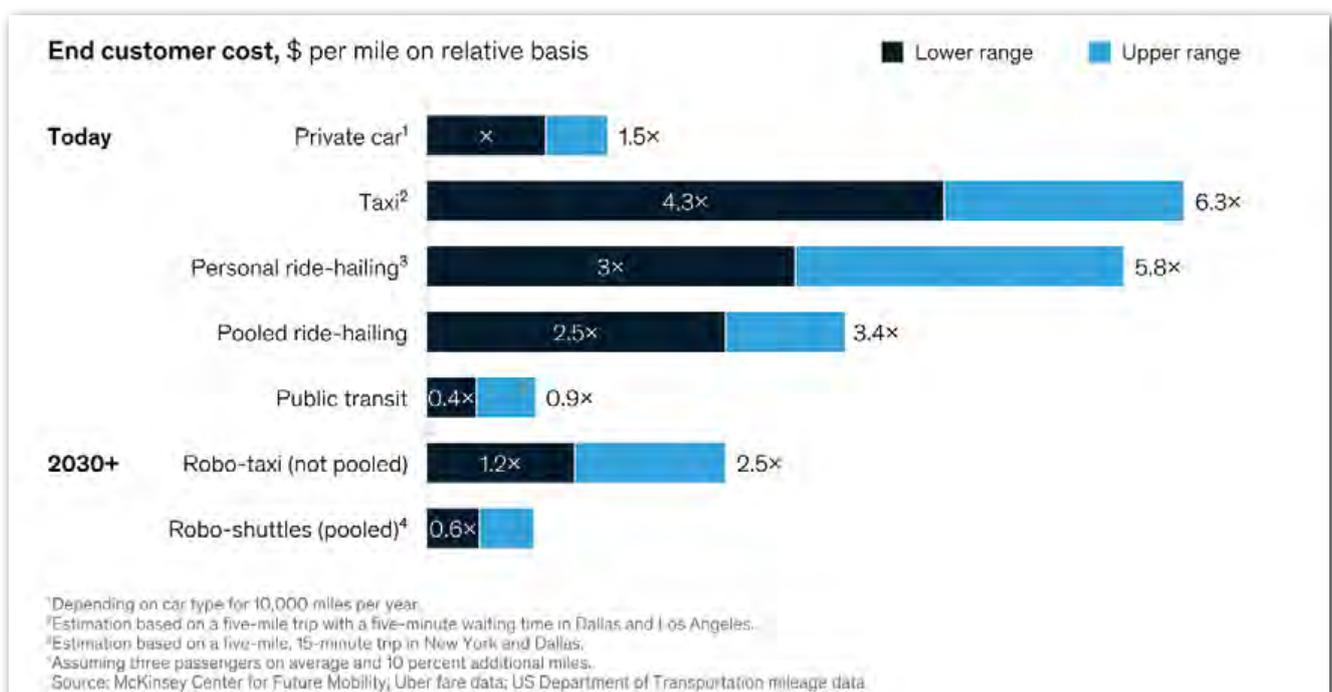


Figura 4. Costes de movilidad para el usuario final (Heineke et al., 2022).

Al igual que el robo-taxi, este servicio de transporte autónomo está dirigido a cifras reducidas de pasajeros, ya que en modos de transporte colectivo de mayores dimensiones (autobús o incluso tren) el coste del conductor dividido entre el número de viajeros hace que la implantación de un sistema autónomo no tenga sentido comercial.

Existen multitud de empresas que están desarrollando *robo-shuttles*, dos ejemplos son:

- Navya: *startup* francesa con 280 empleados en Francia, EE. UU. y en Singapur. Desde 2015 ha sido la primera en comercializar y poner en servicio soluciones de movilidad autónoma. Cuenta con un servicio de autobús autónomo llamado Autonom Shuttle para el transporte de pasajeros, que está en uso en ciudades de más de 23 países. Asimismo, cuentan con un vehículo llamado *Autonom Tract* que está diseñado para el transporte de mercancías.
- 2GetThere: empresa holandesa subsidiaria de ZF Group, está especializada en autobuses autónomos. Cuenta con proyectos en Ámsterdam, Bruselas y la futurista ciudad de Masdar en los Emiratos Árabes Unidos.

3.1.3. Vehículo particular autónomo

La preferencia del cliente por la adquisición de un VAC particular dependerá fundamentalmente de la relación entre el coste del vehículo y la mejora de la experiencia de conducción. En los vehículos privados el coste del conductor es nulo, por lo que el cliente valorará adquirir un VAC cuando el valor subjetivo que asocia a la mejora de la experiencia de conducción supere el coste adicional que supone un VAC. En un sistema de nivel 2, el coste de los componentes de las funciones avanzadas está actualmente en el rango de 1.000 € a 2.000 €. En un sistema de nivel 3, en el que se requieren sensores adicionales, fusión sensor-datos, mayor potencia de cálculo y redundancia en la actuación, los componentes podrían costar hasta 5.000 €, más las licencias de *hardware* y *software* y los sistemas de seguridad requeridos en el momento del lanzamiento del sistema, que en el caso del “Autopilot” (considerado nivel de automatización 2+) de Tesla asciende a 8.000 € (Doll *et al.*, 2020).

En cualquiera de los casos, el aumento del coste de los vehículos convierte las características avanzadas de la conducción autónoma en una funcionalidad de alta gama, sólo al alcance de los consumidores más pudientes. Es decir, los productores enfocados al mercado masivo probablemente no buscarán las características avanzadas de conducción autónoma a corto y mediano plazo.

Algunas empresas que están especializándose en este segmento son:

- Tesla: su “Autopilot” está considerado como un nivel de automatización 2+, que requiere la atención del conductor en todo momento, sin soltar el volante.
- Mercedes: su “Drive Pilot” de nivel 3 se espera que sea aprobado este febrero de 2023 por las autoridades automovilísticas del estado de Nevada, EE. UU. En esta funcionalidad el conductor tiene diez segundos para retomar el control del coche en caso de que el sistema lo requiera o detendrá automáticamente el vehículo y encenderá las luces de emergencia.

3.2. Transporte de mercancías

3.2.1. Distribución de mercancías de último kilómetro

De forma similar al transporte de viajeros, el mayor interés comercial se encuentra en aquellos casos en los que es necesario un repartidor para una mercancía de volumen (o peso) reducido, y eso se da en la llamada distribución de último kilómetro (o última milla) de mercancías.

Esta modalidad de transporte autónomo es de máxima rentabilidad cuando las distancias de transporte son amplias, es decir, en zonas residenciales de baja densidad, como los suburbios residenciales de EE. UU., donde las distancias son largas y las calles homogéneas. En Europa, y particularmente en España, donde contamos con núcleos de población muy densos, esta opción de transporte presenta dudas, dadas las dificultades tecnológicas de la Inteligencia Artificial para identificar zonas de depósito seguro de mercancías o problemas de robo o vandalismo.

Algunas empresas que están especializándose en este segmento son:

- Amazon Scout: es un vehículo de 6 ruedas del tamaño de una nevera pequeña que se mueven “a ritmo de caminata” por la acera, que Amazon lleva probando en diversas ciudades de EE. UU. desde 2019. Estos dispositivos se detienen en la puerta del domicilio de los usuarios para que estos recojan sus pedidos.
- Goggo Network: *startup* alemana creada en 2018, se especializa en robots de entrega de baja velocidad optimizados para vecindarios residenciales del mismo estilo que los de Amazon Scout. Cuenta con proyectos de entrega de última milla en Francia y España.

3.2.2. Transporte con camiones autónomos

Alrededor del 70 % de las mercancías en los EE. UU. viajan por camión, cifra que asciende al 96 % en España (OTLE-MITMA, 2022), por lo que cualquier sistema que reduzca los costes, sin sacrificar la seguridad, cambiaría las reglas del juego. Se estima que las tecnologías de conducción autónoma podrían reducir el coste total del transporte de larga distancia por camión en más de un 30 % mediante el ahorro de mano de obra y el aumento de la eficiencia de conducción (Collie *et al.*, 2022). Esto, unido a la falta de relevo generacional en los conductores de este tipo de vehículos y la mayor simplicidad de circulación en vías interurbanas de gran capacidad, hace que exista un creciente interés en el desarrollo de los camiones autónomos. Aun así, las desventajas potenciales son mayores: un camión totalmente cargado conduciendo a 100 km/h puede causar un gran daño si algo sale mal.

La tecnología actual hace muy difícil transitar por vías urbanas, por lo que las empresas especializadas en transporte de mercancías autónomo están siguiendo el modelo “Transfer-Hub” en el que el trayecto se divide en dos partes: unos tramos en entornos urbanos, recorridos con conductores humanos que recogen y llevan la mercancía hasta un centro de operaciones a las afueras de la ciudad, donde toma el relevo el sistema de conducción autónomo que conecta una red de terminales (Adler, 2021).

Algunas empresas que están especializándose en este segmento son:

- TuSimple Autonomous Trucking: fundada en 2015, esta empresa californiana es líder en el segmento de camiones autónomos. Cuenta con una red de terminales de carga (*Autonomous Freight Network, AFN*) en el cinturón del sol de EE. UU. (figura 5) entre las que operan sus camiones autónomos. Cuenta con una flota de más de 100 vehículos en servicio, tiene pedidos de 7.500 camiones autónomos nivel 4 y ha realizado colaboraciones con grandes operadores de transporte y logística. Asimismo, en Europa están colaborando en un proyecto piloto con el fabricante sueco de vehículos pesados SCANIA para transportar mercancías en condiciones normales de tráfico a lo largo de 300 km, entre centros logísticos ubicados en las ciudades de Södertälje y Jönköping, con la primera y última milla manejada manualmente (<https://www.tusimple.com/>).
- Waymo Via: Es la apuesta tecnológica de Waymo por los camiones autónomos. Cuenta con zonas de pruebas en los estados de Texas, Arizona, California, Ohio y Michigan, en EE. UU., y está asociado con los grandes operadores logísticos.
- Aurora: Su línea de producto Aurora Horizon está especializada en los camiones autónomos y cuenta con proyectos piloto en Texas, con el objetivo de expandirse por el cinturón del sol de EE. UU. siguiendo el

modelo “Transfer-Hub”. Esta empresa centrada en proporcionar la “Conducción como Servicio” planea disponer de soluciones comerciales a partir de 2024.

3.2.3. Transporte con ferrocarriles autónomos

Con objeto de combinar la sostenibilidad del sistema ferroviario y la flexibilidad del transporte por carretera, la empresa Parallel Systems (<https://moveparallel.com/>) está conceptualizando una nueva arquitectura de transporte ferroviario. Concibe el transporte de mercancías por ferrocarril como una serie de vehículos portacontenedores que pueden autoensamblarse en ruta formando un pelotón, sin la necesidad de formar grandes convoyes, que hagan el servicio económico.

El ferrocarril es actualmente un medio de transporte adecuado para el transporte de mercancías de grandes volúmenes a largas distancias. En contraposición a esto, la solución propuesta por Parallel Systems permitiría atender a un transporte de corta y media distancia, liberando espacio de las autopistas, aprovechando las redes ferroviarias de media distancia infrautilizadas, mediante la construcción de microterminales cerca de los cargadores y clientes, que requieren mucha menos superficie que una terminal tradicional (figura 6).

Parallel Systems está probando actualmente su prototipo Mark 1 en un tramo de tramo de vía de 3 millas en Fillmore,



Figura 5. Red de terminales de carga de TuSimple (Fuente: <https://www.tusimple.com/>).



Figura 6. Sistema autónomo de transporte por ferrocarril de Parallel Systems.

California, que utiliza tecnología VAC autónoma para la propulsión. A fecha de enero de 2022, esta compañía californiana fundada por antiguos ingenieros de SpaceX, contaba con una financiación de \$53.15 millones.

4. ESCALA TEMPORAL DE SU PENETRACIÓN

Para determinar las necesidades de infraestructura que pueda llegar a requerir los niveles más altos de automatización, es necesario realizar previsiones sobre el grado de adopción de esta tecnología. La penetración de los vehículos autónomos en el mercado es un tema muy debatido en la industria automovilística y en las empresas tecnológicas. Los expertos tienen opiniones diversas sobre cuándo se alcanzará la masa crítica de adopción de los vehículos autónomos y la velocidad a la que esto sucederá.

4.1. Pronósticos globales

Existen multitud de pronósticos sobre la penetración del VAC en el mercado (S&P Global, 2020; CPCatapult, 2020). Un ejemplo de ellos es el realizado por el experto en el sector automotriz S&P Global/IHS Markit, que estima que alrededor de 4,5 millones de VAC nivel 3 (y algunos con funciones de nivel 4) estarán en circulación para 2030, tal y como indica la figura 7. En el caso de los vehículos autónomos de nivel 4 y superiores, IHS Markit prevé de forma muy optimista una flota de aproximadamente

5,5 millones para 2030, como muestra la siguiente figura (derecha). Se espera que estas flotas previstas estén compuestas principalmente por taxis robotizados y vehículos utilizados para servicios de alquiler y de transporte en lugar de los vehículos privados.

Sin embargo, las tendencias de pronósticos de penetración de mercado tienden a ser actualizadas constantemente y pospuestas para una fecha posterior, lo que genera una incertidumbre significativa en torno al tiempo de llegada de vehículos altamente automatizados (nivel 3 y superior) al mercado. Por ejemplo, Tesla anunció por primera vez su objetivo de lanzar vehículos autónomos nivel 5 en 2018 y desde entonces ha pospuesto esta fecha en repetidas ocasiones.

4.2. Opiniones de expertos y otros agentes del sector

Austrroads, en su informe de 2022 *Minimum Physical Infrastructure Standard for the Operation of Automated Driving. Scenarios for Potential Availability and Usage of Different Levels and Types of Automated Driving* (Xue et al., 2022), lleva a cabo una serie de consultas con agentes y expertos del sector con objeto de obtener sus puntos de vista sobre los futuros escenarios de conducción y obtener su opinión sobre problemas de la disponibilidad de las tecnologías VAC, la demanda de esta tecnología y las necesidades de infraestructura física para permitir la implementación de VAC (tabla 2).

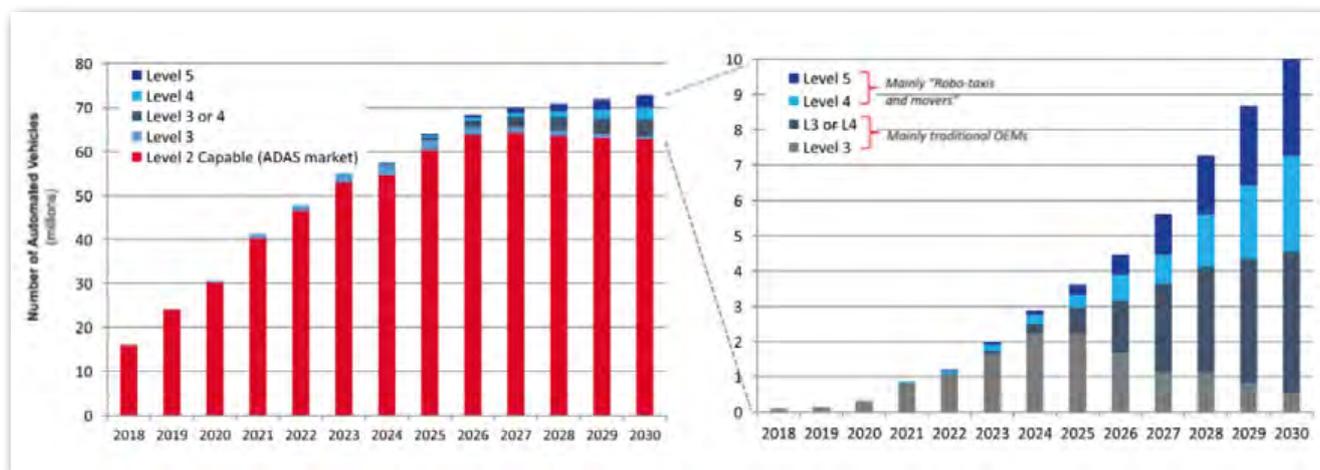


Figura 7. Crecimiento del mercado global de VAC (Doll et al., 2020).

Tabla 2. Grupos industriales consultados por Austrroads (Xue et al., 2022)

Sector	Organisation
OEMs	Tesla and Lexus
AV sensor technology vendors	Mobileye
AV-related technology vendors	Kapsch, HERE, Cisco, Transmax
AV trial leaders	Easymile, Centre for Accident Research and Road Safety – Queensland (CARRS-Q)
Automotive industry	ANCAP, Australian Federal Chamber of Automotive Industry
Insurance companies	Insurance Australia Group (IAG), Suncorp
Freight vehicle industry	Aramex (urban logistics), Australian Trucking Association
Australian researchers	QUT, UNSW, University of Melbourne, ADVI, TAS DCRC, Private Consultants
International experts	European Commission, FHWA, EuroRAP, Singapore Land Transport Authority

4.2.1. Vehículos de pasajeros

El coste de propiedad de los VAC durante los primeros años será seguramente alto, por lo que los consultados compartieron la opinión de que es más probable que los consumidores usen primero los VAC como un servicio a demanda en lugar de adquirirlos. Esta opinión es coherente con la literatura que apunta que el modelo de propiedad de automóviles cambiará de modo que los servicios de transporte bajo demanda, como los robo-taxis, sustituirán una parte significativa de los viajes que antes se realizaban en vehículos privados.

Dado el alto coste total de propiedad de los vehículos automatizados, la mayoría de los consultados estimó un calendario de:

- 5 a 10 años para el despliegue a gran escala del nivel 3 en las carreteras y áreas metropolitanas de las grandes ciudades.
- 10 a 20 años para el despliegue del nivel 4 en áreas urbanas y el nivel 3 en áreas rurales.
- 20 a 40 años para aplicaciones de nivel 5.

4.2.2. Vehículos de mercancías de larga distancia

El pelotón de camiones (*platooning*) y la automatización reducirían los costes de explotación y contribuirían a mejorar la seguridad, ya que los vehículos pesados funcionan durante más horas y viajan distancias más largas. Teniendo en cuenta que el ciclo de vida promedio del vehículo pesado es más corto que el de los automóviles de pasajeros, la evolución de los ADAS y la automatización puede ocurrir más rápido de lo esperado. Por ello, es probable que el transporte por carretera sea uno de los primeros casos de uso para la autonomía en el segmento comercial (Heineke *et al.*, 2021), pero sólo en dominios de diseño operativo limitado (puertos, almacenes, caminos rurales de poco tráfico o limitado a operaciones nocturnas), y en el transporte de mercancías pesadas de larga distancia. Por otra parte, existen barreras para su implementación, como son las restricciones regulatorias, la menor aceptación pública y las preocupaciones de seguridad.

4.3. Pronóstico de vehículos circulantes

Austrroads en su informe de 2022 *Minimum Physical Infrastructure Standard for the Operation of Automated Driving. Scenarios for Potential Availability and Usage*

of Different Levels and Types of Automated Driving (Xue *et al.*, 2022), realiza un pronóstico sobre la venta de vehículos altamente automatizados. A corto plazo (antes de 2030), prevén que los automóviles de pasajeros altamente automatizados y los taxis robotizados estarán disponibles comercialmente, sin embargo, representarán solo el 5 % de las nuevas ventas. Se espera que entre 2030 y 2035 los autobuses y camiones autónomos de larga distancia estarán disponibles comercialmente.

En la siguiente gráfica de la figura 8, Austrroads (Xue *et al.*, 2022) ilustra una posible cronología de penetración en el mercado de los vehículos de pasajeros, teniendo en cuenta el índice de venta de nuevas flotas, el crecimiento anual del mercado (una tasa per cápita constante basada en pronósticos de crecimiento demográfico bajo, medio y alto) y una vida útil promedio de los vehículos de pasajeros de 10 años.

Particularizando los datos al escenario español (edad media del parque de vehículos de 13,5 años, PIB y PIB *per cápita* estancado y un crecimiento demográfico decreciente hasta 2050 por una natalidad muy baja) cabe pensar que España se podría situar en un lugar más cercano al escenario más conservador (en rojo en la figura 8).

4.4. Quién ganará la carrera por los VAC: China, EE. UU. o Europa

Es difícil determinar con certeza quién ganará en el desarrollo tecnológico del vehículo autónomo, ya que depende de muchos factores, como la inversión, la regulación y la infraestructura.

China tiene una gran base de ingenieros y trabajadores altamente capacitados en las tecnologías de inteligencia artificial y robótica. Además, el gobierno chino ha proporcionado un fuerte apoyo político y financiero para el desarrollo de la industria del vehículo autónomo, estableciendo un marco regulatorio más favorable para los empresarios del país, lo cual acelera el desarrollo de los sistemas de conducción autónoma avanzados.

Los EE. UU. también tienen una gran fortaleza en el desarrollo del vehículo autónomo, ya que cuenta con un gran número de empresas líderes en tecnología, como Google y Tesla, que están invirtiendo fuertemente en esta área. Además, las regulaciones de los EE. UU. en esta área son ampliamente consideradas como algunas de las más progresistas del mundo.

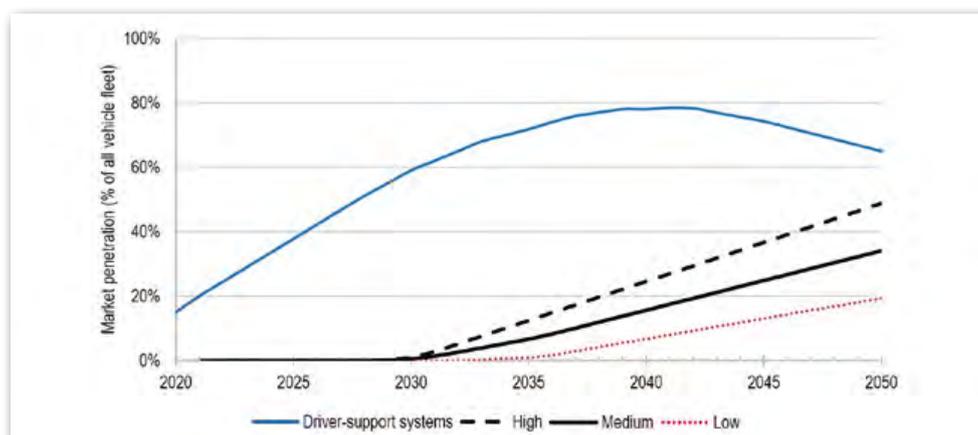


Figura 8. Pronóstico de penetración de VAC en la flota de vehículos circulantes (Xue *et al.*, 2022).

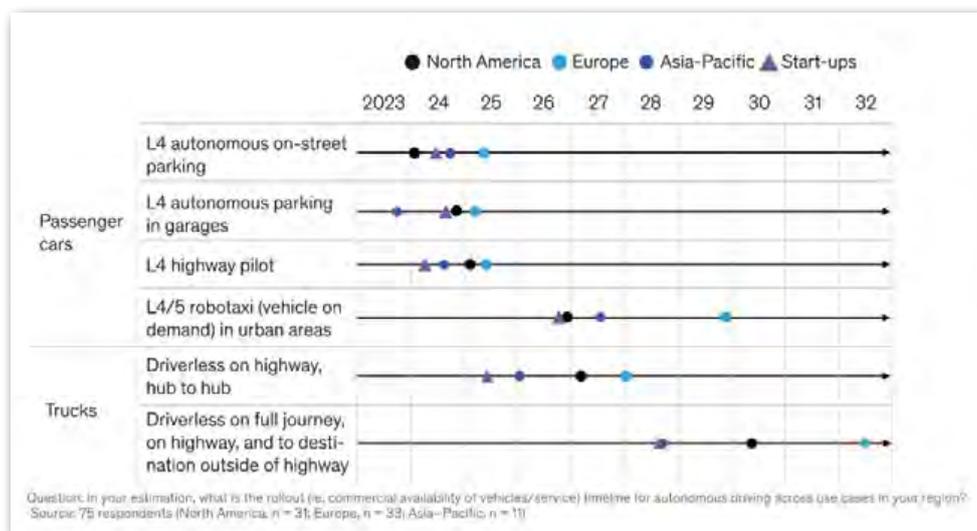


Figura 9. Cronograma de despliegue tecnológico por continente (Heineke et al., 2021).

Europa cuenta con varios fabricantes de automóviles líderes en el mundo, como Mercedes-Benz, BMW y Volvo, que están realizando fuertes inversiones en esta tecnología. Además, las regulaciones de la Unión Europea en esta área son muy exigentes, lo que proporciona una buena cobertura jurídica para las pruebas y el uso de estos vehículos en carreteras públicas. Sin embargo, los principales desarrolladores de VAC en Europa son en su mayoría pequeñas empresas que están cerrando o siendo absorbidas por empresas más grandes provenientes de fuera de la UE, como Microsoft, Google, Baidu o General Motors, capaces de sostener las inversiones necesarias sin necesidad de asegurar ingresos rápidos.

Existe una carencia, por tanto, de grandes empresas tecnológicas que puedan competir claramente por el liderazgo en el sector, así como una mayor aversión al riesgo en la inversión europea y una creciente demanda de profesionales de perfiles tecnológicos, lo que facilita su movilidad a mercados mejor remunerados como el estadounidense (Europa tiene el objetivo de aumentar el número de especialistas TIC de los 8,4 millones de 2020 hasta los 20 millones en 2030 (CE, 2021)). Estas condiciones hacen que Europa tenga una posición difícil en la competición a corto plazo por el liderazgo. Sin embargo, el modelo de desarrollo tecnológico de la UE basado en asociaciones entre el sector público y privado propicia un enfoque conjunto que avanza de una forma más lenta pero más firme, en contraposición al modelo americano basado en la unilateralidad de la iniciativa privada.

En general, se puede esperar que EE. UU. o China lideren el camino en el desarrollo de vehículos autónomos a corto-medio plazo, pero también es probable que se vean cambios en las tendencias y posiciones de liderazgo en el futuro, dependiendo de la inversión, la regulación y la innovación en este campo.

5. ADAPTACIÓN DE LA INFRAESTRUCTURA AL VEHÍCULO AUTÓNOMO

Con objeto de facilitar la implantación y futuro despliegue del vehículo autónomo es importante identificar y evaluar posibles cambios en la infraestructura que permitan respaldar su operación, de manera que la infraestructura

no obstaculice ni retrase su adopción. Para ello, se han de tener en cuenta los futuros escenarios de despliegue del VAC, la incertidumbre tecnológica que todavía existe y los posibles cambios de infraestructura necesarios, lo cual nos permite realizar una priorización de inversión.

5.1. Inversiones en infraestructura física

Astroads, en su informe de 2022 *Minimum Physical Infrastructure Standard for the Operation of Automated Driving Part D. Economic Analysis of Investment Options* (Xue et al., 2022), identifica posibles cambios en la infraestructura física para su adaptación al vehículo autónomo:

- **Señalización horizontal:** desempeña un papel fundamental para respaldar la operación de los VAC, que se basan en la visión artificial para navegar dentro de los límites de la calzada y del carril. En algunos casos, puede ser necesario invertir en señalización horizontal para adecuar la retrorreflexancia (EuroRAP, 2013), pero en la mayor parte de las carreteras de la Red del Estado bastaría con vigilar que se cumplen las disposiciones actuales en cuanto a niveles de retrorreflexión a lo largo de la vida útil de la marca vial, contenidas en el PG-3 (Leal, 2020). Esta inversión beneficia tanto a los vehículos convencionales como a los VAC.
- **Señalización vertical:** es necesario asegurar la visibilidad, homogeneidad y buen estado de la señalización vial, ya que la conducción autónoma seguirá dependiendo de la lectura de estas señales en combinación con otras herramientas de navegación como los mapas de alta definición. Esta inversión ayudará a reducir la probabilidad de errores de reconocimiento por parte de los VAC, beneficiando tanto a los vehículos convencionales como a los VAC.
- **Señalización de zonas de obras:** contempla sistemas de señalización inteligente para acomodar la presencia de VAC en las zonas de obras, tales como señales digitales, sensores, dispositivos de monitorización y comunicación. Un sistema de señalización inteligente beneficiaría tanto a los vehículos convencionales como a los VAC.

cionales como a los VAC. Actualmente la plataforma DGT 3.0 trabaja en un sistema de conos conectados para obras.

- **Semáforos:** reemplazo de la cabeza de los semáforos para mejorar su visibilidad por parte de los vehículos equipados con tecnología de visión artificial. Una de las barreras identificadas es que los VAC sean capaces de encontrar e interpretar, mediante procesamiento de imágenes, los semáforos que son aplicables. Para ello, pueden ser asistidos por mejoras en los dispositivos de semaforización, ya que, incluso cuando se utilizan herramientas como los mapas de alta definición y los C-ITS, los VAC siguen necesitando contrastar el estado de las luces de los semáforos con sus sistemas de visión. Esta inversión podría mejorar también la visibilidad de los semáforos para los conductores humanos, por lo que beneficiaría tanto a los VAC como a los vehículos convencionales.
- **Paradas VAC:** proporcionaría un área segura para la subida y bajada de pasajeros de los VAC en áreas urbanas. Esta medida solo beneficiaría a los VAC, ya que los vehículos convencionales no podrían acceder a estas instalaciones al impedir/desplazar el acceso de los VAC.
- **Enlaces a distinto nivel:** la separación a distinto nivel es una posible solución para evitar choques en nudos no señalizados a lo largo de carreteras en áreas urbanas e interurbanas. La separación a distinto nivel puede reducir la cantidad de colisiones en estos lugares donde la tecnología de conducción autónoma en la vía secundaria no puede dar preferencia de paso al tráfico que se aproxima en la vía principal como lo hacen los conductores humanos. De esta medida se beneficiarían tanto los vehículos convencionales como los VAC, aunque por lo general es una solución de alto coste.
- **Zonas de parada segura:** permitirían a los VAC estacionar de manera segura en el lateral de una carretera interurbana de alta capacidad durante un accidente u otros incidentes inesperados. Se trata esencialmente de espacios de estacionamiento donde un vehículo puede detenerse sin correr el riesgo de colisiones. Tanto los vehículos convencionales como los VAC podrían acceder a las zonas de parada segura durante un incidente, saliendo ambos beneficiados de dicha inversión.
- **Puentes y pavimentos:** posible necesidad de invertir en su refuerzo para soportar el aumento de cargas debido a la formación de pelotones de camiones (*platooning*).
- **Carril dedicado VAC:** carril dedicado para respaldar el funcionamiento de los VAC que dan servicio de transporte colectivo, como los robo-taxis o robo-buses. Esta medida sólo sería beneficiosa para los vehículos sin conductor.
- **Carril dinámico dedicado para camiones VAC:** consistiría en la instalación de tecnología de asignación dinámica en carriles existentes para dar servicio a los camiones VAC. Esta inversión proporcionaría unos beneficios de seguridad y un ahorro de tiempo de viaje.

- **Aparcamientos VAC remotos y hubs de movilidad:** permiten que los VAC que conducen solos estacionen en una instalación de estacionamiento remota.

La siguiente tabla (tabla 3), elaborada a partir de la información recogida en el informe de Austroads, agrupa dichos elementos de inversión en cuatro clases:

- Clase 1: mejoras de la infraestructura existente que pueden beneficiar tanto a los vehículos autónomos y conectados de bajo nivel (LVAC) (vehículos equipados con ADAS) como a los VAC de alto nivel (HVAC) (vehículos equipados con sistemas de conducción autónoma).
- Clase 2: creación de nueva infraestructura que puede beneficiar tanto a los LVAC como a los HVAC.
- Clase 3: actualizaciones de la infraestructura existente que benefician solo a los HVAC.
- Clase 4: creación de nueva infraestructura que beneficia únicamente a los HVAC.

Asimismo, se identifica la tipología de carretera a la que afectaría (urbana/interurbana), los vehículos a los que está destinado, el tipo de infraestructura digital que brindaría el mismo beneficio, la probabilidad de que puedan ser redundantes gracias a futuras tecnologías de sensores en vehículos, y el horizonte temporal dentro del cual se espera que el elemento de inversión sea más relevante para respaldar la conducción autónoma:

- Corto plazo: hasta 2030
- Medio plazo: del 2030 al 2040
- Largo plazo: del 2040 al 2050

Por último, el informe de Austroads (Xue *et al.*, 2022) hace un exhaustivo análisis económico evaluando la relación coste-beneficio de cada uno de los elementos identificados que justificarían su inversión, cuyas conclusiones son recogidas en la tabla 3.

Como se puede observar, las opciones de inversión a corto plazo tienen más probabilidades de estar justificadas que las que se requieren en un futuro más lejano. Aunque cabe señalar que las opciones a medio y largo plazo que se evalúan como no viables económicamente en este momento podrían estar justificadas en el futuro y por ende, es recomendable hacer una reevaluación futura de estas opciones de inversión.

El informe de Austroads utiliza la matriz de priorización mostrada en la figura 10 para ordenar las opciones de inversión en base a su viabilidad económica y valor estratégico a la hora de facilitar el despliegue y conducción del vehículo autónomo, ya sea mejorando el rendimiento o la percepción de los VAC, o por ser difícil su sustitución por tecnología como los mapas de alta definición o sensores en el vehículo.

A modo de conclusión, conviene que las inversiones para adaptar la infraestructura física a la conducción autónoma sean implementadas en etapas y en complejidad creciente:

- Inversiones a corto plazo: deben centrarse en respaldar la conducción de vehículos con ADAS. Estas

Tabla 3. Análisis de opciones de inversión en infraestructura física (Xue *et al.*, 2022)

Elemento de inversión	Descripción de la acción de infraestructura	Clase de inversión	Tipo de carretera	Uso	Horizonte temporal	Cierre de brechas por infraestructura digital	Cierre de brechas mediante tecnologías de sensores	Probabilidad de que las opciones de inversión estén justificadas económicamente		
								Muy probable	Muy improbable	Sin resultados definitivos
Señalización horizontal y vertical	Mejorar la visibilidad de la señalización horizontal Mejorar la legibilidad de la señalización vertical	Clase 1	Todas	Todos	Corto Plazo	Es probable que lo aborden los mapas AV/HD	Probable	✓		
Señalización de zonas de obras	Uso de tecnología o armonización de señalización para mejorar la percepción de los VAC en las zonas de obras	Clase 1	Todas	Todos	Corto Plazo	Probable ser abordado por V2X	Probable		✓	
Semáforos	Mejorar la legibilidad actualizando las cabezas semafóricas	Clase 1	Urbana	Todos	Corto Plazo	Probable ser abordado por V2X	Probable	✓		
Paradas VAC de subida y bajada de pasajeros	Modificación de los bordillos y aceras para proporcionar áreas de subida/bajada o carga/descarga para vehículos autónomos de pasajeros y de reparto	Clase 2	Urbana	Robotaxis, robobuses y Veh. de entrega autónomos	Medio Plazo	N/D	N/D		✓	
Enlaces a distinto nivel	Segregación de carriles para eliminar los conflictos de tráfico a lo largo de corredores interurbanos	Clase 2	Interurbana	Todos	Medio Plazo	Probable ser abordado por V2X	Probable		✓	
Zonas de parada segura	Provisión de zonas de parada segura en carreteras interurbanas de gran capacidad	Clase 2	Interurbana	Todos	Medio Plazo	N/D	N/D			✓
Puentes y pavimento	Refuerzo estructural de puentes y pavimentos para soportar las mayores exigencias del platooning	Clase 3	Todas	Todos	Largo Plazo	N/D	N/D		✓	
Carril dedicado VAC de transporte colectivo	Conversión de un carril existente en un carril exclusivo HVAC de transporte colectivo	Clase 3	Urbana	Tránsito y robotaxis compartidos	Largo Plazo	Probable ser abordado por V2X	Muy probable		✓	
Carril dedicado dinámico para camiones VAC	Conversión de un carril existente en un carril exclusivo para HVAC de carga con capacidad de asignación dinámica de tráfico	Clase 4	Interurbana	Vehículos pesados de carga de larga distancia	Largo Plazo	Probable ser abordado por V2X	Muy probable		✓	
Aparcamientos VAC remotos y hubs de movilidad	Construcción de aparcamientos para HVAC	Clase 4	Urbana	Turismos autónomos y robotaxis	Largo Plazo	N/D	N/D			✓

inversiones se dirigirían a respaldar mejoras relativamente básicas en los activos viales existentes, como mejoras en la retrorreflectancia y perceptibilidad de los semáforos y la señalización horizontal y vertical, con la expectativa de que se reduzcan los errores de percepción cometidos por los VAC actuales.

- Inversiones a medio plazo: cuando se adopten más VAC para el transporte de viajeros, las inversiones

que apoyen el desarrollo de infraestructura nueva y dedicada comenzarían a estar justificadas, por ejemplo, las zonas de parada segura, aparcamientos VAC seguros, etc.

- Inversiones a largo plazo: cuando se adopte la conducción automatizada para el transporte de mercancías, la inversión debería centrarse en ampliar la mejora de productividad y eficiencia asociados a los VAC.

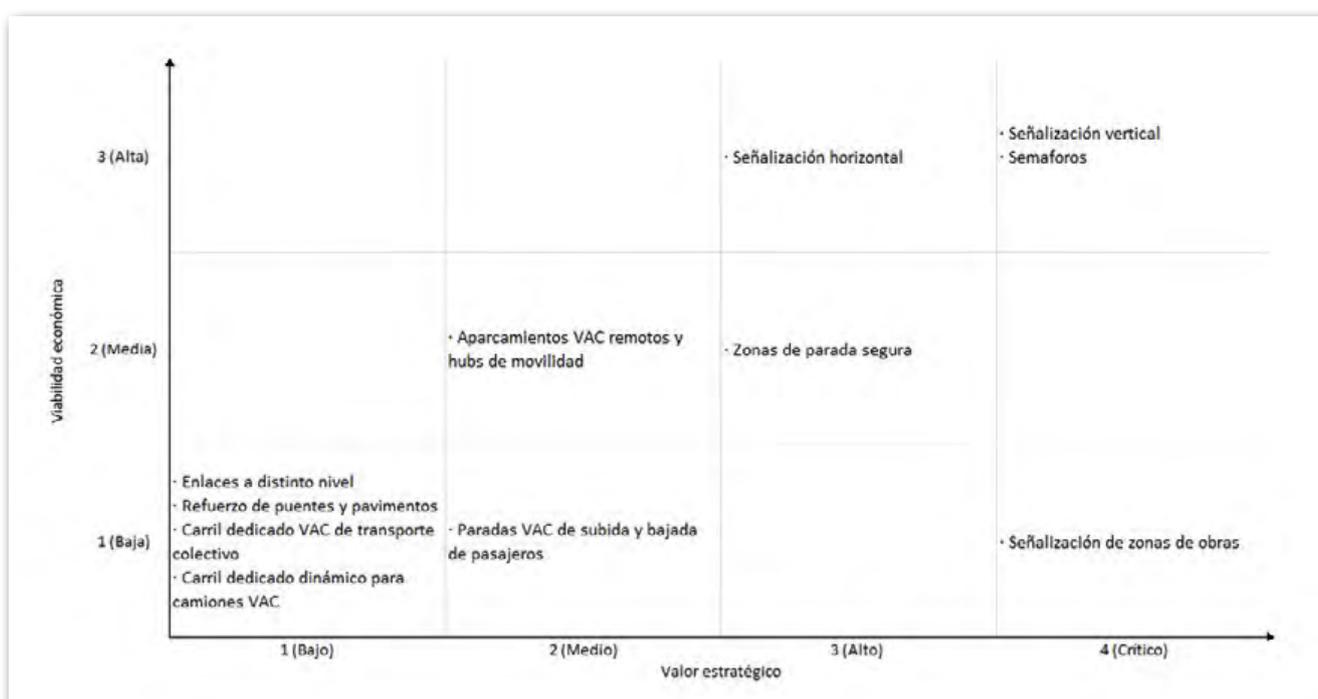


Figura 10. Matriz de priorización de opciones de inversión (Xue *et al.*, 2022).

5.2. Infraestructura de telecomunicaciones

Un aspecto fundamental para la seguridad y eficiencia del vehículo autónomo y conectado es la comunicación con otros agentes, como vehículos, semáforos y señalización de mensaje variable, infraestructura de control remoto, etc. Los vehículos autónomos necesitan la comunicación “Vehículo con Todo” (V2X) para intercambiar información en tiempo real que les permitan tomar decisiones informadas y reaccionar rápidamente a cambios en el entorno, lo que mejora la seguridad y la eficiencia del tráfico. Además, la comunicación también permite una mejor planificación de rutas y una mejor coordinación entre los vehículos autónomos, lo que puede ayudar a reducir el tráfico y los accidentes (Tsukada, 2020).

Las comunicaciones V2X son generalmente peer-to-peer y reservan la banda de frecuencia específica a 5,9 GHz para permitir el desarrollo de Sistemas Inteligentes de Transporte (ITS). La comunicación V2X se compone de comunicación:

- Vehículo a Vehículo (V2V): tiene por objeto mantener un flujo de información constante entre todos los vehículos cercanos, intercambiando información general del automóvil, su posición, dirección, velocidad y aceleración, mensajes de emergencia como detección de peligros en la carretera, o incluso servicios como platooning.

- Vehículo a Infraestructura (V2I): conecta al vehículo con semáforos y señales de mensaje variable, con objeto de mantener un flujo de información constante sobre éstas y reenviar mensajes de emergencia, e infraestructuras de telecontrol, con objeto de tomar el control de los vehículos para aumentar la seguridad (evitar colisiones), y la eficiencia (conducción en pelotón, reducción del consumo de combustible).

Existen dos tipologías de tecnologías de telecomunicación para posibilitar la comunicación V2X:

- Comunicación celular (LTE-V2X/NG C-V2X): se basa en la utilización de la red de antenas de telefonía móvil de 3G/4G/5G para permitir la comunicación entre vehículos. Este modo de comunicación está ya muy extendido, por lo que el coste de implementación de esta tecnología es bajo, al estar la infraestructura principal ya instalada, e incluso algunos vehículos también tienen integrado este tipo de comunicación. Sin embargo, cuenta con la desventaja de que los desarrollos más avanzados no son retrocompatibles con las versiones anteriores, lo cual podría condicionar la evolución posterior de los sistemas de comunicación VAC. Actualmente, la iniciativa europea The Smart Networks and Services Joint Undertaking (SNS JU) (CE, 2020) tiene, entre sus objetivos, impulsar el despliegue de 5G en Europa mediante la creación de corredores 5G que faci-



Figura 11. Corredores 5G para la movilidad automatizada y conectada (Fuente: SNS JU, 2020).

liten la implantación del vehículo autónomo (figura 11) (SNS JU, 2020).

- Comunicación dedicada de onda corta C-ITS G5 (IEEE 802.11p/802.11bd): se basa en la utilización de RSU (*Road Side Units*) instaladas en la carretera a modo de 'router WiFi' para permitir la comunicación V2X con las OBU (*On Board Units*), instaladas en los vehículos. Este modo de comunicación necesita la instalación de equipos a lo largo de la carretera, con sus correspondientes costes de instalación y mantenimiento, pero cuenta además con la ventaja de tratarse de un sistema retrocompatible, interoperable y que permite la coexistencia con versiones anteriores, lo que lo hace muy adecuado para prestar servicio a una tecnología en desarrollo. Los proyectos C-Roads europeos (figura 12) (<https://www.c-roads.es/>) tienen como objetivo ampliar la prestación de servicios C-ITS probando ambas tecnologías de telecomunicación:

La combinación de ambas tecnologías en un sistema híbrido es una opción interesante, ya que tener diversos protocolos de comunicación que no sean interoperables en una misma banda de frecuencia podría ser contraproducente. A tal respecto, hay dos puntos de vista diferentes sobre este tema. Por un lado, hay quienes piensan que se debe seleccionar una de las tecnologías y funcionar solo con ella. Aquí, NR-V2X es el protocolo que está ganando importancia, ya que los análisis en entornos de simulación lo sitúan como el protocolo con mejor rendimiento (Gorospe Jáuregui y Alonso Gómez, 2023). Aunque, por otro lado, la Comisión Europea ha preferido optar por buscar una solución capaz de combinar ambas tecnologías en lugar de optar por una sola (CE, 2019).

Por último, cabe destacar el proyecto DGT 3.0, desarrollado por la Dirección General de Tráfico. Este proyecto, pionero en Europa, consiste en una plataforma de vehículo conectado con la que se ofrece información del tráfico en tiempo real a los usuarios de la vía. El proyecto ha optado por utilizar tecnologías basadas en comunicación celular con tecnología 3G y 4G, suficientes para la mayoría de los casos de uso que el proyecto contempla, ya que, si bien es cierto que 5G daría más ancho de banda y menos latencia, se

ha considerado que no es necesario mejorar estos aspectos. Y a su vez, se descarta el uso de tecnologías de comunicación dedicada de onda corta por no ser sostenibles económicamente debido al alto coste de equipar y mantener la infraestructura asociada a la instalación de RSUs en la carretera (Computerworld, 2023).

6. CONCLUSIONES

Actualmente existen en nuestras carreteras vehículos con un bajo nivel de autonomía y conectividad. Todos los vehículos de nueva homologación en Europa ya cuentan con un nivel 2 de autonomía y existen perspectivas de que las autoridades estadounidenses aprueben vehículos de nivel 3 en 2023. Sin embargo, la complejidad técnica exponencialmente mayor que supone enfrentarse a los escenarios completamente imprevisibles que implica la conducción sin supervisión humana (especialmente en ciudades), motiva que se vayan a tardar más años en llegar a los niveles 4 y 5 de autonomía.

Las ciudades serán las grandes protagonistas de la movilidad autónoma de viajeros, pues los esfuerzos inversores se centran en la actualidad en el desarrollo de soluciones de movilidad autónoma como los robo-taxis o *robo-shuttles* (nivel 4 o superior).

Por otra parte, el vehículo autónomo privado es hoy por hoy un artículo de alta gama, dado el alto coste de los sensores y licencias hardware y software que lo componen, solo accesible para la minoría más pudiente. La mayoría de los expertos estima que, debido al alto coste total de propiedad, el despliegue a gran escala del vehículo autónomo y conectado privado para pasajeros sucederá siguiendo el siguiente calendario:

- 5 a 10 años para el nivel 3 en áreas metropolitanas de grandes ciudades.
- 10 a 20 años para el nivel 4 en áreas urbanas y el nivel 3 en áreas regionales.
- 20 a 40 años para aplicaciones de nivel 5.

El transporte de mercancías con vehículos pesados autónomos de larga distancia es un caso diferente. Mediante el

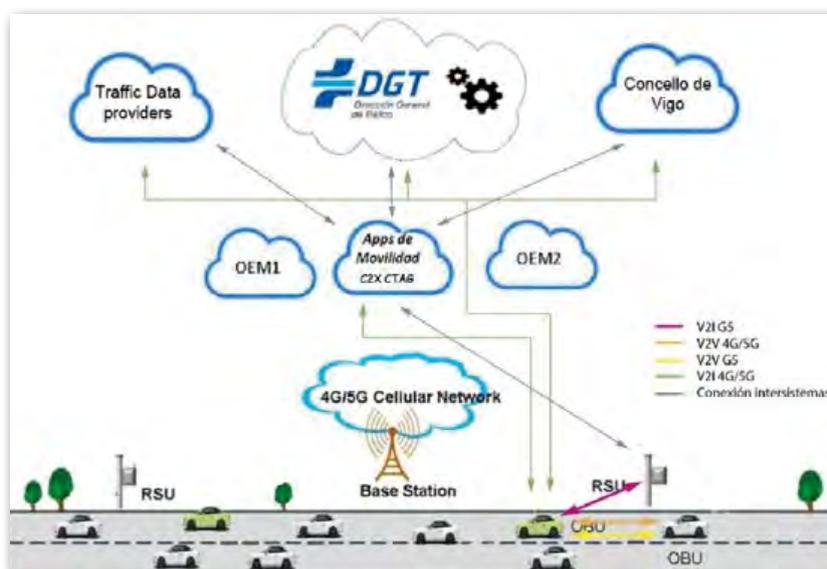


Figura 12. Sistema de comunicaciones híbrido (Fuente: <https://www.c-roads.es/>).

modelo “Transfer-Hub” se sortea la complejidad de la conducción en ciudades, por lo que se espera que estos servicios estén disponibles comercialmente a partir de 2026. Su despliegue a gran escala muy probablemente ocurra antes que otras aplicaciones, pero solo en dominios de diseño operativo limitado y en el transporte de mercancías pesadas de larga distancia, por lo que sería uno de los primeros casos de uso de vehículos autónomos en el segmento comercial.

Las administraciones de carreteras, en su esfuerzo para adecuar la infraestructura a la circulación de estos vehículos, han de tener en cuenta los futuros escenarios de despliegue del vehículo autónomo y conectado, la incertidumbre tecnológica que todavía existe y los posibles cambios de infraestructura necesarios. Conviene que las inversiones sean implementadas en etapas y en complejidad creciente, centrándose a corto plazo en respaldar la conducción de vehículos con ADAS, ayudados por mejoras relativamente básicas en los activos viales existentes, como mejoras en la retrorreflectancia y perceptibilidad de los semáforos y la señalización horizontal y vertical. A medio y largo plazo, cuando la adopción del vehículo autónomo progrese, las inversiones que apoyen el desarrollo de infraestructura nueva y dedicada comenzarían a estar justificadas.

7. REFERENCIAS

- Adler, A. (2021). *Study: Autonomous trucking transfer hubs promise huge cost savings*. Chattanooga (TN/USA): Freight Waves. <https://www.freightwaves.com/news/study-autonomous-trucking-transfer-hubs-promise-huge-cost-savings>
- Cassauwers, T. (2022). *Los coches sin conductor logran avances notables en carreteras europeas lejos de los focos*. *El País* (28/12/22). <https://elpais.com/tecnologia/2022-12-28/los-coches-sin-conductor-logran-avances-notables-en-carreteras-europeas-lejos-de-los-focos.html>
- Collie, B., et al. (2022). *Mapping the Future of Autonomous Trucking*. Atlanta (GA/USA): Boston Consulting Group. <https://www.bcg.com/publications/2022/mapping-the-future-of-autonomous-trucks>
- Comisión Europea (2019). *Commission staff working document impact assessment accompanying the document Commission Delegated Regulation supplementing Directive 2010/40/EU of the European Parliament and of the Council with regard to the provision of EU-wide cooperative intelligent transport systems*. SWD(2019)96. [https://ec.europa.eu/transparency/documents-register/detail?ref=SWD\(2019\)96&lang=en](https://ec.europa.eu/transparency/documents-register/detail?ref=SWD(2019)96&lang=en)
- Comisión Europea (2020). *The Smart Networks and Services Joint Undertaking (SNS JU). 5G Strategic Deployment Agenda for Connected and Automated Mobility in Europe*. https://5g-ppp.eu/wp-content/uploads/2020/10/20201002_5G_SDA_for_CAM_Final.pdf
- Comisión Europea (2021). *2030 Digital Compass: The European way for the Digital Decade*. https://commission.europa.eu/system/files/2023-01/cellar_12e835e2-81af-11eb-9ac9-01aa75ed71a1.0001.02_DOC_1.pdf
- Computerworld (2023). *Entrevista a Jorge Ordás, subdirector general de Gestión de la Movilidad y Tecnología en la DGT*. <https://www.computerworld.es/entrevistas/gracias-a-la-tecnologia-la-movilidad-por-carretera-sera-mucho-mas-inteligente-eficiente-sostenible-y-justa>
- Connected Places Catapult (2020). *Market forecast for connected and autonomous vehicles*. London (UK): Connected Places Catapult. https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/919260/connected-places-catapult-market-forecast-for-connected-and-autonomous-vehicles.pdf
- Connected, Cooperative & Automated Mobility (CCAM) (2023). *Paving the way to driving automation in EU*. <https://www.ccam.eu/paving-the-way-to-driving-automation-in-eu/>
- Doll, G., et al. (2020). *Private autonomous vehicles: The other side of the robo-taxi story*. McKinsey & Company. <https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/private-autonomous-vehicles-the-other-side-of-the-robo-taxi-story>
- EuroRAP (2013). *Roads that Cars Can Read. A Quality Standard for Road Markings and Traffic Signs on Major Rural Roads*. https://www.eurorap.org/wp-content/uploads/2015/02/roads_that_cars_can_read_2_spread.pdf
- Gorospa Jáuregui, J., y Alonso Gómez, A. (2023). *Equipo de Investigación de Teoría de la Señal y Comunicaciones*. Departamento de Electrónica y Ciencia Computacional, Facultad de Ingeniería, Mondragón Unibertsitatea. <https://www.mondragon.edu/es/investigacion/ingenieria-tecnologia/grupos-investigacion-transferencia/-/mu-inv-mapping/grupo/teoria-de-la-senal-y-comunicaciones>
- Heineke, K., et al. (2021). *What's next for autonomous vehicles?* McKinsey & Company. <https://www.mckinsey.com/features/mckinsey-center-for-future-mobility/our-insights/whats-next-for-autonomous-vehicles>
- Heineke, K., et al. (2022). *The road to affordable autonomous mobility*. McKinsey & Company. <https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/the-road-to-affordable-autonomous-mobility>
- Institute for Global Automotive Regulatory Research (2022). *EU: New implementing regulation for automated driving systems (ADS)*. <https://igarr.com/?s=new+implementing+regulation>
- Jiménez, F. (2017). *Retos tecnológicos en el desarrollo e implantación del vehículo autónomo y conectado*. *Carreteras*, nº 216, pp. 8-16.
- Leal, J.M. (2020). *Características de la infraestructura que pueden favorecer la conducción asistida y automatizada*. *Ingeniería Civil*, nº 197, pp. 106-117. <http://ingenieriacivil.cedex.es/index.php/ingenieria-civil/article/view/2433>
- Observatorio del Transporte y la Logística en España (OTLE-MITMA) (2022). *Datos de movilidad 2022*. <https://observatoriortransporte.mitma.es/>
- Rablau, C. (2019). *LiDAR: a new self-driving vehicle for introducing optics to broader engineering and non-engineering audiences*. *Proceedings of the Fifteenth Conference on Education and Training in Optics and Photonics: ETOP 2019, Quebec City, Quebec, Canada, 2 July 2019*. <https://doi.org/10.1117/12.2523863>
- S&P Global (2020). *Autonomous Vehicles Whitepaper*. <https://www.spglobal.com/mobility/en/Info/0319/autonomous-vehicles-whitepaper.html>
- Torre, A. de la (2022). *Estos son los sistemas ADAS obligatorios en todos los coches homologados en 2022*. <https://www.xataka.com/automovil/estos-sistemas-adas-obligatorios-todos-coches-homologados-2022>
- Tsukada, M., Oi, T., Kitazawa, M., y Esaki, H. (2020). *Networked Roadside Perception Units for Autonomous Driving*. *Sensors*, 20(18): 5320. <https://doi.org/10.3390/s20185320>
- Xue, S., Irannezhad, E., y Karl, C. (2022). *Minimum Physical Infrastructure Standard for the Operation of Automated Driving*. Research Report AP-R665A-22. Sydney (Australia): Austroads. <https://austrroads.com.au/publications/connected-and-automated-vehicles/ap-r665-22>

Análisis de los parámetros característicos para la correcta interpretación de ensayos CPTU en ‘quick clays’ y arcillas de alta sensibilidad en la obra E-6 Ranheim-Vaernes motorway de Noruega

Analysis of the Characteristic Parameters for the Correct Interpretation of CPTU Tests in Quick and High Sensitivity Clays in the E-6 Ranheim-Vaernes Motorway, Norway

Juan Alfonso Carcolé Galea^{1*}, Ana María Aguilar Bauzá²

Resumen

En este artículo se recogen las correlaciones geotécnicas que sus autores establecieron para la obra de ACCIONA E-6 Ranheim-Vaernes para arcillas rápidas, arcillas de alta sensibilidad y otras arcillas noruegas con respecto a los ensayos de penetración estática (CPTU).

Las correlaciones se han establecido utilizando ensayos de laboratorio realizados en muestras extraídas a 1 m de distancia de 28 ensayos CPTU.

Para establecer las correlaciones que se proponen se han analizado 227 ensayos de laboratorio de cono realizados en muestras inalteradas, y 221 en muestras remoldeadas; 53 ensayos de plasticidad; 225 análisis de contenido de humedad; 221 determinaciones de densidades; 27 ensayos edométricos en equipos electrónicos y 25 ensayos triaxiales consolidados no drenados de equipos electrónicos en condiciones anisótropas.

Palabras clave: arcillas rápidas, arcillas quebradizas, sensibilidad, CPTU, carta de clasificación.

Abstract

This article presents the geotechnical correlations that the authors established for the ACCIONA E-6 Ranheim-Vaernes site for quick clays, high-sensitivity clays, and other Norwegian clays with respect to static penetration tests (CPTU).

The geotechnical works included in this paper have entailed carrying out undisturbed modified samples at 1 m distance of 28 CPTU test.

Laboratory tests have consisted of 227 undrained strength tests over undisturbed samples (cone test), and 221 undrained strength tests over remoulded samples (cone test) [sensitivity is defined as the ratio $Su_{undisturbed}/Su_{remoulded}$]; 53 Atterberg limit tests, 225 moisture content analysis, 221 bulk density measures, 27 oedometer tests (by using automatic-data-logging devices), and 25 triaxial undrained tests with pore pressure measurements consolidated under anisotropic conditions

Keywords: Quick clay, brittle clay, sensitivity, CPTU, soil behaviour type.

1. INTRODUCCIÓN

Históricamente ha resultado muy complejo establecer las correlaciones entre los ensayos de penetración estática (CPTU) y las propiedades geotécnicas de arcillas de alta sensibilidad.

Especialmente complejo resulta establecer las correlaciones en las llamadas “arcillas rápidas” (*quick clays*). Este tipo de arcillas pueden ser encontradas principalmente en Noruega, Suecia, Finlandia, Canadá y norte de Rusia, así como escasamente en el sur de Chile. Las *quick clays* muestran sensibilidades superiores a 30 (50 a 690 en el presente

artículo) y valores altos de la razón de presión intersticial “Bq” en el ensayo CPTU (en un rango entre 0,6 y 1,2). El parámetro “Qtn” definido por Robertson (2009) se ubica entre 2 y 6. Además de la sensibilidad, la anisotropía es otro aspecto muy analizado en estas arcillas (cambio de la resistencia con la orientación del plano de falla).

El presente artículo recoge parte de los trabajos geotécnicos llevados a cabo para el proyecto y obra de ACCIONA en la Autovía E-6 Ramheim-Vaernes, Noruega. En los 23 km de longitud de la obra existen tres depósitos de *quick clays* con potencias de hasta 47 m. Uno de estos depósitos sufrió un corrimiento de masa en 2002. Estas arcillas se encuentran usualmente en contactos irregulares laterales con otras arcillas sensitivas.

En este trabajo se va a proponer una serie de correlaciones a los parámetros geotécnicos más representativos de estas arcillas para la zona Ramheim-Vaernes.

El gran punto oscuro de las correlaciones de las *quick clays* con el ensayo CPTU ha sido siempre la gráfica de

* Autor de contacto: jcarcole@acciona.com

¹ Ingeniero geólogo (ETSICC y Universidad Politécnica de Cataluña). ACCIONA E-6 Ranheim-Vaernes, Norway.

² Geóloga (Universidad de Barcelona). Máster en Ingeniería Geológica (Universidad Complutense de Madrid). IGPS S.L. Sant Sadurni d'Anoia. Barcelona, España.

identificación. En el presente artículo propondremos también una sencilla gráfica que ha funcionado muy bien en las *quick clays* analizadas en esta zona de Noruega.

2. CLASIFICACIÓN DE LAS ARCILLAS NORUEGAS

2.1. Clasificación noruega de arcillas acorde a la sensibilidad

Los umbrales de sensibilidad definida como $St = Su_{in} / Su_r$, (sensibilidad=resistencia al corte no drenada de la arcilla inalterada / resistencia al corte no drenada de la arcilla remodelada) suelen establecerse en rangos similares en todos los países. En Noruega el Håndbok HB-V220 (2014), establece “arcillas de baja sensibilidad” aquellas de $St < 8$, “arcillas de media sensibilidad” aquellas de $8 < St < 30$ y “arcillas de alta sensibilidad” aquellas de $St > 30$. En este último rango se diferencian fundamentalmente dos subgrupos de arcillas: las “arcillas rápidas” (*quick clays*) son aquellas en las que $Su_r < 0,5$ kPa, y las “arcillas quebradizas” (*brittle clays*) son aquellas de $Su_r < 2$ kPa.

Debido a lo blandas que suelen resultar estas arcillas, especialmente en condiciones remodeladas, las sensibilidades se establecen con el ensayo de cono (*konus*, en noruego, *fall cone*, en inglés).

Como se verá, poder interpretar el incremento de la presión intersticial en las piedras porosas durante el avance del ensayo CPTU es fundamental para establecer varias de las correlaciones que propondremos. Para ello la determinación de la presión intersticial previa en el terreno resulta

de gran importancia y se realiza con piezómetros instalados antes de realizar los ensayos CPTU.

Los piezómetros escogidos fueron de tipo eléctrico. Para generar la menor perturbación posible, su instalación se realiza hincándolos en el terreno con vainas metálicas que quedan perdidas, equipadas con piedras porosas similares a las puntas de los CPTU.

La toma de muestras inalteradas es igualmente compleja, sobre todo en *quick clays*, ya que pueden ver totalmente alterada su estructura al intentar muestrearlas. Para garantizar una buena calidad de las muestras se utilizó un modelo de toma-muestras desarrollado por el Instituto Geológico Noruego (NGI).

2.2. Ambiente deposicional de las *quick clays*

Durante las glaciaciones, Noruega estuvo enterrada bajo un manto de hielo de 2-3 Km de espesor (más de 20000 kPa de presión ejercida sobre el terreno en toda su extensión). Cuando el hielo se derritió, el agua del deshielo transportó grandes cantidades de limo y arcilla a los fiordos y al mar, a la vez que el terreno ascendía lentamente debido a la descompresión. Debido a ello, la sedimentación de las arcillas se dio en un medio acuoso salino pasando a ser la composición del agua intersticial rica en sales (30-35 g/L de sales). Las partículas de arcilla tienen una carga negativa que conduciría a la repulsión electrostática entre ellas, pero debido a la salinidad del agua de los poros, las cargas negativas atraerán a los iones positivos que se concentrarán cerca de las superficies de las partículas de arcilla, y así

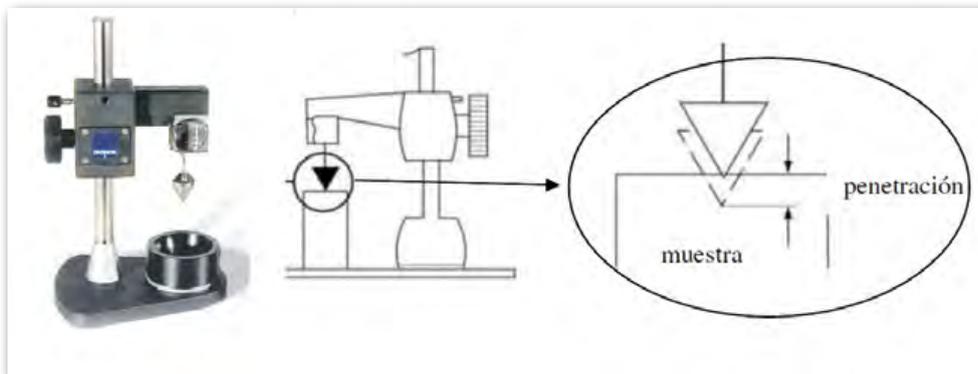


Figura 1. Ensayo de cono acorde a la guía noruega Håndbok HB-V220 (2014).

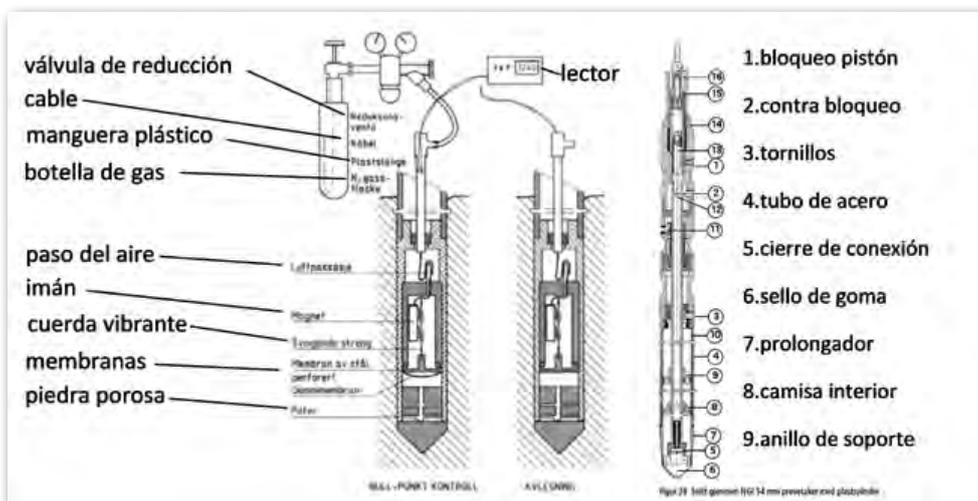


Figura 2. Piezómetro eléctrico y toma muestras de 54 mm NGI (Håndbok V222, 2014).

se “neutralizan” las fuerzas repulsivas. El resultado es una deposición relativamente rápida es una estructura floculada de alta porosidad (índices de poros superiores a 1) con agua salina intersticial.

El problema se genera al quedar estas arcillas marinas exhumadas debido al lento levantamiento del terreno descrito y sometidas al lixiviado posterior de las aguas meteóricas ya que, al perderse la salinidad, la estructura pierde la resistencia y colapsa o se disgrega fácilmente frente a cualquier acción de cizalladura, generando grandes corrimientos de masa incluso con pendientes muy pequeñas del terreno.

Así pues, la desalinización del agua intersticial será lo que condicionará la evolución de la arcilla, dándose un progresivo aumento de la sensibilidad, hasta convertirse en *quick clay*, cuando la salinidad del agua llegue a ser inferior al 0,5 %.

Finalmente, la presencia de fracciones arenosas erráticas y el hecho de que el lixiviado del depósito puede no ser suficientemente maduro, siendo heterogéneo, dificultará la correcta identificación de las arcillas rápidas, quebradizas y otras sensitivas.

3. ENSAYOS DE LABORATORIO

3.1. Ensayos identificativos

Resulta importante realizar ensayos de laboratorio que permitan caracterizar el terreno antes de analizar su respuesta frente al avance de los ensayos CPTU.

En la figura 3 se muestra la carta de plasticidades de Casagrande. Las *quick clays* de los depósitos aquí analizados son arcillas de baja plasticidad (índice de plasticidad <7 %; límite líquido=17-26 %; límite plástico=16 %). Según la zona del mundo que se analice la plasticidad de las arcillas rápidas son diferentes.

La figura 4 muestra la correlación existente entre el índice de liquidez ($IL=(W-W_p)/PI$), donde W =humedad y W_p =límite plástico) y el índice de plasticidad (PI). Las *quick clays* muestran índices de fluidez mayoritariamente entre 1 y 3, pero con valores que pueden llegar hasta 9,3. Se propone una correlación del tipo:

$$PI\% = 10 * IL^{-0,9} \quad [1]$$

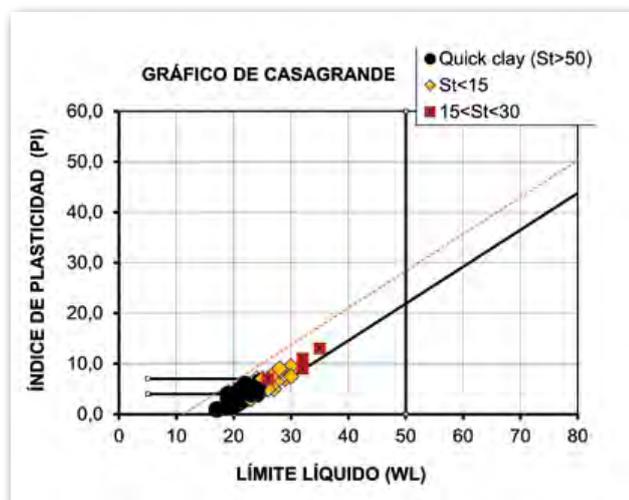


Figura 3. Gráfico de plasticidades de Casagrande. PI=índice de plasticidad, WL=límite líquido.

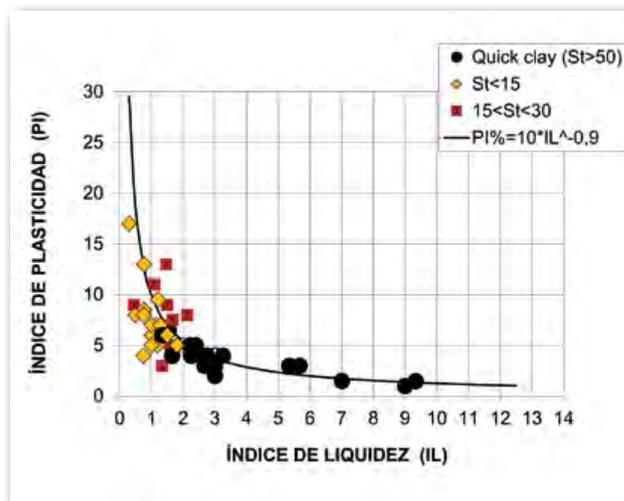


Figura 4. Correlación entre el índice de plasticidad (PI) y el índice de liquidez (IL).

La figura 5 muestra la correlación existente entre el índice de liquidez (IL) y la resistencia al corte no drenada en muestras remoldeadas (S_u), establecida con el ensayo de cono (figura 1). Las *quick clays*, por definición, tienen $S_u < 0,5$ kPa por lo que quedan prácticamente en el eje. El resto de las arcillas permiten definir con claridad una correlación aplicable al conjunto de arcillas.

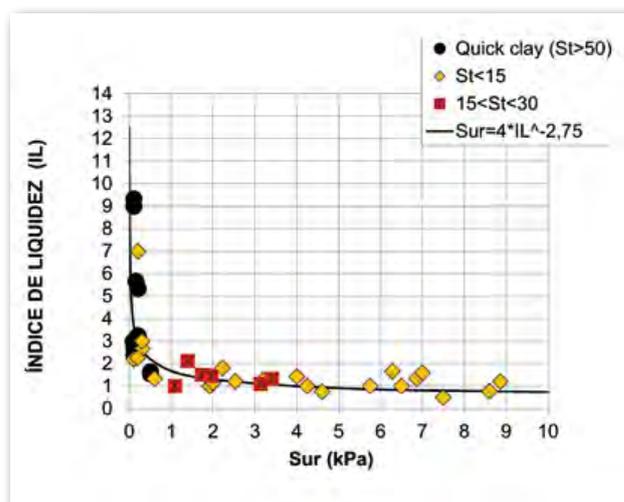


Figura 5. Correlación entre el índice de liquidez (IL) y la resistencia al corte no drenado de muestras remoldeadas (S_u).

Se puede establecer la correlación:

$$S_u = 4 * IL^{-2,75} \quad [2]$$

La figura 6 muestra la correlación entre la sensibilidad (St) y el índice de fluidez (IL). Resulta evidente como las *quick clays* muestran una dispersión en los valores de seis muestras cuyo índice de fluidez se sale del rango habitual de entre 1 y 3.

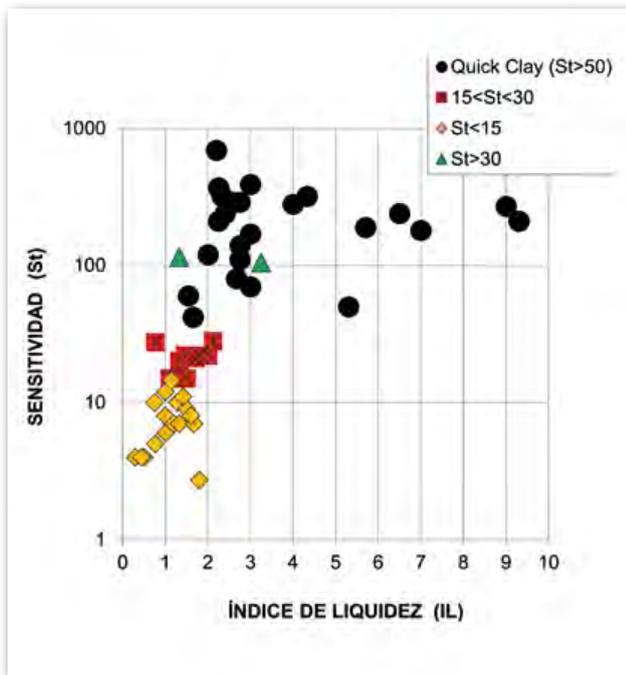


Figura 6. Correlación entre el índice de liquidez (IL) y la sensibilidad (St).

3.2. Ensayos de tenso-deformación

Lunne *et al.*, 1997, establecieron un método de cálculo de la resistencia al corte no drenada haciendo uso del ensayo CPTU por similitud a la capacidad portante de un pilote llegando a una expresión que se ha universalizado; $S_u = q_t / N_{kt}$ (S_u =resistencia al corte no drenada; q_t =resistencia al cono corregida; N_{kt} =constante usualmente entre 10 y 20 a ajustar en cada terreno). Debido a la naturaleza descrita de las arcillas rápidas, la plastificación con reordenación de la estructura en condiciones anisótropas con un fuerte incremento de la presión intersticial durante el avance del CPTU, este tipo de correlaciones son difícilmente aplicables en estas arcillas. La forma más exitosa de definir esta correlación se basa en aplicar el criterio de SHANSEP (Ladd y Foott, 1974). Para ello se han realizado ensayos triaxiales electrónicos sin drenaje con muestras inalteradas consolidadas en condiciones anisótropas similares a las del terreno ($k = \sigma'_{ho} / \sigma'_{vo}$ establecido acorde al criterio de Mayne y Kulhawy (1982), $k = (K_o)_{NC} * (OCR)^{sin\phi}$, con $(K_o)_{NC} = 1 - sin\phi$ acorde a Jaki (1948)). Resulta importante destacar que la humedad en las arcillas ensayadas ha sido muy constante, alrededor del 30 %. Diferentes contenidos de humedad desplazarían la curva de la correlación de la figura 7. Los valores de OCR (*Over Consolidation Ratio*) se han establecido con edómetros electrónicos. El criterio de SHANSEP se presenta para los ensayos hechos en condiciones de compresión como estas:

$$S_u / \sigma'_{vo} = \alpha * OCR^m \quad [3]$$

donde: α =constante; $OCR = p'_c / p'_0$ (grado de sobreconsolidación); m =constante; p'_c = presión efectiva de preconsolidación; p'_0 = presión vertical efectiva máxima en la historia tensional; σ'_{vo} = actual presión efectiva vertical en el terreno, σ'_{ho} = actual presión efectiva horizontal del terreno.

De la figura 7 se desprende el ajuste para los ensayos triaxiales de compresión:

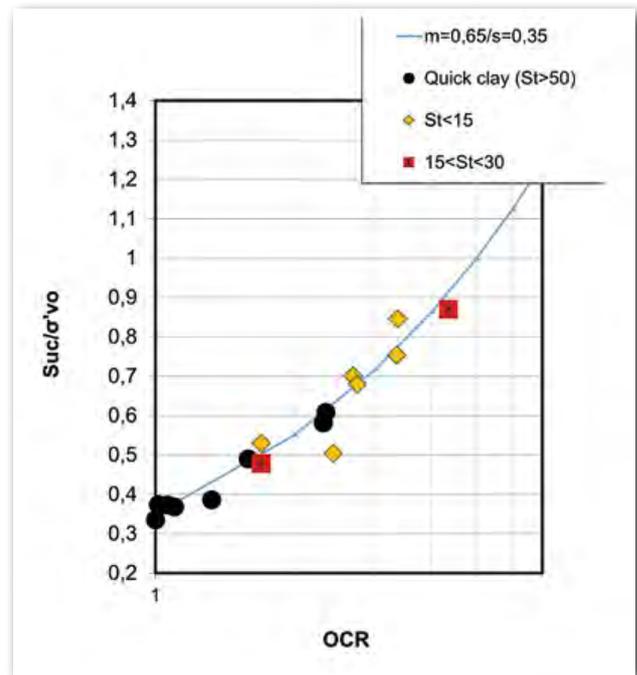


Figura 7. Correlación entre la resistencia la corte no drenada en compresión normalizada (S_{uc} / σ'_{vo}) y el grado de sobreconsolidación (OCR).

$$S_{uc} / \sigma'_{vo} = 0,35 * OCR^{0,65} \quad [4]$$

Como se ha indicado, los valores diferentes de humedad (del 30 % +/- 3 % en estas muestras) significaría diferentes valores de “ α ” y “ m ”.

En los ensayos triaxiales realizados en equipos electrónicos se ha evaluado el valor de deformación de las muestras en un rango lo suficientemente preciso para determinar el valor del módulo de deformación de corte en pequeñas deformaciones “Go” (figura 8).

La figura 9 muestra la correlación entre el módulo de deformación de corte a pequeñas deformaciones normalizado por la resistencia al corte no drenada (G_o / S_u) y el grado de sobreconsolidación (OCR). Si bien la gráfica muestra una dispersión importante, la relación queda establecida en un rango entre 250 y 500.

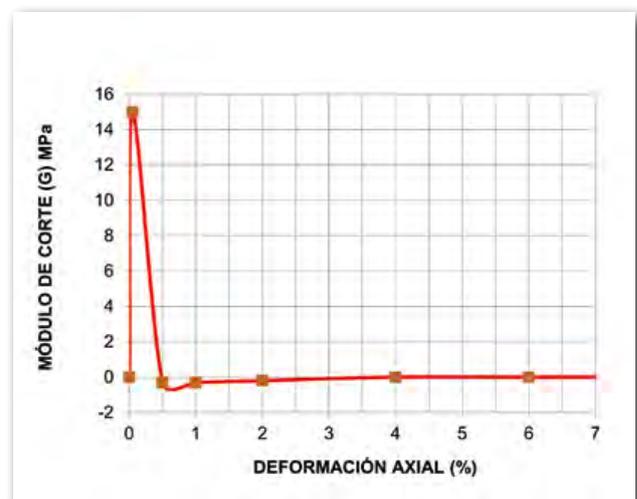


Figura 8. Ejemplo de uno de los ensayos triaxiales de compresión anisótropos realizados donde se establece la relación “G” respecto a la deformación axial de la muestra ($\epsilon\%$).

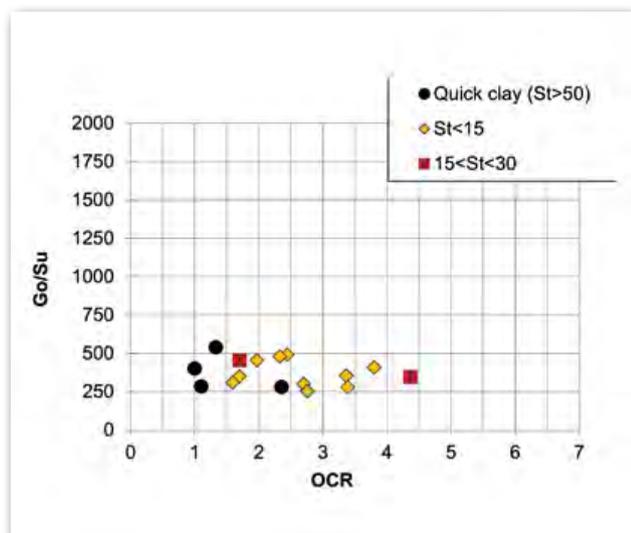


Figura 9. Correlación entre el módulo de deformación de corte a pequeñas deformaciones normalizado (G_o/S_u) y el grado de sobreconsolidación (OCR).

4. MEDIDAS REALIZADAS EN LOS ENSAYOS CPTU

El ensayo CPTU consiste en introducir en el terreno un tren de varillas a una velocidad constante de unos 2 cm/seg. En el fondo de las varillas se encuentra una “cabeza” de medición que consta de una punta que lee la presión “qc” que el terreno ejerce sobre ella al clavarse, un faldón que lee el rozamiento en la pared “fs” y una o dos piedras porosas (hasta tres en algunos modelos modernos) que leen la presión del agua que se genera durante la ejecución del ensayo (“ u_1 ” y “ u_2 ”). Los detalles del ensayo quedan recogidos, por ejemplo, en la norma europea UNE-EN ISO 22476-1. Los parámetros que utilizaremos para analizar los resultados de este tipo de ensayos son:

q_c = (Fuerza en el cono/Área del cono) //resistencia al cono//

f_s = (Fuerza en el faldón/área del faldón) //resistencia en el faldón//

$q_t = q_c + u_2 \cdot (1 - a)$ //resistencia al cono corregida (por los efectos de la presión de poros)//

$a = (A_n/A_c)$ // área ratio// factor de la forma de la piedra porosa. Suele estar entre 0,6 a 0,9 (usualmente 0,8). Por lo que suele definirse de forma aproximada $q_t \approx q_c + 0,2 \cdot u_2$

$R_f = \frac{f_s}{q_c} \cdot 100$ // “Friction Ratio”-Razón de fricción// En muchas publicaciones se indica que debe hacerse uso de “qt” en lugar de “qc”, en la Norma Europea se pasaría a llamar “ R_{ft} ”, pero en la literatura anglosajona se suele definir como “Rf”.

$q_{net} = q_t - \sigma_{vo}$ // Resistencia neta//

$Fr = \frac{f_s}{q_t - \sigma_{vo}} \cdot 100$ // “Friction Ratio” normalizado//

$Q_t = \frac{(q_t - \sigma_{vo})}{\sigma'_{vo}}$ // Resistencia del cono normalizada//

$Q_{tn} = \left[\frac{q_t - \sigma_{vo}}{P_{atm}} \right] \cdot \left[\frac{P_{atm}}{\sigma'_{vo}} \right]^n$ // Resistencia del cono normalizada-2// (Robertson, 2009, 2016).

$n = 0,381(I_c) + 0,05 \cdot (\sigma'_{vo}/P_{atm}) - 0,15$
// Parámetro de presión y terreno// (Robertson, 2009).

$I_c = [(3,47 - \log Q_t)^2 + (\log Fr + 1,22)^2]^{0,5}$
//“material index”-Índice de material// (Robertson, 1998-2009).

$B_q = \frac{u_2 - u_1}{q_t - \sigma_{vo}}$ // Razón de presión intersticial// es el parámetro de la presión de poros normalizada.

$P.P. = \frac{u_2 - u_0}{q_t}$ // “differential Pore Pressure ratio”- presión de poro normalizada//.

Existe corrección de “fs” a “ft”, pero para ella es necesaria la existencia de la tercera piedra porosa. Al ser inusual disponer de la tercera piedra porosa, no se suele realizar.

Puede observarse que los verdaderos datos directos son “qc”, “fs”, “ u_1 ” y “ u_2 ”; el resto de los parámetros surgen en realidad de combinar estos primeros.

Error en la determinación del nivel freático

En suelos detríticos normalmente consolidados la determinación del NF queda prácticamente descrita con la presión “ u_2 ”, por lo que resulta muy sencilla. No es así en suelos cohesivos. Poder considerar la presencia del NF en superficie *del lado de la seguridad* se convierte automáticamente en una fuente de error. Los valores de “Qt” pueden pasar a ser el doble de los reales. En “Ic” habrá error traído por el de “Qt” y en “Qtn” también habrá error. Por todo ello se debe verificar mediante piezómetros instalados previamente en el terreno, la correcta valoración de la presión de poros inicial.

5. CORRELACIONES DEFINIDAS PARA LOS ENSAYOS CPTU EN ARCILLAS NORUEGAS

Para realizar las correlaciones se ha utilizado el valor correspondiente a la media de los valores obtenidos por el CPTU test en los 60 cm de longitud equivalente a la muestra inalterada que se compara.

5.1. Presión de sobrecarga previa del terreno POP (*Pre Overburden Pressure*)

La figura 10 muestra la relación entre la máxima presión vertical efectiva tenida en las muestras ensayadas en edómetros electrónicos (POP) y la presión neta del cono (q_{net}).

La figura 10 muestra dos posibles correlaciones. La primera de ellas (trazo punteado) aplica a la mayoría de las muestras y se ajusta muy bien a las arcillas de sensibilidad inferior a 15. La segunda correlación (trazo continuo) se presenta para algunas muestras de arcillas rápidas que no se ajustan a la primera correlación.

“línea discontinua” \rightarrow POP (kPa) = 0,25 * q_{net} (kPa) [5]

“línea continua” \rightarrow POP (kPa) = 0,4 * q_{net} (kPa) [6]

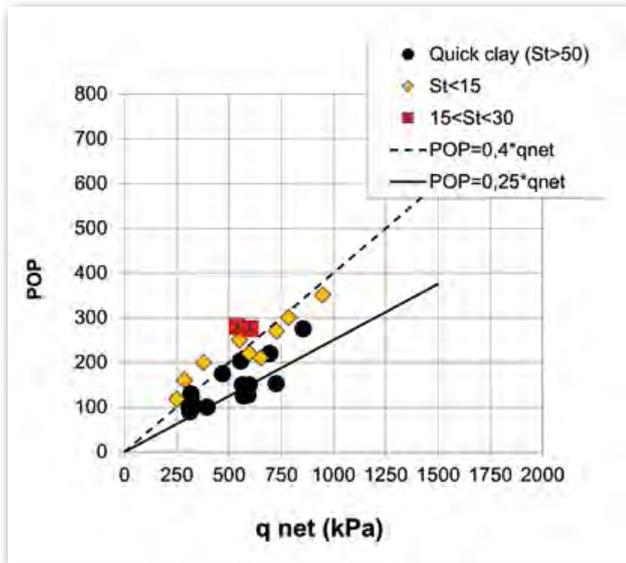


Figura 10. Correlación entre máxima presión vertical efectiva (POP) y la presión neta del cono (qnet).

5.2. Grado de sobreconsolidación OCR (Over Consolidation Ratio)

El grado de sobreconsolidación (OCR) se puede establecer haciendo uso de la resistencia al cono normalizada-2 (Qtn). La figura 11 muestra una misma correlación para arcillas rápidas que para el resto de arcillas. El valor obtenido es similar al correspondiente al que se obtendría con la máxima presión vertical efectiva utilizando la figura 10.

Se puede establecer la correlación lineal:

$$OCR = Qtn / 2,5 \quad [7]$$

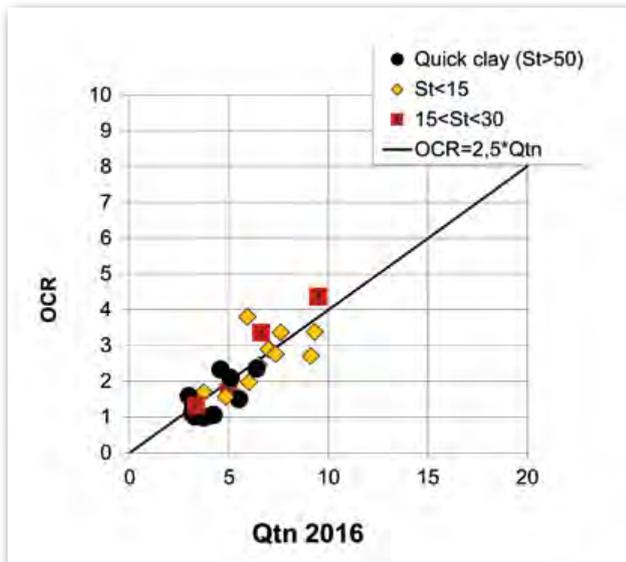


Figura 11. Correlación entre el grado de sobreconsolidación (OCR) y la resistencia al cono normalizada-2 (Qtn).

5.3. Correlación a la resistencia al corte no drenada obtenida en los ensayos de cono de laboratorio realizados en muestras inalteradas

La figura 12 muestra la correlación entre la resistencia al corte no drenada establecida con el ensayo de cono de

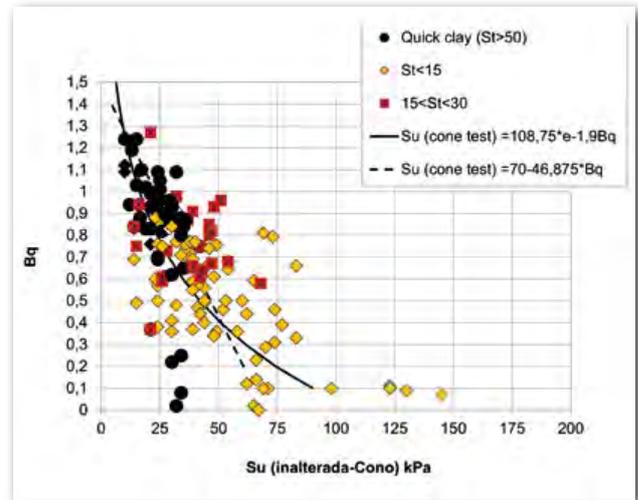


Figura 12. Correlación entre la razón de presión intersticial del CPTU (Bq) y la resistencia al corte no drenada del ensayo de laboratorio de cono ($Su_{\text{inalterada-Cono}}$).

laboratorio (figura 1) y la razón de presión intersticial (Bq). Algunos valores se desplazan de la correlación a valores de Bq anómalamente bajos. Esto es debido a que se trataba de muestras obtenidas por encima del nivel freático y el avance del CPTU no puede desarrollar toda la presión de poro que les correspondería.

Definimos dos correlaciones aproximadamente similares en el rango $0,4 < Bq < 1,3$:

$$Su_{\text{inalterada-Cono}} = 108,75 * e^{-1,9Bq} \quad [8]$$

$$Su_{\text{inalterada-Cono}} = 70 - 46,875 * Bq \quad [9]$$

Una correlación entre la resistencia al corte no drenada establecida con el ensayo de cono se puede establecer también respecto a la resistencia al cono normalizada (Qtn).

Se definen dos correlaciones similares en el rango $0 < Qtn < 15$ para todas las arcillas:

$$Su_{\text{inalterada-Cono}} = 5 * Qtn \quad [10]$$

$$Su_{\text{inalterada-Cono}} = 3,38 + 5,51Qtn - 0,03Qtn^2 \quad [11]$$

5.4. Correlación a la resistencia al corte no drenada de los ensayos de cono de laboratorio realizados en muestras remoldeadas

La correlación a la resistencia al corte no drenada establecida con el ensayo de cono de laboratorio en muestras remoldeadas es muy compleja en las arcillas rápidas ya que resultan extremadamente blandas ($Su_r < 0,5$ kPa) y los valores obtenidos se van al eje del gráfico. La figura 14 establece la mejor de las correlaciones halladas, haciendo uso de la razón de presión intersticial (Bq) con el resto de arcillas. De nuevo los valores bajos de razón de presión intersticial se deben a zonas del terreno por encima del nivel freático.

$$Su_{\text{remoldeada-Cono}} = 0,8 * Bq^{-2,5} \quad [12]$$

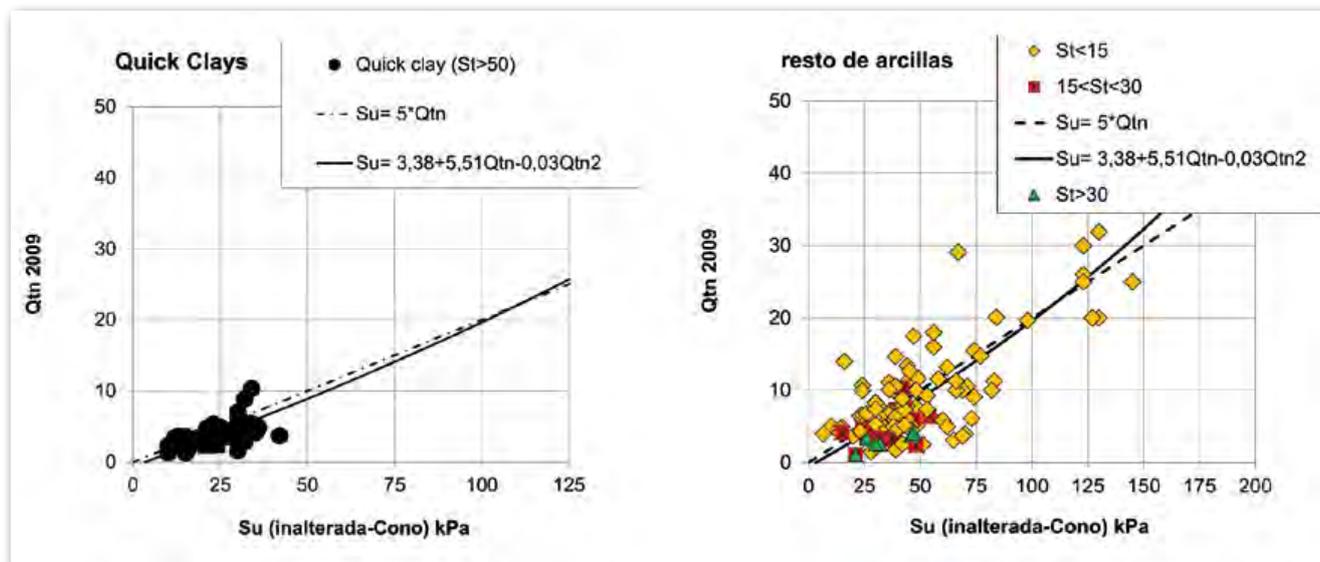


Figura 13. Correlación entre la resistencia al corte no drenada del ensayo de laboratorio de cono (S_u inalterada-Cono) y la resistencia al cono normalizada (Q_{tn}).

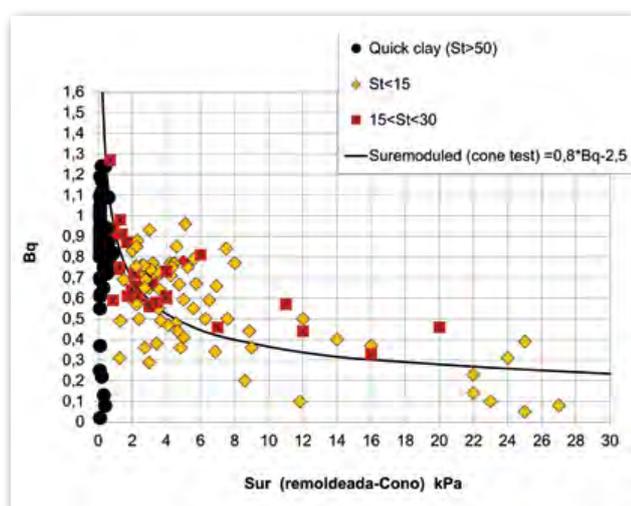


Figura 14. Correlación entre la razón de presión intersticial (B_q) y la resistencia al corte no drenada de muestras remoldeadas en el ensayo de cono ($S_{u\text{ remoldeada-Cono}}$).

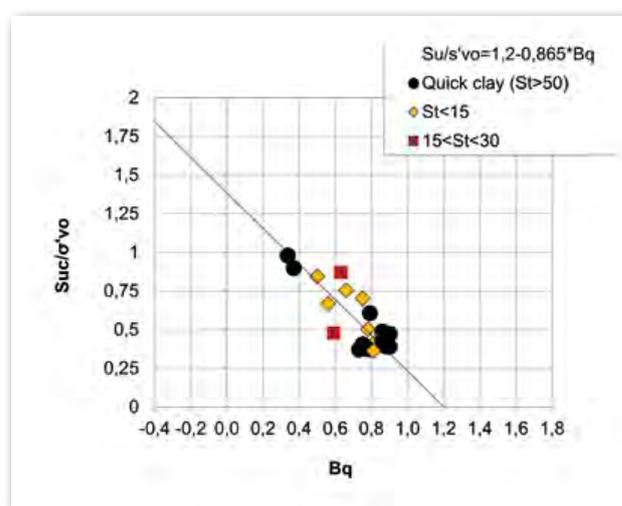


Figura 15. Correlación entre la razón de presión intersticial (B_q) y la resistencia al corte de compresión no drenada triaxial normalizada (S_{uc}/σ'_{vo}).

5.5. Resistencia al corte no drenada correlacionada de los ensayos triaxiales anisótrpos de compresión realizados en muestras inalteradas

La figura 15 muestra la correlación entre el valor de la resistencia al corte no drenada en muestras ensayadas en triaxiales anisótrpos de compresión (S_{uc}) y la razón de presión intersticial (B_q). La correlación es común entre arcillas rápidas y el resto de arcillas.

Se puede definir la correlación:

$$S_{uc}/\sigma'_{vo} \text{ (triaxial)} = 1,2 - 0,865 * B_q \quad [13]$$

Del mismo modo se pueden combinar las ecuaciones [4], [5] y [6] y definir el ajuste de SHANSEP como:

$$S_{uc}/\sigma'_{vo} \text{ (triaxial)} = 0,35 * (\alpha * q_{net})^{0,65} \quad [14]$$

Donde $\alpha = 0,33$ en arcillas rápidas y 0,25 en el resto.

6. CARTA DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS PROPUESTA PARA LAS ARCILLAS RÁPIDAS NORUEGAS

Fuente de continua discusión es la posibilidad de definir una carta de clasificación de suelos (*soil behaviour type*) donde se pudieran identificar las arcillas rápidas (*quick clays*) y las quebradizas (*brittle clays*) de manera separada al resto de arcillas. En los 28 ensayos de penetración estática analizados hemos obtenido una posible clasificación basada en la carta de Schneider *et al.*, 2008, extendiéndola a los campos en los que se han ubicado estas arcillas en el presente trabajo. Dicha carta se realiza con la resistencia al cono normalizada del ensayo CPTU (Q_{tn}) y la relación de incremento de lectura de presión de poros en la segunda piedra porosa normalizada por la presión efectiva del terreno ($\Delta u_2/\sigma'_v$).

La figura 16 muestra la carta con sus dominios en los que se describen arcillas sensitivas, las arcillas rápidas (*quick clays*), y los grados de sobreconsolidación observados en los ensayos de laboratorio correspondientes a esos pisos. Se muestran cinco de los ensayos analizados en dicha carta a modo de ejemplo.

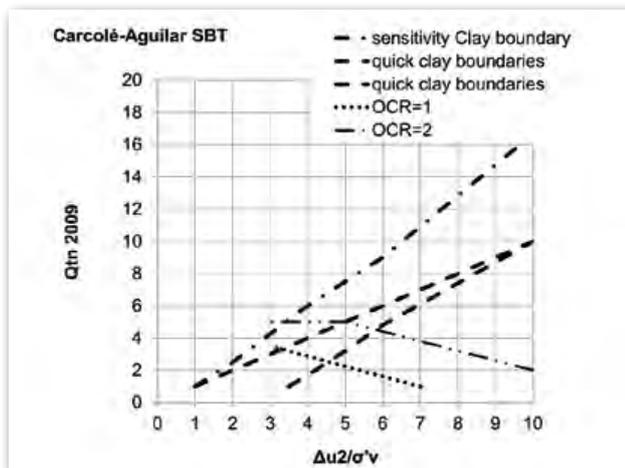


Figura 16. Carta de clasificación de arcillas rápidas, *quick clays*.

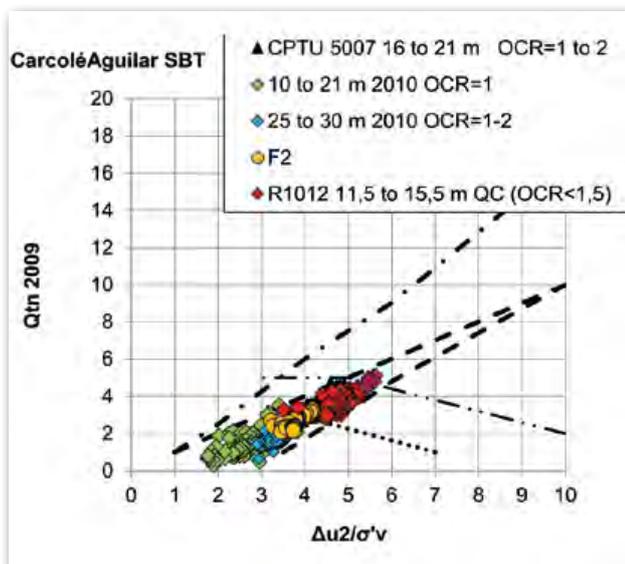


Figura 17. Carta de clasificación de arcillas rápidas, *quick clays*, aplicada a algunos de los ensayos de la obra.

7. CONCLUSIONES

A diferencia de otras arcillas sensitivas (Jamiolkowski, 1985), en las arcillas rápidas la resistencia al corte no drenada está condicionada por la presión efectiva del terreno. Las correlaciones habituales del ensayo de penetración estática (N_{kt} , N_u) no son satisfactorias. La vía para establecer esas correlaciones será en base al grado de sobreconsolidación, la tensión efectiva y la generación de presión de poros en la segunda piedra porosa.

Los parámetros en condiciones remoldeadas son muy difíciles de establecer ya que a efectos prácticos las arcillas rápidas plastifican.

Los materiales sensitivos se suelen identificar y clasificar en base al faldón del ensayo de penetración estática

(Robertson, 2014), eso resulta imposible con arcillas rápidas. Una carta de clasificación de suelos es posible haciendo uso de la carta de Schneider *et al.*, 2008, extendiéndola a campos que estos autores no definieron.

8. REFERENCIAS

Jaky, J. (1948). Pressure in soils. *Proceedings of the 2nd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rotterdam*, Vol. 1, pp. 103-107.

Jamiolkowski, M., (1985). New developments in field and laboratory testing of soils. *Proceedings of the 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, San Francisco*, Vol. 1, pp. 57-153.

Janbu, N. (1963). Soil compressibility as determined by oedometer and triaxial test. *Proceedings of the European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Weisbaden*, Vol. 1, pp. 19-25.

Ladd, C.C., y Foott, R. (1974). New design procedure for stability of soft clays, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 100(7): pp. 763-786.

Lunne, T., y Kleven, A. (1982). *Role of CPT in North Sea Foundation Engineering*, Norwegian Geotechnical Institute Publication, N139, 14P.

Lunne, T., (1997). *Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice*. London: Spoon Press.

Lunne, T., (2006). Effects of sample disturbance and consolidation procedures on measured shear strength of soft marine Norwegian clays. *Canadian Geotechnical Journal*, 43(7): pp. 726-750. <https://doi.org/10.1139/t06-040>

Mayne, P.W., y Kulhawy, F.H. (1982). K_0 -OCR relationships in soil. *Journal of Geotechnical Engineering*, 108(6): pp. 851-872.

Robertson, P.K. (2009). Interpretation of cone penetration test - a unified approach. *Canadian Geotechnical Journal*, 46(11): pp. 1337-1355.

Robertson, P.K. (2016). Cone penetration test (CPT)-based soil behaviour type (SBT) classification system-an update. *Canadian Geotechnical Journal*, 53(12): pp. 1910-1927. <https://doi.org/10.1139/cgj-2016-0044>

Robertson, P.K., y Cabal, K.L. (2014). *Guide to Cone Penetration Testing for Geotechnical Engineering*. 6th Edition. California: Gregg Drilling & Testing, Inc.

Schneider, J.A., (2008). Analysis of factors influencing soil classification using normalized piezocone tip resistance and pore pressure parameters. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 134(11): pp. 1569-1586.

Statens Vegvesen (2014). *Geoteknisk felthåndbok. Håndbok HB-V222*. And *Geoteknikk i vegbygging. Håndbok HB-V220*.

UNE-EN ISO 22476-1. *Investigación y ensayos geotécnicos. Ensayos de campo. Parte 1: Ensayos de penetración con el cono eléctrico y el piezocono* (ISO 22476-1:2012). Madrid: AENOR.

Uso y costes del hidrógeno en transporte

Use and Costs of Hydrogen in Mobility

Carlos Merino^{1*}, Jesús Ruiz de Pascual², Emilio Nieto³

Resumen

Las primeras pruebas del uso del hidrógeno y la electrolisis del agua se remontan a 1800. Fue utilizado para alimentar motores de combustión interna hace 200 años, utilizado para la sustentación de globos y aeronaves en los siglos XVIII y XIX, y propulsó a la humanidad hacia la Luna en la década de los 60. Ha servido para la industria de los fertilizantes y jugado un papel importante en la industria energética para el refinado de petróleo. En el momento actual se postula como una de las palancas para la descarbonización del sector transporte debido a su versatilidad, conjunción con las energías renovables y su proyección en la reducción de precio tanto del H₂ como de los equipos auxiliares.

Palabras clave: hidrógeno, transporte, pila de combustible, hidrógeno verde, descarbonización.

Abstract

The first tests of hydrogen and water electrolysis date back to 1800 and it has since been used to power internal combustion engines, sustain balloons and airplanes in the 18th and 19th centuries, and drive humanity to the moon in the 1960s. It has helped the fertilizer industry and has played a significant role in oil refining in the energy industry. Currently, it's being postulated as one of the levers for the decarbonisation of the transport sector due to its versatility, its conjunction with renewable energies and its projection in reducing the price of both H₂ and auxiliary equipment.

Keywords: Hydrogen, transport, fuel cell, green hydrogen, low carbon fuel.

ABREVIATURAS UTILIZADAS

FCEV: Fuel cell electric vehicle
CCS: Carbon capture and storage
LOHC: Liquid organics hydrogen carriers
BEV: Battery electric vehicle
TCO: Total cost ownership
GNL: Gas natural licuado
ICE: Internal combustion engine
BoP: Balance of plant

1. INTRODUCCIÓN

La demanda de hidrógeno para usos industriales se ha multiplicado por tres desde finales de los años 70. Este hidrógeno se suministra en la actualidad casi por completo a partir de fuentes de combustibles fósiles con un consumo del 6 % de gas natural y el 2 % de carbón a nivel mundial, situándose en niveles de demanda de alrededor de 330 millones de toneladas equivalentes de petróleo (Mtep) y 830 millones de toneladas de dióxido de carbono al año (MtCO₂/año).

El mercado existente para el hidrógeno se basa en sus atributos de ligereza, almacenable, alto contenido de energía por unidad de masa y fácil producción a escala industrial. El creciente interés actual en el uso generalizado del hidrógeno para sistemas de energía limpia se basa en gran medida en dos atributos adicionales, el hidrógeno se puede utilizar sin emisiones directas de contaminantes atmosféricos o gases de efecto invernadero y se puede generar a partir de una amplia gama de fuentes de energía bajas en carbono. La producción baja en carbono a partir de combustibles fósiles también es posible, si se combina con la captura, el uso y el almacenamiento de carbono (CCS) y se mitigan las emisiones durante la extracción y el suministro de combustibles fósiles, si bien la tendencia es a la generación de hidrógeno verde a partir de energías renovables.

En términos generales, el hidrógeno puede contribuir a un futuro energético resiliente y sostenible de dos maneras:

- Las aplicaciones existentes del hidrógeno pueden utilizar hidrógeno producido utilizando métodos de producción limpios a partir de un conjunto diverso de fuentes de energía renovable.
- El hidrógeno se puede utilizar en una amplia gama de nuevas aplicaciones como alternativa a los combustibles e insumos actuales, o como complemento al mayor uso de la electricidad en estas aplicaciones. En el transporte, la calefacción, la producción de acero y la electricidad, el hidrógeno puede utilizarse en su forma pura o convertirse en combustibles a base de hidrógeno como los electrocombustibles (e-fuels) y el amoníaco.

* Autor de contacto: carlos.merino@cnh2.es

¹ Ingeniero industrial (Universidad de Castilla-La Mancha). Director técnico (Centro Nacional del Hidrógeno).

² Ingeniero industrial (Universidad de Castilla-La Mancha). Ingeniero de la Unidad de Aplicaciones (Centro Nacional del Hidrógeno).

³ Dr. Ciencias Químicas (Universidad Autónoma de Madrid). Director (Centro Nacional del Hidrógeno).

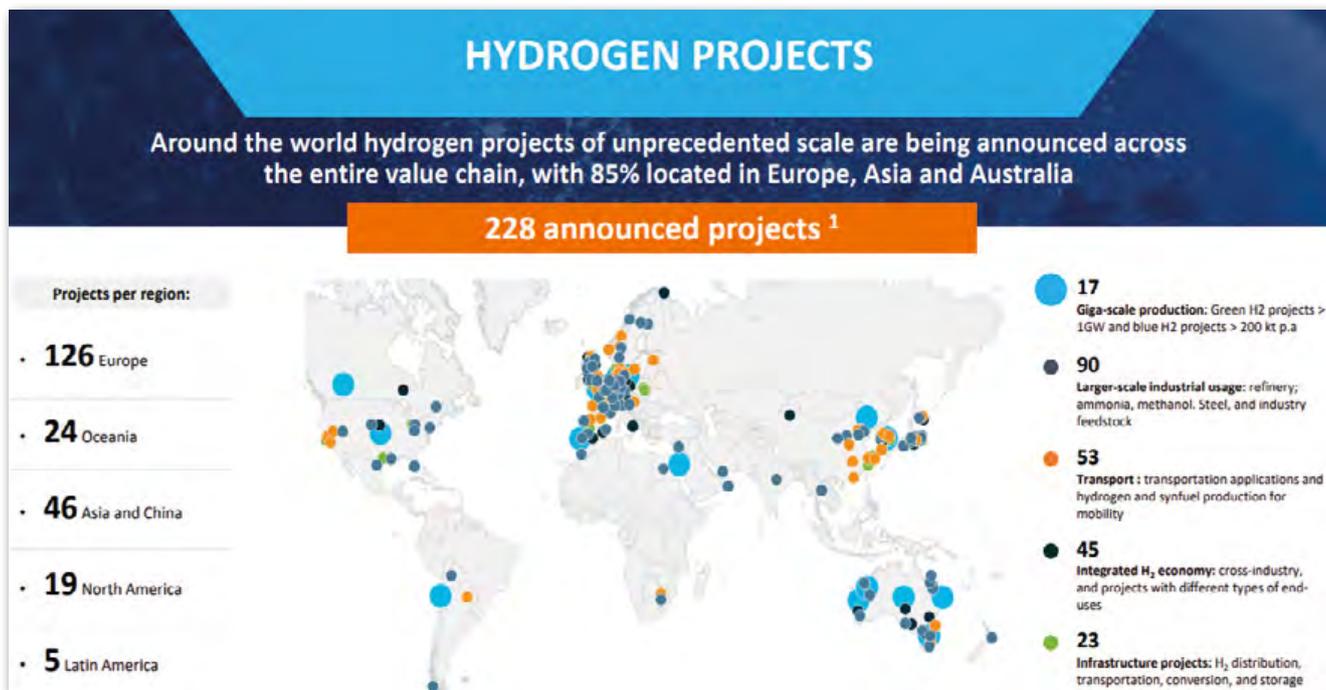


Figura 1. Grandes proyectos de hidrógeno (Fuente: Hydrogen Council).

En ambos sentidos, el hidrógeno tiene el potencial de reforzar y conectar diferentes partes del sistema energético. Al producir hidrógeno, la electricidad renovable se puede utilizar en aplicaciones que son mejor atendidas por combustibles químicos. La energía baja en carbono se puede suministrar a distancias muy largas y la electricidad se puede almacenar para satisfacer los desequilibrios semanales o mensuales en la oferta y la demanda.

El interés en el potencial del hidrógeno como portador de energía bajo en carbono no es nuevo. En las últimas décadas, una amplia gama de expertos ha investigado el potencial para producir hidrógeno a partir de diversas fuentes, transportarlo, almacenarlo y usarlo para proporcionar energía sin emisiones. Los dos grandes ciclos anteriores de entusiasmo por el hidrógeno se centraron en gran medida en el uso de pilas de combustible en el sector del transporte. Lo que es nuevo hoy en día es tanto la amplitud de las posibilidades para el uso del hidrógeno que se está discutiendo como la profundidad del entusiasmo político por esas posibilidades en todo el mundo como medio para lograr los objetivos medioambientales.

El conjunto actual de voces a favor del hidrógeno incluye a proveedores de electricidad renovable, productores de gas industrial, servicios de electricidad y gas, fabricantes de automóviles, compañías de petróleo y gas, grandes empresas de ingeniería y los gobiernos de la mayoría de las grandes economías. También incluye a aquellos que usan, o podrían usar, hidrógeno como materia prima para la producción industrial, no solo de energía.

El número de países con políticas que apoyan directamente la inversión en tecnologías del hidrógeno está aumentando, junto con el número de sectores a los que se dirigen. Como consecuencia en los últimos años, el gasto mundial en investigación, desarrollo y demostración de energía de hidrógeno ha aumentado.

2. PRODUCCIÓN Y UTILIZACIÓN DEL HIDRÓGENO

La demanda mundial de hidrógeno se sitúa alrededor de 70 millones de toneladas (Mt). Las principales aplicaciones de este hidrógeno son el refinado de petróleo y la producción de amoníaco, principalmente para fertilizantes. Existen otras 45 Mt de demanda de hidrógeno como parte de una mezcla de gases, como el gas de síntesis, para combustible o materia prima. Las principales aplicaciones del hidrógeno como parte de una mezcla de gases son la producción de metanol y la producción de acero. Si bien un tercio de la demanda de hidrógeno hoy en día se destina a aplicaciones del sector del transporte en un sentido amplio, en refinerías y para metanol utilizado en combustible para vehículos, en los vehículos de pila de combustible se utilizan menos de 0,01 Mt por año de hidrógeno puro.

La gran mayoría del hidrógeno producido hoy en día es a partir de combustibles fósiles. Alrededor del 60 % de él se produce en instalaciones de producción de hidrógeno dedicadas, lo que significa que el hidrógeno es su producto principal, producido en su mayoría a partir de gas natural, aunque parte proviene del carbón y una pequeña fracción proviene de la electrólisis del agua. Un tercio del suministro mundial es hidrógeno “subproducto”, lo que significa que proviene de instalaciones y procesos diseñados principalmente para otro fin. Este subproducto de hidrógeno a menudo necesita secado u otros tipos de acondicionamiento. La mayor parte del hidrógeno se produce actualmente cerca de su uso final, utilizando recursos extraídos en el propio país.

En general, menos del 0,7 % de la producción actual de hidrógeno proviene de energías renovables o de plantas de combustibles fósiles equipadas con CCS por lo que la producción de hidrógeno hoy en día es responsable de 830 MtCO₂/año. En general, la demanda de hidrógeno puro que se suministra desde instalaciones dedicadas es la más sencilla de reemplazar con fuentes alternativas de hidrógeno bajo en carbono.

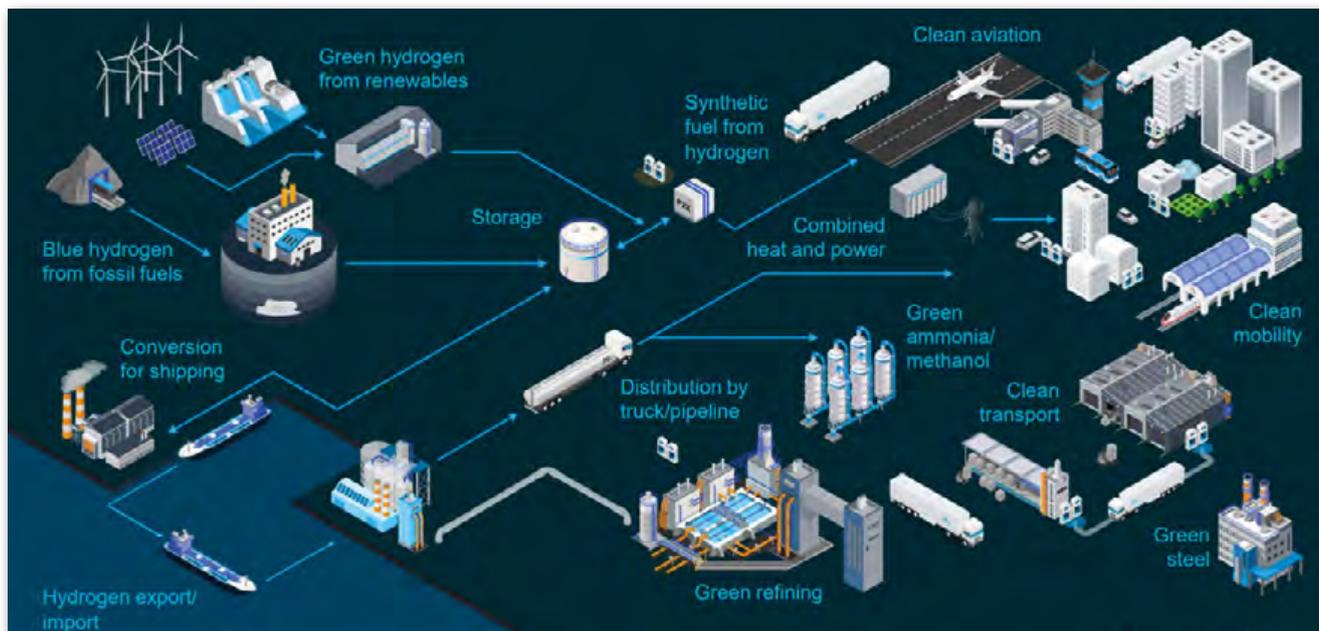


Figura 2. Usos sectoriales del hidrógeno (Fuente: Hydrogen Council).

3. UN VECTOR ENERGÉTICO Y NO UNA FUENTE DE ENERGÍA PRIMARIA

El hidrógeno no es una fuente de energía primaria, sino un vector energético o portador de energía, lo que significa que su papel potencial tiene similitudes con el de la electricidad. Tanto el hidrógeno como la electricidad pueden ser producidos por diversas fuentes de energía y tecnologías. Ambos son versátiles y se pueden utilizar en muchas aplicaciones diferentes. No se producen gases de efecto invernadero, partículas, óxidos de azufre u ozono troposférico por el uso de hidrógeno o electricidad. Si el hidrógeno se utiliza en una pila de combustible, no emite nada más que agua. Sin embargo, tanto el hidrógeno como la electricidad pueden tener una alta intensidad de CO₂ aguas arriba si se producen a partir de combustibles fósiles como el carbón, el petróleo o el gas natural. Esta desventaja solo puede superarse utilizando energías renovables o equipando plantas de combustibles fósiles con sistemas CCS.

La diferencia crucial entre el hidrógeno y la electricidad es que el hidrógeno es un portador de energía química. La energía química es atractiva porque puede almacenarse y transportarse de forma estable, como se hace hoy en día con el petróleo, el carbón, la biomasa y el gas natural. Debido a su naturaleza molecular, el hidrógeno también se puede combinar con otros elementos como el carbono y el nitrógeno para hacer combustibles a base de hidrógeno que son más fáciles de manejar y se pueden utilizar como materia prima en la industria, lo que ayuda a reducir las emisiones.

Todos los portadores de energía, incluidos los combustibles fósiles, encuentran pérdidas de eficiencia cada vez que se producen, convierten o utilizan. En el caso del hidrógeno, estas pérdidas pueden acumularse en diferentes etapas de la cadena de valor. Después de convertir la electricidad en hidrógeno, enviarla y almacenarla y luego convertirla de nuevo en electricidad en una pila de combustible, la energía entregada puede estar por debajo del 30 %. Esto hace que el hidrógeno sea más caro que

la electricidad o el gas natural utilizado para producirlo. También se aboga por minimizar el número de conversiones entre portadores de energía en cualquier cadena de valor.

Dicho esto, en ausencia de restricciones al suministro de energía y siempre que se valoren las emisiones de CO₂, la eficiencia puede ser en gran medida una cuestión de economía, que debe considerarse a nivel de toda la cadena de valor. Esto es importante ya que el hidrógeno se puede utilizar con una eficiencia mucho mayor en ciertas aplicaciones y tiene el potencial de producirse sin emisiones de gases de efecto invernadero. Por ejemplo, una pila de combustible de hidrógeno en un vehículo tiene una eficiencia de alrededor del 60 %, mientras que un motor de combustión interna de gasolina es alrededor del 20 % y una moderna planta de energía a carbón es alrededor del 45 %, que considerando la línea eléctrica las pérdidas representan un 10 % adicional o más.

Power-to-X es un término comúnmente utilizado para la conversión de electricidad a otros portadores de energía o productos químicos, generalmente a través del hidrógeno producido por la electrólisis del agua. La "X" puede representar cualquier combustible, producto químico, potencia o calor resultante. Por ejemplo, *power-to-gas* se refiere a la producción de hidrógeno electrolítico en sí mismo o metano sintético producido a partir de hidrógeno electrolítico combinado con CO₂. Del mismo modo, *power-to-liquids* se refiere a la producción de combustibles líquidos a base de hidrógeno. Juntos, los combustibles a base de hidrógeno que integran hidrógeno electrolítico a veces se denominan electrocombustibles o "e-Fuels".

En los últimos años, los colores se han utilizado para referirse a diferentes fuentes de producción de hidrógeno. Negro, gris o marrón se refieren a la producción de hidrógeno a partir de carbón, gas natural y lignito respectivamente. Azul se utiliza comúnmente para la producción de hidrógeno a partir de combustibles fósiles con emisiones de CO₂ reducidas por el uso de CCS. Verde es un término aplicado a la producción de hidrógeno a partir de electricidad renovable.

En general, no hay colores establecidos para el hidrógeno a partir de diferente mix de electricidad de red. Dado que los impactos ambientales de cada una de estas rutas de producción pueden variar considerablemente según la fuente de energía, la región y el tipo de CCS aplicado.

4. PROPIEDADES FÍSICAS MÁS RELEVANTES DEL HIDRÓGENO Y CONSIDERACIONES DE SEGURIDAD Y SALUD

El hidrógeno contiene más energía por unidad de masa que el gas natural o la gasolina, lo que lo hace atractivo como combustible de transporte. Sin embargo, el hidrógeno es el elemento más ligero y, por lo tanto, tiene una baja densidad de energía por unidad de volumen. Esto significa que se deben mover mayores volúmenes de hidrógeno para satisfacer demandas de energía idénticas en comparación con otros combustibles. Esto se puede lograr, por ejemplo, mediante el uso de tuberías más grandes o de flujo más rápido y tanques de almacenamiento más grandes. El hidrógeno puede ser comprimido, licuado o transformado en combustibles a base de hidrógeno que tienen una mayor densidad de energía.

Al igual que otros portadores de energía, el hidrógeno presenta ciertos riesgos para la salud y la seguridad cuando se usa a gran escala. Las consideraciones e incidentes de seguridad pueden ralentizar o incluso impedir el despliegue de una nueva tecnología energética si los riesgos no se comunican y gestionan bien. Por otro lado, los impactos en la salud y la seguridad de los combustibles tradicionales como gasolina, diésel, gas natural, electricidad o carbón son asumidos y rara vez cuestionados.

Como gas ligero de moléculas pequeñas, el hidrógeno requiere equipos y procedimientos especiales para manejarlo. El hidrógeno es tan pequeño que puede difundirse en algunos materiales, incluidos algunos tipos de tuberías de hierro y acero y aumentar su probabilidad de fallo. También se escapa más fácilmente a través de sellos y conectores que las moléculas más grandes, como el gas natural.

El hidrógeno es un gas no tóxico, pero su alta velocidad de llama, amplio rango de explosividad y baja energía de ignición lo hacen altamente inflamable. Esto se ve mitigado en parte por su alta flotabilidad y difusividad, lo que hace que se disipe rápidamente. Tiene una llama que no es visible a simple vista y es incolora e inodora, lo que dificulta que las personas detecten incendios y fugas. Ya hay muchas décadas de experiencia en el uso industrial del hidrógeno, incluso en grandes tuberías de distribución dedicadas. Existen protocolos para la manipulación segura en estos emplazamientos y también existen para la infraestructura de repostaje de hidrógeno en formas específicas del emplazamiento.

Las consideraciones de salud y seguridad de la mayoría de los combustibles y materias primas a base de hidrógeno son familiares al sector energético. Las excepciones son el amoníaco y los portadores de hidrógeno orgánico líquido (LOHC). Al igual que el hidrógeno, existe una larga experiencia en el uso industrial de amoníaco. Se ha utilizado

como refrigerante desde principios del siglo 19 y también se ha utilizado en producción de fertilizantes a escala durante más de un siglo.

5. OPORTUNIDADES PARA EL USO EN TRANSPORTE, EDIFICIOS Y GENERACIÓN DE ENERGÍA

Maximizar la promesa potencial a largo plazo del hidrógeno depende de ir más allá de los usos industriales existentes del hidrógeno descritos anteriormente y del desarrollo para su uso como combustible versátil en varios sectores nuevos. Este caso se basa en gran medida en su capacidad para ayudar a diversificar la mezcla de combustibles y si se produce a partir de fuentes bajas en carbono y apoyar la transición hacia un sistema de energía más limpio. Existen numerosas oportunidades para utilizar el hidrógeno fuera de las aplicaciones industriales, prácticamente todos los modos de transporte podrían funcionar con hidrógeno o combustibles a base de hidrógeno. Las necesidades de calefacción, refrigeración y electricidad de los edificios podrían satisfacerse a través del hidrógeno y el sector eléctrico podría utilizar hidrógeno o combustibles ricos en hidrógeno como el amoníaco para la producción de electricidad.

Dada esta versatilidad, puede ser tentador prever una economía de hidrógeno baja en carbono que lo abarque todo en el futuro. Sin embargo, otras opciones tecnológicas de energía limpia han avanzado mucho recientemente, sobre todo las soluciones que utilizan directamente la electricidad, lo que significa que el futuro del hidrógeno compartirá protagonismo con otras tecnologías. Servirá de integración en redes energéticas diversas y complementarias, así como medio para la descarbonización de sectores y usos difícilmente realizables por otras tecnologías.

6. EL HIDRÓGENO COMO BASE PARA COMBUSTIBLES LIMPIOS PARA EL TRANSPORTE

El hidrógeno ha sido anunciado durante mucho tiempo como un combustible potencial para el transporte. Se considera que ofrece una alternativa baja en carbono a los productos refinados de petróleo y gas natural y complementa otras alternativas como la electricidad y los biocombustibles avanzados. Los vehículos eléctricos de pila de combustible reducirían la contaminación del aire de manera localizada porque, al igual que los vehículos eléctricos de batería, tienen cero emisiones. El hidrógeno se puede convertir en combustibles a base de hidrógeno, incluidos el metano sintético, el metanol, el amoníaco y los combustibles líquidos sintéticos. Los combustibles líquidos sintéticos producidos a partir de hidrógeno electrolítico a menudo se denominan “e-Fuels” o electrocombustibles.

En general, los combustibles a base de hidrógeno podrían aprovechar la infraestructura existente con cambios limitados en la cadena de valor a expensas de las pérdidas de eficiencia. Los combustibles a base de hidrógeno ofrecen ventajas importantes para la aviación en forma de combustible sintético para aviones y para el transporte marítimo como amoníaco, sectores en los que es más difícil utilizar hidrógeno puro o electricidad.

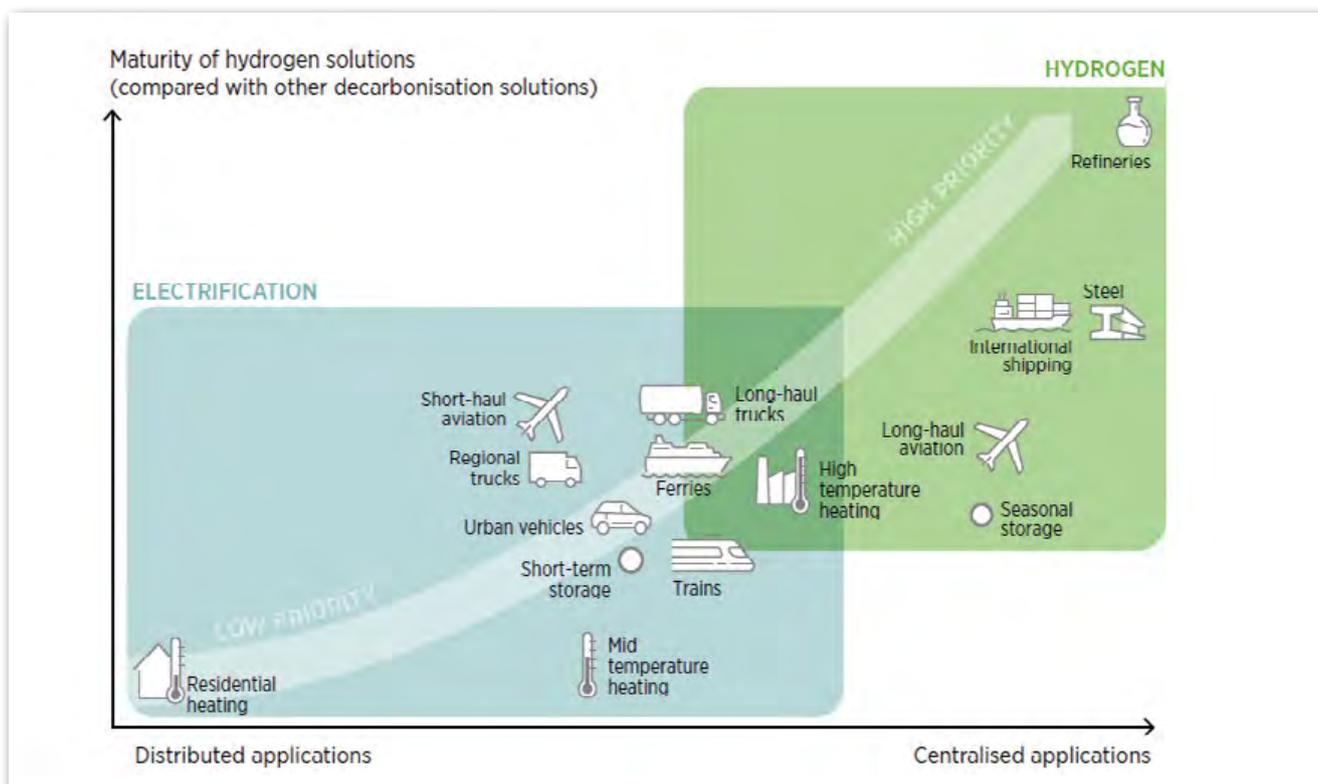


Figura 3. Potencialidad del uso del hidrógeno verde (Fuente: IRENA).

7. TRANSPORTE POR CARRETERA

Los FCEV ligeros reciben la mayor atención cuando se trata del uso directo del hidrógeno en aplicaciones de movilidad en la actualidad. Sin embargo, las pilas de combustible también se han implementado para aplicaciones de transporte y movimiento de mercancías principalmente carretillas elevadoras, autobuses, trenes y camiones.

7.1. Automóviles

Los automóviles representan la gran mayoría de la energía generada por pila de combustible desplegada en el transporte por carretera. Estados Unidos representa aproximadamente la mitad de los FCEV registrados, seguido de Japón con aproximadamente una cuarta parte, la Unión Europea, principalmente en Alemania y Francia y Corea. Casi todos los FCEV de automóviles de pasajeros son fabricados en la actualidad por Toyota, Honda y Hyundai.

7.2. Autobuses, camiones y vehículos de mercancías

Las carretillas elevadoras eléctricas de pila de combustible de hidrógeno ya son comercialmente viables como sustitutos de las carretillas elevadoras eléctricas de batería existentes y su cifra se sitúa en torno a 25.000 carretillas elevadoras con pila de combustible en todo el mundo.

En el caso de autobuses, China ha reportado el mayor despliegue, con más de 400 registrados para proyectos de demostración. Mas de 50 autobuses eléctricos de pila de combustible también están en funcionamiento en Europa, 25 en California y alrededor de 30 en Estados Unidos. Otros proyectos de demostración han desplegado autobuses eléctricos de pila de combustible en Corea y Japón. Los

volúmenes están aumentando rápidamente y se espera que miles estén en funcionamiento en los próximos años principalmente en China.

A nivel mundial, al menos 11 empresas fabrican actualmente autobuses eléctricos de pila de combustible. Ofrecen un largo rango de alcance significa que generalmente no hay necesidad de recargar durante el día. En general son muy adecuados para mayor kilometraje diario, por encima de 200 km por día, flotas de autobuses más grandes donde el reabastecimiento de combustible puede ser más simple que la recarga de autobuses eléctricos de batería y rutas y operaciones flexibles por ejemplo para extender una ruta determinada en ciertos períodos del año.

Recientemente se han producido, comprado y puesto en funcionamiento nuevos modelos de camiones y autobuses eléctricos de batería. El crecimiento del mercado ha sido más rápido en flotas que tienen acceso a oportunidades de carga y rangos diarios limitados de hasta 350 km por día, en especial autobuses urbanos y flotas de entrega de mercancías. Ciertas operaciones en estas flotas se utilizan intensivamente y requieren largos alcances y algunos propietarios y operadores han encontrado rentable en regiones donde existen estaciones de hidrógeno la instalación de extensores de autonomía “range extender” basados en pila de combustible para camiones y autobuses ligeros y medianos. Es probable que los autobuses interurbanos sean una aplicación prometedora y competitiva.

En cuanto a los camiones, China lidera el despliegue mundial de camiones eléctricos de pila de combustible y representa la mayoría de los proyectos de demostración junto con Suiza donde un cambio legislativo referente a cuota por emisiones ha propiciado la viabilidad económica del transporte pesado basado en hidrógeno.

7.3. Estaciones de repostaje de hidrógeno

La instalación de infraestructura de reabastecimiento de hidrógeno, aunque relativamente limitada hasta la fecha, ha cobrado impulso en los últimos años. Las estaciones de repostaje de hidrógeno para vehículos de transporte por carretera. Japón, Alemania y Estados Unidos son los tres países con el mayor número de estaciones de repostaje de hidrógeno disponibles públicamente. Sin embargo, estos son números aún pequeños en comparación con los puntos de recarga para BEV.

Los precios del hidrógeno suministrado son muy sensibles a la utilización de la estación de repostaje de hidrógeno. Una proporción aproximadamente de 10 coches por estación implica estaciones de repostaje tan pequeñas como 50 kg al día. Esto se traduce en un alto precio de alrededor de 15–25 €/kgH₂.

Las estaciones de repostaje pueden tardar tan solo seis meses en ponerse en funcionamiento en China, pero generalmente el plazo suele ser de hasta dos años. Las iniciativas que intentan mitigar el problema de coordinación y el desfase temporal relacionado con el desarrollo de la infraestructura incluyen el uso de las hidrogeneras cerca de los sitios de producción de hidrógeno en zonas industriales, centros intermodales o puertos y para servir a flotas cautivas como autobuses públicos o taxis.

7.4. Potencial demanda futura de hidrógeno en el transporte por carretera

Junto con los BEV, los FCEV son los únicos vehículos sin emisiones de escape y por lo tanto ofrecen el potencial de reducir drásticamente la contaminación del aire local, especialmente en las ciudades. También pueden reducir drásticamente las emisiones de CO₂ cuando se utiliza hidrógeno bajo en carbono. El rango de conducción y el patrón de reabastecimiento de combustible para los FCEV es similar al de los vehículos de combustión interna. Además, el hidrógeno tiene algunos atributos atractivos en comparación con los biocombustibles, ya

que generalmente no se enfrenta a limitaciones de recursos o competencia por el uso de la tierra. Sin embargo, los FCEV han tardado en despegar. Los desafíos técnicos y los altos precios han retrasado su introducción en el mercado. Mientras que el Hyundai Tucson-iX 35 se introdujo en 2013 y el Toyota Mirai en 2014, existe la necesidad de reducir aún más los costes y construir redes de hidrogeneras simultáneamente con la adopción de vehículos si se quiere atraer a más fabricantes de automóviles al mercado.

El potencial teórico para el uso futuro del hidrógeno en el transporte por carretera es muy grande. Técnicamente, cualquier modo de transporte por carretera puede alimentarse con hidrógeno, ya sea directamente utilizando pilas de combustible o a través de combustibles a base de hidrógeno en motores de combustión interna. Como indicación del tamaño de este mercado, si todos los 1.000 millones de automóviles, 190 millones de camiones y 25 millones de autobuses actualmente en la carretera a nivel mundial fueran reemplazados por FCEV, la demanda de hidrógeno sería tan alta como 300 MtH₂/año, más de cuatro veces la demanda mundial actual de hidrógeno puro. La demanda futura potencial teórica es aún mayor. En los próximos años hasta 2030, la demanda de petróleo del transporte por carretera crecerá un 10 % sin una acción fuerte para cumplir con los objetivos del Acuerdo de París. En particular, esto sería debido a la demanda de camiones en las economías emergentes, pero también por el aumento de la propiedad de automóviles. La propiedad de automóviles en países como India e incluso China está muy por debajo de la de países industrializados como la Unión Europea y los Estados Unidos. La propiedad de automóviles per cápita en los Estados Unidos es 25 veces mayor que la de la India.

8. COSTES Y PERSPECTIVAS DE EVOLUCIÓN

Si bien el potencial teórico es muy grande, el despliegue real dependerá en gran medida de las interacciones entre el coste de los vehículos, el coste del combustible y las



Figura 4. Oportunidades de ubicación de clúster de H₂ en el sur de Europa (Fuente: ETC).

políticas, así como el coste de las alternativas y la evolución de los hábitos de conducción y desarrollo de los nuevos modelos de movilidad en los diferentes países.

Cabe señalar que, desde la perspectiva de los consumidores, el coste del vehículo es solo uno de los muchos criterios de decisión. Los compradores de automóviles tienden a basar las decisiones de compra de vehículos en una serie de criterios, que incluyen rendimiento, comodidad, confiabilidad percibida y marca. La elección de qué vehículo comprar, en otras palabras, no es de ninguna manera solo una cuestión de coste o precio, o un cálculo comparativo del coste total de poseer y operar un vehículo. Tanto los BEV como los FCEV tienen algunas características compartidas que pueden atraer a los consumidores al tiempo que avanzan en una transición más amplia hacia el uso de combustibles bajos en carbono en el transporte. También tienen algunos atributos de rendimiento diferentes que probablemente atraerán a distintos grupos de consumidores.

Dejando de lado el coste del combustible, la competitividad de costes del uso directo de hidrógeno en FCEV depende de tres principalmente, el asociado a la pila de combustible, el almacenamiento a bordo y el repostaje.

La pila de combustible ha experimentado reducciones considerables de costes en la última década, pero siguen siendo altos y los volúmenes de producción siguen siendo bajos. El coste comercial actual de una pila de combustible típica se estima en 230 €/kW para grandes volúmenes.

Los costes podrían reducirse aún más en el futuro a través de los avances tecnológicos impulsados por la

investigación. Puede ser posible aumentar la actividad del catalizador y por lo tanto reducir el contenido de platino, que es uno de los componentes costosos de la pila de combustible, a la vez que puede ser posible desarrollar un catalizador libre de platino. También se necesita investigación para optimizar el diseño y la integración de los componentes de la pila de combustible en el conjunto de electrodos, disminuir los costes de las placas bipolares y el de los componentes del balance de planta "BoP" como son compresores y humidificadores. También podrían reducirse en el futuro a través de economías de escala aumentando el número de unidades. Aproximadamente la mitad del coste del sistema se encuentra en las placas bipolares, membranas, catalizador y capas de difusión de gases. El coste combinado de estos componentes podría reducirse por encima del 50 % aumentando la escala de la planta de 1.000 a 100.000 unidades por año. Sin embargo, estas estimaciones de reducción deben equilibrarse con el desafío de mejorar simultáneamente el rendimiento y la durabilidad de las pilas de combustible. En este sentido los fabricantes de automóviles están trabajando para aumentar la durabilidad mediante el desarrollo de mapas de operación de pilas de combustible para mitigar la degradación del rendimiento.

Los costes del tanque de almacenamiento a bordo están determinados por los materiales compuestos y se espera que se reduzcan a un ritmo más lento que las pilas de combustible. El almacenamiento a bordo de hidrógeno requiere que se comprima a 350-700 bar para automóviles y camiones y esto utiliza el equivalente al 6-15 % del contenido de energía de hidrógeno. Los costes de los sistemas de almacenamiento a bordo actuales, incluidos los accesorios, las válvulas y los reguladores, se estiman en 25 €/kWh de almacenamiento de hidrógeno a una escala de 10.000 unidades por año, disminuyendo a 14-18 €/kWh a una escala de 500.000 unidades por año. Para un camión pesado con un alcance de 700 km, implica costes de 30.000 € en la actualidad y una reducción potencial a 17.000 € para un tanque de 1.800 kWh.

El despliegue de la infraestructura de repostaje de hidrógeno es un requisito clave para los FCEV. Estimaciones de coste son difíciles de establecer porque hay aun pocas estaciones de repostaje de hidrógeno en todo el mundo y porque sus datos son usualmente no públicos. Sin embargo, la inversión se sitúa en torno a 0.6-2 millón de € para hidrógeno a presión de 700 bar y 0.15-1.6 millones de € a 350 bar. El extremo inferior de estos rangos es para estaciones con la capacidad de 50 kgH₂/día mientras el superior es para 1.300 kgH₂/día.

Los dos componentes de mayor coste son el compresor que puede ser hasta el 60 % cuando la presión de entrega es de 700 bar y los tanques de almacenamiento. El coste real de construir una estación varía considerablemente de un país a otro, principalmente como resultado de los diferentes requisitos de seguridad y permisos. Es probable que el aumento de la capacidad de 50 a 500 kgH₂/día reduzca el coste específico por kg de hidrógeno dispensado en un 75 %. Se están planificando estaciones de mayor capacidad de hasta unos pocos 1.000 kgH₂/día, especialmente para aplicaciones de transporte pesado. También existe la posibilidad de que los costes se reduzcan mediante un cambio a opciones de suministro más avanzadas como la presión muy alta o el hidrógeno líquido y mediante el despliegue

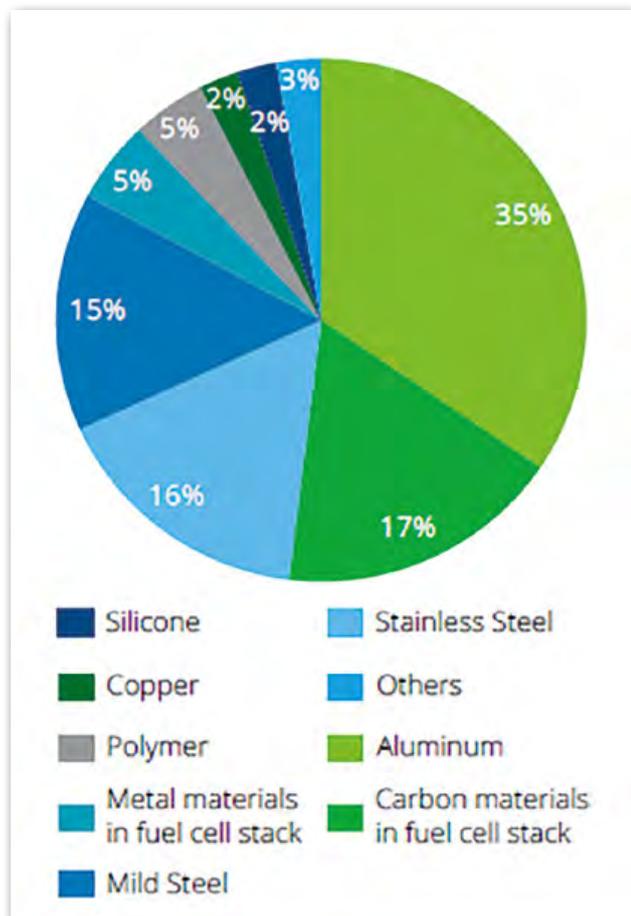


Figura 5. Desglose de materiales por peso de un sistema de pila de combustible (85kW) (Fuente: Deloitte & Ballard).

de la fabricación de componentes y equipos de estaciones de repostaje.

Las estaciones pequeñas tienen más sentido económico en la fase de despliegue inicial, ya que es más probable que aseguren mayores tasas de utilización de la capacidad cuando la demanda de hidrógeno de los vehículos de transporte es limitada, pero tienen un coste más alto por unidad de hidrógeno entregado. Una vez que se hayan establecido volúmenes de demanda suficientes, las estaciones más grandes serán la opción predominante. El coste del hidrógeno entregado también dependerá de si el hidrógeno se produce localmente o se entrega desde instalaciones de producción centralizadas. Las ventajas de la producción centralizada pueden verse compensadas por el coste de la distribución a la estación de repostaje por camión o tubería en donde la opción más barata se determinará caso por caso.

A pesar de los costes iniciales más altos que la infraestructura de carga para BEV, las estaciones de hidrógeno pueden ofrecer ventajas significativas cuando se implementan a escala, como un reabastecimiento de combustible más rápido y requisitos de espacio alrededor de 15 veces más bajos, así como una inversión final potencialmente más baja. A largo plazo, se necesitarían más de 400 estaciones de repostaje para dar servicio a una flota de 1 millón de FCEV de hidrógeno si la relación entre las estaciones de repostaje y los automóviles fuera similar a la de la flota actual de automóviles propulsados por petróleo. Comparado con BEV supondría casi 1 millón de estaciones de carga privadas y al menos 10.000 estaciones públicas de carga rápida que se necesitarían para una flota de 1 millón de BEV.

8.1.1. Coste total de propiedad de los coches

El consumo de energía por kilómetro tiende a ser mayor en vehículos grandes utilizados en largas distancias. Esto significa que los costes de combustible generalmente representan una mayor proporción de los costes totales para vehículos más pesados y para vehículos con alta utilización como camiones de larga distancia, autobuses interurbanos y flotas de automóviles comerciales. Como el coste de capital de un automóvil oscila entre el 70 % y el 95 % del coste total de propiedad TCO dependiendo del vehículo, será imperativo reducir el coste de los sistemas de pila de combustible y los tanques de almacenamiento de hidrógeno para lograr la competitividad con otras opciones. El caso es algo diferente para los camiones, para los cuales el coste de capital oscila entre el 40 y el 70 % del TCO, lo que significa que las reducciones para el hidrógeno suministrado son igual de importantes.

8.1.2. Coste total de propiedad de los vehículos medianos y pesados

El segmento de larga distancia de servicio pesado, incluidos camiones y autobuses interurbanos, ofrece fuertes perspectivas para los FCEV de hidrógeno porque requiere requisitos de largo alcance y alta potencia. Como resultado, los FCEV de servicio pesado tienden a ser más competitivos inmediatamente contra los BEV que en el caso de los

automóviles. La electrificación directa de las operaciones de autobuses regionales y el transporte pesado para carga de larga distancia se enfrentan a grandes desafíos con una mayor capacidad de batería, largos tiempos de carga y altos requisitos de energía que se traducen en pérdida de carga útil y costes adicionales de infraestructura de recarga. Los camiones eléctricos de pila de combustible superan algunos de estos desafíos.

En el caso de los camiones pesados de larga distancia, los costes de las pilas de combustible son más altos que las aplicaciones de vehículos ligeros, principalmente como resultado de los altos requisitos de durabilidad. Esto actualmente requiere una mayor carga de catalizadores, lo que se traduce en mayores costes. Incluso con los costes actuales, los FCEV podrían ser competitivos en general contra los BEV en aplicaciones de servicio pesado en rangos de más de 600 km si el hidrógeno pudiera entregarse a menos de 7 €/kgH₂, aunque el precio exacto del hidrógeno al que se vuelven competitivos depende del kilometraje anual general y otras características operativas.

En el caso de los camiones y también de los autobuses, la contribución de costes de la infraestructura podría reducirse mediante la operación de un modelo de flota cautiva que opere en rutas fijas, pudiendo utilizar una sola estación de repostaje de hidrógeno centralizada. Dado que las refinerías y los clústeres industriales a menudo están ubicados en los puertos, las operaciones portuarias ofrecen mercados más atractivos. La eficiencia de estas estrategias ha sido demostrada por la rápida adopción de autobuses y camiones eléctricos de pila de combustible de hidrógeno en China, donde el modelo de negocio para las operaciones intensivas de servicio mediano y pesado se ha fortalecido considerablemente por el éxito en el acceso al hidrógeno de bajo coste y el logro de altas tasas de utilización de las estaciones de repostaje.

8.2. El sector marítimo: buques y puertos

El sector marítimo es un importante consumidor de productos petrolíferos, representando alrededor del 5 % de la demanda mundial de petróleo. En volumen, alrededor del 90 % del comercio físico mundial de bienes se realiza por mar, de los cuales un tercio son productos energéticos, en particular productos derivados del petróleo. Alrededor del 80 % del uso de combustible en el sector marítimo se realiza en el transporte marítimo internacional. Como resultado, el transporte marítimo internacional es un importante contribuyente al cambio climático siendo responsable de alrededor del 2,5 % de las emisiones mundiales de CO₂ relacionadas con la energía. Al utilizar fueloil pesado, también tiene grandes efectos perjudiciales en la calidad del aire, especialmente en el área de los puertos. El hidrógeno es una opción para abordar estos desafíos en sector internacional naviero que combina potencialidad con el uso de maquinaria portuaria para el movimiento de mercancías. También existen oportunidades para utilizar hidrógeno y pilas de combustible para rutas de corto alcance como ferris.

Los productos derivados del petróleo dominan actualmente el sector del transporte marítimo y, en consecuencia, el uso de combustibles a base de hidrógeno en el

transporte marítimo es muy limitado. Sin embargo, existen proyectos para co-combustión de hidrógeno con diésel en motores de combustión interna marítima y proyectos para pilas de combustible de hasta 300 kW, principalmente para unidades de potencia auxiliares. Se planean proyectos que utilizan pilas de combustible, a menudo en combinación con baterías, en California, Irlanda, Noruega y para algunas operaciones en toda Europa.

Los barcos no utilizan amoníaco como combustible hoy en día. Sin embargo, varios proyectos de investigación y demostración están analizando el uso de amoníaco como combustible para barcos. La combustión satisfactoria de amoníaco en los motores existentes generalmente requeriría promotores de encendido para superar su menor energía de encendido y modificaciones en el motor.

8.2.1. *Potencial de los combustibles a base de hidrógeno en el sector marítimo*

Se espera que el volumen de transporte internacional de mercancías se triplique con creces para 2050 bajo las tendencias actuales. En ausencia de políticas de mitigación del cambio climático, esto podría conducir a un aumento del 50 % en la demanda de productos derivados del petróleo en el sector. La acción para reducir las emisiones asociadas con este uso de petróleo podría abrir un camino hacia el uso de combustibles a base de hidrógeno. La Organización Marítima Internacional (IMO) ha puesto en marcha estrategias para reducir las emisiones de azufre y gases de efecto invernadero.

Las posibles medidas para abordar el desafío de reducir las emisiones de azufre son la instalación de etapas de post-tratamiento, el cambio de combustible a GNL y el uso de fueloil muy bajo en azufre, aunque estas medidas solo contribuirán parcialmente al objetivo de reducción de gases de efecto invernadero del 50 % para 2050 en comparación con 1990. Es probable que las limitaciones a las emisiones de azufre estimulen la demanda como combustible para el transporte marítimo. Para alcanzar el objetivo de emisiones de gases de efecto invernadero, los biocombustibles avanzados, el hidrógeno, el amoníaco y los combustibles líquidos sintéticos a base de hidrógeno son potenciales combustibles. La elección del cambio de combustible se basa en el despliegue de infraestructura fuera del control directo de los armadores. El GNL, el hidrógeno y el amoníaco requerirían el desarrollo de instalaciones de abastecimiento de combustible, mientras que tanto el GNL como el amoníaco podrían basarse en la red de distribución existente. La disponibilidad y los costes de los biocombustibles avanzados son inciertos, ya que existe una competencia de demanda de otros sectores por un suministro limitado de biomasa sostenible.

En algunos países también se han establecido objetivos para alternativas bajas en carbono en el transporte marítimo nacional. Suecia y Noruega son dos ejemplos de esto, mientras que la Comisión Europea está desarrollando una estrategia para establecer objetivos de reducción de CO₂ para el transporte marítimo basada en el seguimiento, la notificación y la verificación de las emisiones de CO₂ de los grandes buques.

Entre las empresas, Maersk, la compañía marítima más grande del mundo, anunció ya en 2018 que su objetivo es

convertirse en carbono neutral para 2050. Para lograr esto, reconoce que los buques bajos en carbono deberán ser comercialmente viables para 2030. Los líderes de la industria también han redactado un plan de acción para descarbonizar el sector del transporte marítimo, que incluye proyectos de demostración, adopción de tecnología, transparencia e intercambio de conocimientos.

Los buques tienen una alta intensidad energética por kilómetro y grandes necesidades de energía de hasta 130 MW para los buques portacontenedores más grandes y por lo tanto plantean requisitos de combustible exigentes. Los principales componentes de los costes para los buques son los mismos que para el transporte por carretera, infraestructura, equipos a bordo y combustible.

La información sobre los costes del uso de hidrógeno líquido para el transporte marítimo internacional es incierta. Una estimación del coste adicional de las instalaciones de abastecimiento de combustible sugiere que la infraestructura de hidrógeno líquido podría ser un 30 % más cara que el GNL. Sin embargo, es probable que esta estimación omita los costes iniciales asociados con el desarrollo de una nueva infraestructura para el hidrógeno que actualmente no existe. Los principales componentes del coste son los buques de almacenamiento y búnker, que tendrían que escalarse en paralelo con el número de buques atendidos. Se necesitaría hidrógeno en el sitio o cercano para puertos pequeños dados los flujos más pequeños y el alto coste de las tuberías de hidrógeno dedicadas.

Entre los combustibles a base de hidrógeno, el amoníaco ya se comercializa a nivel mundial y parte de la infraestructura que se necesitaría para usarlo como combustible ya existe. Sin embargo, habría que construir nuevas instalaciones de abastecimiento de combustible. También sería necesario ampliar en masa la producción de amoníaco, las instalaciones portuarias y de distribución y los tanques de almacenamiento. Satisfacer la demanda de envío a largo plazo requeriría 500 Mt de amoníaco, casi tres veces el nivel de producción mundial actual y alrededor de treinta veces el volumen de amoníaco que se comercializa actualmente.

Parece poco probable que se produzca un cambio a combustibles bajos en carbono en ausencia de políticas, ya sean mandatos, fijación directa de precios del carbono y medidas más flexibles y potencialmente más aceptables, tales como normas de combustibles con bajas emisiones de carbono. Es probable que los fletadores, que actualmente supervisan más de la mitad de las operaciones de la flota de contenedores, operen con períodos de amortización mucho más cortos.

Los buques que sirven rutas comerciales marítimas de larga distancia pueden ofrecer el mejor margen potencial para el hidrógeno, el amoníaco y otros combustibles a base de hidrógeno. Esto se debe a que el sistema de pila de combustible y los costes de almacenamiento de hidrógeno tienen un impacto comparativamente menor en comparación con los costes de combustible. Además, los requisitos de espacio de las pilas de combustible podrían ser un problema, especialmente para los barcos más pequeños ya que necesitan casi el doble de espacio que un ICE. El almacenamiento de hidrógeno líquido requiere al menos cinco veces más volumen que los combustibles

convencionales a base de petróleo y el amoníaco requiere tres veces más volumen. A largo plazo, esto podría requerir el rediseño de los buques, viajes de distancia más cortos, reabastecimiento de combustible más frecuente, volúmenes de carga reducidos o una combinación de estos factores operativos dependiendo del buque, tipos de rutas y carga.

8.3. Ferroviario

El ferrocarril ya es el modo de transporte más electrificado. Aunque la proporción porcentual de vías electrificadas todavía se está expandiendo en la mayoría de los países, es probable que una mayor electrificación de las redes ferroviarias se encuentre con una disminución de los rendimientos de la inversión, ya que las líneas altamente utilizadas son las primeras en electrificarse. En Francia y Alemania, por ejemplo, las líneas electrificadas ahora transportan más del 80 % del tráfico, a pesar de que menos de la mitad de la red ferroviaria ha sido electrificada. Más allá de las opciones diésel-eléctricas bimodo, varias tecnologías ofrecen cero emisiones de escape en vías no electrificadas y la industria parece estar lista para avanzar hacia ellas en las próximas décadas. Las más innovadoras de estas tecnologías son los trenes eléctricos de batería y los trenes de pila de combustible de hidrógeno. Los trenes eléctricos de batería con baterías más pequeñas también se pueden usar en líneas parcialmente electrificadas, lo que permite reducir drásticamente los costes de electrificación al perder aquellas partes de la vía que son más difíciles de electrificar como puentes o túneles.

Los planes que involucran trenes de hidrógeno ya existen en varios países. Dos trenes de hidrógeno que pueden recorrer casi 800 km al día en un solo repostaje ya operan en Alemania.

Bajo supuestos optimistas sobre la reducción de costes de las pilas de combustible, los trenes de hidrógeno podrían convertirse en competitivos. La tecnología de pila de combustible de hidrógeno es la más competitiva para servicios que requieren un largo movimiento de distancia de grandes trenes con utilización de red de baja frecuencia, un conjunto común de condiciones en el transporte ferroviario de mercancías. El uso de hidrógeno en el ferrocarril podría combinarse con su uso para carretillas elevadoras, camiones y maquinaria auxiliar.

8.4. Aviación

La aviación representó casi el 2,8 % de las emisiones mundiales de CO₂ relacionadas con la energía y se espera que el tráfico aéreo de pasajeros se duplique con creces a mediados de siglo según las tendencias actuales. Las mejoras en la eficiencia deberían reducir el consumo de energía y frenar el aumento de la demanda de energía, pero eventualmente se necesitarán combustibles alternativos para evitar aumentos en las emisiones del sector. Los biocombustibles avanzados y los combustibles a base de hidrógeno son opciones líderes.

Si bien ha habido estudios de factibilidad y proyectos de demostración que prueban el alcance del uso de hidrógeno en aviones pequeños, el uso de hidrógeno puro como combustible de aviación requiere una importante I+D. La baja densidad de energía del hidrógeno y la necesidad de

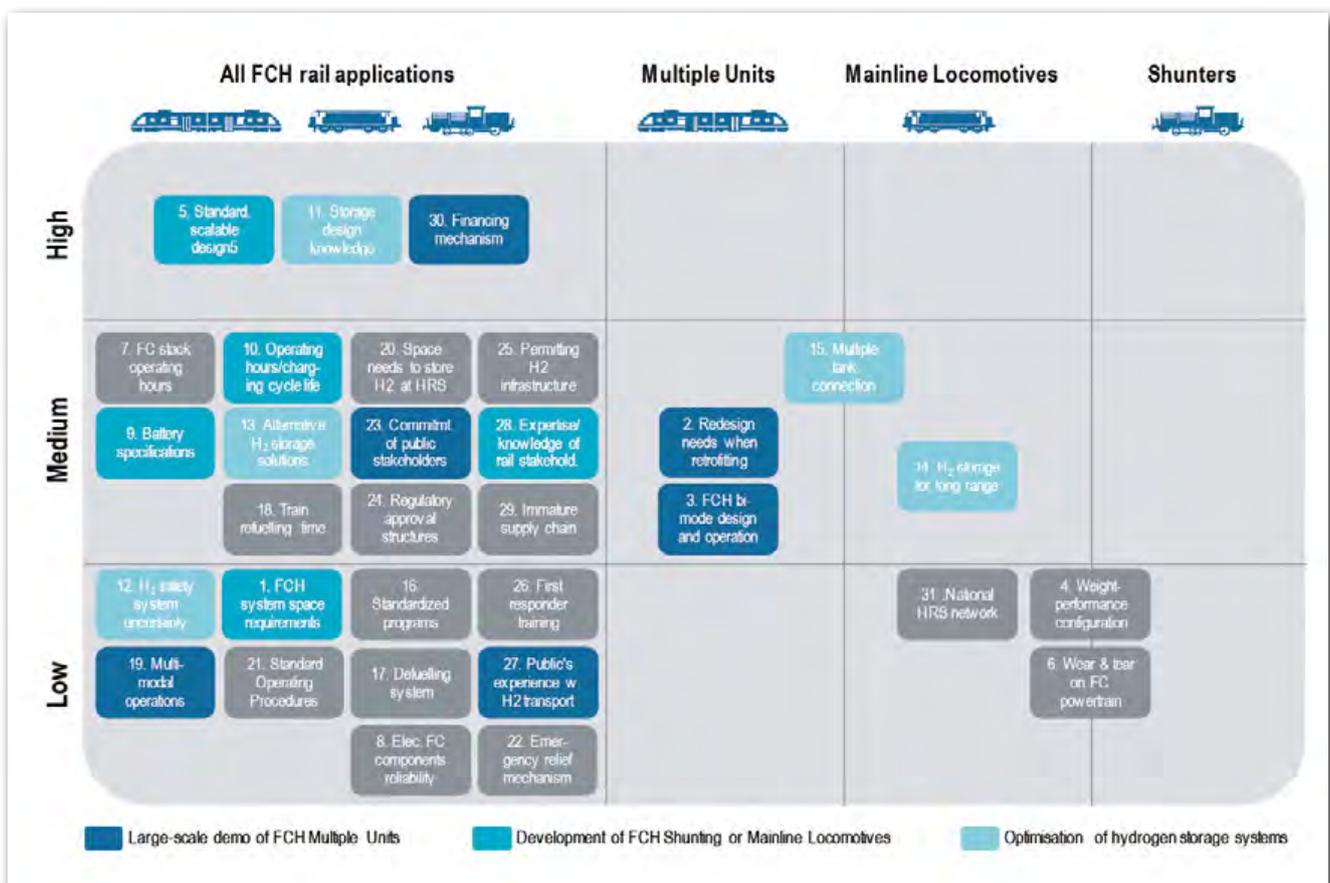


Figura 6. Barreras ferroviarias para H2 para afrontar mediante I+D+i (Fuente: Shift2Rail).

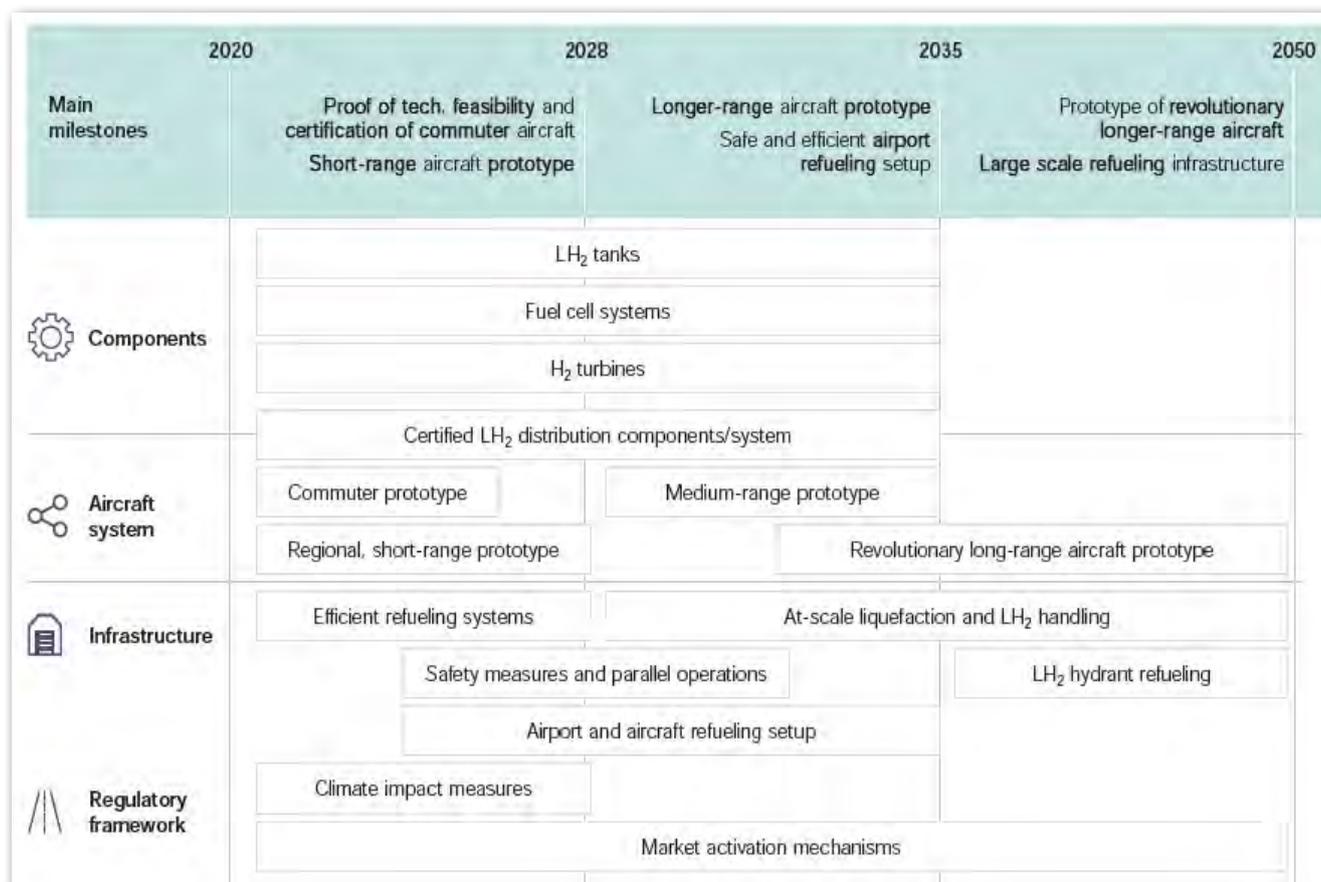


Figura 7. Hoja de ruta I+D+i de H₂ en aviación (Fuente: CleanSky2).

almacenamiento criogénico requerirían cambios en el diseño de las aeronaves, así como una nueva infraestructura de reabastecimiento y almacenamiento en los aeropuertos. Sin embargo, la electrificación directa también enfrenta desafíos, específicamente relacionados con el peso y los costes de la batería.

Por el contrario, los combustibles líquidos a base de hidrógeno no requerirían cambios en el diseño o la infraestructura de reabastecimiento de combustible en los aeropuertos. Se estima que los combustibles sintéticos basados en hidrógeno los llamados power-to-liquid son de cuatro a seis veces más caros que el combustible convencional para aviones en la actualidad. El combustible representa una gran parte de los costes totales de operación de aeronaves, por lo que esto aumentaría significativamente los costes operativos y presumiblemente los precios de los billetes. Este sería el caso independientemente del coste del combustible convencional para aviones, que a su vez podría encarecerse debido a la fijación de precios del carbono u otras políticas para reducir las emisiones. Las estimaciones del precio del CO₂ que se necesitaría para fomentar un cambio a la energía a líquidos en la aviación a largo plazo varían ampliamente. Dada la falta de otras alternativas, la mayoría de las estimaciones colocan estos costes entre los costes de reducción más altos para completar la transición a un sistema energético bajo en carbono.

Al igual que con los biocombustibles, el uso de combustibles a base de hidrógeno en la aviación podría promoverse a través de un objetivo para las cuotas de mezcla. Incluso un objetivo modesto podría ayudar a demostrar la viabilidad y apoyar la ampliación de la producción. La

organización de desarrollo de estándares ASTM actualmente establece límites de mezcla para combustibles alternativos que varían según el combustible desde tan solo el 10 % hasta el 90 %. Estos podrían proporcionar un punto de referencia útil para que los responsables de la toma de decisiones públicas y privadas establezcan límites superiores y podrían actualizarse a medida que surja una nueva tecnología de motores.

Además del uso a bordo del hidrógeno en la aviación, el hidrógeno ya se utiliza hoy en día en algunas unidades de potencia auxiliares que generan electricidad cuando el motor a reacción no está funcionando. Tales unidades, que generalmente funcionan con gas natural, pueden representar hasta el 20 % de las emisiones terrestres de las aeronaves.

9. CONCLUSIONES

El hidrógeno es capaz de abarcar todas las aplicaciones del transporte, si bien debería ser utilizado para aquellas aplicaciones donde la descarbonización sea una barrera para otro tipo de alternativas y tecnologías. Dispone de la madurez tecnológica suficiente y los avances y desarrollos realizados permiten hacer una proyección de reducción de precio tanto en términos de €/kg H₂ como de los dispositivos una vez que comience un despliegue masivo y entren en juego las economías de escala.

10. REFERENCIAS

Anselma, P.G., y Belingardi, G. (2022). Fuel cell electrified propulsion systems for long-haul heavy-duty trucks: present

and future cost-oriented sizing. *Applied Energy*, Vol. 321: 119354. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119354>

Ballard & Deloitte (2020). Fuelling the Future of Mobility. Hydrogen and Fuel Cell Solutions for Transportation. <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/cn/Documents/finance/deloitte-cn-fueling-the-future-of-mobility-en-200101.pdf>

IEA (2019). The Future of Hydrogen – Analysis. <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>

IEA (2021). Net Zero By 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector. <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>

IRENA (2022). Geopolitics of the Energy Transformation: The Hydrogen Factor. [https://www.irena.org/](https://www.irena.org/publications/2022/Jan/Geopolitics-of-the-Energy-Transformation-Hydrogen)

publications/2022/Jan/Geopolitics-of-the-Energy-Transformation-Hydrogen

Muñoz, P., Franceschini, E.A., Levitan, D., Rodríguez, C.M., Humana, T., y Correa, G. (2022). Comparative analysis of cost, emissions and fuel consumption of diesel, natural gas, electric and hydrogen urban buses. *Energy Conversion and Management*, Vol. 257: 115412. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115412>

Sens, L., Piguel, Y., Neuling, U., Timmerberg, S., Wilbrand, K., y Kaltschmitt, K. (2022). Cost minimized hydrogen from solar and wind – Production and supply in the European catchment area. *Energy Conversion and Management*, Vol. 265: 115742. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115742>

Investigación de los efectos hidrometeorológicos sobre los movimientos de masas en laderas de depósitos coluviales

Investigation of the Hydrometeorological Effects on Mass Movements on Slopes of Colluvial Deposits

Mario Patricio Ochoa Cañizares^{1*}

Resumen

Esta investigación tiene el propósito de exponer la deducción de una ley para predecir la velocidad de reptación de laderas conformadas por coluviones, afectadas por un elevado nivel freático y erosión hídrica, partiendo de dos variables predictivas: la precipitación y el caudal medios fluviales que causa socavación lateral en la base. La metodología consistió en la toma semanal a quincenal de coordenadas topográficas de puntos en el terreno llamados mojones, a partir de las cuales se calcularon el desplazamiento y la velocidad. El modelo geológico fue determinado a partir de estudios de geofísica y ensayos de suelos. Para elaborar el modelo matemático se utilizó el Teorema Pi II de Buckingham, relacionando la velocidad observada y las características del suelo con las variables predictivas mediante la combinación de parámetros adimensionales. El modelo matemático obtenido ha dado resultados muy cercanos frente a valores observados de velocidad. Su aplicación más importante es identificar umbrales de precipitación y caudal que producirían un aumento en la actividad en laderas de coluviones, a partir de modelos de evaluación de riesgo.

Palabras clave: Buckingham, coluvión, permeabilidad, reptación, velocidad.

Abstract

This research has the purpose of exposing aims to expose the deduction of a law to predict the creeping speed of slopes formed by colluvions, and affected by a high-water table and water erosion, based on two predictive variables: the average rainfall and the average fluvial flow that causes lateral undercut at the base. The methodology consisted of taking weekly to fortnightly topographical coordinates of points on the ground called milestones, from which displacement and speed were calculated. The geological model was determined from geophysical studies and soil tests. To develop the mathematical model, Buckingham's Pi II Theorem was used, relating the observed speed and the characteristics of the soil with to the predictive variables through the combination of dimensionless parameters. The mathematical model obtained has given very close results compared to observed speed values. Its most important application is to identify precipitation and flow thresholds that would produce an increase in activity on colluvium slopes, based on risk assessment models.

Keywords: Buckingham, colluvion, permeability, crawling, velocity.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Naturaleza del problema investigado

Los movimientos en masa investigados se localizan en la cuenca del río Negro, entre las poblaciones de San Bartolo y La Dolorosa, en la provincia de Morona Santiago, Ecuador.

El área de estudio está conformada por depósitos coluviales que son materiales de diverso tamaño transportados por gravedad y la acción del agua. Su origen es local, producto de la alteración *in situ* de las rocas y posterior transporte como derrubios de ladera o depósitos de solifluxión (González de Vallejo, 2004). Frecuentemente, están asociados a masas inestables. Los depósitos investigados están caracterizados por rocas metamórficas (mayormente pizarras y filitas gráficas), englobados en una matriz (suelo

areno-limoso), que se distribuye irregularmente en las vertientes del territorio montañoso, habiéndose formado por alteración y desintegración *in situ*, de las rocas ubicadas en las laderas superiores adyacentes y por la acción de la gravedad. Presentan inestabilidad con grietas y fracturación en la superficie.

Las laderas están afectadas por *procesos gravitacionales*, que consisten en el movimiento pendiente abajo de suelo, roca y regolito, agravados por el agua: lluvias y caudales erosivos. El agua afecta a la estabilidad de laderas de tres formas básicas: (1) aumento del peso por saturación de las laderas durante los temporales de lluvia; (2) infiltración hasta la profundidad de las superficies de movimiento; y (3), la erosión por el agua de la base o pie de una ladera (Keller y Blodgett, 2007).

La infiltración en la masa del suelo proviene del agua de vertientes en la ladera y del agua de lluvia, y se produce a través de los sistemas de grietas de tracción existentes que evidencian la descompresión del basamento rocoso, provocando el incremento de la presión de poros y del campo de las *fuerzas de filtración*, cuya magnitud

* Email: ingeochoa@hotmail.com

¹ Ingeniero civil. HIDROSANBARTOLO.



Figura 1. Zona de estudio en la cuenca del río Negro.

depende de la *permeabilidad* de la matriz del coluvión. Cuando los poros del sedimento se llenan de agua, se destruye la cohesión entre las partículas, permitiendo que se deslicen unas sobre otras con relativa facilidad. La saturación reduce la resistencia interna de los materiales, los cuales son puestos fácilmente en movimiento por la fuerza de la gravedad (Tarbuck y Lutgens, 2005). La socavación lateral que producen los cuerpos de agua de ríos, que fluyen en el pie de las laderas, disminuye su capacidad de sostenimiento.

Los procesos gravitacionales en la zona son movimientos *en masa* de tipo *reptación*, que es un movimiento superficial muy lento, prácticamente imperceptible, que afecta a suelos y materiales alterados, provocando deformaciones continuas que se manifiestan al cabo del tiempo en la inclinación o falta de alineación de árboles, vallas, muros, postes, etc. en las laderas. Es una de las formas más lentas de procesos gravitacionales (González de Vallejo, 2004). Cruden y Varnes (1996) la definen como movimientos graduales de rocas, escombros o suelo, a nivel superficial y subsuperficial pendiente abajo, sobre una o varias superficies de rotura. Esta definición se apega más a la naturaleza de los movimientos de coluviales estudiados, ya que, por su heterogeneidad, las superficies de rotura suelen alcanzar diversas profundidades. Otros autores (Highland y Bobrowsky, 2008) la definen como corrientes de tierra lenta (arrastre), causadas por una tensión cortante intensa, pero insuficiente para causar una falla.

El desencadenamiento de los movimientos de ladera por causas meteorológicas y climáticas está relacionado fundamentalmente con el volumen, intensidad y distribución de las precipitaciones y con la erosión fluvial (González de Vallejo, 2004).

La descripción del tipo de movimientos se realizó con base en la escala propuesta por Cruden y Varnes (1996) (figura 2), y es aplicable a movimientos de reptación, excluyendo hundimientos, colapsos o avalanchas que suelen producirse de modo violento.

El tipo de movimiento se describe mediante umbrales de velocidad; por ejemplo, el movimiento “muy lento” se produce cuando la velocidad es mayor a 60 mm/año (0.016 cm/d) y menor a 1.50 m/año (0.411 cm/d).

Cruden y Varnes (1996) consideran que la velocidad de movimiento puede ser el mejor parámetro para describir el potencial de daño de un deslizamiento. Sin embargo,

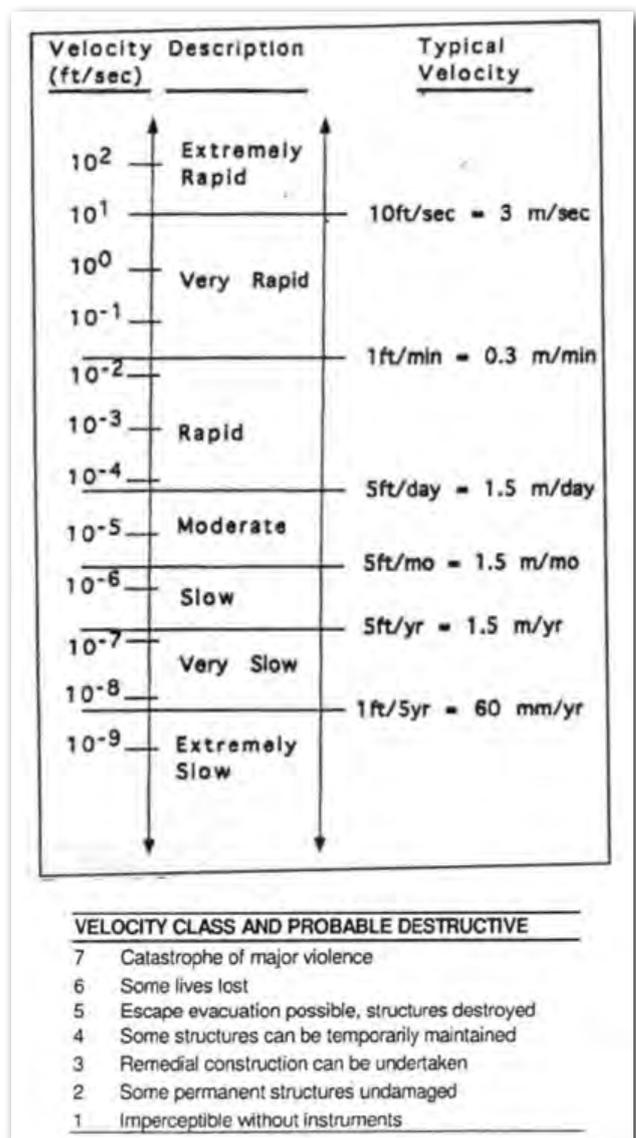


Figura 2. Escala tomada de Cruden y Varnes (1996) aplicable a procesos de reptación.

es muy difícil de predecir e incluso de medir. El modelo propuesto permitirá superar estas dificultades, y se espera contribuir al avance en posteriores investigaciones de esta importante área de la geología aplicada.

Los movimientos son de tipo traslacional, ya que los movimientos rotacionales se dan mayormente en laderas conformadas por suelos homogéneos (González de Vallejo, 2004).

Varios autores (Ferrer y Ayala, 1997) han establecido umbrales de intensidad y duración de la lluvia para el desencadenamiento de movimientos en masa en diferentes lugares. El principal inconveniente para su aplicación como medida preventiva es que no son extrapolables a otras zonas (González de Vallejo, 2004).

Por lo señalado, es de interés deducir una ley matemática que permita predecir la velocidad de reptación que se presentaría bajo la acción de determinadas condiciones hidrometeorológicas propias de una región (precipitación y caudal medios del río) aplicable a coluviones. En estos materiales, la hidrogeología puede ser muy compleja por su heterogeneidad y, como consecuencia, estos muestran una respuesta errática ante los efectos de las lluvias (Suárez, 2009); por lo que el análisis estadístico de la información reveló una correlación moderada entre valores de velocidad observados y calculados.

La ley de reptación es una ecuación que expresa la dependencia entre la velocidad que adopta una masa de coluviones, con un conjunto de ocho variables, de las cuales se eligen como fundamentales a la precipitación y el caudal medios del río Negro. Estas variables fundamentales se las conoce como predictivas, y a la variable dependiente (velocidad) se la conoce como predecible.

La información de las características hidrometeorológicas de la zona, y de los estudios geofísicos y geotécnicos, fue proporcionada por HIDROSANBATOLO, que aprovecha las aguas del río Negro en esta zona, para la generación de energía eléctrica.

El período de la investigación comprendió desde el 2 de agosto de 2016 hasta el 19 de noviembre de 2019. Se investigaron seis zonas inestables, las cuales se designaron mediante el posicionamiento de la tubería de conducción de la central HIDROSANBARTOLO, cuyo trazado se desarrolla en este sector (tabla 1).

Tabla 1. Posicionamiento (abscisas) de las zonas inestables investigadas

Zona	Abcisas
1	3+114 – 3+300
2	3+650 – 3+753
3	3+900 – 4+093
4	4+400 – 4+731
5	4+790 – 4+900
6	4+900 – 5+493

1.2. Marco geológico regional

En la figura 3 se muestran las unidades geológicas que componen las laderas. La roca de la formación Napo deformada (K_{ND}) subyace a los depósitos coluviales (Q_c).

La región se ubica en el frente Subandino, que está afectada por fallas inversas, que han causado fracturaciones y

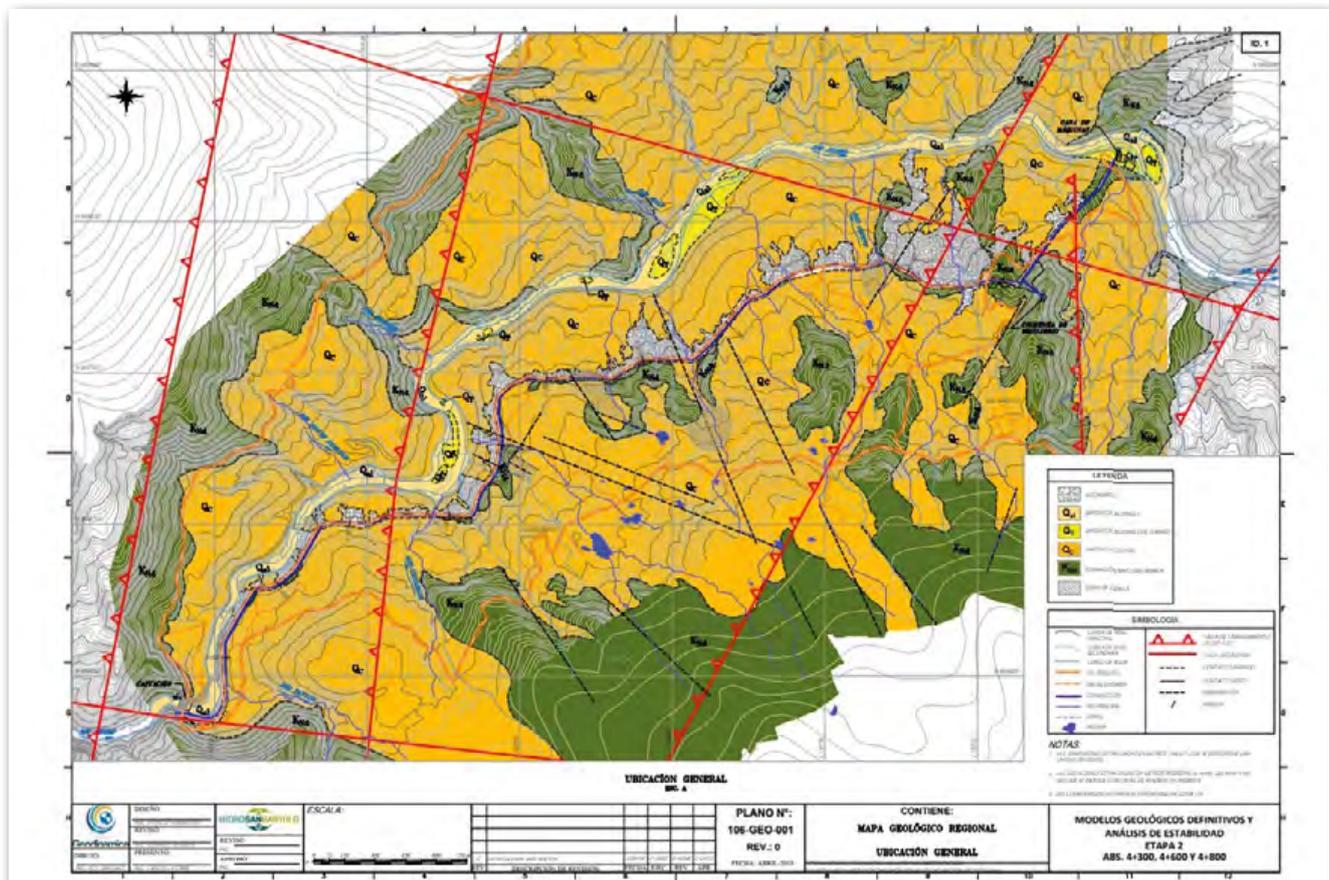


Figura 3. Marco geológico regional (Fuente: HIDROSANBARTOLO).

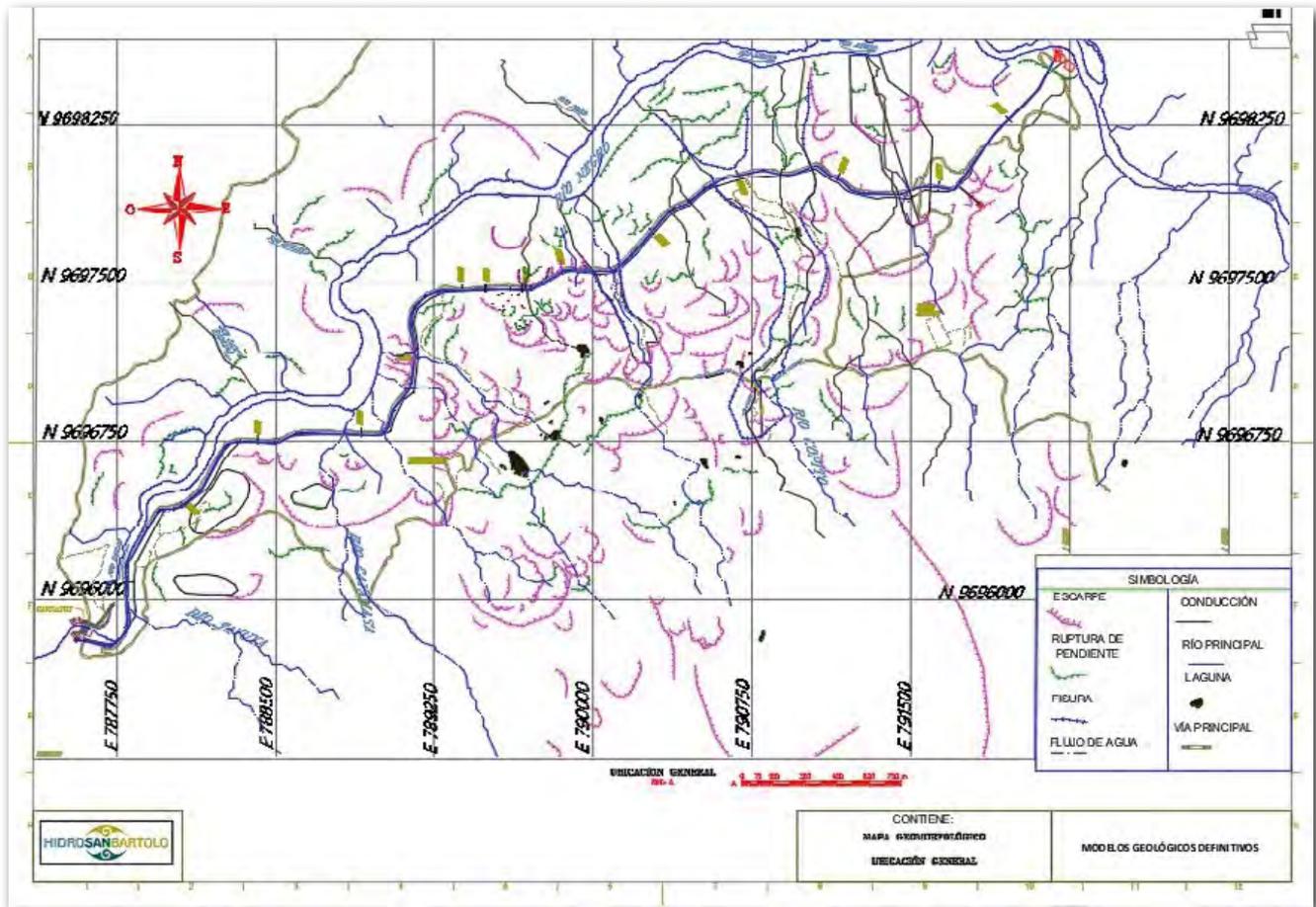


Figura 4. Plano topográfico de grietas, escarpes y zonas inestables.

cizallamientos en el basamento rocoso. La figura 4 muestra la presencia de grandes extensiones agrietadas y escarpadas, por donde el agua infiltra en la masa del suelo.

Existen rasgos morfológicos indicativos de que esta región ha sido afectada por movimientos en masa de tipo reptación, de diversa magnitud y edad (figuras 5 y 6).



Figura 5. Grieta de tracción hallada en la corona de la zona 1.



Figura 6. Grieta de tracción hallada en media ladera de la zona 4.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Explicación del método. Fundamento matemático

La base matemática de esta investigación es el Análisis Dimensional, basado en el teorema Π "pi" de Buckingham, cuyo marco conceptual puede consultarse en la obra de Gibbings (2011). Su aplicación se expone a continuación:

La variable predecible considerada es la velocidad media de reptación V , que adopta una masa de coluviones en un período de tiempo.

El simbolismo para las dimensiones básicas (L para longitud y T para tiempo) corresponde al adoptado por el Sistema Internacional de Unidades (Gibbings, 2011).

Las dimensiones de las cantidades físicas que intervienen en el problema se expresan a partir de las básicas (tabla 2).

Tabla 2. Dimensiones de cantidades físicas (Gibbings, 2011)

Cantidad	Dimensión	Símbolo
Velocidad	Longitud / tiempo	LT^{-1}
Aceleración	Velocidad / tiempo	LT^{-2}
Área	Longitud ²	L^2
Volumen	Longitud ³	L^3

2.2. Elección de variables

Las variables se eligen de manera que sean las más convenientes experimentalmente (Gibbings, 2011). Cada

variable y sus dimensiones se detallan como sigue (para denotar las dimensiones de una variable se utilizó el corchete []):

V: Velocidad de reptación	[V]=LT ⁻¹
P: Precipitación media	[P]=LT ⁰
Q: Caudal medio fluvial	[Q]=L ³ T ⁻¹
g: Aceleración de la gravedad	[g]=LT ⁻²
A: Área del deslizamiento	[A]=L ² T ⁰
h _s : Altura de la masa afectada por la presión de poros	[h _s]=LT ⁰
k: Coeficiente de permeabilidad del suelo	[k]=LT ⁻¹
j: Pendiente media natural de la ladera	[j]=L ⁰ T ⁰
tanφ: Tangente del ángulo de rozamiento interno de suelo	[tanφ]=L ⁰ T ⁰

Cuando las dimensiones están elevadas al exponente cero, significa que la variable es adimensional o que carece de esa dimensión. Por ejemplo, la precipitación tiene dimensión de longitud (L), y carece de la dimensión tiempo T, por lo que [P]=LT⁰. Esta notación será de utilidad en la deducción de los parámetros adimensionales.

Se adoptaron como variables fundamentales P y Q, que contienen las dimensiones L y T, pues engloban de mejor manera las características cinemáticas, geométricas, geotécnicas e hidrológicas del problema. A estas variables se las conoce como predictivas, y para las mismas, se verificó que el determinante de los exponentes de sus dimensiones es diferente de cero. Así, en la variable P: los exponentes son 1 y 0, y en la variable Q son 3 y -1, luego:

$$\det \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 3 & -1 \end{pmatrix} = -1 \neq 0$$

Cálculo del número de parámetros adimensionales Π:

Número de variables	= 9
Número de dimensiones fundamentales	= 2
Número de parámetros adimensionales	= 9 - 2 = 7.

Las variables restantes se combinan con el producto de potencias de las variables predictivas, para formar los parámetros adimensionales Π, cuyas expresiones se obtienen como sigue:

Velocidad de reptación V:

$$\begin{aligned} \Pi 1 &= P^x Q^y V \\ L^0 T^0 &= L^x L^{3y} T^{-y} L T^{-1} \\ x + 3y + 1 &= 0, -y - 1 = 0 \\ x &= 2, y = -1 \end{aligned}$$

$$\Pi 1 = \frac{V P^2}{Q}$$

Aceleración de la gravedad g:

$$\begin{aligned} \Pi 2 &= (P)^x (Q)^y g \\ L^0 T^0 &= L^x L^{3y} T^{-y} L T^{-2} \\ x + 3y + 1 &= 0, -y - 2 = 0 \\ x &= 5, y = -2 \end{aligned}$$

$$\Pi 2 = \frac{g P^5}{Q^2}$$

Área del deslizamiento en planta A:

$$\begin{aligned} \Pi 3 &= P^x Q^y A \\ L^0 T^0 &= L^x L^{3y} T^{-y} L^2 \quad \therefore \\ x + 3y + 2 &= 0, -y = 0 \\ x &= -2, y = 0 \end{aligned}$$

$$\Pi 3 = \frac{A}{P^2}$$

Espesor de la masa afectada por la presión de poros h_s:

$$\begin{aligned} \Pi 4 &= P^x Q^y h_s \\ L^0 T^0 &= L^x L^{3y} T^{-y} L \quad \therefore \quad x + 3y + 1 = 0, -y = 0 \\ x &= -1, y = 0 \end{aligned}$$

$$\Pi 4 = \frac{h_s}{P}$$

Coeficiente de permeabilidad k:

$$\begin{aligned} \Pi 5 &= P^x Q^y k \\ L^0 T^0 &= L^x L^{3y} T^{-y} L T^{-1} \quad \therefore \\ x + 3y + 1 &= 0, -y - 1 = 0 \\ x &= 2, y = -1 \end{aligned}$$

$$\Pi 5 = \frac{k P^2}{Q}$$

Las variables j y tanφ son adimensionales, por lo que las ecuaciones de sus parámetros toman la misma expresión:

$$\begin{aligned} \Pi 6 &= j \\ \Pi 7 &= \tan \emptyset \end{aligned}$$

El teorema de Buckingham establece que existe alguna función f₁ tal que:

$$f_1(\Pi 1, \Pi 2, \Pi 3, \Pi 4, \Pi 5, \Pi 6, \Pi 7) = 0 \quad [1]$$

$$f_1 \left(\frac{V P^2}{Q}, \frac{g P^5}{Q^2}, \frac{A}{P^2}, \frac{h_s}{P}, \frac{k P^2}{Q}, j, \tan \emptyset \right) = 0 \quad [2]$$

dado que se considera que estas variables explican en sí mismas el fenómeno (Gibbinngs, 2011).

Es posible mediante el producto de los parámetros Π combinar estos constituyendo nuevos parámetros, ya que son adimensionales.

Combinando los parámetros Π1, Π3 y Π5, se forma el parámetro Π8 que será igual a:

$$\Pi 8 = \frac{V k A P^2}{Q^2} \quad [3]$$

Combinando los parámetros Π2, Π4 y Π6 y el inverso del parámetro Π7, formamos el parámetro Π9 que es igual a:

$$\Pi 9 = \frac{P^4 g h_s j}{Q^2 \tan \emptyset} \quad [4]$$

Se puede formar la función f₂ tal que:

$$f_2(\Pi 8, \Pi 9) = f_2 \left(\frac{V k A P^2}{Q^2}, \frac{P^4 g h_s j}{Q^2 \tan \emptyset} \right) = 0 \quad [5]$$

Finalmente, si se asumen ciertas condiciones de regularidad y diferenciabilidad sobre la función anterior, podrá usarse el teorema de la función implícita, para expresar el parámetro Π8 que contiene la variable predecible V, mediante una función f₃ del parámetro Π9:

$$\frac{V k A P^2}{Q^2} = f_3 \left(\frac{P^4 g h_s j}{Q^2 \tan \phi} \right) \quad [6]$$

La función f_3 es desconocida, y se determinó calculando Π_8 y Π_9 con los datos de campo para cada una de las variables.

2.3. Escarpes. Implantación de mojones en el terreno

Los escarpes se representaron en un mapa topográfico, para determinar el área de cada zona inestable, representada por la variable A . En campo se procedió a la colocación manual de 77 mojones cilíndricos de hormigón de

resistencia 180 kg/cm² a 28 días, de 15 cm de diámetro y 30 de altura.

Para que los datos obtenidos reflejen mejor el resultado de la investigación, se colocaron los mojones en el terreno, siguiendo los siguientes criterios: (1) regiones en media ladera de baja pendiente, para evitar que derrumbes locales influyan en la toma de coordenadas; (2) regiones alejadas del río en el pie del talud y de la corona del deslizamiento; (3) sitios alejados de bordes de quebradas; y (4), se colocaron a profundidad de 30 cm para evitar que su movimiento sea causado por perturbaciones extrañas a la reptación. Las figuras 7 y 8 muestran el escarpe principal para cada zona, los mojones instalados y rasgos morfológicos.

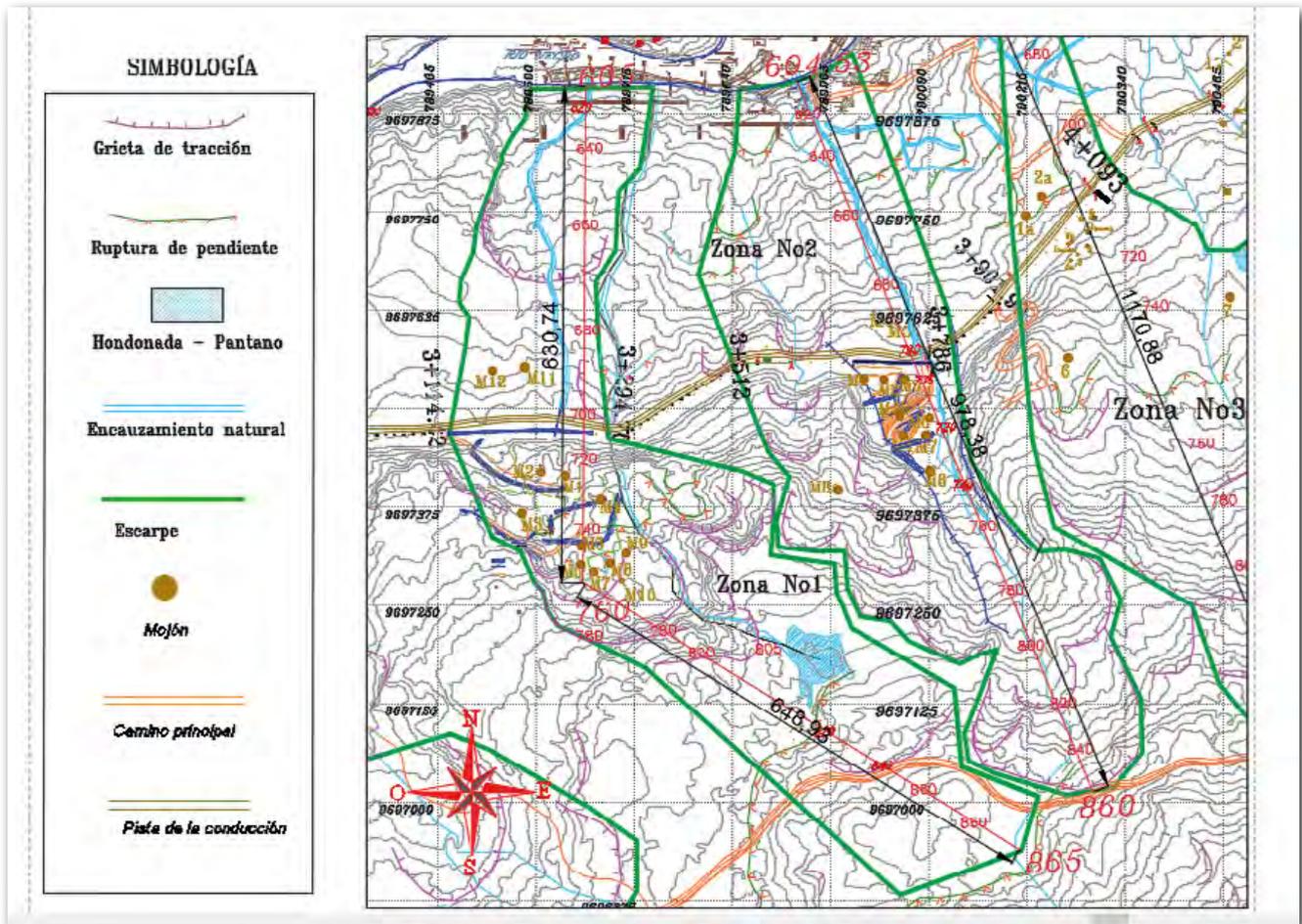


Figura 7. Escarpes y ubicación de mojones. Zonas 1 y 2.

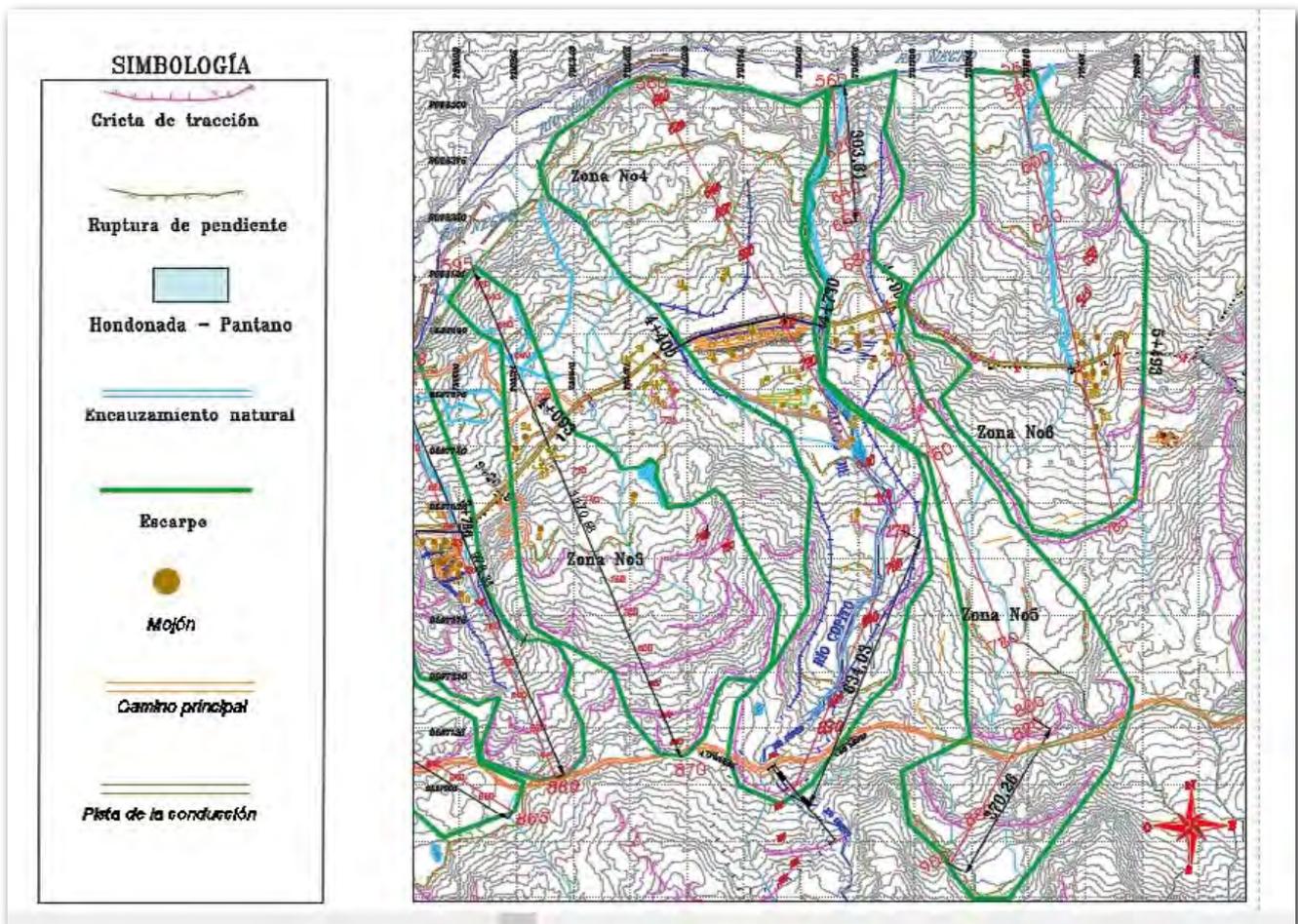


Figura 8. Escarpes y ubicación de mojonos. Zonas 3 a 6.

2.4. Monitoreos topográficos. Cálculo del desplazamiento y de la velocidad

Una vez implantados los mojonos, se realizó la toma de sus coordenadas iniciales en base al sistema WGS84, ZONA 17S y se ubicaron en los mapas topográficos.

El valor para la variable *V* se determinó mediante toma semanal a quincenal de coordenadas con estación total de los 77 mojonos. Los hitos geodésicos del polígono de referencia han sido fijados en sitios de afloramientos de roca, en donde es muy poco probable que existan movimientos, y así evitar que el error de medición sea excesivo.

Si el vector posición del mojón *i* en la fecha 1 es **r**₁ y en la fecha 2 es **r**₂, el vector desplazamiento **Δr** del mojón *i* entre estas dos fechas es **Δr** = **r**₂ - **r**₁. Si se conocen las coordenadas topográficas para estas fechas (*E1*, *N1*, *Z1*) y (*E2*, *N2*, *Z2*), la magnitud del desplazamiento en cm se calculó como:

$$|\Delta r| = 100\sqrt{(E_2 - E_1)^2 + (N_2 - N_1)^2 + (Z_2 - Z_1)^2} \quad [7]$$

Si Δt es el tiempo en días que transcurrió entre las fechas 1 y 2, la magnitud de la velocidad del mojón *i* en cm/d se calculó como:

$$V_i = \frac{|\Delta r|}{\Delta t} \quad [8]$$

La velocidad promedio observada *V*₀ entre dos fechas para un deslizamiento, se calculó como la media aritmética de las velocidades individuales de los mojonos.

$$V_0 = \frac{\sum_{i=1}^l V_i}{l} \quad [9]$$

Con *l* = Número de mojonos (del inglés *landmarks*)

La velocidad promedio observada *V*₀, representa la medida de la variable *V*. Esta velocidad es causada por una precipitación media *P* y un caudal fluvial medio *Q* en el período de tiempo correspondiente a *V*₀.

A modo de ejemplo explicativo, en las tablas 3 y 4 se expone el cálculo del desplazamiento y la velocidad para los mojonos 5 y 7 del deslizamiento en la zona 1, en el período junio-julio 2018.

Tabla 3. Desplazamientos y velocidades. Mojón 5. Zona 1

Fecha	Δt (d)	\Delta r (cm)	V _s (cm/d)
2018-06-01	0	0,00	
2018-06-06	5	4,96	0,992
2018-06-11	5	4,21	0,842
2018-06-19	8	7,99	0,999
2018-06-27	8	7,47	0,934
2018-07-06	9	6,36	0,707
2018-07-10	4	3,16	0,790
2018-07-16	6	3,32	0,553
2018-07-30	14	10,21	0,729

Tabla 4. Desplazamientos y velocidades. Mojóñ 7. Zona 1

Fecha	Δt (d)	$ \Delta r $ (cm)	V_r (cm/d)
2018-06-01	0	0,000	
2018-06-06	5	3.326	0,665
2018-06-11	5	1.756	0,352
2018-06-19	8	5.221	0,653
2018-06-27	8	3.826	0,478
2018-07-06	9	4.174	0,464
2018-07-10	4	1.703	0,426
2018-07-16	6	2.846	0,474
2018-07-30	14	4.174	0,298

2.5. Modelo geológico del área de estudio

El modelo geológico se construyó a partir de estudios de sísmica de refracción.

Se practicaron cuatro líneas sísmicas por cada zona: una principal en sentido de la pendiente de la ladera y tres

en sentido transversal. La figura 8 muestra la planta de la ubicación para cuatro de estas zonas investigadas.

Los perfiles sísmicos de la línea en sentido de la pendiente se muestran en la figura 9.

Los materiales se componen de suelos distribuidos en capas, determinadas a partir de estudios de sísmica de refracción, y se caracterizaron de acuerdo con la velocidad de onda de corte V_s , de la siguiente manera (U.S. Department of Interior, 2001, y López Marinas, 2002):

- Capa con $V_s = 300$ m/s, podría tratarse de suelos blandos y materiales de acarreo entremezclados con fragmentos rocosos. Derrubios. Rocas sueltas.
- Capa con $V_s = 600$ m/s, podría tratarse de suelos muy duros o materiales coluviales pobremente consolidados.
- El estrato con $V_s = 1.200$ m/s, litológicamente podría tratarse de rocas metamórficas parcialmente desgastadas, alteradas y fracturadas, con permeabilidad secundaria importante debido a las fracturas.

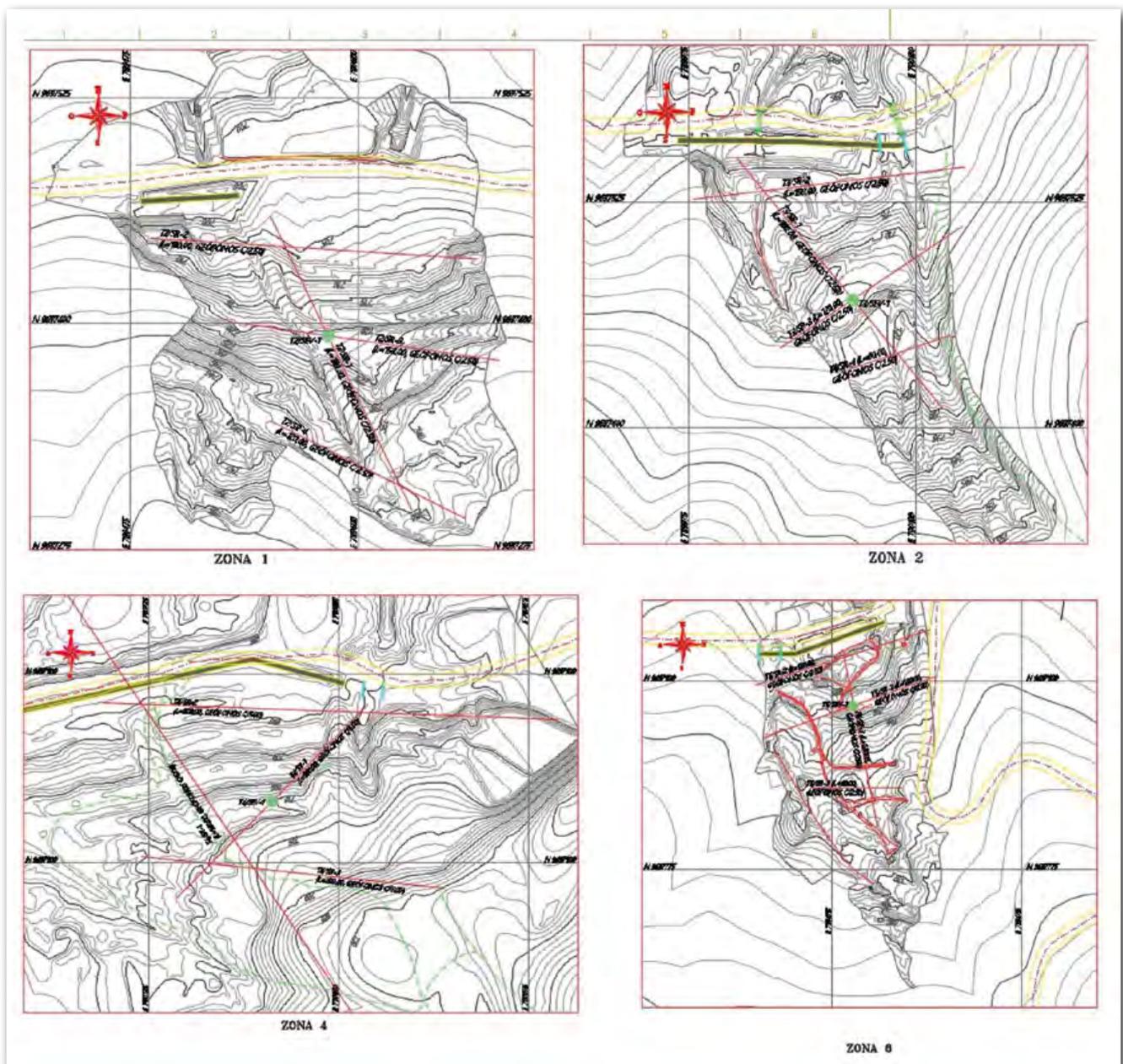


Figura 9. Líneas sísmicas practicadas en algunas zonas inestables.

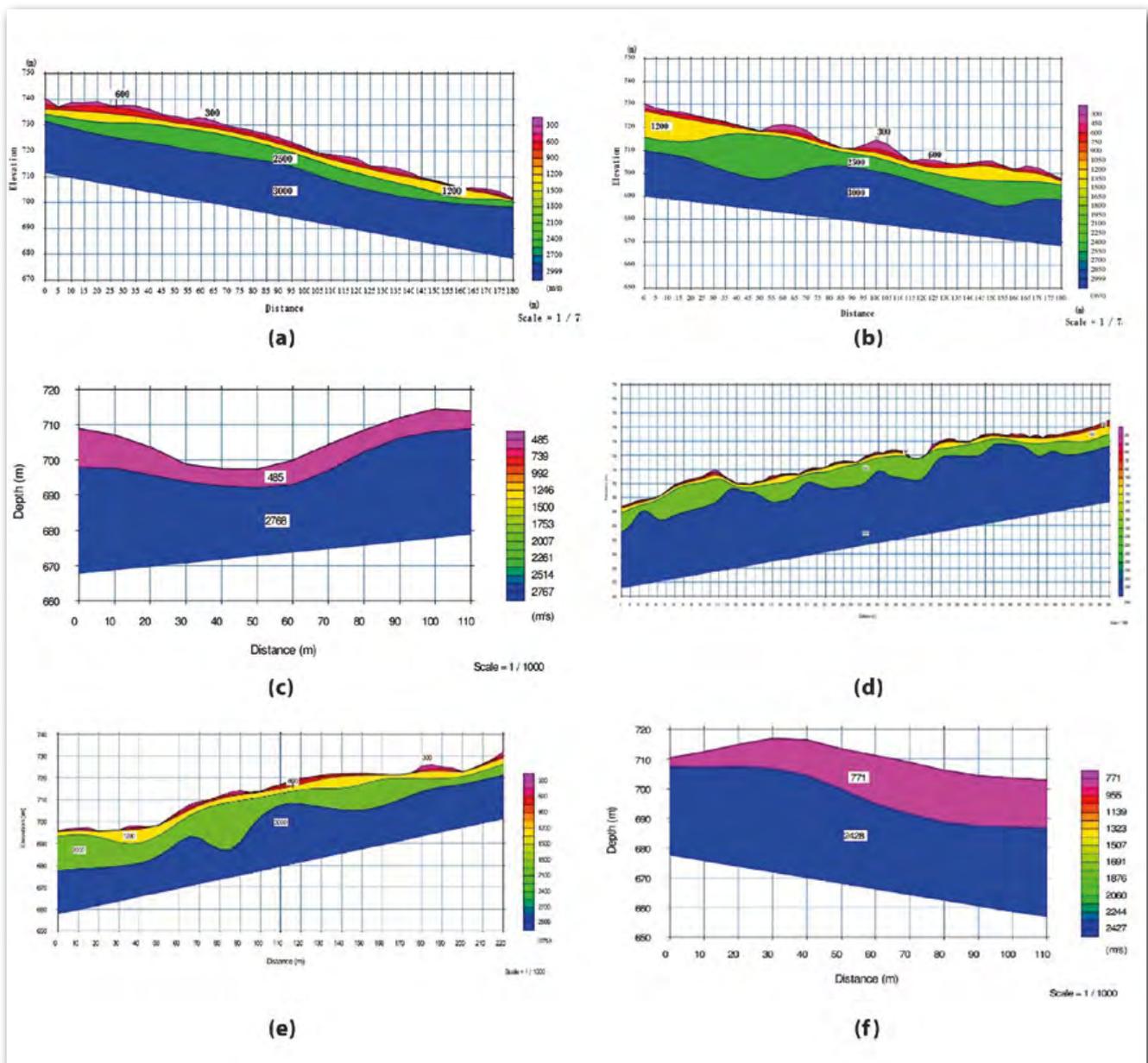


Figura 10. Perfiles sísmicos de cada zona: (a) zona 1; (b) zona 2; (c) zona 3; (d) zona 4; (e) zona 5; y (f), zona 6.

Esquistos gráficas. Rocas metamórficas descomprimidas.

- Para $V_s = 2.000$ a 2.500 m/s, litológicamente podría tratarse de rocas metamórficas blandas, de muy alteradas a medianamente alteradas y fracturadas, lo que le confiere una permeabilidad secundaria. Piso probable sobre el que deslizarían las capas superiores en un evento desestabilizador.
- La capa con velocidad $V_s = 3.000$ m/s, denota rocas metamórficas sanas. Mejores características geomecánicas, de baja compresibilidad. Alta capacidad de carga y de resistencia al corte; su permeabilidad primaria es muy baja. Por tal motivo, se considera que esta capa no está afectada por la presión de poros.

2.6. Geotecnia e Hidrología

Los deslizamientos investigados están afectados por la presión de poros, en un espesor h_s que comprende la altura desde el nivel de la capa con $V_s = 3.000$ m/s (roca

impermeable) hasta el respectivo nivel freático. El modelo geológico proporciona información útil para estimar h_s : Dado que la capa con velocidad de onda 2.000 a 2.500 m/s se conforma de roca fracturada, posee permeabilidad secundaria, y estará afectada por la presión de poros. Como la capa con $V_s = 3.000$ m/s corresponde a roca impermeable, el espesor h_s se determina a partir del nivel superior de la roca impermeable, hasta el límite superior dado por la posición del nivel freático.

En la figura 10: si H_m es el espesor total promedio de la masa deslizando, y NF la profundidad del nivel freático,

$$h_s = H_m - NF \quad [10]$$

La profundidad del nivel freático para cada zona inestable se investigó mediante observaciones hechas en calicatas y sondeos eléctricos verticales (SEV). Los valores son estimados, debido a la heterogeneidad del suelo que constituye la matriz del coluvión, lo que implica la existencia de acuíferos confinados reflejando profundidades freáticas irregulares.

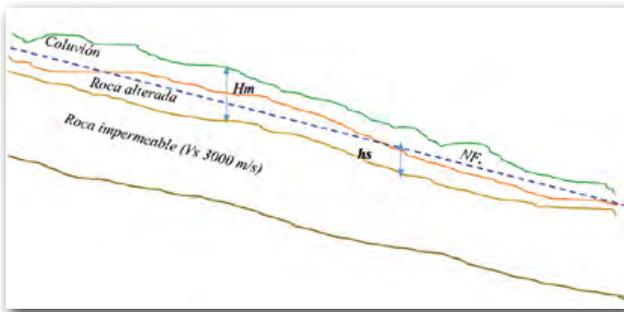


Figura 11. Esquema para el cálculo de h_s .



Figura 12. Calicata practicada en zona 1. Nivel freático a 3.50 m.

Para cada zona, en la tabla 5 se reporta el promedio de las profundidades observadas.

Tabla 5. Profundidades estimadas del nivel freático

Zona	Profundidad del nivel freático (m)
1	3.50
2	4.00
3	6.00
4	6.00
5	5.23
6	6.45

En la tabla 6 se presentan los espesores promedios H_m y el cálculo de h_s para cada zona.

Tabla 6. Espesor de la masa afectada por la presión de poros

Zona	H_m (m)	Prof. N.F. (m)	$h_s = H_m - \text{N.F.}$ (m)
1	18.80	3.50	15.30
2	19.85	4.00	15.85
3	8.00	6.00	2.00
4	19.95	6.00	13.95
5	20.33	5.23	15.10
6	22.55	6.45	16.10

Los parámetros de resistencia al corte de la matriz del coluvión (cohesión C y ángulo de fricción interna ϕ), se determinaron mediante ensayos de corte triaxiales no drenados.

Tabla 7. Resultados de ensayos de corte triaxiales no drenados

Zona	C (kN/m ²)	ϕ (°)
1	27.12	3.05
2	75.00	19.60
3	60.00	16.37
4	90.99	4.13
5	60.00	16.37
6	61.35	20.50

La permeabilidad del coluvión se determinó in situ en cuatro puntos de cada ladera en estudio, mediante el método de ensayo Lefranc (López Marinas, 2002). La medida de la permeabilidad de un suelo expresa la facilidad con que los flujos subterráneos pueden circular en la masa (López Marinas, 2002). En suelos con permeabilidad muy pobre, el flujo subterráneo de agua presentará mayor resistencia, lo que incidirá en una mayor velocidad.

Tabla 8. Coeficientes de permeabilidad

Zona	k (cm/s)
1	0.0630
2	0.0244
3	0.0700
4	0.0800
5	0.0330
6	0.0901

Para delimitar el área interior del escarpe para cada zona, se consideró el límite inferior como la orilla del río Negro. El límite superior o la “corona” del deslizamiento, lo constituyen las zonas altas ubicadas en las cercanías del camino que une las poblaciones de San Bartolo y La Dolorosa. La delimitación lateral del área se realiza con un trazo que esté acorde con el direccionamiento de las grietas y rupturas de pendiente, y que abarque hondonadas y pantanos, que son zonas de potencial infiltración. El área de cada deslizamiento se expone en la tabla 9.

Tabla 9. Área de los movimientos en masa

Zona	Abcisas	Área A (m ²)
1	3+114 – 3+300	257.200
2	3+650 – 3+753	228.500
3	3+900 – 4+093	302.500
4	4+400 – 4+731	518.100
5	4+790 – 4+900	395.600
6	4+900 – 5+493	350.400

La pendiente se calculó mediante la media ponderada en la longitud total de los rumbos o direcciones que sigue la descompresión de las masas, los cuales se estiman mediante la morfología de las grietas de tracción. Los valores se presentan en la tabla 10.

Tabla 10. Pendiente de los deslizamientos

Zona	Abscisas	Pendiente j
1	3+114 – 3+300	0.208
2	3+650 – 3+753	0.261
3	3+900 – 4+093	0.235
4	4+400 – 4+731	0.156
5	4+790 – 4+900	0.184
6	4+900 – 5+493	0.197

Para la zona 1 por ejemplo, se pueden observar en la figura 6 dos direcciones de movimientos: La primera de longitud 648.96 metros entre las elevaciones 865 y 760 msnm, con pendiente $j_1 = 105/648.96 = 0.162$. La segunda, de longitud 630.74 metros entre las elevaciones 760 a 605 msnm, con pendiente $j_2 = 155/630.74 = 0.256$. La pendiente media ponderada en la longitud total es:

$$j = \frac{0.162 \times 648.93 + 0.256 \times 630.74}{1279.67} = 0.208$$

La precipitación media se calculó a partir de los registros diarios de lluvias de un pluviómetro ubicado en la cuenca del río Negro a 2.2 kilómetros de la zona 1. Se procedió de la siguiente manera: En cada intervalo de tiempo de medición de la velocidad, el área bajo la curva de

precipitación, dividida para el intervalo de tiempo representa la precipitación media. Por ejemplo, entre el 11 y 19 de junio 2018 el área bajo la gráfica es igual a 108.40 mm x d (figura 13), que dividida para 8 días resulta 13.55 mm.

De manera similar, el caudal medio en este período de tiempo es igual al área bajo la curva de caudales, 2103.52 (m^3/s) x d, dividida para 8 días, que resulta 262.94 m^3/s (figura 14).

Al valor del caudal medio se restó el caudal de 30 m^3/s que capta la central HIDROSANBARTOLO para la generación de electricidad.

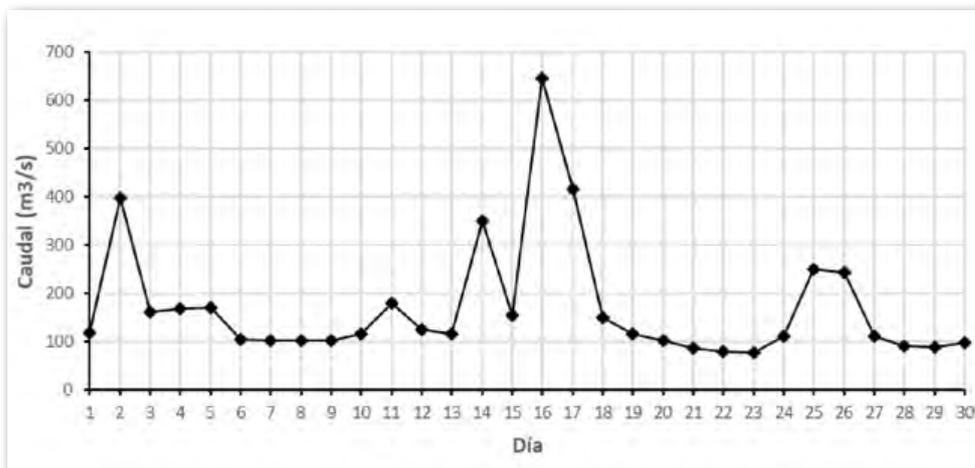
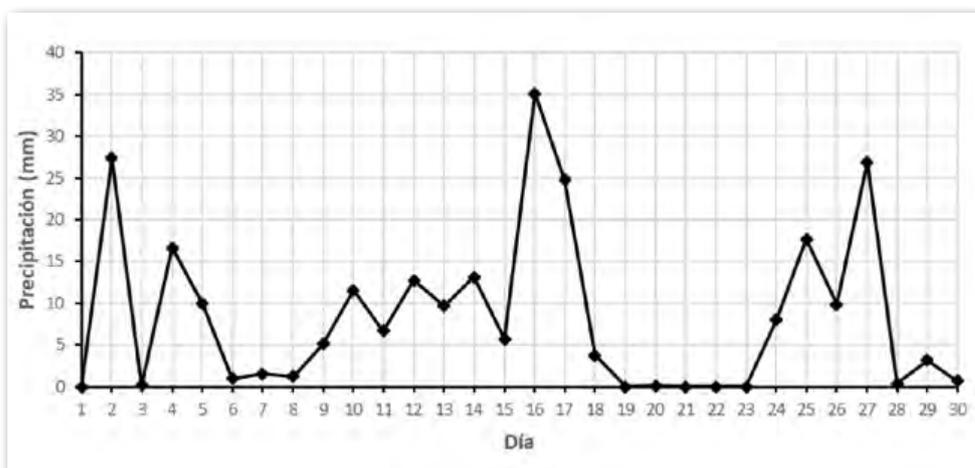
3. RESULTADOS

3.1. Cálculo de parámetros adimensionales Π

Relacionando los valores de velocidad observados V_0 de cada zona, con los valores de sus variables correspondientes y con las variables predictivas P y Q , se calcularon los parámetros Π_8 y Π_9 mediante [3] y [4]. Para la aceleración de la gravedad se ha tomado el valor estándar $g = 9.81 \text{ m/s}^2$.

En los anexos se presentan los cálculos de los parámetros adimensionales Π para cada zona inestable.

Con los valores obtenidos, se realizaron gráficos de dispersión entre estos parámetros, para determinar la función f_3 que tenga el mayor coeficiente de determinación R^2 (figura 15):

**Figura 13.** Registro diario de precipitación (junio 2018).**Figura 14.** Registro diario de caudales (junio 2018).

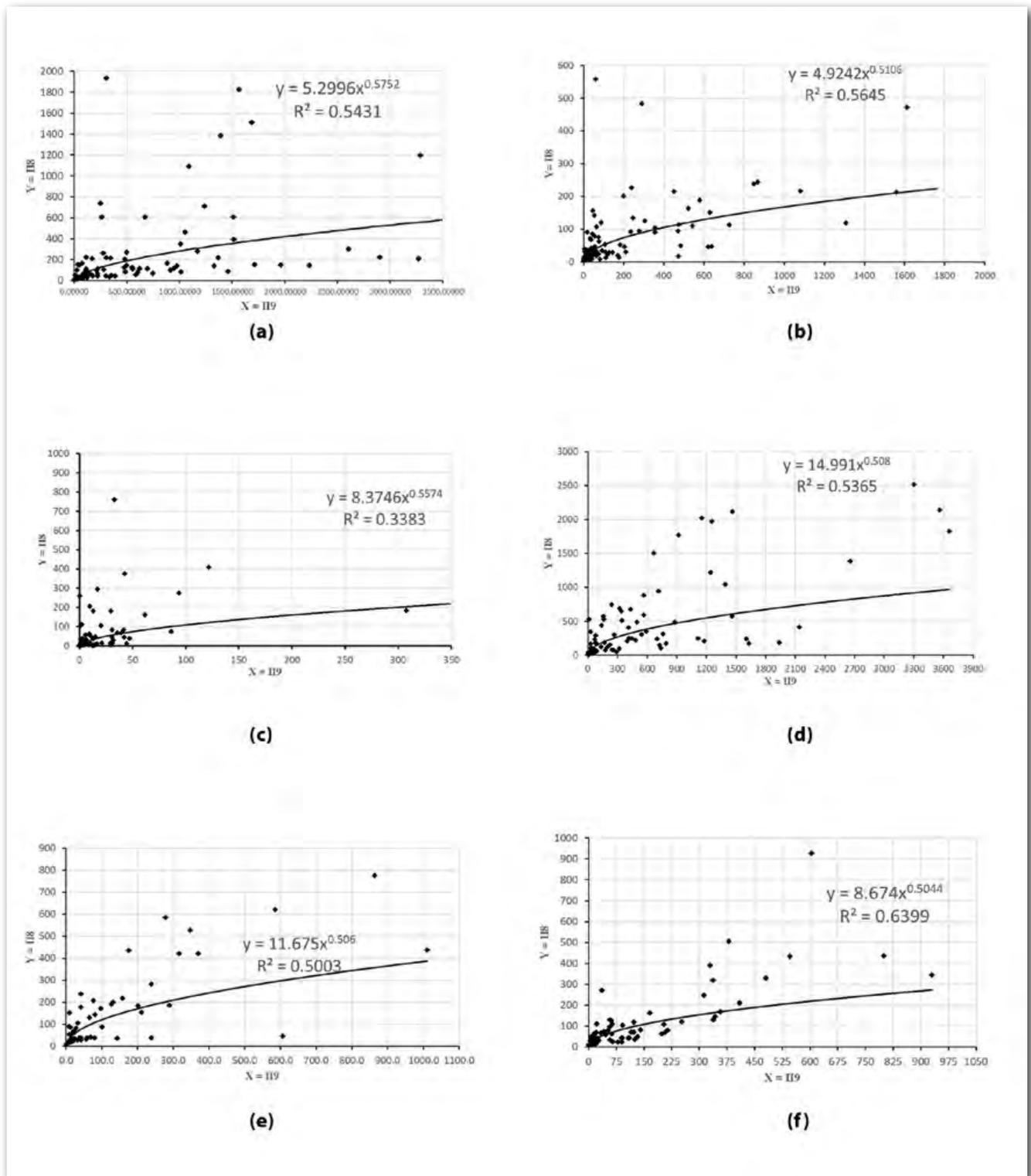


Figura 15. Función de ajuste entre parámetros Π8 y Π9: (a) zona 1; (b) zona 2; (c) zona 3; (d) zona 4; (e) zona 5; (f), zona 6.

Sustituyendo [3] y [4] en Y y X respectivamente, se determinaron las siguientes expresiones:

Zona 1:

$$V = \frac{5.30}{kA} P^{0.300} Q^{0.850} \left(\frac{g h_s j}{\tan \theta} \right)^{0.575} \quad [10]$$

Zona 2:

$$V = \frac{4.92}{kA} P^{0.044} Q^{0.978} \left(\frac{g h_s j}{\tan \theta} \right)^{0.511} \quad [11]$$

Zona 3:

$$V = \frac{8.37}{kA} P^{0.228} Q^{0.886} \left(\frac{g h_s j}{\tan \theta} \right)^{0.557} \quad [12]$$

Zona 4:

$$V = \frac{14.99}{kA} P^{0.032} Q^{0.984} \left(\frac{g h_s j}{\tan \theta} \right)^{0.508} \quad [13]$$

Zona 5:

$$V = \frac{11.68}{kA} P^{0.024} Q^{0.988} \left(\frac{g h_s j}{\tan \theta} \right)^{0.506} \quad [14]$$

Zona 6:

$$V = \frac{8.67}{kA} P^{0.016} Q^{0.992} \left(\frac{g h_s j}{\tan \phi} \right)^{0.504} \quad [15]$$

4. DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. Ley General de reptación de coluviones

Las ecuaciones halladas difieren para cada deslizamiento, pero presentan la misma estructura algebraica, lo que condujo a deducir la ley general de reptación de coluviones, la cual se puede expresar mediante la ecuación 16:

$$V = \frac{m}{kA} P^p Q^q \left(\frac{g h_s j}{\tan \phi} \right)^n \quad [16]$$

Con $P \geq 0.54 \text{ mm}$; $n > 0.500$; $kA > 0$.

De (10) a (15), tomando para cada deslizamiento el coeficiente m , se verificó una buena correlación con el área correspondiente de cada zona inestable (figura 16).

La función potencial mostrada, presenta el mayor poder predictivo para el coeficiente m :

$$m = (1.12 \times 10^{-7}) A^{1.43} \quad [17]$$

Para definir los exponentes, se calculó la media aritmética de los valores obtenidos en [10] a [15]:

$$\begin{aligned} p &= 0.108 \\ q &= 0.946 \\ n &= 0.527 \end{aligned} \quad [18]$$

Reemplazando (17) y (18) en (16), se obtuvo la Ley General de reptación de coluviones:

$$V = \frac{1.120 \times 10^{-7} (A)^{0.43}}{k} P^{0.108} Q^{0.946} \left(\frac{g h_s j}{\tan \phi} \right)^{0.527} \quad [19]$$

Con P en mm, Q en m^3/s , A en m^2 , k en cm/s , $g = 9.81 \text{ m}/\text{s}^2$, h_s en m, j y $\tan \phi$ adimensionales.

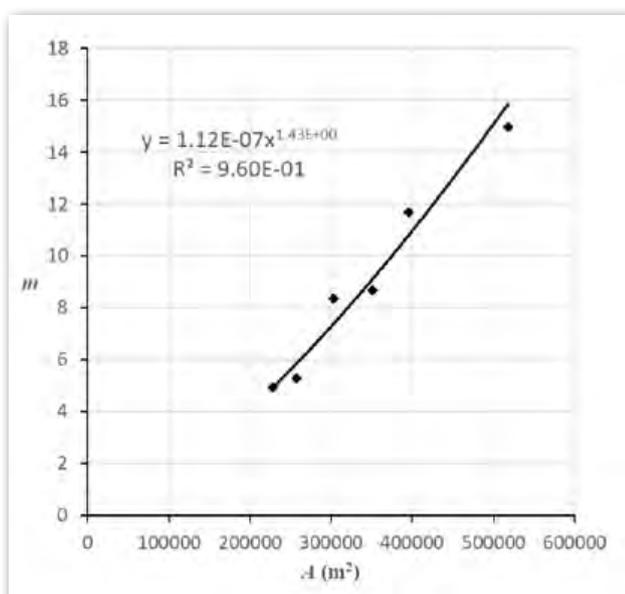


Figura 16. Correlación entre el coeficiente m y el área A .

La ley expresada mediante [19] es válida para deslizamientos de laderas en cuencas hidrográficas constituidas por coluviones, caracterizados por rocas metamórficas en matriz limo-arenosa, y fue determinada para movimientos en masa con extensiones desde 228.500 hasta 518.100 m^2 , en una región afectada por fallas inversas, que han causado fracturaciones y cizallamientos en el basamento rocoso.

Los caudales medios han sido calculados tomando en cuenta la regulación de la obra de captación de la central HIDROSANBARTOLO, que utiliza el caudal de 30 m^3/s para la generación de electricidad.

La velocidad de reptación es inversamente proporcional a la permeabilidad k del suelo de la matriz, siendo mayor el riesgo en laderas con permeabilidad muy baja.

4.2. Correlación lineal entre valores observados (V_o) y valores del modelo (V)

Se obtuvieron coeficientes de correlación lineal " r " mayores a 0.50. El análisis reveló que este se obtiene para caudales del río mayores a 26 m^3/s . Para caudales menores a 26 m^3/s , el modelo no es confiable. El análisis realizado con datos del modelo para $Q < 26 \text{ m}^3/\text{s}$ dio como resultado coeficientes de correlación muy bajos, por lo que estos caudales fueron omitidos. En estadística, es permisible eliminar ciertos datos adecuadamente, siempre que exista una justificación apropiada (Navidi, 2006).

Estadísticamente, un coeficiente de correlación mayor o igual a 0.50 representa un ajuste moderado, mientras que valores inferiores a este representan un ajuste débil (Navidi, 2006). La figura 17 muestra los ajustes lineales y los coeficientes de correlación respectivos, para cada zona inestable.

El poder predictivo del modelo está en el rango 25 al 39 %.

La restricción para $Q > 26 \text{ m}^3/\text{s}$ se fundamenta en la protección que confieren las terrazas aluviales en el pie de las laderas, por lo que caudales menores no constituyen la causa para acelerar los movimientos por socavación lateral.

La heterogeneidad del suelo también ocasiona que el poder predictivo del modelo tome el máximo del 39 %.

4.3. Descripción de los movimientos en masa

La figura 2 muestra la escala de velocidades, en donde se describen los movimientos como: muy lento, lento, moderado, rápido, muy rápido y extremadamente rápido, para 6 valores típicos de la velocidad.

En un período de siete días se registraron:

P máxima = 28.15 mm

Q máximo = 259.21 m^3/s

Bajo estas condiciones hidrometeorológicas, aplicando [19] se determinó la siguiente descripción de los movimientos con base en la escala de Cruden y Varnes (figura 2):

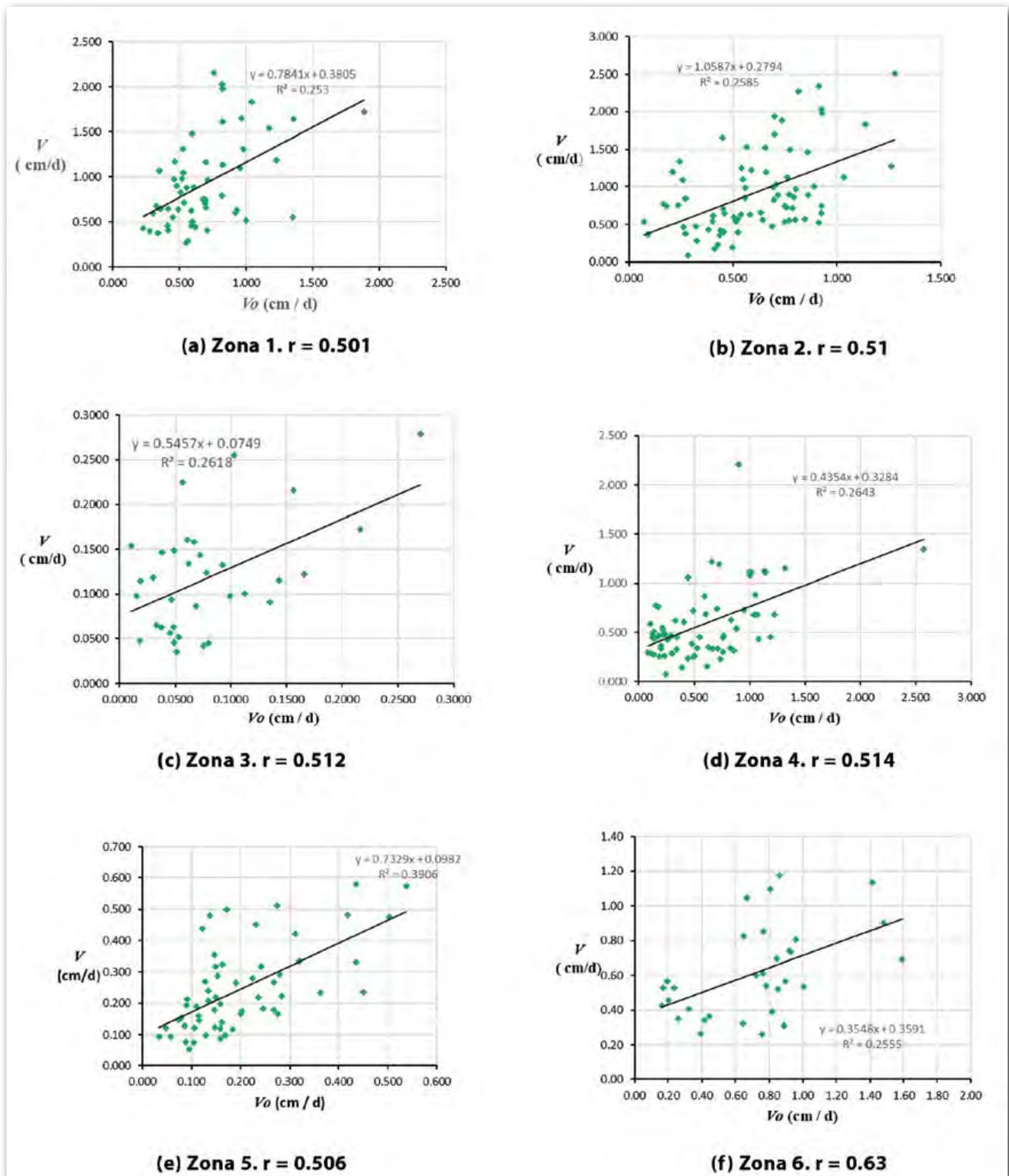


Figura 17. Correlación lineal entre valores observados y del modelo. Análisis efectuado para $Q > 26 \text{ m}^3/\text{s}$.

Tabla 11. Descripción de movimientos para condiciones hidrometeorológicas en un período de 7 días

Zona	V(cm/d)	Desplazamiento = 7.V (cm)	Descripción
1	2.95	20.63	Lento
2	3.09	21.63	Lento
3	0.43	2.99	Lento
4	0.56	3.94	Lento
5	2.60	18.17	Lento
6	0.58	4.06	Lento

Desplazamiento máximo período semanal = 21.63 cm. Zona 2.

La velocidad máxima es 3.09 cm/d y se produce en la zona 2. Está en el intervalo 1.5 m/año – 1.5 m/mes (0.411 – 5.00 cm/d), para el cual, el movimiento se describe como “Lento” según la escala de Cruden y Varnes (figura 2).

Aplicando [19], para $P= 18\text{mm}$ y $Q= 600 \text{ m}^3/\text{s}$, se desencadenará el movimiento moderado en las laderas 1, 2 y 5, ($V > 5.0 \text{ cm/d}$).

Tabla 12. Velocidades de reptación para los umbrales de precipitación y caudal de movimiento moderado ($5 < V < 150$ cm/d)

Zona	V (cm/d)	Descripción
1	6.21	Moderado
2	6.51	Moderado
5	5.47	Moderado

Desplazamiento máximo período de 1 día = 6.51 cm. Zona 2.

5. CONCLUSIONES

Se presentan, en este apartado, las conclusiones más relevantes derivadas de este estudio.

La ley de reptación encontrada es aplicable a movimientos en masa constituidos por rocas metamórficas (pizarras y esquistos gráficas) cuyos fragmentos están englobados en una matriz arcillo limosa, con elevado nivel freático y erosión fluvial, en laderas de cuencas hidrográficas, con un poder predictivo moderado.

- El coeficiente de correlación lineal entre velocidades observadas V_0 y velocidades calculadas con el modelo es superior a 0.50, que estadísticamente indica un poder de asociación “moderado”. Este factor se obtuvo para caudales medios del río mayores a $26 \text{ m}^3/\text{s}$. El modelo refleja que caudales menores a $26 \text{ m}^3/\text{s}$ no activan los deslizamientos, lo que se explica por la presencia de terrazas aluviales en el pie de las laderas, que constituye una protección contra la socavación lateral.
- Constantes del modelo: proporcionalidad directa con la potencia 0.108 de la precipitación y la potencia 0.945 del caudal fluvial, lo que revela una mayor influencia de la socavación lateral en la velocidad de reptación. El término expresa la similitud cinemática.
- Otra constante es la potencia 0.43 del área interior de los escarpes. Físicamente, esto puede interpretarse en el sentido de que existen regiones protegidas por vegetación, en donde la infiltración se reduce por la interceptación.
- Proporcionalidad inversa con la permeabilidad k : en suelos con permeabilidad muy pobre el agua no se drena con facilidad, siendo mayor la resistencia al flujo, y se generan mayores fuerzas de filtración, causando que las laderas aceleren su movimiento.
- Las condiciones climáticas e hidrológicas de esta región desencadenarán movimientos “lentos” a “moderados”, siendo poco probable que se desencadenen movimientos “rápidos”. La zona más vulnerable ante la ocurrencia de lluvias y caudales es la 2, la cual tiene la máxima pendiente, factor agravante para el movimiento.
- Si se desencadenan movimientos moderados muy frecuentes, las condiciones de saturación y niveles freáticos alcanzarían valores críticos, siendo probable el paso a movimientos rápidos, por la cedencia

de los materiales de las laderas, mayormente conformadas por roca alterada.

- Se producirán desplazamientos promedios de las masas, desde 5.7 hasta 21.6 cm. No es recomendable edificar en esta región, dado que estos desplazamientos causarían daños en las estructuras. Aunque según la escala de Cruden y Varnes los daños serán reparables, las estructuras necesitarán mantenimiento frecuente, afectando la economía de los propietarios.
- El control del drenaje, subdrenaje y revestimientos con escolleras en el pie de las laderas constituyen la mejor solución para disminuir los movimientos en masa. Se reemplazó en varias áreas, el suelo saturado por suelo con mayores parámetros de corte, con el fin de ganar resistencia y atenuar los movimientos en masa. Las obras indicadas se construyeron con recursos de HIDROSANBARTOLO. La construcción en media ladera de subdrenes asociados a bermas y muros con materiales más permeables contribuyó a la disminución del *campo de las fuerzas de filtración*, y por ende, a reducir la velocidad en un 70 %. Las escolleras construidas disminuyen la socavación lateral del río. Tienen sección de 120 ton/m y confieren una buena protección ante las crecidas de hasta $1.000 \text{ m}^3/\text{s}$. La piedra utilizada tiene tamaño de 1.50 m.

6. REFERENCIAS

- Cruden, D.M., y Varnes, D.J. (1996). *Landslide Types and Processes*. Transportation Research Board, U.S. National Academy of Sciences, Special Report, 247: pp. 36-75.
- Ferrer, M., y Ayala, F. (1997). Relaciones entre desencadenamiento de movimientos y condiciones meteorológicas para algunos deslizamientos de España. *IV Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables*. Granada. Vol. I, pp. 185-198.
- Gibbins, J.C. (2011). *Dimensional Analysis*. London: Springer.
- González de Vallejo, L.I. (2004). *Ingeniería Geológica*. Madrid: Pearson/Prentice Hall.
- Highland, L.M., y Bobrowsky, P. (2008). *Manual de derrumbes: Una guía para entender todo sobre los derrumbes*. Circular 1325. Reston, Virginia: Servicio Geológico de los EE.UU.
- Keller, E., y Blodgett, R. (2007). *Riesgos naturales. Procesos de la Tierra como riesgos, desastres y catástrofes*. Madrid: Pearson/Prentice Hall.
- López Marinas, J.M. (2002). *Geología aplicada a la Ingeniería Civil*. Madrid: Cie Inversiones Editoriales Dossat 2000.
- Navidi, W. (2006). *Estadística para ingenieros y científicos*. México, D.F.: McGraw-Hill.
- Suárez Díaz, J. (2009). *Deslizamientos. Análisis geotécnico*. Vol. I. Bucaramanga: División de Publicaciones UIS.
- Tarbut, E.J., y Lutgens, F.K. (2005). *Ciencias de la Tierra. Una Introducción a la geología física*. Madrid: Pearson/Prentice Hall.
- U.S. Department of Interior. Bureau of Reclamation (2001). *Engineering Geology Field Manual*.

7. ANEXOS

Cálculo de parámetros adimensionales Π para cada zona inestable

FECHA	V_0 (cm/día)	P (mm)	Q (m ³ /s)	$X = \frac{P^4 g h_s j}{Q^2 \tan \theta}$	$Y = \frac{V k A P^2}{Q^2}$	FECHA	V_0 (cm/día)	P (mm)	Q (m ³ /s)	$X = \frac{(P)^4 g h_s j}{(Q)^2 \tan \theta}$	$Y = \frac{V k A (P)^2}{(Q)^2}$
8/10/2016	1.354	6.96	190.00	37.195	29.436	8/2/2016					
8/15/2016	1.885	10.70	190.00	207.460	96.813	8/10/2016	0.930	9.78	190.00	28.875	13.731
8/29/2016	0.932	5.61	71.20	111.859	93.778	8/15/2016	0.737	6.20	190.00	4.654	4.370
9/16/2016	0.921	7.70	65.47	468.392	206.262	8/29/2016	0.747	5.61	72.00	21.792	25.298
9/29/2016	0.820	7.71	86.11	273.228	106.667	9/16/2016	0.453	7.70	66.27	91.073	34.031
11/1/2016	1.611	3.77	50.01	46.352	148.525	9/29/2016	0.773	7.71	84.91	55.982	35.551
11/14/2016	1.971	9.73	65.16	1209.528	712.553	10/11/2016	0.634	5.19	64.02	20.113	23.193
11/30/2016	1.685	11.58	47.82	4507.209	1602.926	11/1/2016	0.525	2.97	39.28	5.715	16.677
3/14/2017	6.298	3.28	51.92			11/14/2016	0.760	9.74	65.96	235.673	92.351
3/31/2017	3.181	8.68	46.06	1528.752	1829.220	11/30/2016	0.771	11.58	48.62	868.615	244.052
4/19/2017	2.521	13.84	80.86	3211.845	1196.944	12/13/2016	0.989	4.30	26.82	54.359	141.957
5/2/2017						1/6/2017	0.456	4.54	38.73	32.358	34.992
7/31/2017	1.639	6.73	103.92	108.675	111.356	1/16/2017	0.926	10.51	67.58	304.340	124.845
8/15/2017	1.639	2.23	50.31	5.624	52.328	2/2/2017	0.764	6.76	55.65	76.960	62.934
9/6/2017	0.843	4.31	34.59	164.544	211.787	2/13/2017	0.927	4.44	52.83	15.818	36.451
9/26/2017	1.152	6.70	62.10	299.448	217.510	3/3/2017	0.072	9.84	47.58	472.961	17.239
10/11/2017	0.790	5.91	45.47	337.642	216.261	3/14/2017	0.091	3.28	36.15	10.096	4.193
10/15/2017	1.242	6.16	35.50	654.737	606.344	3/31/2017	0.911	9.66	46.98	449.368	214.707
10/31/2017	1.931	14.38	128.59	1481.632	391.622	4/19/2017	0.881	13.40	76.50	628.835	150.759
11/6/2017	2.267	4.14	14.92	756.683	2831.774	5/2/2017	1.421	15.75	90.89	849.082	237.883
11/14/2017	1.244	14.74	33.03	24780.261	4015.268	5/15/2017	1.154	13.19	77.23	578.289	187.667
11/27/2017	1.755	4.55	59.39	69.307	166.690	5/30/2017	1.032	7.07	61.65	74.796	75.624
3/19/2018	1.689	3.46	56.66	25.618	102.187	6/14/2017	0.933	13.32	100.62	354.317	91.139
4/3/2018	1.000	14.08	51.90	8339.566	1191.446	7/3/2017	0.996	6.49	74.97	36.031	41.639
4/18/2018	1.219	8.73	56.86	1027.848	465.500	7/14/2017	1.092	5.31	105.56	8.128	15.396
4/24/2018	0.693	5.77	79.83	99.307	58.581	7/31/2017	0.924	14.05	187.18	126.895	29.044
6/1/2018	0.822	16.60	209.56	989.434	83.601	8/1/2017	0.943		78.50		
6/6/2018	0.822	13.23	172.66	588.034	78.221	8/15/2017	0.890	2.39	51.11	1.431	10.880
6/11/2018	0.678	6.43	84.24	137.823	64.014	8/31/2017	0.439	5.19	39.66	52.604	41.926
6/19/2018	0.760	13.79	234.14	377.179	42.715	9/26/2017	1.138	5.46	52.93	36.097	67.470
6/27/2018	0.713	10.03	103.67	539.115	108.104	10/11/2017	1.187	5.91	46.27	64.967	107.952
7/6/2018	0.621	1.22	57.67	0.377	4.480	10/30/2017	1.262	13.40	115.31	276.663	95.044
7/10/2018	0.598	5.84	55.43	216.279	107.550	11/14/2017	0.975	9.53	25.97	1394.316	731.939
7/16/2018	0.531	8.41	115.43	214.683	45.617	12/1/2017	1.400	5.51	57.58	31.596	71.385
7/30/2018	0.595	10.76	161.29	295.298	42.925	12/5/2017	3.585	13.89	49.09	1759.898	1599.942
8/13/2018	0.509	9.02	89.35	474.785	84.056	12/28/2017	1.482	6.58	27.20	289.250	483.760
8/20/2018	1.228	10.86	127.75	487.200	143.723	1/8/2018	1.662	2.94	11.99	59.326	557.523
8/28/2018	0.821	13.11	221.13	345.954	46.794	1/22/2018	0.891	17.86	86.21	1559.707	213.059
9/3/2018	0.694	10.93	78.25	1335.531	219.521	2/1/2018	2.201	4.48	52.10	16.842	90.546
9/11/2018	1.175	6.14	179.71	25.140	22.199	2/15/2018	0.323	4.29	26.51	54.902	47.185
9/17/2018	0.932	5.07	18.85	1061.452	1090.984	2/27/2018	2.354	5.80	53.26	45.609	155.841
9/25/2018	0.428	3.51	18.04	267.713	263.116	3/7/2018	0.269	9.21	33.57	726.528	112.720
10/1/2018	0.491	3.89	8.93	1647.719	1512.953	3/19/2018	1.534	3.46	57.46	4.963	31.061
10/17/2018	0.229	7.52	45.34	889.587	102.009	4/3/2018	1.187	14.08	52.70	1611.350	472.128
10/26/2018	0.314	1.36	7.79	32.373	155.163	4/18/2018	1.578	8.73	57.67	199.121	201.656
11/6/2018	0.281	7.39	42.31	951.303	138.919	4/24/2018	0.696	5.77	80.63	19.393	19.865
11/20/2018	0.416	12.22	67.07	2834.345	223.710	6/1/2018					
11/28/2018	0.707	7.53	43.22	985.327	347.957	6/6/2018	1.136	10.55	173.46	46.934	23.429
12/4/2018	0.550	13.15	25.82	25671.994	2311.102	6/11/2018	0.862	6.43	85.04	26.943	27.469
12/12/2018	0.590	8.26	48.22	1143.375	280.247	6/19/2018	1.277	13.79	234.94	74.631	24.522
12/19/2018	0.597	4.67	57.09	83.597	64.712	6/27/2018	1.035	10.03	104.47	105.764	53.227
1/3/2019	0.450	5.10	62.58	98.590	48.314	7/2/2018	0.925	1.47	73.15	0.099	2.082
1/17/2019	0.563	5.34	30.93	484.828	271.372	7/10/2018	0.643	3.37	57.01	4.518	12.512
2/6/2019	0.462	14.00	100.29	2182.199	145.606	7/16/2018	0.588	8.41	116.23	42.182	17.149
2/13/2019	0.957	10.69	117.76	537.992	127.727	7/24/2018	0.817	16.74	206.67	209.763	29.887
2/19/2019	0.588	7.78	67.32	463.374	127.465	7/30/2018	0.804	2.79	102.66	0.657	3.317
2/25/2019	1.352	9.65	57.95	1477.863	607.499	8/14/2018	0.693	8.42	93.69	65.278	31.194
3/12/2019	0.409	7.75	48.85	863.573	166.865	8/20/2018	0.700	12.67	157.15	118.823	25.352
3/19/2019	0.489	15.14	64.17	7292.647	441.069	8/29/2018	0.773	11.66	138.86	109.114	30.376
3/26/2019	0.698	5.41	74.95	87.073	58.904	9/3/2018	0.716	13.12	78.91	542.395	110.326
4/2/2019	0.611	10.12	94.23	676.351	114.145	9/11/2018	0.762	6.14	110.77	13.183	13.042
4/16/2019	0.338	9.01	38.53	2544.413	300.145	9/17/2018	0.499	5.07	17.74	238.620	226.738
5/1/2019	0.361	12.50	66.18	3193.057	208.998	9/27/2018	0.428	3.88	21.50	55.870	77.638
5/21/2019	0.462	11.21	125.89	570.183	59.341	10/1/2018	0.412	3.16	16.40	42.383	85.462
5/28/2019	0.302	5.52	67.08	118.204	33.124	10/17/2018	0.261	7.52	42.43	202.390	45.676
6/11/2019	0.702	13.58	122.33	1298.540	139.992	10/26/2018	0.282	1.36	8.59	5.304	39.544
6/19/2019	0.978	12.00	140.23	603.360	115.994	11/6/2018	0.323	7.39	43.11	182.550	52.817
6/26/2019	0.963	6.94	190.32	36.555	20.712	11/14/2018	0.382	8.83	38.15	476.387	114.189
7/2/2019	0.826	8.18	125.55	162.809	56.886	11/19/2018	0.658	18.77	103.99	1308.567	119.570
7/9/2019	0.517	6.14	111.55	65.175	25.340	11/26/2018	0.513	9.26	48.50	355.867	104.189
7/17/2019	0.479	7.37	99.90	169.036	42.256	12/3/2018	0.437	8.24	31.77	521.440	164.183
7/23/2019	1.043	18.06	190.72	1672.949	151.553	12/12/2018	0.403	9.92	48.39	470.869	94.432
8/1/2019	0.553	4.31	103.58	18.330	15.481	12/19/2018	0.506	4.67	57.89	16.197	18.352
8/7/2019	0.523	12.55	139.57	728.663	68.480	2/14/2019	4.047	14.78	125.58		
8/13/2019	0.413	2.12	49.40	4.707	12.291	2/19/2019	1.387	6.98	55.88	86.650	120.622
9/2/2019	0.348	9.38	116.46	325.886	36.537	3/11/2019	0.847	8.69	51.48	245.626	134.593
9/12/2019	0.534	6.94	78.51	214.741	67.568	3/19/2019	0.269	13.28	74.48	638.251	47.704
9/20/2019	0.327	5.38	76.45	82.093	26.237	3/27/2019	0.179	6.54	70.98	41.331	8.487
10/4/2019	0.201	6.68	34.99	927.615	118.390	4/1/2019	0.211	9.71	112.00	80.779	8.827
10/9/2019	0.342	14.35	56.24	7670.842	361.262	4/16/2019	0.167	8.41	71.78	110.857	12.765
10/22/2019	0.225	10.29	67.06	1425.515	85.847	5/1/2019	0.236	12.50	66.98	621.014	45.805
11/7/2019	0.354	11.33	70.09	1917.988	149.967	5/14/2019	0.243	12.35	122.50	176.497	13.749
						5/28/2019	0.258	7.31	105.04	29.513	6.958
						6/11/2019	0.451	13.58	151.13	169.493	20.300
						6/19/2019	0.565	12.00	141.14	118.656	22.753
						6/26/2019	0.701	6.94	193.14	7.071	5.043
						7/1/2019	0.856	9.80	137.64	55.505	24.209
						7/8/2019	0.560	5.97	96.45	15.581	11.971
						7/18/2019	0.546	6.49	106.81	17.727	11.243
						7/23/2019	0.913	20.71	208.40	482.8	

FECHA	V_o (cm/día)	P (mm)	Q (m ³ /s)	$X = \frac{(P)^4 g h_s j}{(Q)^2 \tan \theta}$	$Y = \frac{V k A (P)^2}{(Q)^2}$	FECHA	V_o (cm/día)	P (mm)	Q (m ³ /s)	$X = \frac{(P)^4 g h_s j}{(Q)^2 \tan \theta}$	$Y = \frac{V k A (P)^2}{(Q)^2}$
6/1/2018	0.083	14.30	208.74	15.064	8.285	8/11/2016	0.295	8.69	193.20	45.124	24.778
6/11/2018	0.083	7.41	126.47	2.959	6.060	8/15/2016	2.573	7.74	193.20	28.398	171.192
6/27/2018	0.156	10.49	165.57	6.933	13.246	8/29/2016	0.716	5.61	46.03	138.075	440.761
7/10/2018	0.045	1.55	49.93	0.036	0.923	9/15/2016	0.236	5.72	67.10	70.224	71.040
7/24/2018	0.043	12.19	169.59	12.051	4.659	9/29/2016	0.175	9.01	86.51	260.082	78.797
8/14/2018	0.080	6.75	89.88	4.034	9.603	10/11/2016	0.219	5.01	74.86	33.204	40.653
8/29/2018	0.068	11.90	194.95	8.282	5.384	11/1/2016	0.082	2.79	44.46	9.054	13.420
9/11/2018	0.139	8.71	137.13	4.804	11.857	11/14/2016	0.405	9.74	67.16	589.330	353.105
9/27/2018	0.071	4.26	16.00	20.193	107.229	11/30/2016	0.186	11.58	49.82	2139.790	415.585
10/17/2018	0.017	7.00	34.76	31.191	14.461	12/13/2016	0.229	3.85	37.12	47.095	102.261
11/5/2018	0.061	3.96	24.81	6.271	32.818	1/6/2017	0.108	4.53	40.94	74.220	54.668
11/20/2018	0.069	10.43	62.78	47.129	40.070	1/16/2017	0.328	10.51	68.78	761.827	317.386
12/3/2018	0.049	8.75	32.61	86.521	74.419	2/1/2017	0.225	7.18	63.94	191.978	117.751
12/17/2018	0.033	6.38	49.40	10.657	11.740	2/13/2017	0.340	4.07	47.29	36.246	104.470
1/17/2019	0.038	4.24	49.63	2.060	5.843	3/3/2017	0.123	9.84	48.46	1179.228	209.607
2/14/2019	0.038	13.40	106.74	44.418	12.695	3/14/2017	0.190	3.28	37.35	24.505	60.861
3/11/2019	0.048	8.14	46.45	31.939	31.439	3/31/2017	0.149	9.66	48.06	1113.624	248.769
4/16/2019	0.016	8.11	73.86	12.447	3.963	4/18/2017	0.151	14.01	83.52	1631.385	176.334
5/14/2019	0.061	11.13	120.08	16.704	11.043	5/2/2017	0.148	14.63	83.60	1935.984	187.827
5/29/2019	0.011	10.23	115.70	12.842	1.778	5/15/2017	0.490	13.20	78.43	1457.897	575.242
6/13/2019	0.031	8.96	88.98	12.777	6.586	5/30/2017	0.132	7.57	62.85	245.537	79.088
6/18/2019	0.103	16.00	187.89	29.138	15.796	6/14/2017	0.291	13.58	112.81	789.842	175.129
6/25/2019	0.046	7.30	194.71	1.176	1.369	7/3/2017	0.212	6.49	76.17	90.318	63.727
7/1/2019	0.216	8.08	134.00	3.726	16.631	7/14/2017	0.299	4.19	96.97	9.681	23.146
7/8/2019	0.019	5.10	92.26	1.248	1.233	8/1/2017	0.218	13.27	177.66	290.376	50.503
7/17/2019	0.062	5.86	106.52	1.631	3.963	8/15/2017	0.529	2.39	52.31	3.538	45.888
7/22/2019	0.053	17.53	224.57	29.391	6.881	9/5/2017	0.505	4.32	36.59	76.836	291.665
8/7/2019	0.072	6.86	112.59	2.742	5.699	9/26/2017	0.291	6.57	64.10	134.030	126.577
8/12/2019	0.053	0.96	48.24	0.006	0.447	10/11/2017	0.826	5.91	47.47	159.921	530.968
9/4/2019	0.049	7.89	115.07	4.594	4.898	10/30/2017	0.445	13.40	116.51	702.124	244.075
9/11/2019	0.046	7.20	71.62	8.223	9.950	11/14/2017	0.494	9.53	27.17	3300.497	2516.911
9/24/2019	0.099	4.49	78.46	1.036	6.880	11/30/2017	0.260	4.84	60.55	44.229	68.966
10/3/2019	0.051	4.90	26.61	12.779	36.952	12/28/2017	0.446	7.97	30.99	1241.237	1222.135
1/3/2020	0.135	10.26	66.50	39.331	68.114	1/22/2018	0.136	11.29	54.75	1603.007	239.308
2/27/2020	0.246	4.91	56.87	2.821	38.845	2/15/2018	0.137	4.37	38.37	72.930	73.652
3/31/2020	0.124	6.00	42.88	11.063	51.519	3/6/2018	0.203	6.31	45.96	221.683	158.458
6/16/2020	0.067	11.67	117.79	20.983	13.961	4/2/2018	0.122	9.13	53.15	726.226	149.130
8/4/2020	0.078	8.67	93.75	10.091	14.174	4/24/2018	0.108	10.12	64.75	739.097	109.073
8/25/2020	0.119	9.19	56.15	35.510	67.330	7/3/2018	0.629	1.23	57.49	0.201	11.845
9/1/2020	0.152	1.39	7.69	0.991	105.435	7/9/2018	0.299	2.62	43.49	7.321	44.941
9/15/2020	0.505	3.39	33.14	1.888	111.824	7/24/2018	0.390	13.04	164.29	316.705	101.984
10/22/2020	0.360	8.88	57.58	29.438	181.165	8/14/2018	0.230	7.84	127.78	68.344	35.941
11/5/2020	0.754	1.27	9.97	0.411	259.022	8/20/2018	0.605	12.67	138.61	395.745	209.253
11/10/2020	0.124	2.69	5.00	32.875	759.993	8/28/2018	0.514	13.11	223.13	175.382	73.545
11/17/2020	0.817	2.15	5.00	13.416	3197.965	9/3/2018	0.520	10.93	100.84	415.053	253.373
11/24/2020	0.080	7.34	32.98	41.887	83.908	9/11/2018	0.707	6.14	105.89	37.378	98.384
12/8/2020	0.238	9.80	34.47	121.847	408.192	9/25/2018	0.389	4.18	19.37	239.939	749.910
12/15/2020	0.091	3.46	20.00	5.624	57.943	10/3/2018	0.245	4.22	10.10	916.689	1771.563
12/22/2020	0.614	6.26	49.61	9.794	207.014	10/17/2018	0.205	7.85	48.23	482.171	224.754
12/30/2020	0.240	6.96	8.30	534.655	3573.526	10/25/2018	0.784	1.38	10.80	9.186	530.833
1/5/2021	0.238	6.03	22.10	42.489	375.751	10/29/2018	0.860	8.29	34.79	1151.144	2023.798
1/13/2021	0.542	6.50	40.57	17.023	294.876	11/5/2018	0.666	6.96	45.41	336.957	649.691
1/19/2021	0.237	3.30	41.23	1.095	32.102	11/12/2018	0.741	6.79	30.66	666.352	1504.015
1/26/2021	0.363	13.60	93.44	61.501	162.803	11/19/2018	1.050	16.79	94.04	2655.774	1388.097
2/3/2021	0.306	7.80	81.21	8.810	59.854	11/26/2018	0.342	9.26	49.70	878.040	491.573
2/10/2021	0.518	7.09	55.13	13.050	181.289	12/3/2018	0.762	8.24	32.97	1254.455	1973.399
2/24/2021	0.164	8.66	30.73	93.485	276.270	12/11/2018	0.481	9.50	41.59	1390.537	1040.443
3/9/2021	0.275	11.64	96.94	30.662	84.049	12/17/2018	0.550	4.48	64.76	28.453	109.316
3/23/2021	0.075	5.56	31.62	15.003	49.103	1/3/2019	0.767	5.62	65.14	69.330	236.584
3/30/2021	0.093	20.94	91.30	362.042	103.431	1/7/2019	1.083	10.24	47.12	1461.199	2118.589
4/6/2021	0.440	9.36	112.86	9.458	64.071	1/16/2019	0.617	2.59	22.19	26.986	348.294
4/13/2021	0.193	3.36	58.68	0.581	13.389	1/25/2019	0.591	8.66	99.46	167.571	185.421
4/21/2021	0.113	10.17	73.85	30.788	45.177	1/31/2019	0.832	15.29	66.44	3658.879	1827.287
5/4/2021	0.165	19.31	84.23	307.602	184.056	2/12/2019	0.727	13.39	132.49	541.176	307.673
5/17/2021	0.270	18.26	203.34	42.204	46.066	2/19/2019	0.606	8.59	77.89	265.419	305.568
						2/25/2019	0.879	9.65	59.95	712.767	944.393
						3/11/2019	0.761	8.28	49.56	565.803	881.335
						3/26/2019	1.036	9.60	76.27	431.834	680.547
						4/15/2019	0.948	9.39	82.07	340.533	513.827
						4/24/2019	1.066	15.78	71.69	3561.758	2141.092
						5/1/2019	1.190	6.71	62.23	155.026	574.258
						5/10/2019	1.000	11.93	120.56	411.294	405.824
						5/14/2019	1.321	13.29	127.86	563.181	591.192
						5/22/2019	1.139	8.02	129.34	72.997	181.454
						5/29/2019	1.225	8.93	76.52	320.558	691.186
						6/11/2019	1.132	12.75	125.27	497.389	486.240
						6/18/2019	0.661	12.93	136.39	443.571	246.314
						6/21/2019	0.899	11.32	259.21	72.095	70.983
						6/25/2019	1.015	4.70	166.45	5.202	33.554
						7/1/2019	0.995	8.38	130.02	86.300	171.540

Figura A2. Parámetros adimensionales para las zonas 3 y 4.

FECHA	V_0 (cm/d)	P (mm)	Q (m ³ /s)	$X = \frac{(P)^4 g h_s j}{(Q)^2 \tan \theta}$	$Y = \frac{V k A (P)^2}{(Q)^2}$	FECHA	V_0 (cm/d)	P (mm)	Q (m ³ /s)	$X = \frac{(P)^4 g h_w j}{(Q)^2 \tan \theta}$	$Y = \frac{V k A (P)^2}{(Q)^2}$
11/1/2016						8/11/2016	0.4191066	8.69	190.00	13.162	27.662
11/14/2016	0.896	9.74	51.30	316.084	421.551	8/15/2016	0.5026788	7.75	190.00	8.296	26.341
11/30/2016	0.853	11.58	43.92	863.579	774.866	8/29/2016	0.3461281	5.61	73.20	15.394	64.129
12/13/2016	0.759	4.30	27.77	41.134	237.932	9/16/2016	0.2674617	7.70	67.47	64.153	109.759
1/6/2017	0.416	4.54	37.15	28.518	81.169	9/29/2016	0.2834915	7.71	84.91	40.876	73.784
1/16/2017	0.922	10.51	68.78	238.540	281.065	10/11/2016	0.2761585	5.19	65.22	14.150	55.054
2/1/2017	0.723	7.18	61.15	65.730	130.129	11/1/2016	0.176866	2.97	40.48	3.929	29.936
2/13/2017	0.818	4.07	45.46	12.241	85.472	11/14/2016	0.2458872	9.74	67.16	165.984	163.050
3/3/2017	0.782	9.84	48.46	369.235	420.959	11/30/2016	0.5436186	11.58	49.82	604.040	927.075
3/14/2017	0.89	3.28	37.35	7.673	89.604	12/13/2016	0.3656328	4.30	28.02	36.365	271.963
3/31/2017	1.005	9.66	48.18	346.959	527.485	1/6/2017	0.2686231	4.54	39.93	22.228	109.635
4/18/2017	1.479	14.01	78.08	584.467	621.688	1/16/2017	0.1096205	10.51	68.78	214.530	80.694
5/2/2017	0.114	14.63	83.60	606.188	45.577	2/1/2017	0.3061029	7.18	62.02	57.651	129.538
8/31/2017	0.390	4.59	41.16	24.22979249	63.315	2/13/2017	0.1592349	4.07	47.47	10.104	36.860
9/19/2017	0.194	6.32	59.94	41.06620027	28.156	3/3/2017	0.304785	9.84	48.78	328.554	391.488
10/11/2017	0.321	4.27	46.70	14.0970235	35.035	3/14/2017	0.160412	3.28	37.35	6.906	39.013
10/30/2017	0.260	12.07	116.88	143.6806749	36.197	3/31/2017	0.1954302	9.66	48.18	311.969	247.663
11/14/2017	0.284	9.61	27.94	1010.39324	438.614	4/18/2017	0.362874	14.15	83.37	479.973	329.631
11/30/2017	0.235	4.93	60.18	15.0845721	20.589	5/2/2017	0.4498892	14.63	83.60	544.841	434.194
12/28/2017	0.258	7.52	32.00	288.8158947	186.005	5/15/2017	0.2358978	13.19	78.43	409.420	210.380
1/22/2018	0.202932	4.10	53.82	9.021894097	15.375	5/30/2017	0.2004326	7.07	62.85	52.548	79.909
2/15/2018	0.1934315	13.13	107.42	238.1981001	37.727	6/14/2017	0.2243056	13.32	101.82	252.646	121.040
3/6/2018	0.1618601	5.21	45.96	32.26044686	27.155	7/3/2017	0.1584382	6.49	76.17	25.486	36.298
4/2/2018	0.1691388	7.02	53.15	79.49007641	38.513	7/14/2017	0.1897317	5.31	106.76	5.802	14.797
4/24/2018	1.5921129	9.50	65.58	175.1367154	436.138	8/1/2017	0.1374575	13.27	180.77	79.038	23.368
6/11/2018	0.8058859	6.83	126.81	12.51574279	30.522	8/15/2017	0.1480385	2.39	52.31	0.997	9.768
6/27/2018	0.7887278	10.49	170.90	38.33939689	38.792	9/5/2017	0.0569716	4.32	36.59	21.730	25.089
7/9/2018	0.6431851	1.59	50.49	0.231868513	8.327	9/19/2017	0.0896256	9.09	72.16	108.920	44.804
7/24/2018	0.6060526	11.44	164.29	58.68273897	38.361	10/11/2017	0.047953	4.52	47.63	15.318	13.620
8/14/2018	0.6488272	6.17	94.07	15.14550142	36.439	10/30/2017	0.1498076	13.40	116.51	197.868	62.522
8/28/2018	0.7174601	12.81	190.25	68.80340276	42.465	11/14/2017	0.0888135	9.53	27.17	930.125	344.616
9/11/2018	0.6978315	8.45	138.23	24.67685778	34.045	11/30/2017	0.0791	4.84	60.55	12.464	15.942
9/25/2018	0.3568928	4.31	20.39	76.79577613	208.277	12/28/2017	0.1591083	7.97	31.60	335.923	318.970
10/17/2018	0.4444015	6.73	34.71	157.4916704	218.134	1/22/2018	0.1833229	11.29	41.16	799.368	435.279
11/5/2018	0.3921638	4.12	28.60	32.5754556	106.239	2/15/2018	0.1687212	4.37	38.37	20.553	68.903
12/4/2018	1.3335451	9.46	51.59	278.2956369	585.400	3/6/2018	0.1055218	6.31	45.96	62.390	62.688
12/17/2018	1.0528135	5.91	52.06	41.62362937	177.107	4/2/2018	0.1157328	9.13	53.15	204.660	107.667
1/16/2019	0.7237033	4.08	53.41	8.981922266	55.123	4/24/2018	0.2025206	8.87	64.76	122.999	119.883
2/12/2019	0.8606703	12.89	109.91	211.3425477	154.539	5/31/2018	0.4350566	16.69	214.83	139.818	82.771
3/11/2019	0.7639129	8.40	59.18	131.4752749	200.932	6/11/2018	0.4350566	8.94	126.81	33.012	68.139
4/2/2019	0.9607457	8.70	80.97	80.81247666	144.800	6/27/2018	0.2305095	11.91	170.90	57.327	35.299
4/15/2019	0.9290251	8.64	72.54	97.93762143	172.056	7/9/2018	0.1287594	1.92	42.17	0.637	8.425
5/1/2019	0.8465101	8.90	67.52	127.2755095	192.007	7/24/2018	0.1227135	13.04	164.29	89.252	24.391
5/22/2019	0.702263	10.41	161.98	41.39206051	37.865	8/14/2018	0.1345086	6.64	94.07	18.237	21.107
5/28/2019	0.7654436	10.88	80.15	201.7326878	184.142	8/28/2018	0.1712379	12.92	188.33	65.422	25.422
6/13/2019	0.6649274	10.40	103.25	101.4926212	88.077	9/11/2018	0.1465398	8.19	138.23	19.627	16.235
6/25/2019	0.6244915	12.30	194.51	55.95061563	32.602	9/25/2018	0.0954364	4.18	20.39	61.066	126.460
7/1/2019	0.5352483	8.08	137.71	20.78643157	24.057	10/17/2018	0.0334529	6.53	34.71	125.596	37.337
8/7/2019	1.4119162	7.72	126.30	20.59335256	68.869	11/5/2018	0.1047753	4.89	28.60	58.283	96.674
8/30/2019	1.6396219	8.51	159.61	19.03998749	60.852	11/20/2018	0.1465342	11.44	64.49	342.767	145.407
9/6/2019	1.7990576	3.89	48.32	9.069727501	152.216	12/3/2018	0.2798169	8.92	37.25	379.727	506.046
						12/17/2018	0.1616039	7.35	51.52	91.510	103.716
						1/16/2019	0.086144	5.33	49.61	27.226	31.318
						2/12/2019	0.1530977	12.90	105.31	207.847	72.449
						3/12/2019	0.1137416	8.37	59.56	114.949	70.775
						4/16/2019	0.0905539	9.51	79.28	108.526	41.133
						5/23/2019	0.1270859	11.22	99.74	132.792	50.752
						5/29/2019	0.1497021	9.90	80.93	122.090	70.654
						6/13/2019	0.1634945	11.24	121.40	90.246	44.223
						6/18/2019	0.3112014	17.52	152.44	337.469	129.630
						6/25/2019	0.2749256	7.54	206.21	6.313	11.579
						7/1/2019	0.3198855	8.38	130.02	24.321	41.941
						7/9/2019	0.5736883	5.37	103.29	6.481	48.876
						7/18/2019	0.2684026	7.08	103.97	19.385	39.290
						7/23/2019	0.5385596	20.71	207.17	356.764	169.729
						8/6/2019	0.2412635	8.15	123.43	24.062	33.142
						8/13/2019	0.3092917	1.81	52.80	0.324	11.518
						9/4/2019	0.2806088	9.12	111.89	45.961	58.772
						9/11/2019	0.1342649	6.49	81.14	22.470	27.114
						10/10/2019	0.0736442	7.56	55.25	89.005	43.468

Figura A3. Parámetros adimensionales para las zonas 5 y 6.

La nevada de Filomena pone a prueba la norma de Acciones en la Edificación

Filomena Snowstorm Tests the Standard of Actions on Structures

Manuel Ignacio Guerra Romero^{1*}, Julia García González², Julia M.^a Morán del Pozo³, Andrés Juan Valdés⁴

Resumen

Como consecuencia del temporal de frío y nieve, en la península ibérica se acumularon importantes espesores de nieve en zonas poco habituales del interior, lo que provocó el hundimiento de algunas edificaciones de estructura ligera, especialmente naves agrícolas e industriales. ¿Ofrece dudas la actual norma de acciones DB SE-AE, para estimar el valor de sobrecargas climáticas como la nieve?

En este trabajo se han analizado las precipitaciones nivosas de las comunidades autónomas más castigadas por ese temporal, comparándolas con los respectivos *valores característicos* dados por la citada norma. Se ha comprobado que, en general, la norma ha resultado ser adecuada para estimar la sobrecarga de nieve, con la salvedad de Toledo, donde se superó el *valor característico* en un 38 %. En los numerosos colapsos de cubiertas ligeras acaecidos durante la borrasca, la nieve ha debido de actuar como factor desencadenante; no se puede afirmar que haya sido la principal responsable.

Se puede concluir que la actual norma SE-AE es mejor, en general, que la anterior norma AE-88, y que en la mayoría de los casos ofrece valores adecuados para el dimensionamiento de las estructuras. Con la citada excepción, esta norma SE-AE ha pasado satisfactoriamente la prueba de Filomena.

Palabras clave: borrasca Filomena, acciones en la edificación, sobrecarga de nieve, naves industriales, seguridad estructural.

Abstract

The Iberian Peninsula suffered the effects of the Filomena storm at the beginning of 2021. The first two days, a heavy snow fell in the interior of the Iberian Peninsula and a high depth was reported. As a result, it caused the collapse of a few light framework buildings.

Is the current standard of action DB SE-AE, established to estimate the value of climatic overloads such as snow, reliable?

In this work, the snowfall of the autonomous communities most affected by this storm has been analyzed, comparing it with the respective characteristic values given by the aforementioned norm. Generally speaking, it has been found that the standard has been adequate to estimate snow overload, except for Toledo, where the characteristic value was exceeded by 38 %. In the numerous collapses of warehouses that happened during the storm, snow must have acted as a trigger, though it cannot be said that it was primarily responsible.

Therefore, it can be concluded that the current SE-AE standard is better, in general terms, than the previous AE-88 standard, and offers adequate values for the sizing of structures. With the aforesaid exception, this standard has successfully passed the Filomena test.

Keywords: Filomena snowstorm, actions on structures, snow loads, warehouses, structural security.

1. INTRODUCCIÓN

La península ibérica sufrió los efectos de un temporal de nieve durante los días 8, 9 y 10 de enero de 2021, debido a la borrasca Filomena. Los dos primeros días descargó una nevada en el interior peninsular que fue calificada por la Agencia Estatal de Meteorología (Aemet, 2021b) de histórica, al acumular espesores de nieve de 30 a 50 cm en zonas poco habituales, como Madrid o Toledo. Sus efectos se

hicieron notar en el tráfico, en la caída de árboles, etc. (Domingo, 2021). También, la nieve acumulada en los tejados fue el desencadenante del hundimiento de algunas naves industriales, agrícolas, ganaderas o forestales (*El Correo*, 2021), amén de otro tipo de edificios de estructura ligera (Casanueva, 2021; *La Tribuna de Toledo*, 2021; *Noticias para Municipios*, 2021). Sin embargo, tal como puede verse más adelante, en la mayoría de los casos, las precipitaciones en forma de nieve han estado por debajo de los valores máximos especificados en normas como la (DB SE-AE, 2009) o la instrucción sobre las acciones a considerar en proyectos de puentes de carretera, (IAP-11, 2011).

En los proyectos de construcción es necesario considerar según (DB SE, 2006) todas «las acciones que deben tenerse en cuenta en el cálculo de la estructura», y en particular las climáticas, de las que la nieve y el viento son las más importantes. Cuando se toman correctamente los valores de las acciones y se hacen bien los cálculos constructivos según las normas en vigor, el proyectista no debe esperar ningún fallo estructural.

* Autor de contacto: ignacio.guerra@unileon.es

¹ Dr. Ingeniero agrónomo e ITOP. Escuela de Ingeniería Agraria y Forestal. Universidad de León.

² Dra. Ingeniera agrónoma. Escuela de Ingeniería Agraria y Forestal. Universidad de León.

³ Dra. Ingeniera agrónoma. Escuela de Ingeniería Agraria y Forestal. Universidad de León.

⁴ Dr. Ingeniero agrónomo. Escuela de Ingeniería Agraria y Forestal. Universidad de León.

En este artículo se analizan los datos de las precipitaciones de nieve registrados en los observatorios de la Aemet, comparándose con los valores de la sobrecarga de nieve establecidos en la norma española DB SE-AE. Además, se hace una revisión bibliográfica sobre el origen de dichos valores.

La borrasca Filomena y otros eventos meteorológicos extremos parece que son consecuencia del cambio climático (Dimova *et al.*, 2016). Ante la indudable repercusión del cambio climático en los edificios, cabe hacer mención al grupo CEN-TC250-SC1_N1711 *Climate Change Coverage*, que tiene, entre otras, la función de analizar cómo afecta el cambio climático a las estructuras y, en particular, a las acciones.

Estos fenómenos extremos, según Añel y Torre, 2021, se han dado siempre, pero con una bajísima frecuencia: «puede que ahora sean cada vez más frecuentes y que haya que estar preparados para ello». En este sentido, habría que replantearse si los valores de la sobrecarga de nieve que figuran en la norma española DB SE-AE para el cálculo de los edificios, seguirán siendo válidos para asegurar la estabilidad estructural de las edificaciones, en el futuro.

2. CARGA DE NIEVE EN UNA SUPERFICIE HORIZONTAL

La antigua normativa de acciones en la edificación, la (NBE-AE/88, 1988), establecía que el valor de la sobrecarga de nieve en una superficie horizontal se podía determinar a partir de los datos estadísticos locales; en ausencia de estos datos locales, se podía tomar de una tabla (tabla 1) en función, únicamente, de la altitud topográfica del lugar, adoptándose un valor mínimo de 40 kg/m², incluso en las localidades donde no nieva. En esta tabla, la altitud es la única variable a considerar para hallar la sobrecarga de nieve, sin establecer ninguna diferencia entre las regiones españolas. Con la publicación del CTE en 2006, se derogó esta norma y se empezó a utilizar el Documento Básico de Acciones en la Edificación: DB SE-AE.

Tabla 1. Sobrecarga de nieve en una superficie horizontal: tabla 4.1 de la norma NBE-AE-88

Altitud topográfica h (m)	Sobrecarga de nieve s_k (kg/m ²)
0-200	40
201-400	50
401-600	60
601-800	80
801-1.000	100
1.001-1.200	120
>1.200	$h/10$

Con el fin de mejorar los conocimientos sobre nivometría en España, el Instituto Nacional de Meteorología –actualmente la Aemet–, publicó un estudio con las bases estadísticas para elaborar un mapa nacional de sobrecarga de nieve en función de la altitud y de las zonas climáticas (Peinado y Almarza, 1984). En esta línea, cabe citar también el trabajo DGIII-D3 llevado a cabo en el ámbito europeo por un comité de expertos (Brettle *et al.*, 1999), para determinar la sobrecarga de nieve potencial en diferentes regiones europeas, entre ellas España. En el caso de

la península ibérica y Baleares, los autores propusieron –con poco acierto– una división del territorio en regiones climáticas (figura 1), muy diferente a la actual, recogida en el DB SE-AE (figura 2).

A partir de estos y otros estudios, y de la información proporcionada por la Aemet, se comenzó a trabajar en una nueva norma de acciones, basada en la altitud y en la división del territorio en zonas de clima invernal. La mayoría de las estaciones climatológicas de la red de la Aemet no registran directamente ni el espesor ni la densidad de las precipitaciones acumuladas en forma de nieve (Morata Gasca, Tanner y Almarza Mata, 2004). Para conocer estas precipitaciones nivosas y poder determinar con suficiente fiabilidad la carga de nieve, se recurrió a una estimación indirecta: partiendo de registros históricos termopluviométricos de más de 1.000 estaciones, se seleccionaron los datos pluviométricos de días con temperatura mínima extrema inferior o igual a 0 °C. Se identificaron 7 zonas de clima invernal (figura 2), donde las precipitaciones de nieve mostraban cierta homogeneidad. Con los datos pluviométricos seleccionados de cada zona y un exhaustivo tratamiento estadístico, se hizo el ajuste a una función potencial para estimar el valor medio de la carga de nieve esperada en cada una de las zonas climáticas (Morata Gasca, Tanner, Luna, *et al.*, 2004) y (Morata Gasca, Tanner y Almarza Mata, 2004). Estas funciones potenciales permiten estimar el valor característico “esperado” de la sobrecarga de nieve sobre un terreno horizontal en función de la altitud (tabla 2).

Al comparar los valores característicos “esperados” con los valores de cada estación meteorológica, se observó una dispersión nada desdeñable. Para tenerla en cuenta, a efectos de asegurar el nivel de fiabilidad requerido por las normas de construcción –en esos momentos se estaba desarrollando la actual norma, DB SE-AE–, se propusieron unas nuevas funciones potenciales (Tanner *et al.*, 2011) basadas en el cuantil superior del 95 % (ver tabla 2) que permiten determinar un nuevo valor característico “normalizado”. Los resultados de estas funciones figuran en la tabla 3, y son los que, con mínimas modificaciones, fueron recogidos en el (DB SE-AE, 2009) y en la instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera (IAP-11, 2011).

La borrasca Filomena ha sido una buena oportunidad para verificar la calidad de los valores característicos “normalizados” de la tabla 3. En prácticamente todos los observatorios meteorológicos de la península analizados, la nieve caída fue inferior al correspondiente valor característico. Un buen ejemplo de esto puede ser el caso del observatorio del Retiro en Madrid, a 667 m de altitud, donde a pesar de los numerosos daños materiales que hubo, la carga de nieve registrada (0.52 kN/m²) fue ligeramente inferior al valor que da la norma para este lugar (0.6 kN/m²).

En 2006 se publicó el Código Técnico de la Edificación (CTE, 2006), constituido por varios documentos básicos. En el documento básico de seguridad estructural DB SE (§ 3.3.2.2.) se define el *valor característico* de una acción climática, como «el valor de la acción que está asociado a una probabilidad anual de ser superada de tan solo 0.02 en un periodo de retorno de 50 años». Este valor de referencia es el que se usa en los cálculos estructurales.

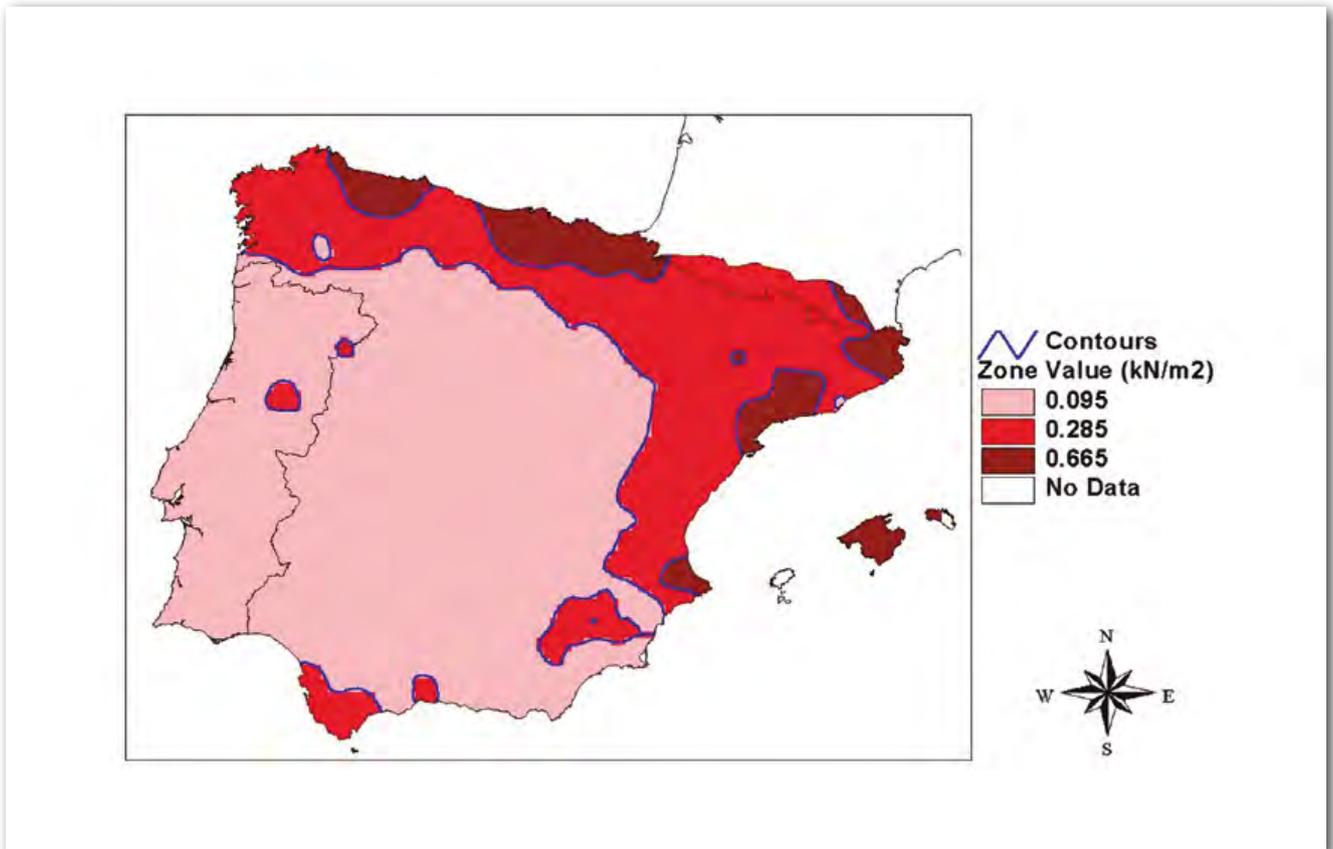


Figura 1. Regiones climáticas de nieve en la península y Baleares según el estudio europeo DGIII-D3 (1999). Los valores representan la carga de nieve al nivel del mar.



Figura 2. Zonas de clima invernal en España (Figura E.2 del DB SE-AE).

Tabla 2. Funciones para determinar el valor característico “esperado” y “normalizado” de la sobrecarga de nieve sobre un terreno horizontal en función de la altitud A , en metros. Se adopta un valor mínimo de 0.2 kN/m²

Zona de clima invernal de nieve	Función del valor característico “esperado” (kN/m ²)	Función del valor carácter. “normalizado” (kN/m ²)	Altitud máxima (m)
1	0.148×1.0016^A	$0.336 \times 1.0016^A \geq 0.2$	1600
2	0.146×1.0014^A	$0.368 \times 1.0014^A \geq 0.2$	2200
3	0.0459×1.0021^A	$0.091 \times 1.0021^A \geq 0.2$	1800
4	0.0387×1.0022^A	$0.138 \times 1.0022^A \geq 0.2$	1600
5	0.0777×1.0016^A	$0.191 \times 1.0016^A \geq 0.2$	1600
6	0.0247×1.0026^A	$0.089 \times 1.0026^A \geq 0.2$	1800
7	0.2	0.2	1800

Tabla 3. Valor característico “normalizado” en kN/m², de la sobrecarga de nieve sobre un terreno horizontal en España, según las funciones potenciales de altura de la tabla 2. En la última columna figuran los valores de la derogada norma NBE-AE-88. Los valores sombreados son una décima superior a los que figuran, en la norma de acciones SE-AE

		DB SE-AE (desde 2006)					NBE-AE/88 (derogada)		
		Valor característico “normalizado” sk (kN/m ²)							(kN/m ²)
Altitud	Zona de clima invernal de nieve								
	A (m)	1	2	3	4	5	6	7	En toda España
0	0.3	0.4	-	-	0.2	0.2	0.2	0.2	0.4
200	0.5	0.5	-	-	0.3	0.2	0.2	0.2	0.5
400	0.6	0.6	0.2	0.3	0.4	0.3	0.2	0.2	0.6
500	0.7	0.7	0.3	0.4	0.4	0.3	0.2	0.2	0.6
600	0.9	0.9	0.3	0.5	0.5	0.4	0.2	0.2	0.8
700	1.0	1.0	0.4	0.6	0.6	0.5	0.2	0.2	0.8
800	1.2	1.1	0.5	0.8	0.7	0.7	0.2	0.2	1.0
1.000	1.7	1.5	0.7	1.2	0.9	1.2	0.2	0.2	1.2
1.200	2.3	2.0	1.1	1.9	1.3	2.0	0.2	0.2	1.2
1.400	3.2	2.6	1.7	3.0	1.8	3.4	0.2	0.2	1.4
1.600	4.3	3.5	2.6	4.6	2.5	5.7	0.2	0.2	1.6

3. COMBINACIÓN DE ACCIONES

El cálculo estructural de edificios de estructura ligera, sensibles a las cargas gravitatorias, se hace combinando las acciones –cargas– hasta encontrar la combinación más desfavorable. Las acciones más habituales en este tipo de edificaciones son las cargas permanentes, las sobrecargas de uso y las acciones climáticas, viento y nieve.

En este tipo de construcciones, la sobrecarga de uso en la cubierta se considera únicamente para labores de mantenimiento o conservación, no siendo concomitante este uso con el resto de las acciones climáticas en la cubierta. La norma de acciones (DB SE-AE, 2009), al igual que el EC1 en su anexo nacional, asignan a esta sobrecarga el valor de 0.4 kN/m², mientras que en la anterior norma, MV-101, 1962; NBE-AE/88 (1988) y NTE ECG (1988), reunidas en la norma NBE-AE/88 (1988), asignan el valor de 100 kg/m².

En el caso de estructuras metálicas, el dimensionamiento basado en estados límite últimos, ELU, se suele hacer para una situación ‘persistente o transitoria’. En ambas situaciones, cuando se analiza la hipótesis de hundimiento, es normal plantear, al menos, dos combinaciones de carga, eligiendo la más desfavorable para el dimensionamiento de cada elemento estructural:

- Combinación 1. Incluye al menos, las cargas permanentes (G_k), la nieve (Q_N) como sobrecarga principal y el viento (Q_v) como sobrecarga de acompañamiento:

$$\sum 1.35 \times G_k + 1.5 \times Q_N + \sum 0.9 \times Q_v$$

- Combinación 2. Incluye las cargas permanentes (G_k) y la sobrecarga de uso en cubierta (Q_v), sin nieve ni viento, por no ser concomitantes con el uso en cubierta:

$$\Sigma 1.35 \times G_k + 1.5 \times Q_U$$

En la combinación 1, la sobrecarga de nieve está multiplicada por el coeficiente parcial de seguridad 1.5; esto significa que el edificio debe estar preparado para resistir una nevada un 50 % superior al valor característico. En cambio, la acción del viento viene multiplicada por 0.9, que es el producto de 1.5 por el coeficiente de simultaneidad o acompañamiento 0.6 (DB SE, 2006) § tabla 4.2.).

Cuando la sobrecarga de uso es superior a la sobrecarga de nieve –en las zonas costeras, por ejemplo–, se toma la combinación 2, que aparentemente es más desfavorable; en caso contrario, se tomaría la combinación 1, siempre siguiendo el criterio de buscar la situación pésima para la estructura. Si el viento fuese más desfavorable que la nieve o la sobrecarga de uso en cubierta, el viento pasaría a ser la acción variable dominante y la nieve la de acompañamiento.

En cuanto a las antiguas normas de acero (EA-95, 1996; MV-103, 1972), cuando la sobrecarga de nieve era inferior a la de uso –que en la AE-88 valía 100 kg/m²–, se dimensionaba la estructura con esta sobrecarga en cubierta, sin nieve ni viento:

$$\Sigma 1.33 \times G_k + 1.5 \times Q_U$$

También, se comprobaba la combinación de nieve y viento:

$$\Sigma 1.33 \times G_k + 1.5 \times Q_N + 1.5 \times Q_V$$

4. SOBRECARGA DE NIEVE EN CUBIERTAS INCLINADAS

La nieve puede depositarse en las cubiertas de los edificios de forma homogénea, o bien acumularse en algunas partes por efecto del viento. En el caso de edificios de estructura ligera, como las naves industriales, el valor de la carga de nieve Q_N que se utiliza en el cálculo, se halla multiplicando el valor característico normalizado s_k , por el coeficiente de forma de la cubierta, y por el coeficiente de exposición al viento c_e :

$$Q_N = s_k \cdot \mu \cdot c_e$$

En este tipo de edificios, c_e y μ suelen valer la unidad. En el caso de un emplazamiento fuertemente expuesto al viento, donde sea previsible una importante acumulación de nieve en la cubierta, puede aumentarse el valor de c_e

hasta 1.20. En cubiertas muy inclinadas, la nieve tiende a deslizarse, cayendo al suelo o a otra cubierta inferior, donde se acumularía. Un caso particular son las naves adosadas, donde la nieve se puede acumular ‘peligrosamente’ en los faldones interiores (limahoya). La norma DB SE-AE contempla esta situación haciendo que el factor de forma sea superior a la unidad; tal como se muestra en la tabla 4: μ puede variar, según el ángulo α de inclinación de la cubierta, entre 1 y 2.

Así, por ejemplo, en el caso de naves adosadas con cubiertas inclinadas entre 10 y 15° (ángulo β), el coeficiente de los faldones interiores puede tomar valores comprendidos entre 1.3 y 1.5, lo que da lugar a cargas de nieve Q_N , entre un 30 y un 50 % superiores a la de los faldones exteriores. Si se aplica el Eurocódigo 1, el resultado es un 20 % menor.

Las naves construidas con anterioridad a 2006 se calculaban con la norma NBE-AE/88. La determinación de la sobrecarga de nieve se hacía multiplicando su valor característico s_k (tabla 1), por el coseno del ángulo de la cubierta –siempre que el ángulo fuese menor de 60°:

$$Q_N = s_k \cdot \cos \alpha$$

En esta misma norma se indica que «En el caso de limahoyas y otras zonas de la cubierta en donde pueda acumularse la nieve por deslizamiento o por efecto del viento, se calculará la sobrecarga debida a la acumulación previsible», sin dar explicaciones de cómo hacerlo.

5. LA NIEVE DE FILOMENA

El temporal de nieve debido a la borrasca Filomena provocó cuantiosos daños estructurales en varias edificaciones, en particular en naves industriales, agrícolas, o forestales. En este apartado se analizan los datos climáticos recogidos en diferentes observatorios de la (Aemet, 2021a) de varias comunidades autónomas, donde ha habido constancia de esos daños.

Se tomaron datos pluviométricos de los días 7, 8, 9 y, en algún caso, 10 de enero de 2021, solo cuando la temperatura mínima absoluta fue igual o inferior a 0 °C, siguiendo el criterio de la (Aemet, 2021b) y de otros informes, como DGIII-D3 (véase la tabla 4.1, página 13 de la referencia (Brettle *et al.*, 1999). Al ser datos pluviométricos –de la nieve derretida–, la conversión a peso, en N/m², es directa, pues basta con multiplicar por el valor de la gravedad g . En las tablas 5-9, con el fin de no extenderlas demasiado, se han omitido los datos de los observatorios con valores inferiores a 0.3 kN/m², o con valores muy por debajo del correspondiente valor característico del lugar.

Tabla 4. Coeficiente de forma μ en una cubierta con faldón libre o con limahoya, según el EC1 y el CTE. α es el ángulo de inclinación del faldón de cubierta, y β es el ángulo medio que forman los dos faldones de la limahoya

Angulo α de la cubierta	Eurocódigo 1		CTE DB SE-AE	
	Faldón libre μ	Limahoya μ	Faldón libre μ	Limahoya μ
$0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$	0.8	$0.8 \times (1 + \frac{\beta}{30^\circ})$	1	$(1 + \frac{\beta}{30^\circ})$
$30^\circ < \alpha \leq 60^\circ$	$0.8 \times (2 - \frac{\alpha}{30^\circ})$	1.6	$0 \leq (2 - \frac{\alpha}{30^\circ}) \leq 1$	$1 \leq (1 + \frac{\beta}{30^\circ}) \leq 2$

Comunidad de Madrid

En la tabla 5 se muestran los registros más relevantes de precipitación nivosa en diversos observatorios –localidades– de la Comunidad Madrileña. En Madrid capital se llegaron a acumular espesores de 50 cm. La nevada más cuantiosa fue registrada en el observatorio del Retiro, con 52.9 mm de agua equivalente, seguida de la del aeropuerto de Barajas, con 38.2 mm. Fuera de la capital, los valores más altos se registraron en Villanueva de la Cañada, con 34.3 mm y en la localidad de Torrelodones, con 30.6 mm. Estos valores contrastan con los registrados en los puertos de montaña que, teniendo mucha mayor altitud, no llegaron a superar los valores de la nieve caída en el corazón de Madrid, según muestra la tabla 5. Así, por ejemplo, en el Alto del León se registraron 35.6 mm, o en la localidad de Somosierra, a 1.434 m de altitud, tan solo 1.2 mm. Según se puede ver, las precipitaciones de nieve se distribuyeron por la comunidad independientemente de la altitud. El peso estimado de la nieve acumulada esos días en el parque del Retiro fue de 0.52 kN/m². Este parque tuvo que cerrarse al público por la caída de ramas y árboles (Domingo, 2021).

Según los datos de la tabla 5, el peso de la nieve caída en cada observatorio fue inferior al correspondiente valor característico normalizado s_k que figura en la norma de acciones en vigor (DB SE-AE).

Se puede concluir que, en esta comunidad, a pesar de haber caído una gran nevada, los valores de la norma de acciones son adecuados.

Comunidad de Castilla-La Mancha

En la tabla 6 se muestran los registros más destacados de la precipitación en forma de nieve acumulada durante los días 7, 8 y 9 de enero de 2021 en Castilla-La Mancha. Como puede verse, estos registros fueron de bastante intensidad en ciertas zonas de Toledo, Ciudad Real y Albacete.

Según el informe de la (Aemet, 2021b), en esta comunidad hubo espesores de nieve de entre 30 y 50 cm, que se corresponden bastante bien con el peso del agua equivalente observado, suponiendo un peso específico de la nieve recién caída en torno a 1.2 kN/m³ (DB SE-AE § 3.5.2.4). El mayor registro de nieve acumulada de esos días tuvo lugar en la ciudad de Toledo, con 55.8 mm de agua equivalente, seguido de la localidad de Tembleque, con 53.4 mm. En la provincia de Ciudad Real destacan los 49.6 mm de Fuencaliente, y en la provincia de Albacete, Hellín marcó el mayor registro, 46.5 mm. Según se puede ver en la tabla 6, los observatorios de Toledo y Tembleque registraron valores de nieve superiores al valor característico normalizado del lugar, destacando Toledo, donde el peso de la nieve alcanzó los 0.55 kN/m², casi un 40 % superior a su valor normalizado s_k . Curiosamente, la derogada norma de acciones AE-88 se muestra más acertada en esta localidad que la norma en vigor, ya que proponía, de acuerdo con la altitud de Toledo, un valor de s_k igual a 0.6 kN/m², valor ligeramente superior al de la nieve registrada en el observatorio de la Aemet.

Tabla 5. Precipitaciones nivosas en la Comunidad de Madrid los días 7, 8 y 9 de enero de 2021. Valor característico s_k (Fuente: Aemet, 2021a)

Observatorio	Provincia	Altitud	Nieve (estimación)	Peso	s_k (SE-AE)
		m	mm de H ₂ O	kN/m ²	kN/m ²
Madrid/Retiro	Madrid	667	52.9	0.52	0.6
Madrid/Barajas	Madrid	609	38.2	0.37	0.5
Alto del León	Madrid	1.532	35.6	0.35	3.9
Villanueva de la Cañada	Madrid	641	34.3	0.34	0.5
Torrelodones pol.	Madrid	879	30.6	0.30	1.0
Somosierra	Madrid	1.434	1.2	0.01	1.2

Tabla 6. Precipitaciones nivosas en Castilla-La Mancha de los días 7, 8 y 9 de enero de 2021. Valor característico s_k (Fuente: Aemet, 2021a). En rojo figuran los valores que superan s_k

Observatorio	Provincia	Altitud	Nieve (estimación)	Peso	s_k (SE-AE)
		m	mm de H ₂ O	kN/m ²	kN/m ²
Toledo	Toledo	515	55.8	0.55	0.4
Tembleque	Toledo	635	53.4	0.52	0.5
Guadalajara	Guadalajara	721	34.4	0.34	0.6
Molina de Aragón	Guadalajara	1.062	26.6	0.26	1.4
Fuencaliente	Ciudad Real	695	49.6	0.49	0.6
Alcázar de San Juan	Ciudad Real	640	45.4	0.44	0.5
Puebla de D. Rodrigo	Ciudad Real	612	45.6	0.45	0.5
Hellín	Albacete	600	46.5	0.46	0.5
Villarrobledo	Albacete	718	44.6	0.44	0.6

Se puede concluir que, salvo Toledo y en menor medida Tembleque, en los demás lugares analizados de la Comunidad Castellano-Manchega, el peso de la nieve fue inferior al valor característico normalizado.

Comunidad de Aragón

Los datos de las nevadas más significativas en la Comunidad de Aragón se muestran en la tabla 7. Según puede observarse, el peso de la nieve caída, aun siendo de consideración en alguna localidad como Alcañiz o Mosqueruela, está por debajo de su respectivo valor característico normalizado s_k .

En la provincia de Huesca cabe destacar la nieve registrada en la localidad de Fraga, 0.44 kN/m^2 ; esta cantidad es ligeramente inferior al valor característico de la norma en vigor, 0.5 kN/m^2 , y curiosamente, es mayor que el propuesto por la antigua norma AE-88, que es 0.40 kN/m^2 .

Por último, cabe citar la localidad zaragozana de Quinto, el único observatorio de esta provincia que registró una nevada superior a 0.3 kN/m^2 . En este caso, tampoco se alcanzó el valor característico del lugar: 0.5 kN/m^2 .

Por lo tanto, en ninguno de los lugares analizados de esta comunidad autónoma, el peso de nieve llegó a superar el valor característico, salvo las naves construidas en Fraga antes de 2006, donde el peso de la nieve fue superior al valor característico de la norma que en aquel tiempo estaba en vigor (AE-88 o la anterior MV-101).

Comunidad de Valencia

La capa de nieve que cubrió el interior de la Comunidad Valenciana llegó a alcanzar en algunos observatorios valores muy altos, según la (Aemet, 2021b). En Chelva, Montanejos y Segorbe, por ejemplo, se alcanzaron cargas de nieve cercanas al valor característico s_k (DB SE-AE, 2009). En otras localidades, como Villafranca o Morella, aunque se registraron valores más altos, cercanos a los 0.5 kN/m^2 , estos fueron inferiores a sus respectivos valores s_k (tabla 8).

Se puede concluir que la carga de nieve dejada por Filomena en esta región, aunque inusualmente alta en las localidades de Chelva, Montanejos y Segorbe, en ningún lugar se sobrepasó el valor característico normalizado s_k .

Tabla 7. Precipitaciones nivosas en algunas localidades de la Comunidad de Aragón los días 7, 8 y 9 de enero de 2021. Valor característico s_k (Fuente: Aemet, 2021a)

Observatorio	Provincia	Altitud	Nieve (estimación)	Peso	s_k (SE-AE)
		m	mm de H ₂ O	kN/m ²	kN/m ²
Quinto	Zaragoza	205	30.4	0.30	0.5
Alcañiz	Teruel	334	41.4	0.41	0.6
Mosqueruela, depó.	Teruel	1515	40.4	0.40	3.1
Calanda	Teruel	466	38.0	0.37	0.7
Teruel	Teruel	900	34.4	0.34	1.3
Fraga	Huesca	170	44.4	0.44	0.5
Benabarre	Huesca	765	42.0	0.41	1.1
Barbastro	Huesca	305	39.0	0.38	0.6
Huesca	Huesca	463	30.0	0.29	0.7

Tabla 8. Precipitaciones nivosas en algunas localidades de la Comunidad de Valencia los días 7, 8 y 9 de enero de 2021. Valor característico s_k (Fuente: Aemet, 2021a)

Observatorio	Provincia	Altitud	Nieve (estimación)	Peso	s_k (SE-AE)
		m	mm de H ₂ O	kN/m ²	kN/m ²
Chelva	Valencia	515	39.4	0.39	0.4
Montanejos	Castellón	469	40.8	0.40	0.4
Segorbe	Castellón	358	39.2	0.38	0.4
Villafranca del Cid	Castellón	1.131	49.6	0.49	1.2
Morella Pº Alameda	Castellón	990	45.0	0.44	0.9
Arenos-pantano	Castellón	601	31.4	0.31	0.5
Ademuz	Valencia	700	30.8	0.30	0.6

Tabla 9. Precipitaciones nivosas en algunas localidades de la Comunidad Catalana los días 7, 8 y 9 de enero de 2021. Valor característico s_k (Fuente: Aemet, 2021a)

Observatorio	Provincia	Altitud	Nieve (estimación)	Peso	s_k (SE-AE)
		m	mm de H ₂ O	kN/m ²	kN/m ²
Cabacés	Tarragona	363	57.4	0.56	0.6
Alforja	Tarragona	406	41.2	0.40	0.6
La Poble de Cérvoles	Lérida	673	63.0	0.62	1.0
Talarn	Lérida	807	46.0	0.45	1.1
Llimiana	Lérida	515	40.0	0.39	0.7
Mollerussa	Lérida	252	38.0	0.37	0.5
Cabdella Central	Lérida	1.273	31.2	0.31	2.3
Lérida	Lérida	185	31.0	0.30	0.5
La Molina	Gerona	1.703	33.6	0.33	4.1

Comunidad de Cataluña

En la tabla 9 figuran los registros de nieve más reseñables de la Comunidad Catalana. Tal como puede verse, todos ellos son inferiores al valor característico normalizado s_k . No obstante, la diferencia entre la nieve caída y la prevista en la norma es muy variable. En la localidad de Cabacés, el peso de la nieve caída, 0.56 kN/m², fue prácticamente igual que el valor normalizado s_k , mientras que en otras localidades como la Poble de Cérvoles, aunque la nevada alcanzó los 0.62 kN/m², quedó lejos del valor normalizado de esta localidad, 1 kN/m². Lo mismo ocurre en los demás observatorios, en todos ellos se registraron nevadas por debajo del valor característico s_k .

Cabe destacar que la nevada registrada en Cabacés, de 0.56 kN/m², fue ligeramente superior al valor máximo, de 0.5 kN/m², dado por la antigua norma de acciones (AE-88). Esta circunstancia apenas afectaría a las naves más antiguas.

Por último, al igual que pasa en la sierra madrileña, llama la atención que este temporal haya descargado tan poca nieve en las cotas pirenaicas, en contraste con las zonas bajas del valle del Ebro: lugares como la estación de esquí de La Molina o la localidad de Cabdella, a más de mil metros de altitud, apenas recibieron la mitad de nieve que La Poble de Cérvoles.

A la vista de los datos analizados de la región catalana, se puede concluir que la nieve dejada por la borrasca Filomena ha estado dentro de los valores esperables. Se puede destacar que en el observatorio de Cabacés se llegó a alcanzar el valor característico normalizado, o incluso, a superarlo ligeramente, si la estructura fue calculada con la antigua norma de acciones, la AE-88.

6. DISCUSIÓN

De todas las localidades analizadas en el apartado anterior, solo la nieve caída en Toledo superó claramente, en un 38 %, el valor característico normalizado s_k (tabla 6). Curiosamente, en esa localidad, la nevada fue inferior al valor dado por la antigua norma de acciones, la AE-88, mientras que, en otras, como Cabacés y Fraga, fue ligeramente superior. Cabe señalar que, en las localidades de Tembleque, Montanejos o Cabacés, la nieve prácticamente alcanzó el valor máximo previsto por la norma actual, sin llegar a superarlo.

Salvo en Toledo, la actual norma de acciones, DB SE-AE, ha estado muy acertada con la sobrecarga de nieve. En un análisis superficial, podría pensarse que una nevada como la ocurrida en Toledo, justificaría el hundimiento de algunas naves. Según el documento básico de seguridad estructural (DB SE, 2006), el valor característico de las sobrecargas se ha de multiplicar por el coeficiente parcial de seguridad¹ de 1.5; esto supone, *de facto*, considerar en el cálculo un 50 % más de carga en favor de la seguridad, que en el caso de Toledo () cubre sobradamente el valor de la nieve caída:

$$s_k \times 1.50 = 0.6 \text{ kN/m}^2 > (\text{nieve caída} = 0.55 \text{ kN/m}^2)$$

Durante el temporal de nieve no se registraron valores altos de la velocidad del viento. En Toledo, las rachas proporcionadas por la Aemet alcanzaron valores máximos de 38 km/h, una velocidad muy inferior a los 94 km/h que establece la citada norma de acciones en esa zona. Los esfuerzos que se pudieron alcanzar en la estructura durante el temporal de viento y nieve, considerando los valores de la Aemet, tuvieron que ser inferiores a los que se obtendrían mediante el cálculo, en una situación “persistente” (DB SE x 4.2.2.).

Tal como se apunta en la introducción de este artículo, la nieve “parece” que ha sido responsable del hundimiento de muchas naves en el interior peninsular: sin embargo, es posible que solo haya sido el detonante.

(Tanner *et al.*, 2007), en su artículo sobre la seguridad estructural, definen el siguiente axioma: «una estructura correctamente dimensionada y construida según un conjunto consistente de normas en vigor, se considera fiable en el marco de esas normas». A la vista del análisis precedente, se puede concluir que las edificaciones sometidas al temporal de nieve de la borrasca Filomena, que cumplían el axioma anterior, no deberían de haber experimentado daños estructurales.

No obstante, hay factores contemplados por dichas normas que son difíciles de determinar adecuadamente en la fase de proyecto. La nieve ha provocado daños en muchas naves situadas en regiones a baja altitud, la mayoría por debajo de los 600 m; son regiones donde nevada cada vez menos o “ha dejado” de nevar como

¹ Este coeficiente parcial de seguridad de 1.5 también se adopta en el recién aprobado Código Estructural y en la antigua norma NBE-MV103/1972.

consecuencia del cambio climático. En estas regiones, no tiene que ser fácil para quien proyecta estas naves adoptar valores de C_e o de μ (véase apartado 4) superiores a la unidad, en previsión de posibles acumulaciones de nieve en la cubierta.

Este trabajo quedaría incompleto si no se hiciera referencia también a las naves agrícolas, ganaderas o forestales. En el mundo rural, hasta no hace mucho, la mayoría de los ayuntamientos no exigían proyecto para autorizar la construcción de este tipo de naves. En muchos de estos casos, la estructura se dimensionaba a ojo, sin los adecuados cálculos constructivos; era el propio constructor y a veces, en caso de cobertizos y estructuras menores, el propietario quien dimensionaba la estructura. Es posible que algunas de estas edificaciones sean las que no resistieron “el efecto Filomena”.

7. CONCLUSIONES

A la vista de los datos analizados en este trabajo y de la discusión precedente, se puede concluir que:

1. La nieve dejada por la borrasca Filomena en el interior peninsular –salvo en Toledo y, en menor medida, en Tembleque–, no ha superado el valor característico normalizado dado por la norma española en vigor, el DB SE-AE (2009). En Toledo, la carga de nieve fue un 38 % superior al previsto para ese lugar.
2. Esta norma española, en general, es mejor que la anterior, y hasta la fecha, ha resultado ser adecuada para estimar la sobrecarga de nieve, con la salvedad indicada anteriormente.
3. En los numerosos siniestros de naves de estructura ligera acaecidos durante la borrasca, la nieve ha debido de actuar como factor desencadenante, pero no se puede justificar que haya sido la causa de los hundimientos.

8. AGRADECIMIENTOS

Nuestro agradecimiento a Peter Tanner y Carlos Lara Sarache por la información proporcionada para escribir este artículo, así como por sus consejos y notas de revisión. También a la Aemet por proporcionarnos la información meteorológica usada en el artículo.

9. REFERENCIAS

Aemet (2021a) (12 de enero de 2021). *El Tiempo. Hoy y últimos días - Datos horarios - Agencia Estatal de Meteorología*. <http://www.aemet.es/es/eltiempo/observacion/ultimosdatos>

Aemet (2021b). Informe sobre el episodio meteorológico de fuertes nevadas y precipitaciones ocasionadas por la borrasca Filomena y posterior ola de frío. https://www.aemet.es/documentos/es/conocerlas/recursos_en_linea/publicaciones_y_estudios/estudios/Informe_episodio_filomena.pdf

Añel, J.A., y de la Torre, L. Una gran nevada de Houston a Atenas. *El País* (21/02/21).

Brettel, M., et al. (1999). *DGIII-D3. Final Report. Scientific Support Activity in the Field of Structural Safety of Civil Engineering Works: Snow Loads*. Pisa: Universidad de Pisa. <http://www2.ing.unipi.it/dic/snowloads/Final%20Report%20II.pdf>

Casanueva, I. El Gobierno declara zona catastrófica los territorios afectados por el temporal de nieve. *Confitegal* (19/01/21).

Dimova, S., et al. (2016). *On adaptation of structural design to climate change*. EUR 27787. Luxemburgo: Oficina de Publicaciones de la Unión Europea. <http://dx.doi.org/10.2788/996279>

Domingo, M.R. El Retiro reabre este lunes doce de sus 17 accesos tras los destrozos de Filomena. *ABC* (22/02/21).

El Correo. El derrumbe de una nave por la nieve atrapa a más de 400 ovejas (12/01/21).

La Tribuna de Toledo. Colapsa la cubierta del colegio Gregorio Marañón (08/01/21).

Ministerio de Fomento (2011). BOE-A-2011-16559, Orden FOM/2842/2011, de 29 de septiembre, por la que se aprueba la Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera (IAP-11). Madrid: Ministerio de Fomento.

Ministerio de la Vivienda (1962). Norma MV-101/1962. Acciones en la edificación. Decreto 195/1963, de 17 de enero de 63. Decreto 165/1963, de 17 de enero. Madrid: Ministerio de la Vivienda.

Ministerio de la Vivienda (1972). Norma NBE-MV-103-1972. Cálculo de las estructuras de acero laminado en edificación. Decreto 1353/1973, de 12 de abril. Madrid: Ministerio de la Vivienda.

Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo (1988). Acciones en la edificación. BOE-A-1988-26435, Real Decreto 1370/1988, de 11 de noviembre, por el que se modifica parcialmente la Norma MV-101/1962, Acciones en la Edificación, aprobada por Decreto 195/1963, de 17 de enero, y se cambia su denominación. Madrid: MOPU.

Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente. (1996). Estructuras de acero en la edificación. R.D. 1829/1995, de 10 de noviembre, por el que se aprueba la norma básica de la edificación NBE-EA-95. Madrid: MOPTMA.

Ministerio de Vivienda (2006). BOE-A-2006-5515, Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación. Madrid: Ministerio de Vivienda.

Ministerio de Vivienda (2009). Orden VIV/984/2009, de 15 de abril, por la que se modifican determinados documentos básicos del Código Técnico de la Edificación aprobados por el Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, y el Real Decreto 1371/2007, de 19 de octubre. Madrid: Ministerio de Vivienda.

Morata Gasca, A., Tanner, P., Luna, Y., y Almarza Mata, C. (2004). Sobrecarga de nieve máxima sobre una superficie horizontal: diferencias regionales en España. En C. Diego Liaño, J.C. García Codrón, D.F. Rasilla Álvarez, P. Fernández de Arróyabe Hernández y C. Garmendia Pedraja (Eds.), *El clima, entre el mar y la montaña. Aportaciones presentadas al IV Congreso de la Asociación Española de Climatología y Universidad de Cantabria, Santander, 2-5 de noviembre de 2004*, 4(1): pp. 85–94. Universidad de Cantabria, 2004.

Noticias para Municipios. La nieve hunde parte de la cubierta del Centro Cultural Isabel de Farnesio (09/01/21).

Peinado, A., y Almarza, C. (1984). *Notas para una climatología de la nieve y bases para un estudio de la cobertura nival en España*. Serie A-88. Madrid: Instituto Nacional de Meteorología.

Tanner, P., Lara, C., e Hingorani, R. (2007). Seguridad estructural. Una lucha con incertidumbres. *Hormigón y Acero*, 28(245): pp. 59–78.

Tanner, P., Lara, C., y Morata, A. (2011). Modelado de fenómenos meteorológicos extremos a efectos del análisis estructural. *V Congreso de ACHE, Barcelona, 12 de abril de 2011*.

Puertos y Costas

Líneas de Actividad

Planificación y Gestión de la Costa y el Mar

Estudio de Actuaciones en la Costa y el Mar

Monitorización Costera y Marina

Medio Ambiente Marino



Fields of Activity

Planning and Management for Coastal Zones and Sea Waters

Studies of Actions on Coastal Zones and Sea Waters

Coastal and Maritime Monitoring

Marine Environment

Experimentation and Port Studies

“Vista aérea desde arriba de la hermosa costa atlántica con aguas turquesas cristalinas y playa de arena”, de Airpixel (Fuente: Shutterstock)

Más información en
<http://www.cedex.es>

CEDEX

Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas

Factores condicionantes de la dinámica litoral de la playa de La Isla de Mazarrón en la extracción del pecio fenicio

Conditioning Factors of the Coastal Dynamics of Mazarrón's Beach of the Island During the Extraction of the Phoenician Shipwreck

José Manuel de la Peña Olivas^{1*}

Resumen

En 2016, la Demarcación de Costas de Murcia solicitó al CEDEX, a través de la Dirección General de la Costa y el Mar, un informe sobre la playa de La Isla de Mazarrón para analizar el momento idóneo y los condicionantes de la actuación prevista en ella, y la implicación que tenía, habida cuenta que en el entorno existe un yacimiento arqueológico de importancia, el barco fenicio conocido como *Mazarrón 2*, que podría verse afectado.

Tuvimos diversas reuniones a lo largo del confinamiento por la pandemia, lideradas por la directora general de Bellas Artes y por la Dirección General de Patrimonio Cultural de la Región de Murcia. Al final todo el grupo de “expertos” estuvimos de acuerdo en que había que extraer el pecio del agua.

El barco, a lo largo de su dilatada historia, ha sufrido tres cambios muy significativos: 1) su inicial hundimiento en el agua en los siglos VII o VI a.C.; 2) su lento recubrimiento de arena, hasta encontrarse totalmente enterrado en el siglo XX; y 3), su paulatino desenterramiento hasta quedar próximo al nivel del agua entre 1985 y 1990.

Las acciones del oleaje y la corriente solamente se produjeron en sus primeros momentos y a partir de 1985. Se sabe el efecto de la desaparición de la arena sobre la estructura del barco, pero se desconoce el efecto si vuelve a enterrarse. Tampoco el efecto en los estados intermedios, ya que, si se retirase El Gachero, o espigón de los restos mineros, en algún momento, el pecio se encontraría en zonas de rompientes y su estado final se hallaría, más o menos, como en 1956.

La acción cambiante del clima marítimo debido al cambio climático puede afectar negativamente en las acciones de este sobre el pecio.

Palabras clave: dinámica litoral, playa de La Isla, pecio fenicio, evolución de la costa, incidencia de oleaje.

Abstract

In 2016, the Murcia Coastal Demarcation requested, through the General-Directorate of the Coast and the Sea, a report from CEDEX on the beach of the Mazarrón Island to analyze the appropriate time and the conditioning factors of the planned action on it, and the implication it had, given that there is an important archaeological site in the area, a Phoenician ship known as Mazarrón 2, which could be affected.

We had various meetings throughout the confinement due to the pandemic of the entire group, led by the General Director of Fine Arts, and the General-Directorate of Cultural Heritage of the Murcia Region. In the end, the entire group of “experts” agreed that the wreck should be removed from the water.

Throughout its long history, the ship has undergone three very significant stages: 1) Its initial sinking in the water in the 7th or 6th centuries BC; 2) Its slow covering by sand, until it was completely buried in the 20th century; and 3), Its gradual unearthing until it was again close to the water level reached between 1985 and 1990.

The actions of waves and current only occurred in its early days and after 1985. The effect of the disappearance of the sand on the structure of the ship is known, but not the effect if it is buried again. Neither is the effect on the intermediate stage, for if the Gachero, or jetty, was removed from the mining remains at some point, the wreck would be found in areas of breakers and its final state would be that of 1956.

The changing action of the maritime climate due to climate change may negatively affect the wreck.

Keywords: Littoral dynamics, beach of the Island, Phoenician shipwreck, coastal evolution, wave incidence.

1. INTRODUCCIÓN

En 2016, la Demarcación de Costas de Murcia solicitó al CEDEX, a través de la Dirección General de la Costa y el Mar, un informe sobre la playa de La Isla de Mazarrón para

analizar el momento idóneo y los condicionantes de la actuación prevista en ella, y la implicación que tenía, habida cuenta que en el entorno existe un yacimiento arqueológico de importancia, el barco fenicio conocido como *Mazarrón 2*, que podría verse afectado. Justo después de la emisión de la nota técnica, en ese mismo año me llamó el arqueólogo Carlos de Juan, a quien conocía y con quien había compartido años atrás alguna ponencia sobre el antiguo puerto de Sagunto. Me solicitó y convenció para que me uniera al grupo de trabajo, al que me incorporé tras las pertinentes autorizaciones de mis directores.

* Email: Jose.M.Pena@cedex.es

¹ Dr. Ingeniero de caminos, canales y puertos. Consejero técnico de Estudios Ambientales del Área de Costas del Centro de Estudios de Puertos y Costas (CEPYC), del CEDEX. Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana (MITMA).

Tuvimos diversas reuniones a lo largo del confinamiento por la pandemia de todo el grupo, liderado por la directora general de Bellas Artes y por la Dirección General de Patrimonio Cultural de la Región de Murcia. Al final todo el grupo de “expertos” estuvimos de acuerdo que había que extraer el pecio del agua y que, además, se harían unas jornadas explicativas que, tras cierto retraso, se convocaron entre el 5 y 7 de mayo de 2022, y en las cuales estuve invitado a presentar las conclusiones que se exponen en este artículo.

En fin, agradezco que un mundo como el arqueológico cuente con la participación de un ingeniero de caminos perteneciente al CEDEX.

2. SITUACIÓN

La playa de La Isla es un pequeño enclave en la costa, al suroeste del puerto de Mazarrón, en el término municipal de Mazarrón en Murcia. Se encuentra encajada entre los salientes rocosos de Cabezo de la Rella o de la Cebada, sobre el que se ha construido una dársena deportiva del puerto de Mazarrón a poniente, y Cabezo del Puerto a levante donde actualmente la playa se apoya.

La playa se encuentra protegida frente a ciertos oleajes directos por la isla de Adentro (o de Paco), situada a una distancia aproximada de 290 m respecto a la línea de costa.

Destaca la presencia de diversos islotes de pequeño tamaño, como es el caso del denominado Cabecico de los Aviones, situado frente a la misma playa de La Isla (figura 1).

Su longitud es de 170 m y su anchura de unos 280 m, y está compuesta por arena fina. La playa se apoya en su lado sur sobre una flecha, o espigón, formada por gravas y bolos procedentes de desechos de actividad minera, de 290 m de longitud aproximadamente. Por su lado norte se apoya en la costa, quedando la línea de orilla perpendicular a esta. Su forma actual se debe al basculamiento de la antigua playa por el efecto de la flecha o espigón citado (CEDEX, 2016).

3. ANTECEDENTES

En 1993, la entonces Dirección General de Costas encargó al CEDEX, a través del Centro de Estudios de Puertos y Costas, la realización de un informe sobre la situación de la playa de La Isla; su dinámica litoral, evolución y posibles actuaciones para mejorar su estado. Este trabajo corresponde al informe técnico titulado “Dinámica y evolución de la playa de La Isla de Mazarrón, Murcia”, realizado en el año 1993. El objetivo de dicho estudio era el conocimiento de la dinámica litoral de la zona y el análisis de soluciones para la mejora de la playa de La Isla, que incluía el estudio evolutivo de la playa y sus causas.



Figura 1. Playa de La Isla (Mazarrón, Murcia).



Figura 2. Playa de La Isla, dimensiones e islotes cercanos (Fuente: CEDEX, 2016; Imagen: Google Earth).



Figura 3. Situación de los barcos fenicios hallados en la playa de La Isla (Imagen: MAGRAMA).

Poco tiempo después de la realización del citado informe se organizó el “Proyecto Nueva Fenicia”, que consistió en la excavación sistemática de la plataforma de la playa de La Isla en busca de restos fenicios, ya que en 1988 se habían localizado supuestamente los primeros restos de un barco, conocidos como *Mazarrón 1*. Como consecuencia de esta campaña de prospección, se halló un segundo barco fenicio, *Mazarrón 2*, en mucho mejor estado que el anterior, en la primavera de 1994. El primero de los pecios se trasladó al Museo Nacional de Arqueología Subacuática de Cartagena (AQUA), mientras que el segundo de los barcos, de 8,1 m de longitud y 2,25 m de ancho máximo con una altura de 0,9 m, se halla todavía en el lugar del descubrimiento, a 2,5 m de profundidad, habiéndose hecho una reproducción del mismo que se encuentra en el mencionado museo.

El descubrimiento de estos pecios dio lugar a una serie de campañas arqueológicas, 1999-2000, 2007-2008 y 2019, y a la creación de comisiones de seguimiento del pecio y a una mesa de trabajo asesora. En 2006 (23 de noviembre) la Dirección General de Costas aprobó el gasto para la redacción de un proyecto para la mejora de la playa de La Isla. En 2007 (16 de marzo) se adjudicó su redacción a la empresa INTERCONTROL LEVANTE S.A. Pero las dudas que suscitaba este proyecto hicieron que dicha Dirección General encargara en 2016 una nota técnica al CEDEX con objeto de analizar el momento idóneo y los condicionantes de la actuación prevista en la playa de La Isla en Mazarrón, habida cuenta que en el entorno existe un yacimiento arqueológico de importancia, barco fenicio conocido como *Mazarrón 2*, que podría verse afectado.

La nota técnica concluyó que:

1. No resulta conveniente estar expuesta una pieza de tanto valor al riesgo de acciones del oleaje; siendo aconsejable su extracción.
2. Los movimientos de sedimento que pueden producirse en el transcurso de la ejecución de la obra de mejora de la playa de La Isla y los posibles movimientos de sedimento hacia el pecio hacen que éste pueda verse sometido a acciones dinámicas del oleaje y sedimentos poco recomendables para la conser-

vación del barco fenicio, y su situación final pudiera ser de mayor riesgo que en la actualidad.

Finalmente, un técnico del CEDEX, José Manuel de la Peña Olivas, se incorporó al Grupo de Trabajo para la Conservación y Protección del Pecio *Mazarrón 2*, en calidad de ingeniero de caminos, canales y puertos.

Tras una serie de reuniones realizadas telemáticamente, en la última de ellas, de 11 de marzo de 2021, la Dirección General de Bellas Artes, del Ministerio de Cultura y Deporte, decidió, con el consenso del grupo de trabajo, la extracción del pecio conocido como *Mazarrón 2*, su conservación, restauración en ARQUAtec y la exposición posterior. Asimismo, se decidió realizar un evento para exponer los métodos de extracción y todas las variables asociadas a él.

En el transcurso del análisis y deliberaciones, el técnico del CEDEX expuso los condicionantes respecto a la dinámica litoral y los riesgos asociados a ella, basándose para ello en los dos trabajos que el CEDEX había realizado para la actual Dirección General de la Costa y el Mar de, respectivamente, 1993 y 2016.

4. EVOLUCIÓN DE LA PLAYA Y AFLORAMIENTO DEL PECIO

El afloramiento de los pecios fenicios citados, *Mazarrón 1* y *Mazarrón 2* (figura 3), y el descubrimiento efectivo, en 1994, del segundo de ellos y datado en una cronología comprendida entre los siglos VII y VI a.C., se debió a la casuística, cuyas vicisitudes están asociadas a la evolución de la costa de la playa de La Isla y a la actividad minera de su entorno, que produjo un continuado vertido de sus residuos al mar que, a su vez, fue conformando un espigón de gravas y bolos de estos vertidos por efecto de la dinámica litoral.

Por tanto, los vertidos de gravas provenientes de los desechos de la minería han generado una flecha de gravas que constituye un auténtico espigón dirigido de este a oeste hacia el interior de la bahía, que ha ido absorbiendo la arena que formaba la antigua playa de La Isla, quedándose sin playa en el frente, lo que propició que se quedaran al descubierto los restos de dos barcos fenicios descubiertos en 1988 y 1994.

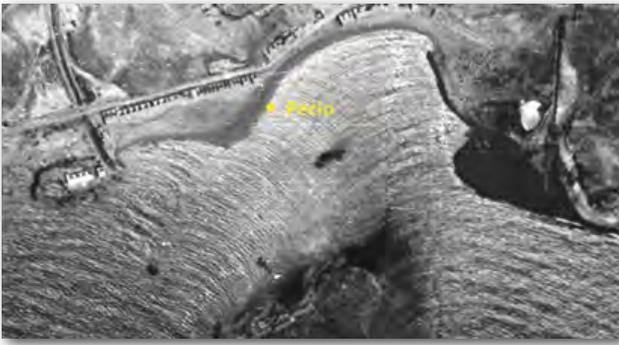


Figura 4. Playa de La Isla en 1946 y situación aproximada de *Mazarrón 2* (Imagen: Instituto Geográfico Nacional-IGN).

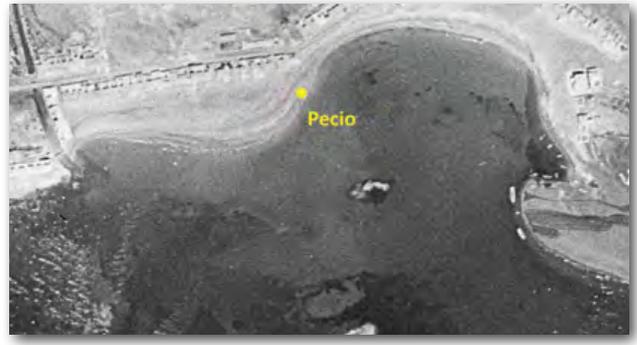


Figura 5. Playa de La Isla en 1956 y situación aproximada de *Mazarrón 2* (Imagen: IGN).



Figura 6. Playa de La Isla en 1977 y situación aproximada de *Mazarrón 2* (Imagen: IGN).



Figura 7. Playa de La Isla en 1985 y situación aproximada de *Mazarrón 2* (Imagen: IGN).



Figura 8. Playa de La Isla en 1999 y situación aproximada de *Mazarrón 2* (Imagen: IGN).

Para mayor facilidad y comprensión, a continuación, se muestra una secuencia de fotografías en las que se ha situado, aproximadamente, dónde estaba en ese momento el pecio *Mazarrón 2* hasta que quedó próximo al contacto con el agua de mar.

La secuencia de variación de la línea de orilla se puede apreciar mejor en el plano de evolución que contiene el informe del CEDEX de 1993 (figura 9).

Con todos estos datos, se aprecia que el pecio *Mazarrón 2* tuvo su primer contacto con el agua en torno a 1985. La aparición de ambos pecios, en 1988 y 1994, puede considerarse como consecuencia del basculamiento que se produjo en la playa de La Isla como consecuencia de la formación del espigón por restos de desechos mineros vertidos al mar. Mientras que el primero de los barcos se extrajo y se expone en el Museo AQUA, el segundo de los barcos, con su armazón



Figura 9. Evolución de la línea de costa de la playa de La Isla de Mazarrón desde 1956 hasta 1993 (Fuente: CEDEX, 1993).

casi completa, se halla todavía en el mismo lugar de su descubrimiento, donde existe una dinámica litoral activa y, por tanto, sometida a las acciones propias de esa dinámica costera que se esbozan en la nota técnica de CEDEX.

5. SITUACIÓN ACTUAL DEL PECIO MAZARRÓN 2

Una vez inspeccionado, estudiado y analizado el pecio, en las campañas de 1999-2000 y 2007-2008, el barco se protegió con una estructura compuesta por un cajón mallado, sacos terreros, etc., hasta que se decidiera su destino con un seguimiento de su estado por parte de la Región de Murcia. En 2020, el arqueólogo Carlos de Juan, de la Universidad de Valencia, realizó el “Informe de la inspección del estado del cerramiento del pecio *Mazarrón 2*. Noviembre, 2020”, en el que concluía diciendo:



Figura 10. Pecio *Mazarrón 2* en su estado actual (Imagen: ARQUA).

“El entorno físico es desfavorable para el futuro del pecio. No parece que pueda garantizarse la preservación del *Mazarrón 2* en su enclave original. Sin que presente urgencia inmediata, sugerimos a la administración competente que continúe con el programa de monitorización exhaustiva del pecio, a la vez que articula los cauces necesarios para la recuperación y conservación del *Mazarrón 2*.”

6. PRESIONES SOBRE LOS RESTOS EN LA ACTUALIDAD

Las presiones a las que se ve sometido el pecio, barco fenicio, son de tres tipos: 1) debida al clima marítimo; 2)

debido a la dinámica litoral; y 3), debido a la propia estructura de preservación.

El clima marítimo interfiere en el barco de dos maneras diferentes, pero asociadas: La acción del oleaje exterior se interna en la playa de La Isla propagándose hasta alcanzar la costa.

La situación relativa del pecio respecto al oleaje y la playa de La Isla se muestra en la figura 11. En ella, se aprecia que existe un abanico de direcciones de oleaje que, aunque pequeño, pueden incidir directamente en él, y que coinciden con las direcciones principales de oleaje. En la actualidad, la línea de orilla de la playa de La Isla se encuentra a una distancia de 275 m del pecio.

Si se observa la propagación de oleaje en las dos direcciones que pueden incidir directamente en la zona de estudio (figura 12), se aprecia que (CEDEX, 2016):

Los oleajes del sureste (E48S) se ven muy afectados por la presencia de la Isla de Adentro, reduciéndose la altura de ola de manera importante y alcanzando la playa con una altura de 0,5 veces la altura inicial solamente en la parte de poniente, con el resto de los valores inferiores de 0,1 y 0,3 veces la altura de ola inicial.

Los oleajes provenientes del S34W también se ven afectados por la Isla de Adentro. A poniente de la playa de La Isla, la altura de ola relativa es 0,4 veces la inicial disminuyendo a 0,1 para la zona central y levante.

Todo ello indica que en la zona donde se encuentra el pecio en la actualidad los oleajes se habrían reducido entre 0,5 y 0,1, aproximadamente.

La distancia de orilla actual parece que es suficiente para no afectar, de manera significativa, en sus alternancias el perfil de playa. Si bien la expansión lateral del oleaje del sureste y la propagación del suroeste hacen que tenga una tendencia neta a un transporte de arenas hacia la actual playa; limpiando los fondos de arena, asentada sobre base rocosa.

La tercera de las presiones es debido a la propia estructura que protege el barco ya que ella también se encuentra sometida a acciones del oleaje y corrientes que transmite o puede transmitir al objeto protegido. La última inspección realizada por Carlos de Juan en noviembre de 2020 indica:

1. Los parapetos de sacos terreros colocados para proteger el frente S de la caja han hecho su papel, frenando el envite del oleaje. No se ha observado socavamiento en el talud adyacente a la caja. El estado del cerra-



Figura 11. Situación relativa del pecio *Mazarrón 2* al oleaje y playa de La Isla (Fuente: CEDEX, 2016).

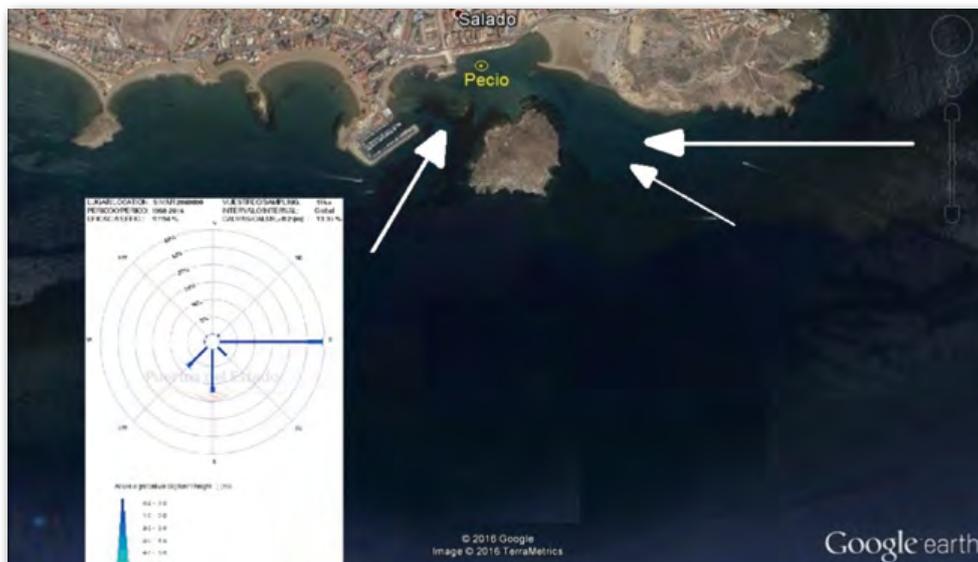


Figura 12. Direcciones de oleaje que pueden incidir sobre la zona del pecio Mazarrón 2 (Imagen: Google Earth).

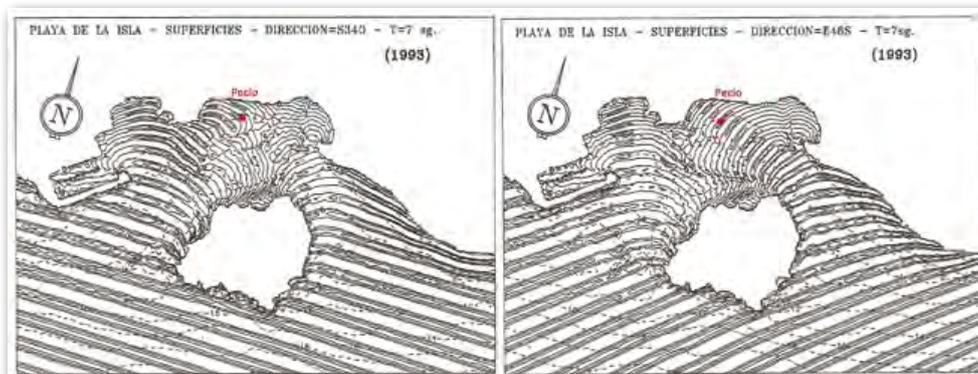


Figura 13. Propagación de oleaje en la playa de La Isla (Fuente: CEDEX, 1993 y 2016).

- miento es semejante a como se dejó en septiembre de 2020. Tan solo en un punto se ha constatado que una de las tapaderas se ha movido ligeramente por el mar.
- La malla colocada para favorecer la sedimentación sobre la caja ha sido arrancada por el oleaje y enrollada en algunos puntos (se reparará cosiéndola con bridas plásticas en la siguiente inspección). Su eficacia conocida en contextos atlánticos no ha podido ser atestiguada en el pecio de Mazarrón por ahora.
 - Los módulos New Jersey colocados como barrera a modo experimental han sufrido el efecto del oleaje. Uno de ellos se encontraba tumbado, lo que sugiere que necesita que se rellene la base con más grava. Los otros dos, en su posición vertical, se han empezado a hundir en la arena. La corriente socava las esquinas, dejando sus caras laterales con algo más de sedimento, pero hundiéndose los módulos. En definitiva, no se ha observado ningún efecto por ahora que nos hable de su eficacia.

7. CONCLUSIONES

Resulta altamente interesante el trabajo realizado por Sierra, Conesa y Cantero (2021) para ARQUA, en el cual proponen la conservación *in situ* del barco, o pecio. No obstante, a la vista de lo expuesto en los puntos anteriores, debe considerarse que:

El barco a lo largo de su dilatada historia ha sufrido tres cambios muy significativos: 1) su inicial hundimiento en el

agua en los siglos VII o VI a.C.; 2) su lento recubrimiento de arena, hasta encontrarse totalmente enterrado en el siglo XX; y 3), su paulatino desenterramiento hasta quedar próximo al nivel del agua entre 1985 y 1990.

Las acciones del oleaje y corriente solamente se produjeron en sus primeros momentos y a partir de 1985. No se sabe el efecto de la desaparición de la arena sobre la estructura del barco, ni tampoco el efecto si vuelve a enterrarse. Tampoco el efecto en los estados intermedios, ya que, si se retirase El Gachero, o espigón de los restos mineros, en algún momento, el pecio se encontraría en zonas de rompientes y su estado final se hallaría, más o menos, como en 1956 (figura 5).

La acción cambiante del clima marítimo debido al cambio climático puede afectar negativamente en las acciones de este sobre el pecio.

8. REFERENCIAS

Peña Olivas, J.M. de la (2016). Nota técnica sobre la playa de La Isla en el T.M. de Mazarrón (Murcia). CEDEX (CLAVE CEDEX: 22-414-5-006, para la Dirección General de Sostenibilidad de la Costa y del Mar).

Sierra Méndez, J.L., Conesa Torres, T., y Cantero Escribano, C. (2021). Propuesta de conservación *in situ* del pecio fenicio Mazarrón 2 en la playa de La Isla. Museo Nacional de Arqueología Subacuática (ARQUA).

CAMINOS DE INNOVACIÓN EN INGENIERÍA CIVIL

USO DE FOTOGRAMETRÍA TRIDIMENSIONAL E INTELIGENCIA ARTIFICIAL EN EL ESTUDIO DE ECOSISTEMAS MARINOS: PROYECTO VirtualMAR

Elena Prado^{1*}, Adolfo Cobo², Sergio Sierra³, Ángela Domingo⁴, Carla Quiles-Pons⁵, Luis Rodríguez⁶, David Díaz⁷, Pablo Roldán⁸, Pedro Anuarbe⁹, Francisco Sánchez¹⁰

¹ Dra. Ingeniera de costas, hidrobiología y gestión de sistemas acuáticos. Instituto Español de Oceanografía (IEO-CSIC, Santander).

² Dr. Ingeniero de telecomunicación. Grupo Ingeniería Fotónica (Universidad de Cantabria).

³ Máster en Ingeniería de Telecomunicación. Grupo Ingeniería Fotónica (Universidad de Cantabria).

⁴ Máster en Tecnologías de la Información Geográfica.

⁵ Máster Erasmus Mundus en Biodiversidad Marina y Conservación. Instituto Español de Oceanografía (IEO-CSIC, Baleares).

⁶ Dr. Ingeniero de telecomunicación. Grupo Ingeniería Fotónica (Universidad de Cantabria).

⁷ Dr. Estudios Avanzados de Ecología. Instituto Español de Oceanografía (IEO-CSIC, Baleares).

⁸ Máster en Ingeniería de Telecomunicación. Grupo Ingeniería Fotónica (Universidad de Cantabria).

⁹ Graduado en Ingeniería de Telecomunicación. Grupo Ingeniería Fotónica (Universidad de Cantabria).

¹⁰ Dr. en Ciencias Biológicas. Instituto Español de Oceanografía (IEO-CSIC, Santander).

* Autora de contacto: elena.prado@ieo.csic.es

Protección de los océanos

Las actividades humanas y los efectos del cambio climático producen un enorme impacto en los ecosistemas marinos, desde la pérdida de hábitats o la sobreexplotación de recursos, la introducción de especies alóctonas o la contaminación, afectando negativamente a su estado de conservación. La pérdida de biodiversidad en los ecosistemas marinos es una de las consecuencias más graves que pueden encontrarse. Desde las diferentes instituciones se está poniendo especial énfasis en adoptar nuevas estrategias para detener esta pérdida de biodiversidad y restaurar los ecosistemas cuando sea posible.

Para ello, las Áreas Marinas Protegidas (AMP) son figuras de gestión espacial esenciales para la conservación de la biodiversidad: De hecho, las AMPs se presentan como una herramienta esencial en todas las estrategias nacionales e internacionales de conservación. Gracias al marco económico y a los avances científicos realizados en los proyectos LIFE INDEMARES y LIFE IP INTEMARES, España ha aumentado su espacio marino protegido del 1 % al 12 % de sus aguas marinas en solo unos años, y se sigue avanzando hacia la meta de designar el 30 % de superficie protegida de nuestros mares para 2030. Además, existen también figuras de protección ambiental de ámbito nacional como la Red de Parques Nacionales, que garantizan esa protección de espacios y apoyan

la investigación y estudios en su amplia red de parques. Dos de estos espacios, se declararon principalmente por el interés de sus fondos marinos el Parque Nacional Marítimo-Terrestre de las Islas Atlánticas de Galicia y el Parque Nacional Marítimo-Terrestre del Archipiélago de Cabrera. En este último es donde principalmente se ha desarrollado el proyecto VirtualMAR, financiado dentro de la Convocatoria de Investigación del Organismo Autónomo de Parques Nacionales.

La importancia de cartografiar los fondos marinos en alta resolución

En el ámbito marino, los fondos que poseen una alta componente tridimensional, con estructura compleja, son un gran nicho de biodiversidad. Estos hábitats pueden estar formados por una elevada complejidad geomorfológica del sustrato, como los fondos rocosos abruptos, o bien por fondos estructurados por especies bioconstructoras que conforman ese hábitat complejo. Un claro ejemplo de ello son los arrecifes de coral de aguas frías (figura 1), donde se observa esa mayor presencia de especies, asociada a la complejidad estructural innata en los propios arrecifes (Ferreira *et al.*, 2001; Guinan *et al.*, 2009).

Se puede obtener una cartografía del fondo oceánico global derivada de datos satelitales, partiendo del principio de que la topografía de la superficie del océano se adapta a las elevaciones y depresiones del fondo oceánico por efecto de la gravedad. Por tanto, utilizando instrumentos que miden el nivel de la superficie marina también se puede cartografiar la topografía del fondo del océano. Sin embargo, la escala de los datos derivados a partir de la teledetección espacial no es capaz de describir características del sustrato marino a una fina escala. De modo que, si queremos realizar una gestión adecuada en fondos complejos, con elevada estructura como los ya mencionados arrecifes de coral, no podemos usar técnicas de amplio espectro, sino que necesitamos contar con técnicas que registren datos a una alta



Figura 1. Imagen de detalle del arrecife de coral de aguas frías situado en el Cañón de La Gavierra, mar Cantábrico (Fuente: IEO ROTV Politolana, campaña ECOMARG, 2017).

resolución espacial. Este tipo de registro detallado de los fondos impone importantes complicaciones tecnológicas. En los últimos años se ha avanzado en el desarrollo de estudios y metodologías que permiten determinar el estado de conservación de las poblaciones de especies vulnerables, describir los hábitats estructurados por dichas especies de forma precisa y conseguir la monitorización a lo largo del tiempo de estos espacios.

El avance tecnológico en los estudios marinos

Tradicionalmente, los métodos extractivos o dragas de muestreo han sido los más utilizados para el estudio de la abundancia y caracterización de especies existentes en fondos blandos o sedimentarios. Sin embargo, cuando se trabaja en zonas con fondos más complejos, y sobre todo en zonas con fondos vulnerables, adquiere mayor importancia la utilización de muestreos o técnicas de exploración no invasivas. Esta aproximación minimiza al máximo el impacto que los propios métodos de muestreo puedan ejercer sobre los hábitats objeto de estudio. Otro aspecto clave dentro de las tecnologías de muestreo es que sean sostenibles en el tiempo, proporcionando información homogénea y comparable que pueda servir como base a estudios multitemporales. La evolución del estado de conservación, degradación o recuperación de un hábitat solo puede ser determinada en base a estudios que extraigan datos comparables en el tiempo.

En este sentido, el uso de imágenes submarinas se ha revelado como una de las metodologías más valiosas de cara a estudiar los fondos vulnerables de una manera sostenible. Estas imágenes pueden ser adquiridas mediante técnicas con escafandra autónoma y/o vehículos submarinos tripulados de forma remota, los denominados ROVs (*Remotely Operated Vehicles*) en sus diferentes variantes. Tanto los sistemas de adquisición operados por buceadores, como los que se instalan en vehículos, generalmente poseen diferentes equipos de adquisición de datos basados en tecnología acústica, imagen, sistemas de iluminación y sondas CTD.

En el proyecto VirtualMAR se ha realizado un importante esfuerzo en el desarrollo de instrumentación submarina altamente especializada y adaptada específicamente a la problemática del estudio de los hábitats marinos de la Red de Parques Nacionales. Se ha diseñado y construido un módulo de fotogrametría, compuesto principalmente por una cámara de vídeo, dos focos de tecnología LED y sensores ambientales, todo ello integrado en una carcasa sumergible hasta 150 metros (figura 2). Este diseño permite al módulo operar en zonas de baja visibilidad, como áreas profundas, donde no llega suficiente luz natural o zonas de difícil acceso como interiores de cuevas submarinas. El módulo puede ser operado por buceadores en campañas de monitorización de hábitats o ser integrado en vehículos submarinos no tripulados ligeros. Este esfuerzo de innovación ha generado una herramienta capaz de adquirir unas imágenes de gran detalle, permitiendo avanzar en la capacidad de obtener información de fondos marinos.

El avance del diseño específico de sensores, la integración de otros elementos complementarios en el



Figura 2. Imagen del módulo de fotogrametría desarrollado en el Proyecto VirtualMAR operado por un buceador junto a un ROV ligero.

sistema (iluminación, sistemas de posicionamiento y orientación, etc.), y su completa integración electrónica, permiten introducir posteriormente tecnologías de proceso de imágenes no utilizadas habitualmente en el entorno submarino.

Fotogrametría tridimensional aplicada a fondos marinos

La fotogrametría es la ciencia de obtener datos fiables sobre objetos físicos mediante el registro, medición e interpretación de imágenes fotográficas. En los últimos años, el rápido desarrollo de la informática y los avances tecnológicos han posibilitado aplicaciones de la fotogrametría a diferentes ámbitos, más allá de la generación de mapas topográficos y planos. Una importante y reciente evolución en el campo de la fotogrametría es el desarrollo de lo que se conoce como la técnica de “estructura a partir del movimiento”, aunque habitualmente se denomina por su término en inglés, *Structure from Motion* o SfM (Carrivick *et al.*, 2016).

La técnica SfM permite la reconstrucción de objetos tridimensionales (3D) a partir de una serie de imágenes bidimensionales (2D) con un alto grado de solape, ver figura 3 (Sweeney, 2016). A diferencia de la fotogrametría tradicional, en las técnicas de SfM no es indispensable contar con el posicionamiento de las tomas, orientación de la cámara o información precisa de los puntos de control en la escena antes de reconstruir la geometría de la superficie. Los modelos cartográficos tridimensionales posibilitan la obtención de una gran variedad de medidas sobre los organismos en 3 dimensiones (alturas, volúmenes, rugosidad, etc.). Y puede ser la base para estudios de conservación, dinámica, crecimiento, con una elevada precisión, e incluso conocer la respuesta a posibles impactos y mortalidad de especies.

La colaboración surgida entre el grupo de investigación ECOMARG, del Instituto Español de Oceanografía (IEO-CSIC), y el Grupo de Ingeniería Fotónica (GIF), de la Universidad de Cantabria (UC), ha permitido en los últimos años la utilización de técnicas de SfM para documentar yacimientos arqueológicos submarinos (Prado *et al.*, 2019a), cuantificar la estructura de poblaciones de especies profundas altamente vulnerables, basado en

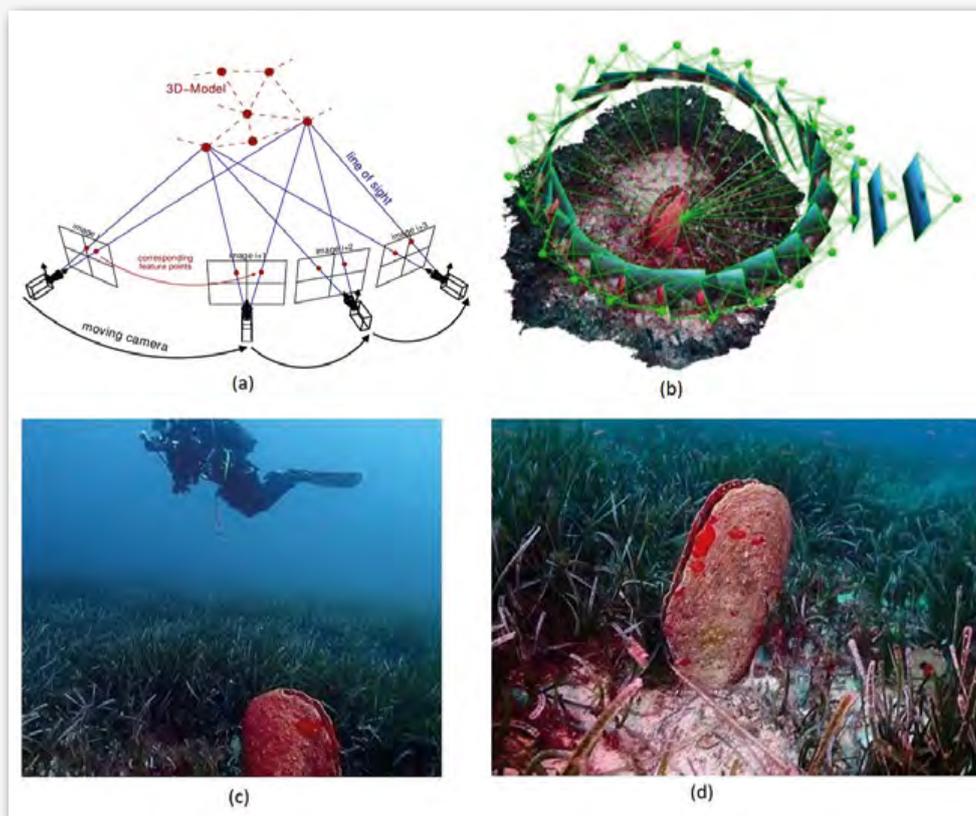


Figura 3. (a) Esquema de SfM (Sweeney, 2016); (b) esquema de reconstrucción 3D de un ejemplar de *Pinna nobilis*; (c) momento de la toma de datos; y (d), modelo 3D del ejemplar.

una evaluación de su morfometría de alta precisión (Prado *et al.*, 2019b; Ríos *et al.*, 2020), el modelado de microhábitats bentónicos (Prado *et al.*, 2020) y la estimación de ratios de crecimiento de esponjas de profundidad (Prado *et al.*, 2021). Pero, en general, la aplicación de las técnicas SfM en estudios de ecología marina puede considerarse todavía escasa, y existen muchos ámbitos dentro de los estudios marinos en los que potencialmente podría resultar interesante su aplicación.

Durante la ejecución del proyecto VirtualMAR se ha explorado también la potencialidad de los modelos tridimensionales como fuente de divulgación y acercamiento de la ciencia a la ciudadanía. Se ha generado una galería virtual 3D de acceso libre de los fondos más representativos de nuestros parques nacionales (<https://sketchfab.com/VirtualMAR>), como praderas de posidonias, comunidades de coralígeno, cuevas submarinas, campos de gorgonias, fondos de arena y cascajo, infralitoral rocoso con cobertura de algas y circalitoral rocoso con presencia de rodolitos. Esta galería de modelos virtuales tridimensionales está disponible en internet, es de libre acceso y los modelos tridimensionales pueden ser visualizados desde cualquier dispositivo, incluidas gafas de realidad virtual. Gracias a este recurso, desde los centros de interpretación de la naturaleza de los parques nacionales pueden ahora facilitar que el ciudadano se sumerja virtualmente y explore con sus propios ojos los fondos marinos.

Estudio poblacional del coral rojo (*Corallium rubrum*)

Los fondos de coralígeno son uno de los hábitats principales del mar Mediterráneo, con una gran

complejidad estructural y una gran abundancia y diversidad de flora y fauna asociados. Una de las especies más importantes en las comunidades de coralígeno es la de las colonias de coral rojo (*Corallium rubrum*) (Gianini *et al.*, 2003). Esta especie ha sido objeto de explotación con fines comerciales, principalmente para la fabricación de joyas, lo que ha hecho mermar su población en el Mediterráneo.

La vulnerabilidad de esta especie hace conveniente abordar estudios que permitan conocer su estado de salud y adoptar, si fuera necesario, las medidas administrativas y de conservación. Desde el proyecto VirtualMAR se ha puesto a punto una metodología no invasiva, basada en técnicas de fotogrametría para la evaluación de esta población (Domingo, 2021).

Se han utilizado dos transectos de vídeos grabados sobre una población de coral rojo en el Parque Nacional Marítimo-Terrestre del Archipiélago de Cabrera, a unos 40 metros de profundidad. A lo largo las secciones de video se situaron escalas metálicas fijas de 3 ejes que permiten escalar las medidas a realizar sobre el bloque tridimensional generado (figura 4).

Partiendo de estos datos, y utilizando técnicas fotogramétricas, se han generado modelos tridimensionales o nubes de puntos 3D, con una media de aproximadamente 70 millones de puntos por modelo. Los modelos 3D del área de estudio cubren un área total de 56,83 m² de superficie de pared rocosa. Para realizar la caracterización de la población de coral en este estudio se han utilizado dos parámetros básicos que describen la población: la densidad de colonias de coral rojo y la estructura de tallas de dichas colonias. Las colonias de coral rojo están distribuidas a lo largo de los dos transectos,

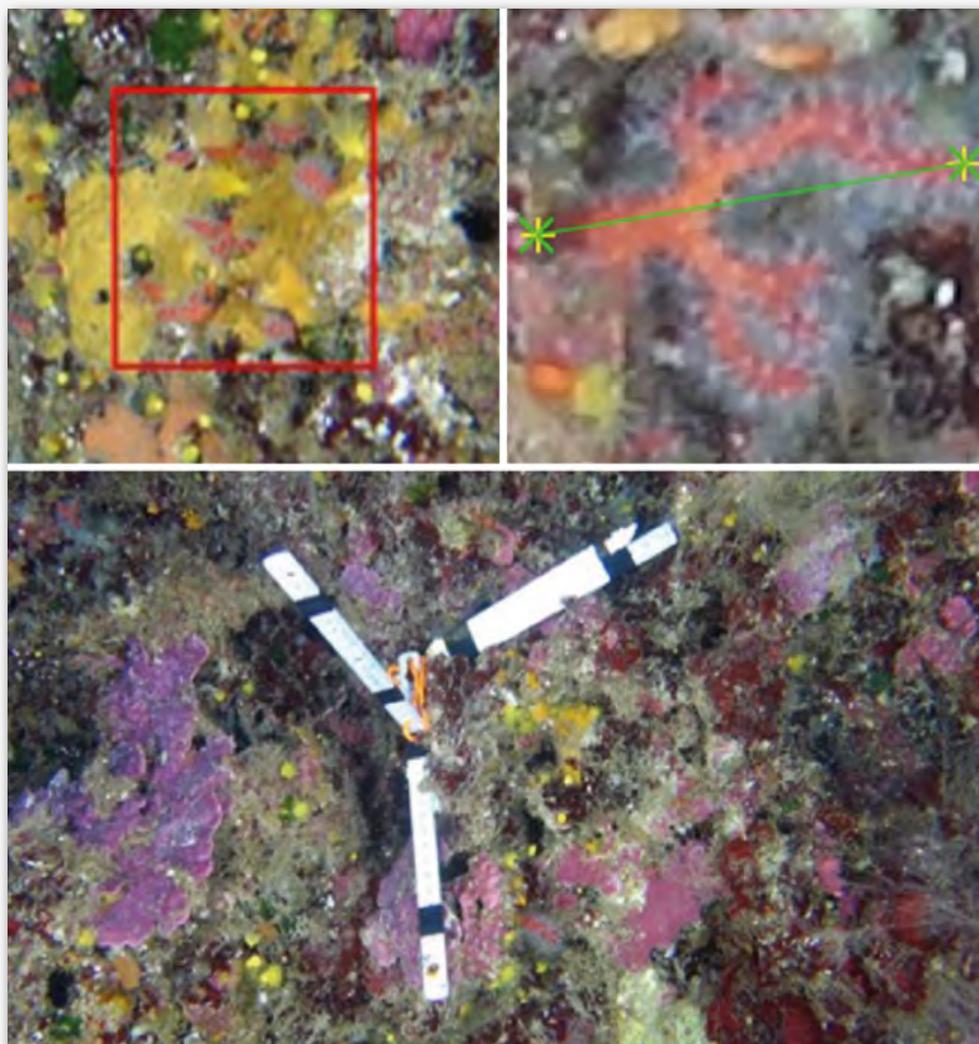


Figura 4. Fotograma de uno de los videos grabados en esta zona en el que pueden verse colonias de coral rojo (recuadro). Escala métrica de 3 ejes que proporcionan un método de escalado de los bloques tri-dimensionales. Detalle de la medición de la talla de una colonia de coral rojo.

principalmente en zonas de grietas o zonas más protegidas del sustrato rocoso. En total, 623 colonias de coral rojo fueron identificadas a lo largo de las dos secciones de vídeo, obteniéndose una densidad de población de 28 colonias por m^2 .

Por otro lado, la distribución de tallas de la población de coral a lo largo del transecto se consigue midiendo las colonias que aparecen en el área de estudio y realizando la distribución de las medidas de tallas en clases. Las medidas de longitud de las colonias se realizan sobre la nube de puntos 3D densificada con una polilínea recta que va desde la región basal hasta la cúspide de la rama más alejada (figura 4). Aunque esta medida no es la comúnmente utilizada para la gestión de la especie, puede sin embargo resultar indicativa y aportar una visión general del estado de la población. Para la caracterización de la distribución de tallas de la población de *C. rubrum* se midieron un total de 276 ejemplares. La longitud o talla media de la población presente en esta zona es de 19,7 mm. La talla con mayor frecuencia, que abarca un rango de entre 10 a 20 mm, agrupa un total de 163 colonias, es decir, un 59 % del total de ejemplares medidos. Le sigue la del grupo de tallas de 20-30 mm con una acumulación 86 colonias, que correspondería al 31 % de la muestra.

Tabla 1. Distribución de tallas de la población de *C. rubrum* (Domingo, 2021)

Clase de talla	Frecuencia	Porcentaje %
0-10	3	1.09
10-20	163	59.06
20-30	86	31.16
30-40	22	7.97
40-50	1	0.36
50-60	1	0.36

Técnicas de inteligencia artificial y aprendizaje profundo

Existe un vacío entre la generación de estos productos cartográficos con propiedades métricas avanzadas y la necesidad de estudiar el contenido de la imagen con el punto de vista puesto en la identificación de especies o la catalogación de tipos de fondo. A este último aspecto se le hace frente habitualmente mediante el trabajo de expertos en taxonomía, a partir de tediosos y largos procesos de visualización y etiquetado del contenido de las imágenes. Es evidente que en este proceso las técnicas de inteligencia artificial (IA) pueden ofrecer alternativas viables.

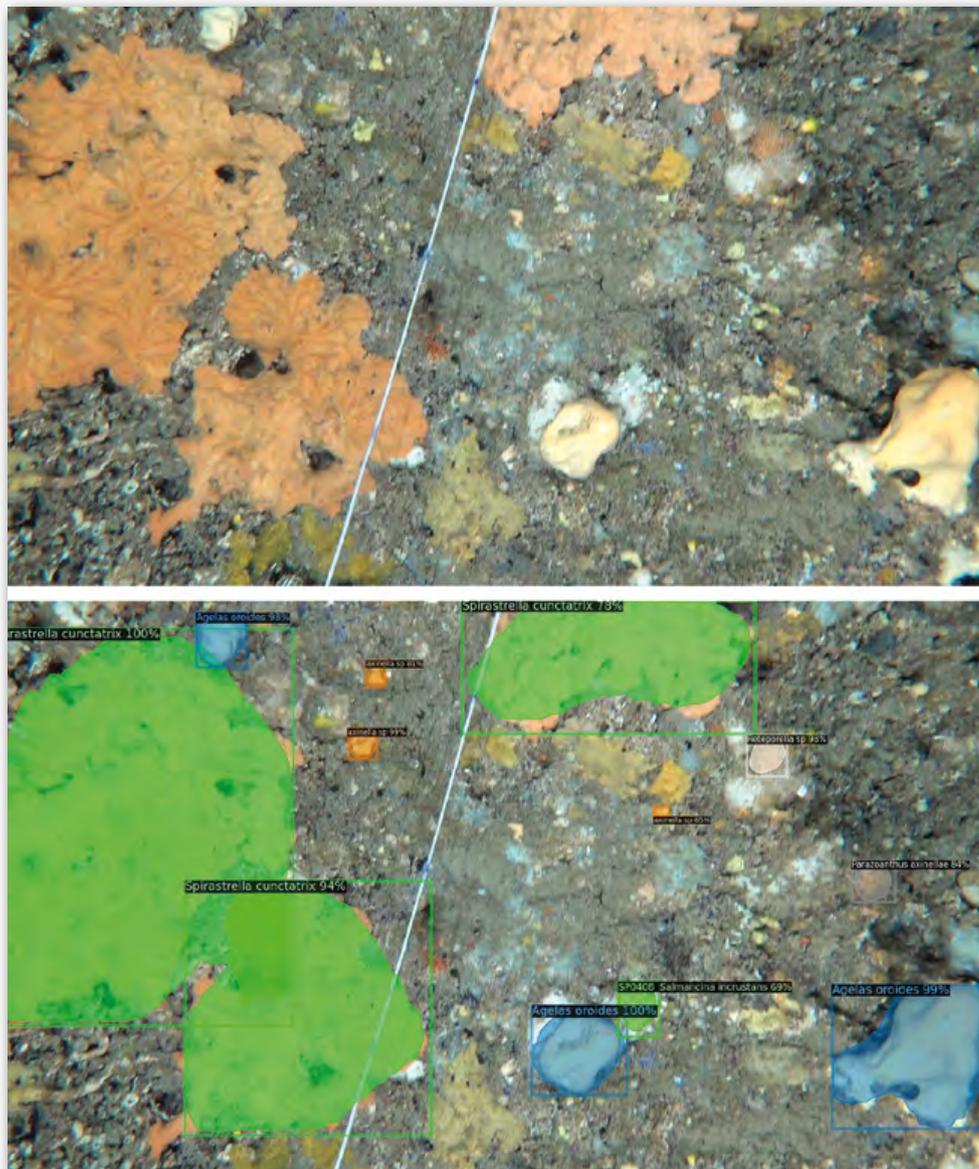


Figura 5. Fotografías de uno de los videos grabados en una cueva submarina. Arriba se puede ver el fotograma original, abajo el fotograma con las especies segmentadas y etiquetadas por el algoritmo de IA desarrollado en VirtualMAR.

En la actualidad son muy numerosas las aplicaciones en las que la IA puede ser utilizada, como sistemas expertos, robótica, reconocimiento de voz y visión artificial, entre otros. Las técnicas basadas en IA han tomado mucha relevancia en parte debido al gran aumento que se ha producido en la disponibilidad de datos de todo tipo y la necesidad surgida de analizar ese gran volumen de información. La aplicación particular de análisis automatizado de las imágenes capturadas en fondos marinos profundos está comenzando a ser explorada en la actualidad con estas herramientas. Así, se ha propuesto el uso de modelos como las redes convolucionales (CNN) con arquitecturas AlexNet y LeCun, respectivamente, para las tareas de detección de presencia de especies propias de los fondos marinos y su clasificación entre 10 posibles categorías genéricas, como estrella de mar, cangrejo, pez de roca, coral, etc. (Marburg y Bigham, 2016).

La monitorización de la biodiversidad marina y el estudio de las densidades de las especies estructurantes de hábitats vulnerables es un desafío en algunos hábitats especialmente complejos, como son las cuevas

submarinas. Las cuevas marinas se consideran un hábitat prioritario para la conservación incluido en la Directiva de Hábitats de la UE (Hábitat 8330). Aunque un gran número de comunidades bentónicas vulnerables habitan el interior de cuevas submarinas, el conocimiento existente sobre estos hábitats es muy escaso. Esto se debe a las dificultades de acceso y a las limitaciones de muestreo que dificultan la creación de cartografía detallada de hábitats, inventarios de especies y estudios de dinámica comunitaria o evaluación de daños (Quiles-Pons *et al.*, 2022). Las especies sésiles que viven en las paredes rocosas de este ambiente son especialmente vulnerables debido a su sensibilidad a los impactos provocados por factores como el buceo recreativo. Por ello, en el contexto del proyecto VirtualMAR se han utilizado este tipo de algoritmos, que han sido programados y entrenados para que puedan identificar y clasificar automáticamente las principales especies que estructuran los hábitats presentes en las cuevas sumergidas (figura 5). Para ello se ha desarrollado una metodología basada en la grabación de videos en las paredes de las

cuevas y el análisis de dichas imágenes con algoritmos de aprendizaje profundo, que entrenados por expertos taxónomos consiguen estimar de forma automática la densidad espacial de las especies de interés en un área determinada. Esta metodología propuesta conseguirá proporcionar, mediante segmentación semántica y estimación precisa de la extensión real de la superficie, mapas de densidad que puedan monitorizar el estado de la biodiversidad a lo largo del tiempo.

Avances conseguidos en los estudios de fondos marinos

Los modelos tridimensionales basados en algoritmos SfM permiten representar el fondo marino con una alta resolución espacial, posibilitando el estudio en 3 dimensiones de los ecosistemas marinos con resoluciones centimétricas. Esto permite utilizarlos como fuente de datos principal para la evaluación de los hábitats tridimensionales complejos, como es el ejemplo presentado en este artículo del estudio del coral rojo, una especie totémica de un hábitat como el coralígeno de gran complejidad estructural y con una elevada biodiversidad. Por su parte, las clasificaciones automáticas de imágenes basadas en algoritmos de inteligencia artificial permiten analizar el proceso de miles de imágenes sin intervención humana posibilitando el avance en el conocimiento de diversos ecosistemas vulnerables.

Referencias

Carrivick, J.L., Smith, M.W., y Quincey, D.J. (2016). *Structure from Motion in the Geosciences*. Chichester (R. U.): Wiley-Blackwell.

Domingo, A. (2021). Fotogrametría submarina 3D aplicada a la caracterización de *Corallium rubrum* y *Pinna rudis* en el Parque Nacional Marítimo-Terrestre del Archipiélago de Cabrera. Trabajo Fin de Máster. *Máster Universitario en Tecnologías de la Información Geográfica*. Alcalá de Henares (Madrid): Universidad de Alcalá.

Ferreira, C.E., Gonççalves, J.E., y Coutinho, R. (2001). Community structure of fishes and habitat complexity on a tropical rocky shore. *Environmental Biology of Fishes*, 61: pp. 353–369.

Giannini, F., Gili, J.M., y Santangelo, G. (2003). Relationships between the spatial distribution of red coral *Corallium Rubrum* and coexisting suspension feeders at Medas Islands Marine Protected Area (Spain). *Italian Journal of Zoology*, 70(3): pp. 233–239. <https://doi.org/10.1080/11250000309356523>

Guinan, J., Brown, C., Dolan, M.F.J., y Grehan, A.J. (2009). Ecological niche modelling of the distribution of cold-water coral habitat using underwater remote sensing data. *Ecological Informatics*, 4(2): pp. 83-92. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2009.01.004>

Marburg, A., y Bigham, K. (2016). Deep learning for benthic fauna identification. *OCEANS 2016 MTS/IEEE Monterey*, pp. 1-5.

Prado, E., Gómez-Ballesteros, M., Cobo, A., Sánchez, F., Rodríguez-Basalo, A., Arrese, B., y Rodríguez-Cobo, L. (2019a). 3D Modeling of Rio Miera wreck ship merging optical and multi-beam high resolution points cloud. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLII-2/W10, 159–165. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W10-159-2019>

Prado, E., Sánchez, F., Rodríguez-Basalo, A., Altuna, Á., y Cobo, A. (2019b). Analysis of the population structure of a gorgonian forest (*Placogorgia* sp.) using a photogrammetric 3D modeling approach at Le Danois Bank, Cantabrian Sea. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, Vol. 153. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W10-159-2019>

Prado, E., Rodríguez-Basalo, A., Cobo, A., Ríos, P., y Sánchez, F. (2020). 3D Fine-scale terrain variables from underwater photogrammetry: a new approach to benthic microhabitat modeling in a circalittoral rocky shelf. *Remote Sensing*, 12(15): 2466. <https://doi.org/10.3390/rs12152466>

Prado, E., Cristobo, J., Rodríguez-Basalo, A., Ríos, P., Rodríguez-Cabello, C., y Sánchez, F. (2021). *In situ* growth rate assessment of the hexactinellid sponge *Asconema setubalense* using 3D photogrammetric reconstruction. *Frontiers in Marine Science*, Vol. 8: 612613. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.612613>

Quiles-Pons, C., Baena Vega, I., Calvo, M., De la Ballina, N.R., Díez-González, S., Goñi, R., Mallol Martínez, S., Maresca, F., Morató, M., Muñoz, A., Prado, E., Real García, E., Sánchez, F., y Díaz, D. (2022). Monitoring the complex benthic habitat on semi-dark underwater marine caves using photogrammetry-based 3D reconstructions. *3rd Mediterranean Symposium on the Conservation of the Dark Habitats, Genoa, Italy, 21-22 September 2022*.

Ríos, P., Prado, E., Carvalho, F.C., Sánchez, F., Rodríguez-Basalo, A., Xavier, J.R., Ibarrola, T.P., y Cristobo, J. (2020). Community composition and habitat characterization of a rocksponge aggregation (Porifera, Corallistidae) in the Cantabrian Sea. *Frontiers in Marine Science*, Vol. 7. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.00578>

Sweeney, C. (2016). Theia multiview Geometry library: Tutorial & Reference. <http://theia-sfm.org/>

ÚLTIMOS AVANCES EN MODELIZACIÓN CLIMÁTICA

José Antonio Parodi Perdomo^{1*}, Esteban Rodríguez Guisado²

¹ Licenciado en Física. Área de Evaluación y Modelización del Clima, de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET).

² Licenciado en Física. Área de Evaluación y Modelización del Clima, de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET).

* Autor de contacto: jparodip@aemet.es

En la actualidad, el cambio climático se ha convertido en uno de los mayores problemas (si no el problema principal) a los que se enfrenta la humanidad en su conjunto. Los sucesivos informes del IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*, referencia de la ONU para el asesoramiento científico sobre el cambio climático) así lo corroboran (IPCC 2014, IPCC 2021), proporcionando una gran cantidad de información avalada científicamente al respecto del aumento de la temperatura global y de los cambios que está experimentando y en el futuro experimentará el clima. Son numerosos los sectores (energía, industria, agricultura, turismo, seguros, transporte, salud, etc.) que, cada vez más, requieren información sobre los posibles escenarios futuros de evolución del clima, tanto en próximas décadas como a largo plazo, dadas las repercusiones asociadas. También presentan gran demanda actualmente los estudios de atribución, evaluación y predicción de eventos extremos asociados al cambio climático (Rodríguez-Camino y Hernanz-Lázaro, 2021).

Los modelos climáticos son la herramienta fundamental utilizada para afrontar los problemas mencionados anteriormente, a través de la comprensión y estimación de la evolución futura del clima que se obtiene gracias a las simulaciones realizadas con ellos. Estos modelos resuelven con métodos numéricos las ecuaciones de la física y dinámica para la atmósfera, al igual que hacen los modelos de predicción del tiempo a corto plazo. Pero, además, y a diferencia de estos últimos, incorporan la simulación de componentes principales del sistema climático (hidrosfera, litosfera, criosfera, biosfera), estrechamente interrelacionados entre sí y de gran relevancia en la evolución del sistema climático global, permitiendo obtener resultados más realistas a largo plazo, al incluir implícitamente las retroalimentaciones que se producen entre los diferentes componentes. Cuando la escala de los procesos es inferior a la resolución del modelo (tamaño de la unidad mínima que es capaz de resolver) se utilizan aproximaciones y cálculos indirectos, lo que se denomina como "parametrizaciones del modelo".

Es importante señalar las diferencias principales entre los modelos de predicción numérica del tiempo (predicciones a corto y medio plazo) y la modelización climática (desde predicciones estacionales a proyecciones de largo plazo). La modelización del tiempo a corto/medio plazo es un problema de condiciones iniciales.

El valor de determinadas variables meteorológicas (p. ej. temperatura en superficie, perfil vertical de temperatura, humedad, viento, precipitación, presión), en un instante inicial dado, será crítico para determinar el estado de la atmósfera en el plazo de predicción deseado.

En cambio, en la modelización climática se pretende obtener una evolución a largo plazo de las variables meteorológicas, unos valores promedio y sus variaciones. En este caso la solución vendrá determinada principalmente por el balance de energía y, en definitiva, por las condiciones de contorno del sistema (p. ej. composición atmosférica, condiciones de la superficie terrestre y del océano, radiación incidente, extensión de superficies de hielo, etc.). La escala de predicción, el nivel de detalle espaciotemporal que proporcionará el modelo climático, dependerá de su resolución y del propósito para el que esté diseñado, aunque es posible obtener una mayor resolución a través del uso de modelos climáticos regionales (RCM, por sus siglas en inglés) lo que se denomina como "downscaling dinámico", o de modelos estadísticos, denominado "downscaling estadístico" a partir del modelo climático global. Sin embargo, la introducción del concepto de "seamless prediction" (Hoskins, 2012) en la última generación de modelos climáticos (como se describe más adelante) permitirá que se difumine esta separación entre escalas, y estructuras, de los modelos climáticos y los modelos de predicción del tiempo a corto plazo.

La generación de modelos climáticos en la actualidad. Modelos de última generación

Algunos modelos climáticos de desarrollo más reciente han introducido el mencionado paradigma "seamless prediction" ("predicción sin costuras" o "predicción sin discontinuidad"). La simulación del sistema climático terrestre debe incorporar los procesos que interactúan a través de un amplio espectro de escalas, desde aquéllos que se producen en evoluciones rápidas o de corto plazo (p. ej. frentes, borrascas, sistemas convectivos) a otros que tienen una evolución más lenta y/o de largo plazo (p. ej. procesos de la criosfera, corrientes oceánicas de retorno, El Niño-Oscilación del Sur) ya que, a pesar de producirse en escalas distintas estarán estrechamente relacionados entre sí.

Para ello, el modelo climático usa como base un modelo atmosférico de predicción de corto plazo, lo que permitirá aprovechar las ventajas y estructuras de los modelos de predicción del tiempo (mayor resolución, realización de diagnósticos frente a observaciones, mejores condiciones iniciales, etc.) y, a su vez, tener mayor versatilidad en cuanto a la escala temporal a resolver, pudiendo ser utilizados no solo para proyecciones climáticas de largo plazo, sino también para predicción decadal o estacional. Esto último, sin embargo, está limitado en gran medida por los recursos de computación disponibles ya que los aumentos de resolución inciden, de manera crítica, en los costes asociados de computación, almacenamiento y, en última instancia, de energía.

En los últimos años, los modelos climáticos han ido aumentando progresivamente tanto su resolución espacial (unidad mínima horizontal, número de niveles en la vertical de la atmósfera) como su complejidad (número de componentes del sistema climático simulados, parametrizaciones físicas, paralelización de procesos). Los modelos climáticos de última generación

están englobados en la categoría de ESM (*Earth System Models*) (Flato, 2011) cuando, a partir del núcleo de un modelo AOGCM (*Atmosphere-Ocean General Circulation Model*, el cual acopla entre sí los componentes: atmósfera, océano, hielo marino y suelo), incorporan, además, la simulación de procesos biofísicos y/o biogeoquímicos, el ciclo del carbono, así como una representación más

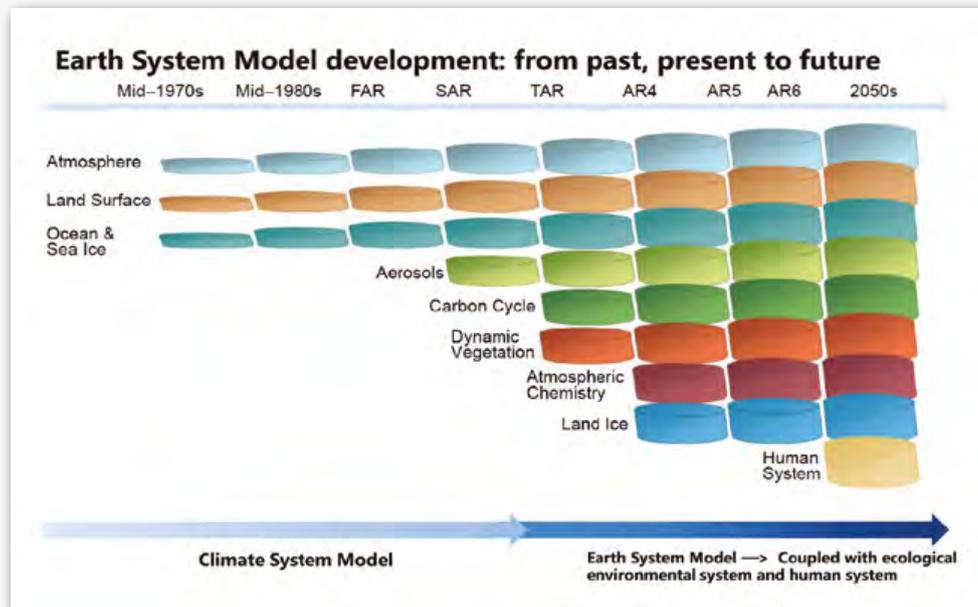


Figura 1. Representación del progresivo aumento de complejidad en los modelos climáticos con cada ciclo del IPCC (Fuente: Zhou *et al.*, 2022).

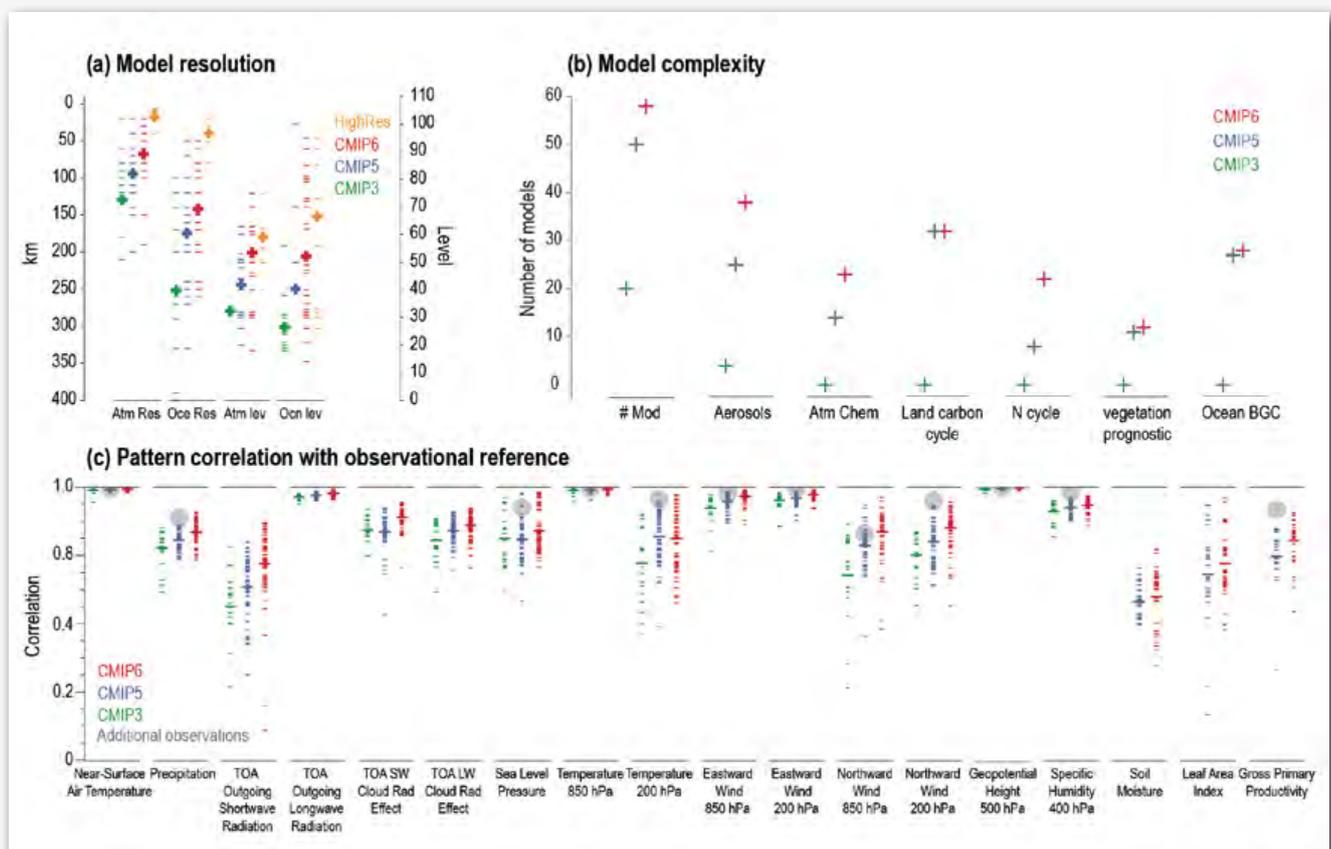


Figura 2. Progreso de los modelos climáticos en resolución, complejidad y representación de variables según las sucesivas fases del CMIP (CMIP3, CMIP5, CMIP6): a) Evolución en la resolución horizontal y niveles verticales; b) Evolución del número de modelos y los procesos incluidos; y c), Correlación entre resultados de modelos y observaciones de distintas variables (climatología media anual para periodo 1980–1999), las líneas cortas representan el valor de cada modelo y la línea larga representa el promedio del ensemble de modelos (Fuente y más información: Figura TS.2 | Arias *et al.*, 2021. IPCC, 2021: Technical Summary).

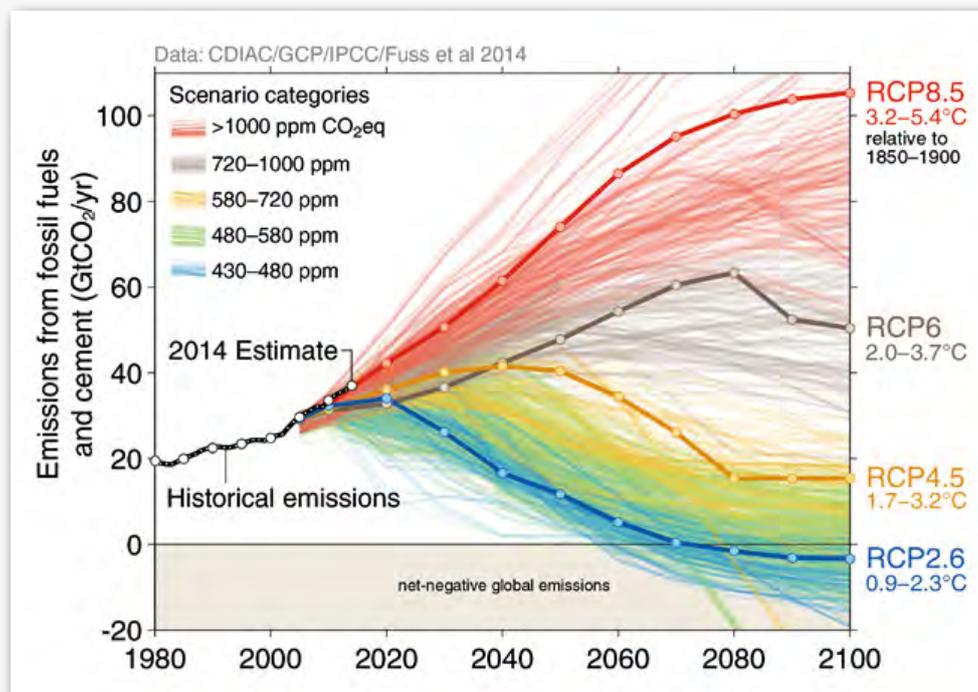


Figura 3. Caracterización de las incertidumbres en los escenarios de clima futuro. Cada línea corresponde a la evolución generada por un modelo. Los colores representan las ejecuciones generadas bajo un mismo escenario de emisiones (Fuente: Fuss *et al.*, 2014).

compleja de los aerosoles. Esto permitirá agregar y conocer con más detalle la influencia de cada uno de los complejos procesos de intercambio de energía, masa, aerosoles, nutrientes y gases, que se producen entre atmósfera, suelo y océanos. El modelo climático EC-EARTH (Hazeleger *et al.*, 2010; Döscher *et al.*, 2022), desarrollado en el marco de un consorcio formado por diferentes servicios meteorológicos y centros de investigación europeos, es un ejemplo de esta última generación de modelos climáticos.

Este aumento en la complejidad de los modelos climáticos se puede apreciar en la introducción progresiva de los componentes incluidos en los modelos, y en cómo va evolucionando en los sucesivos informes del IPCC.

Tanto los modelos más primitivos como los actuales han demostrado su habilidad en la simulación de las características principales de climas pasados y del clima presente (Hausfather *et al.*, 2020). No obstante, será muy importante el tratamiento de las incertidumbres asociadas a la modelización climática que siempre van a existir. Mediante el aumento de resolución de los modelos reduciremos la incertidumbre relativa a la representación de los procesos físicos. Sin embargo, las incertidumbres asociadas a las condiciones de contorno (variables socioeconómicas, emisiones, usos de suelo, etc.), permanecerán inalteradas, aunque las podremos acotar utilizando distintas opciones de escenarios de emisiones.

Para el tratamiento de las incertidumbres es vital y necesario el uso de ensembles (o predicción por conjuntos: conjunto de simulaciones realizadas variando las condiciones de realización), ya que, mediante diferentes opciones de generación de ensembles, podremos distinguir la variabilidad interna de cada modelo (ensemble de simulaciones de un mismo modelo) o las incertidumbres asociadas al uso de diferentes modelos (ensembles multi-modelo) (Rodríguez-Camino *et al.*, 2018).

En la actualidad, se están investigando diferentes estrategias que permitan obtener información valiosa sobre las diferentes incertidumbres y sobre el comportamiento de los modelos (Deser *et al.*, 2020) (p. ej. métodos de realización de ensembles, parametrizaciones estocásticas, uso de alta resolución en los modelos), siendo las sucesivas fases del proyecto de intercomparación de modelos acoplados CMIP -CMIP6 es su última fase (Eyring *et al.*, 2016), auspiciado por el WCRP (*World Climate Research Programme*), una fuente clave de conocimiento al respecto, y cuyos resultados son utilizados por el IPCC para la elaboración de sus Informes de Evaluación sobre el estado del Clima.

La evolución de la modelización climática ha ido en paralelo a los desarrollos en la tecnología de los computadores (Bauer *et al.*, 2015). Debido a su alta demanda de recursos de cálculo, los modelos climáticos se ejecutan sobre plataformas de supercomputación que permiten disponer de estos requisitos necesarios tan exigentes (número de procesadores, almacenamiento de datos,



Figura 4. Supercomputador de ECMWF (Fuente: www.ecmwf.int).

gran demanda de energía, personal especializado que gestione el *hardware/software*), por lo que, actualmente, tan solo los servicios meteorológicos nacionales más importantes del mundo, o consorcios de servicios meteorológicos y centros de investigación, se pueden permitir desarrollar y disponer de un modelo climático de última generación que sea operativo.

Avances y desarrollos futuros en modelización climática

Dada la demanda social, cada vez mayor, de información útil y de calidad acerca de los posibles efectos del cambio climático, los principales esfuerzos en el desarrollo de la próxima generación de ESM van encaminados, principalmente, a incrementar la resolución espacial, permitiendo así la resolución explícita de un mayor número de procesos de pequeña escala y por tanto, de alcanzar detalles más complejos. El objetivo es llegar a resoluciones del orden de 1 km en un modelo global, lo que supone un reto muy importante (Wedi *et al.*, 2020) ya que la configuración estándar de los modelos climáticos globales actuales tiene una resolución horizontal de unos 50-100 km, por lo que para obtener una mayor resolución se ha de realizar el *downscaling* mencionado previamente (dinámico o estadístico).

En línea con este objetivo, la iniciativa europea *Destination Earth* (DestinE) (www.ecmwf.int/DestinE) implica el desarrollo de una réplica digital del planeta Tierra, a muy alta resolución, para la ayuda en la toma de decisiones sobre el cambio climático y las políticas de adaptación y mitigación de impactos/riesgos medioambientales. Dos “gemelos digitales” se están desarrollando para llevar a cabo este objetivo: uno de ellos estará dedicado a la adaptación al cambio climático, con el objetivo de proporcionar un sistema de información climática configurable, realizando simulaciones climáticas globales multi-decadales con una resolución de

5 km o inferior. El otro “gemelo digital” estará dedicado a la predicción de tiempo extremo a corto plazo y muy alta resolución (inferior a 1 km).

En este desarrollo están implicados como agentes principales ESA (*European Space Agency*), EUMETSAT (*European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites*) y ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*), aunque, debido a su enorme complejidad y necesidad de recursos, involucra además a numerosos organismos científicos, tecnológicos y de investigación, líderes a nivel europeo.

Esta iniciativa, *Destination Earth*, permitirá conectar de manera más estrecha la modelización climática con la producción de información climática relevante para diferentes sectores y explorar otros usos de la información generada.

Este objetivo de modelización climática a muy alta resolución llevará asociado una serie de problemas que afrontar (Bauer *et al.*, 2021), principalmente vinculados a la mejora de los sistemas de computación, necesidad de altas prestaciones de cálculo y la gestión del almacenamiento de datos. Esto ha llevado a la aparición de diferentes estrategias de optimización (Palmer y Stevens, 2019), entre las que se encuentran: paralelización de procesos de cálculo y uso de GPU (*Graphics Processing Unit*); asignación de “precisión reducida” en la codificación de ciertas variables; mayor modularidad en el código usado para los distintos componentes del sistema; mejora en la simulación y complejidad de los aerosoles atmosféricos; mejoras en la hidrología y simulación de corrientes subterráneas en el esquema de suelo; optimización en la gestión de las salidas del modelo (paralelización, post-proceso simultáneo); introducción de física estocástica y de inteligencia artificial en las parametrizaciones; resolución explícita de procesos convectivos y de microfísica en nubes; optimización y mejora de los

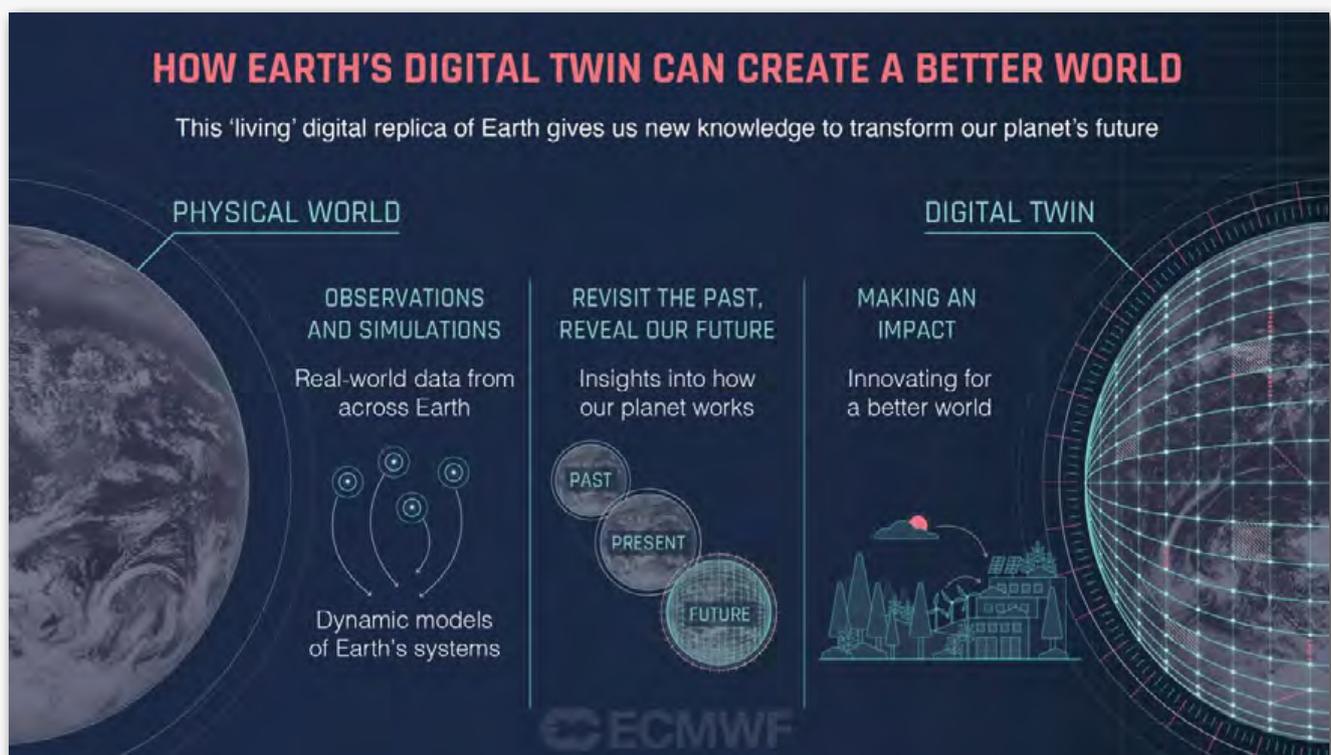


Figura 5. Esquema representativo acerca de la “réplica digital de la Tierra” o “gemelo digital” (Fuente: www.ecmwf.int).

procesos de asimilación de datos para condiciones iniciales; estrategias óptimas de generación de ensembles; implicaciones respecto a sensibilidad climática; umbrales/puntos de no retorno del sistema climático, etc.).

El objetivo es de una envergadura tan importante y conlleva unos costes asociados tan elevados que, para llevarlo a cabo, será imprescindible la participación y cooperación de los institutos de investigación y tecnología más importantes a nivel mundial, junto con centros meteorológicos nacionales y la colaboración de grupos interdisciplinarios de expertos, generando al mismo tiempo oportunidades únicas para el avance científico y tecnológico. Los resultados los podremos comprobar y valorar en esta misma década.

Referencias

Arias, P.A., et al. (2021). *Technical Summary*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 33–144. doi:10.1017/9781009157896.002

Bauer, P., Dueben, P.D., Hoefler, T., et al. (2021). The digital revolution of Earth-system science. *Nature Computational Science*, 1(2): pp. 104–113. <https://doi.org/10.1038/s43588-021-00023-0>

Bauer, P., Thorpe, A., y Brunet, G. (2015). The quiet revolution of numerical weather prediction. *Nature*, 525(7567): pp. 47–55. <https://doi.org/10.1038/nature14956>

Deser, C., Lehner, F., Rodgers, K.B., et al. (2020). Insights from Earth system model initial-condition large ensembles and future prospects. *Nature Climate Change*, 10(4): pp. 277–286. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0731-2>

Döscher, R., et al. (2022). The EC-Earth3 Earth system model for the Coupled Model Intercomparison Project 6. *Geoscientific Model Development*, 15(7): pp. 2973–3020. <https://doi.org/10.5194/gmd-15-2973-2022>

Eyring, V., Bony, S., Meehl, G.A., Senior, C.A., Stevens, B., Stouffer, R.J., y Taylor, K.E. (2016). *Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization*. *Geoscientific Model Development*, 9(5): pp. 1937–1958. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016>

Flato, G.M. (2011). Earth system models: An overview. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 2(6): pp. 783–800. <https://doi.org/10.1002/wcc.148>

Fuss, S., Canadell, J.G., Peters, G.P., et al. (2014). Betting on negative emissions. *Nature Climate Change*, 4(10): pp. 850–853. <https://doi.org/10.1038/nclimate2392>

Hausfather, Z., Drake, H.F., Abbott, T., y Schmidt, G.A. (2020). Evaluating the performance of past climate model projections. *Geophysical Research Letters*, 47(1): e2019GL085378. <https://doi.org/10.1029/2019GL085378>

Hazeleger, W., et al. (2010). EC-Earth. A Seamless Earth-System Prediction Approach in Action. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 91(10): pp. 1357–1364. <https://doi.org/10.1175/2010BAMS2877.1>

Hoskins, B.J. (2013). The potential for skill across the range of the seamless weather-climate prediction problem: a stimulus for our science. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 139(672): pp. 573–584. <https://doi.org/10.1002/qj.1991>

IPCC (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, R.K. Pachauri y L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.

IPCC (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, y B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom y New York, NY, USA (En imprenta). <https://dx.doi.org/10.1017/9781009157896>

Palmer, T. (2014). Climate forecasting: Build high-resolution global climate models. *Nature*, 515, pp. 338–339. <https://doi.org/10.1038/515338a>

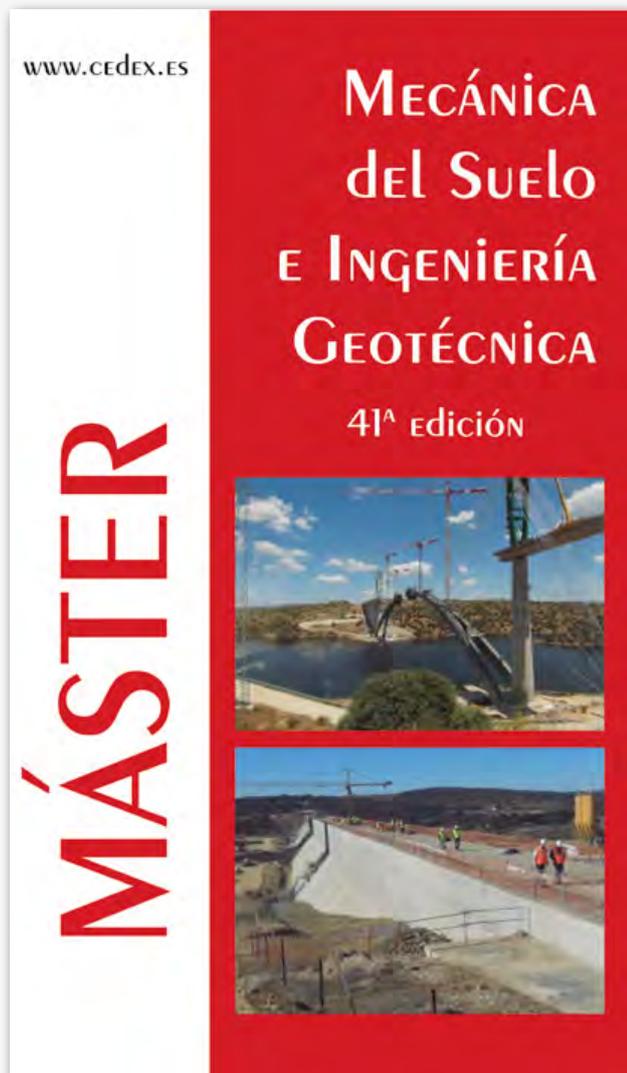
Rodríguez Camino, E., Parodi Perdomo, J.A., González Rouco, J.F., y Montoya Redondo, M. (2018). Proyecciones climáticas. Cap. 29, pp. 470–508. En: *Física del caos en la predicción meteorológica. Historia y fundamentos de la meteorología, sistemas de predicción por conjuntos, predicción probabilista y aplicaciones, cambio climático y aspectos sociales*. Ed. C. Santos Burguete. Pub. AEMET. <https://doi.org/10.31978/014-18-009-x.29>

Rodríguez Camino, E., y Hernanz Lázaro, A. (2021). Modelización y predicción en distintas escalas temporales: servicios de atribución de eventos extremos al cambio climático. *Revista Ambienta*, 130, pp. 76–83. https://repositorio.aemet.es/bitstream/20.500.11765/13399/1/AMBIENTA%20130_3.pdf

Wedi, N.P., Polichtchouk, I., Dueben, P., Anantharaj, V.G., Bauer, P., Boussetta, S., et al. (2020). A baseline for global weather and climate simulations at 1 km resolution. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 12(11): pp. 1942–2466. e2020MS002192. <https://doi.org/10.1029/2020MS002192>

Zhou, T., Zhang, W., Chen, D., Zhang, X., Li, C., Zuo, M., y Chen, X. (2022). Understanding and building upon pioneering work of Nobel Prize in Physics 2021 laureates Syukuro Manabe and Klaus Hasselmann: From greenhouse effect to Earth system science and beyond. *Science China Earth Sciences*, 65(4), pp. 589–600. <https://doi.org/10.1007/s11430-022-9906-4>

MÁSTER EN MECÁNICA DEL SUELO E INGENIERÍA GEOTÉCNICA



RESEÑA HISTÓRICA

Este máster fue ideado **en los años 80** por **José Antonio Jiménez Salas**, pionero de la Mecánica del Suelo en España, catedrático en la Escuela de Ingenieros de Caminos de Madrid y director del Laboratorio de Geotecnia del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX). Originariamente se planteó como un curso de especialización para titulados iberoamericanos. Desde entonces, el CEDEX lo ha organizado **anualmente** con apoyo de diversas entidades.

Aquel curso internacional obtuvo categoría de **Máster en el 2000**. Desde **2009** es **Máster Universitario de Título Propio** (de la Universidad Politécnica de Madrid, UPM, hasta 2011 y de la Universidad Nacional de Educación a Distancia, UNED, desde 2012), siendo una formación de referencia, en España e Iberoamérica, para los profesionales en geotecnia. La evolución histórica del máster está publicada en un artículo del Congreso Internacional *Geotechnical Engineering Education 2020*, auspiciado por la ISSMGE.

DIRECCIÓN: CEDEX Y UNED

La UNED y el CEDEX organizarán de nuevo en **2023** de forma conjunta la **41ª edición** del *Máster en Mecánica del Suelo e Ingeniería Geotécnica*. Será la 3ª edición impartida en modalidad telemática.

El **CEDEX** es el organismo público de referencia, dentro de la Administración General del Estado, en **I+D+i** en obras públicas y medio ambiente, con funciones de asistencia técnica y transferencia de conocimiento. El CEDEX está adscrito orgánicamente al Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana (MITMA), a través de la Secretaría de Estado de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, y tiene dependencia funcional del MITMA y del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITERD), en el marco de sus respectivas competencias.

La UNED es una **universidad** de ámbito **estatal**, tutelada directamente por el **Ministerio de Universidades**. Ocupa el primer lugar de todas las universidades españolas y el segundo en Europa por número de alumnos.

El **máster**, actualmente Título Propio de la **UNED**, tiene una **equivalencia de 60 créditos ECTS**.

FECHAS

30 enero-27 octubre, 2023

Periodo lectivo: febrero-junio: clases telemáticas: 4 horas diarias

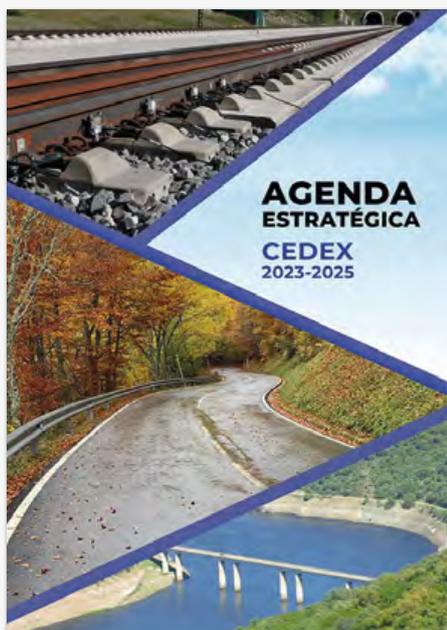
Periodo de TFM: julio-septiembre: tutela telemática

Periodo de prácticas: octubre: presencial: laboratorio, campo, visitas, talleres y viaje a obra

COSTE

El *Máster en Mecánica del Suelo e Ingeniería Geotécnica* tiene un coste de 6.000 euros

EDICIONES DEL CEDEX



Agenda Estratégica CEDEX 2023-2025

Autoría: CEDEX

Edición en papel

Año: 2023

NIPO: 797-23-001-5

ISSN: 2952-2617

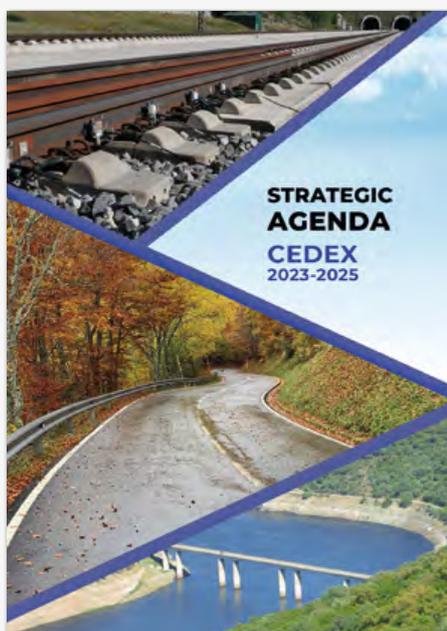
Depósito Legal: M-928-2023

Edición *online* en español

NIPO: 797-23-002-0

ISSN: 2952-2625

La Agenda Estratégica del CEDEX es un documento que recoge las principales líneas de actividad para el horizonte temporal 2023-2025, y cómo a través de ellas el organismo contribuye a dar solución a los principales retos sociales, económicos, ambientales y tecnológicos que debemos abordar en los próximos años. La Agenda define asimismo la misión y visión del CEDEX.



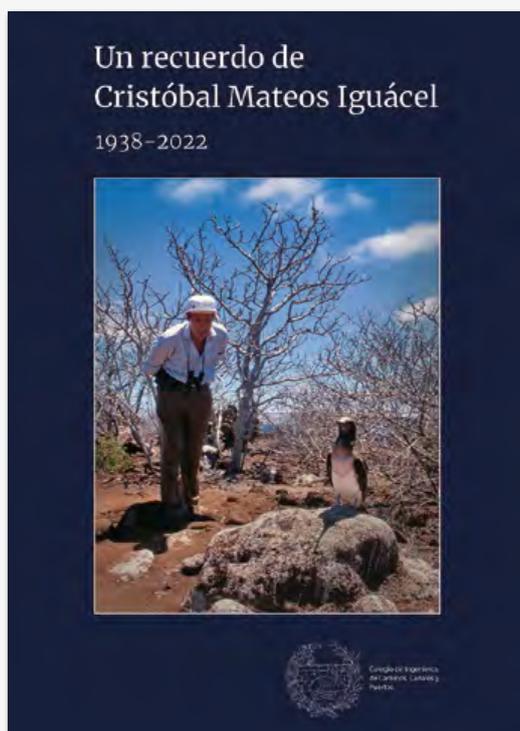
Strategic Agenda CEDEX 2023-2025

Edición *online* en inglés

NIPO: 797-23-003-6

ISSN: 2952-2633

The CEDEX Strategic Agenda is a document that lays out the main lines of activity for 2023-2025, and how, through them, the agency contributes to providing solutions to the main social, economic, environmental, and technological challenges that we must address in the coming years. The Agenda also defines CEDEX's mission and vision.



Un recuerdo de Cristóbal Mateos Iguácel. 1938-2022

A Tribute to Cristóbal Mateos Iguácel. 1938-2022

Autoría: Varios autores

Coedición con el Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Madrid

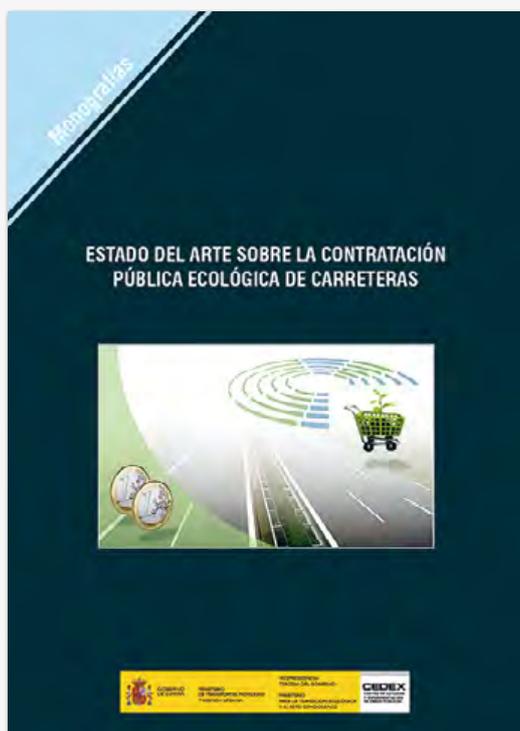
NIPO: 797-22-006-8

Año: 2022

PVP: Publicación gratuita no disponible

Esta publicación rinde homenaje a la figura de Cristóbal Mateos Iguácel, fallecido en mayo de 2022. En primer lugar, matemático y profesor que fue durante muchos años en la Escuela de Madrid. En segundo lugar, el ingeniero hidráulico que desde el CEDEX aplicó sus inmensos conocimientos matemáticos para la construcción de elementos auxiliares de presas y otras obras hidráulicas. En esta fase de su vida profesional, destaca la especial importancia del The International Association for Hydro-Environment Engineering and Research, donde estableció fuertes vínculos en Latinoamérica. Deseamos que esta publicación, que editamos con mucha emoción y afecto en el Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, contribuya a preservar la memoria de la trayectoria de Cristóbal Mateos Iguácel y que su ejemplo nos sirva de inspiración a todos.

This publication pays tribute to the figure of Cristóbal Mateos Iguácel, who died in May 2022. First of all, he was a mathematician and teacher who worked for many years at the Madrid School of Civil Engineers. Second, the hydraulic engineer who, within CEDEX, applied his immense mathematical knowledge to the construction of auxiliary elements for dams and other hydraulic works. In this phase of his professional life, it should be highlighted the International Association for Hydro-Environment Engineering and Research, where he established strong links with Latin America. We hope that this publication, which we publish with great emotion and affection at the College of Civil Engineers, contributes to preserving the memory of the career of Cristóbal Mateos Iguácel, making his example serve as an inspiration to all of us.



Estado del Arte sobre la Contratación Pública Ecológica de Carreteras. M-144

State of the Art on Green Public Procurement Process for Roads. M-144

Autoría: Marcos Perelli Botello, Laura Parra Ruiz, Lidia Hipólito de Gregorio y Mónica Laura Alonso Plá

Edición en papel

ISBN: 978-84-7790-646-9

Año: 2022

PVP: 25 €

Edición online

ISBN: 978-84-7790-647-6

PVP: 15 €

Esta monografía CEDEX constituye una compilación y análisis detallado de todos los aspectos relacionados con la Contratación Pública Ecológica de Carreteras (planes, estrategias, normativa, pliegos específicos, etc.) hasta la actualidad y en los distintos ámbitos territoriales (nacional e internacional). Incluye también una selección de los principales criterios y ámbitos medioambientales clave que pueden utilizarse en el proceso de Contratación Pública Ecológica de Carreteras, así como la forma más adecuada de hacerlo.

This CEDEX monograph presents both a compilation and a detailed, updated analysis of all aspects related to the Green Public Procurement Process for Roads (programmes, schemes, regulations, bid specifications, etc.), and at national and international levels. It also includes a selection of the main criteria and key environmental fields that can be used in the Green Public Procurement Process for Roads, as well as the most appropriate way to do so.



Caracterización geológica, mineralógica, fisicoquímica y geotécnica de los materiales del sondeo de investigación Geotécnica de Julián Camarillo SIG-1. M-145

Geological, Mineralogical, Physico-Chemical and Geotechnical Characterization of the Materials from the Julian Camarillo SIG-1 Geotechnical Experimental Borehole. M-145

Autoría: Rebeca Hinojal, Cristina de Santiago, José M^a Fernández y Francisco Javier Luque

Edición en papel

ISBN: 978-84-7790-650-6

Año: 2022

PVP: 25 €

Edición online

ISBN: 978-84-7790-651-3

PVP: 15 €

El Laboratorio de Geotecnia del CEDEX abordó entre 2009 y 2010 un proyecto de investigación denominado "Sondeos de Investigación Geotécnica SIG CEDEX" consistente en perforar una serie de sondeos en las instalaciones de este organismo en la calle Julián Camarillo de Madrid con el fin de poner a punto, validar, calibrar y experimentar con los diferentes equipos de investigación geofísica y geotécnica *in situ* con los que cuenta el laboratorio. En este contexto de fomento de la investigación interna, se evidenció la necesidad de conocer con precisión la naturaleza geológica y las características de los materiales extraídos de los sondeos, su variación en profundidad y la posible correlación, entre las características estudiadas y los parámetros de comportamiento geotécnico, determinados *in situ* y en laboratorio. Esta monografía ofrece los resultados obtenidos a partir de diversas técnicas con el fin de obtener una exhaustiva caracterización geológica, mineralógica, fisicoquímica y geotécnica de los materiales atravesados por uno de los sondeos del proyecto, denominado SIG-1 (Sondeo de Investigación Geotécnica -1).

*Between 2009 and 2010, the Geotechnical Laboratory of CEDEX undertook a research project called "CEDEX Geotechnical Research Boreholes," consisting of drilling a series of boreholes at the facilities of this agency at Julián Camarillo Street (Madrid) in order to set up, validate, calibrate, and experiment with the different geophysical and geotechnical field research equipment available at the laboratory. In the context of promoting internal research, the need to precisely know the geological nature and characteristics of the materials extracted from the boreholes, their variation in depth, and the possible correlation between the characteristics studied and the geotechnical behaviour parameters, determined *in situ* and in laboratory, was evidenced. This document shows the results obtained by means of different techniques to achieve an exhaustive geological, mineralogical, physico-chemical, and geotechnical. characterization of the materials crossed through by one of the project's boreholes, called "SIG-1: Geotechnical Experimental Borehole -1").*



LA VÍA ROMANA DE NUMANCIA A OSMA Y SU ABRAZO CON LA AUTOVÍA A-11

Isaac Moreno Gallo
(coordinador)

La vía romana de Numancia a Osma y su abrazo con la autovía A-11

The Roman Road from Numancia to Osma and its Embrace with the A-11 Motorway

Coordinador: Isaac Moreno Gallo

Autores de los contenidos: Isaac Moreno, Juan Pedro Benito, Carlos Taberero, José Luis Fernández, Darío Álvarez, Miguel Ángel de la Iglesia, Sagrario Fernández y Carlos Rodríguez

ISBN: 978-84-7790-648-3

Año: 2022

PVP: 20 €

Este libro explica las características técnicas y constructivas de las carreteras de los romanos, así como la importancia cultural y patrimonial que la conservación de estas carreteras tiene para la sociedad. Se describe también la investigación llevada a cabo en el tramo de calzada afectado por la autovía A-11, la desafección y la definitiva promoción de 7 km de la misma.

This book explains the technical and constructive characteristics of Roman roads, as well as the cultural and heritage importance that the conservation of these roads has for society. It also describes the research carried out on the stretch of road affected by the A-11 motorway, the disaffection, and the definitive promotion of 7 km of it.



CEDEX: Actividades Técnicas y Científicas, 2021

Autoría: CEDEX

Edición en papel y online

NIPO: 797-20-013-4

NIPO: 797-20-015-5

ISSN: 1697-3555

Año: 2022

PVP: Gratuito

Esta publicación describe las actividades que se han llevado a cabo por el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) durante 2021.

Incluye también una parte general con información y datos relativos a todo el organismo, y un conjunto de apartados para cada uno de los centros y laboratorios del CEDEX en los que se recogen las temáticas abordadas y el objeto de los trabajos realizados.

El último apartado, por su parte, presenta una selección de proyectos realizados en 2021 para los que se adjunta una breve descripción.



CEDEX: Technical and Scientific Activities, 2021

Edición en papel y online

NIPO: 797-20-022-0

NIPO: 797-20-023-6

ISSN: 1697-3555

Año: 2022

PVP: Gratuito

This report describes the activities carried out by the Centre for Studies and Experimentation in Public Works (CEDEX) during 2021.

It also contains a general section with information and data related to the agency as a whole, and a set of sections for each of CEDEX's centres and laboratories, which include the topics addressed, and the object of the works accomplished.

The last section, for its part, presents a selection of projects undertaken in 2021, for which a brief description is attached.

El Museo ICO inaugura la exposición 'Pablo Palazuelo. La línea como sueño de arquitectura', dedicada al polifacético artista madrileño

- La muestra (del 15 de febrero al 7 de mayo de 2023) reúne las 12 obras y los 12 proyectos donde se hace más visible la aproximación a la arquitectura de sus investigaciones geométricas
- Muchas de las piezas expuestas se muestran por primera vez al público en el Museo ICO
- Realizada en colaboración con la Fundación Pablo Palazuelo, también cuenta con obras de las Colecciones ICO, del MNCARS y del Museo Thyssen-Bornemisza

El Museo ICO presenta *Pablo Palazuelo. La línea como sueño de arquitectura**, una exposición que plantea por primera vez un recorrido a través de la carrera de este pintor, escultor y grabador español, máximo representante de la abstracción geométrica del siglo XX, a través de una selección de obras y proyectos que ilustran la intensa relación establecida entre la arquitectura y su producción artística.

La exposición se estructura en **nueve ámbitos**, que abarcan desde la etapa formativa y las primeras influencias del artista, hasta sus diseños de mobiliario para el entorno doméstico o las grandes obras concebidas para la escala urbana, pasando por otras en las que el énfasis recae en referencias a laberintos, tránsitos, cerramientos, límites y vidrieras. En total, **se exponen 12 obras y 12 proyectos entre dibujos, croquis, acuarelas, maquetas y esculturas**, custodiados por la Fundación Pablo Palazuelo, muchos de los cuales han permanecido inéditos hasta su catalogación por parte de los comisarios y se muestran por primera vez al público.

La muestra está **comisariada por Teresa Raventós-Viñas y Gonzalo Sotelo- Calvillo**, autor este último de una tesis doctoral, *Análisis de la geometría de Pablo Palazuelo desde la visión del arquitecto*, que,



Pablo Palazuelo, *Templo de Niké Apteros. Atenas, 1934* Lápiz y acuarela sobre papel 74 x 51,5 cm. Trabajos de arquitectura en la "City of Oxford School of Arts and Crafts", Oxford (1933-36) © Fundación Pablo Palazuelo, 2023.

defendida en la Universidad Politécnica de Madrid en 2015, sirve de base para el recorrido expositivo. En palabras de Sotelo, el método creativo de Palazuelo "guarda una asombrosa similitud con la metodología



Pablo Palazuelo, *Sin título, 1949-1950* Gouache sobre papel 19,5 x 56 cm. Decorados para la «Sonorité jaune» de Wassily Kandinsky, París (proyecto, 1950-54). © Fundación Pablo Palazuelo, 2023.

del proyecto arquitectónico, atravesando una serie de etapas gráficas que le conducían progresivamente desde los bocetos iniciales hasta los planos más definidos de materialización". Este particular método le llevó, por ejemplo, a usar papeles de croquis, cuya transparencia le permitía superponer diferentes bocetos mientras desarrollaba sus obras, un sistema que aprendió en su formación inicial como arquitecto en la City of Oxford School of Arts and Crafts, donde estudió entre 1933 y 1936.

Pablo Palazuelo. La línea como sueño de arquitectura ha sido posible gracias, fundamentalmente, a la Fundación Pablo Palazuelo, propietaria y custodia del grueso de las obras que la conforman. Pero también a las Colecciones ICO, el Museo Nacional Centro de Arte Reina Sofía y el Museo Nacional Thyssen-Bornemisza, que con sus préstamos han contribuido a enriquecer, aún más si cabe, el discurso expositivo. Esta muestra se inscribe en la línea que el Museo ICO viene desarrollando desde hace algunos años, en la que se profundiza en facetas poco conocidas de artistas presentes en las Colecciones ICO y de la que ya formaron parte *Jaume Plensa. Ópera, teatro y amigos* (2005), *Susana Solano. Proyectos* (2007) o *Guillermo Pérez Villalta. Artífice* (2008).

Catálogo

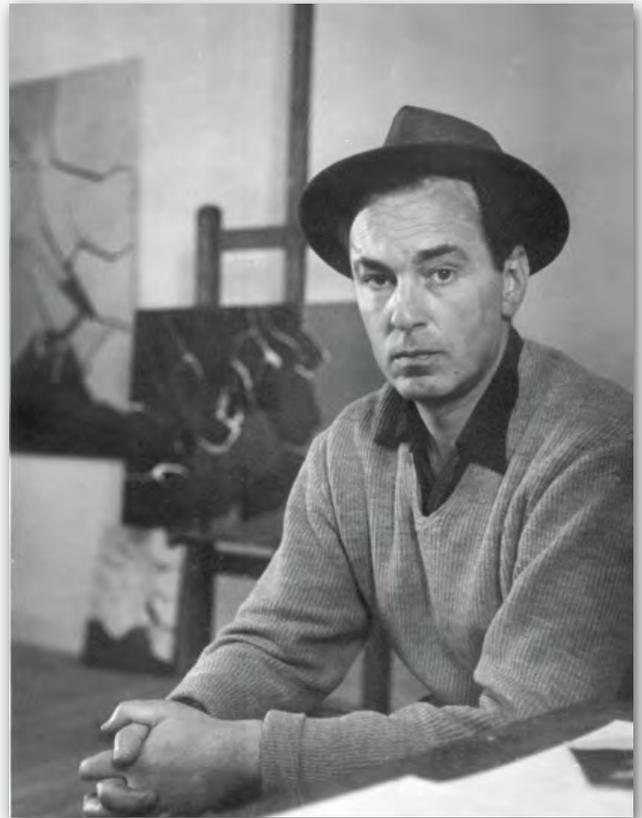
La exposición cuenta con un magnífico **catálogo** que, editado por la Fundación ICO en colaboración con Ediciones Asimétricas, reproduce con gran calidad todas las obras presentes en la exposición y profundiza en el tema de la misma mediante los textos de Gonzalo Sotelo-Calvillo, Teresa Raventós-Viñas, Ángela García de Paredes e Ignacio García Pedrosa, Pere Casanovas, Mariano Bayón y Ramón Ayerza.

Sobre Pablo Palazuelo

Nacido en Madrid en 1915, Pablo Palazuelo fue pintor, grabador y escultor, y es una de las figuras clave del arte español de la segunda mitad del siglo XX. Truncada su formación como arquitecto en la City of Oxford School of Arts and Crafts a causa de la Guerra Civil española, su obra artística pasó de lo figurativo a lo abstracto, influenciada por Paul Klee y el misticismo oriental.

A lo largo de su trayectoria, Palazuelo expuso en las galerías más prestigiosas de Francia, Basilea, Estados Unidos y España, tanto pinturas como grabados y esculturas, disciplina que empezó a desarrollar plenamente a partir de 1977. Su obra se encuentra en museos como el Carnegie Museum of Art de Pittsburgh, donde expuso regularmente; la Fundación Juan March; el Museo Nacional de Arte Moderno de París; el Museo de Arte Abstracto Español de Cuenca; el Museo Guggenheim de Bilbao, el MNCARS de Madrid, el MACBA, el Solomon R. Guggenheim Museum de Nueva York o las Colecciones ICO.

Pablo Palazuelo recibió la Medalla de Oro al mérito en las Bellas Artes (1982), el Premio Nacional de Artes Plásticas ex aequo con Cristina Iglesias (1999) y el Premio Velázquez (2004). Falleció en Madrid en 2007.



Pablo Palazuelo junto a los óleos *Accord Noir* (1958) e *Imagination du Temps I* (1958) Galapagar, c. 1958. Fotografía: Enrique Palazuelo. © Fundación Pablo Palazuelo, 2023.

Sobre el Museo ICO

El Museo ICO, el único en nuestro país dedicado específicamente a la difusión de la arquitectura como disciplina artística y cultural, se inauguró el 28 de marzo de 1996, destinándose, en un primer momento, a la exhibición de las colecciones permanentes del Instituto de Crédito Oficial. Desde 2012, la Fundación ICO ha retomado la línea centrada en el ámbito de la arquitectura y del urbanismo para la realización de sus exposiciones temporales. En torno a ellas, el Museo ICO desarrolla actividades didácticas dirigidas al público infantil y juvenil, y visitas guiadas y acompañadas, dirigidas al público adulto, con la intención de profundizar y completar su discurso.

*La exposición forma parte del programa de la sexta edición del **Madrid Design Festival** (7 de febrero - 9 de abril).

Pablo Palazuelo. La línea como sueño de arquitectura

Del 15 de febrero al 7 de mayo de 2023

Museo ICO

C/ Zorrilla, 3, 28014 Madrid

Tel.: 91 420 12 42

Horarios: De martes a sábado: de 11.00 a 20.00 hrs

Domingo y festivos: de 10.00 a 14.00 hrs

Cerrado: lunes

www.fundacionico.es

Entrada gratuita

CaixaForum Madrid imprime el futuro en la exposición 'PRINT3D. Reimprimir la realidad'

- La exposición *Print3D. Reimprimir la realidad*, que permanecerá en el centro hasta finales de mayo (del 7 de febrero al 21 de mayo de 2023), invita a viajar hacia el futuro y permite profundizar en esta tecnología rápida, sencilla, económica y versátil con mucho camino por recorrer
- Desde hace más de 30 años, las impresoras 3D han abierto un nuevo mundo de posibilidades que antes eran totalmente impensables. Con una buena idea, un ordenador y material para imprimir, estas impresoras han empezado a abrir nuevas puertas en ámbitos como la sanidad, el arte o la arquitectura
- La exposición permite explorar el impacto de la impresión 3D en nuestra sociedad, así como preguntarse hasta qué punto transformará nuestro día a día y qué supondrá su uso, cada vez más extendido, para el sistema productivo actual. Se trata de una transformación que, con toda seguridad, motivará la reformulación de conceptos fundamentales como la autoría, la producción o la accesibilidad. ¿Estamos ante una verdadera revolución tecnológica?
- Más de 200 piezas impresas con esta tecnología colaborativa integran la muestra. Algunas de ellas son tan singulares como el vestido *kinematics*, de Nervous Systems, una pieza icónica generada de forma personalizada a partir de las medidas reales de una persona y que se imprime de una sola pieza. Los visitantes podrán comprobar *in situ* cómo les quedaría esta prenda en el probador virtual de la exposición

PRINT3D. Reimprimir la realidad. La muestra invita a realizar un viaje por el presente y el futuro de la impresión 3D, una tecnología que parece no tener límites. En ella, los visitantes podrán descubrir algunas de sus propiedades, como la versatilidad o la rapidez, y conocer el alcance de la revolución impulsada por el uso de esta tecnología.

PRINT3D. Reimprimir la realidad es la segunda exposición de divulgación del conocimiento científico que acoge esta temporada CaixaForum Madrid. La muestra analiza las posibilidades que nos ofrece la impresión 3D, una tecnología esencialmente colaborativa y que supone nuevos retos en nuestro modelo productivo ya que gracias a ella diversas personas desde diferentes lugares del mundo pueden diseñar y compartir sus diseños de un producto que después se podrá imprimir localmente.

A lo largo del recorrido, se podrán visualizar múltiples aplicaciones prácticas en las que ya se está utilizando la impresión 3D, algunas de ellas, en los campos de la medicina, la moda, la construcción o el arte. Esta tecnología es cada día más accesible y capaz de producir a escalas y tamaños hasta hace unos años impensables. Y, aunque parezca ciencia ficción, ya es una realidad la bioimpresión de tejidos vivos y se habla de la futurible construcción de la primera vivienda lunar.

Dividida en ocho ámbitos temáticos, a través de los cuales se podrá explorar la impresión 3D *in situ*, así como plantear escenarios de un futuro que cada vez se antoja más cercano, la muestra está compuesta por más de 200 piezas impresas en 3D, acompañadas de elementos audiovisuales y de múltiples módulos didácticos para que los visitantes descubran este mundo y profundicen en él. En las horas de mayor afluencia de público entre semana y en fin de semana, CaixaForum Madrid dispondrá de un servicio de educadores en sala para resolver dudas sobre la exposición.

Impresión 3D. ¿Cómo funciona?

La idea de imprimir objetos tridimensionales se ha hecho realidad gracias a la impresión 3D, que hace posible crear infinidad de objetos físicos a partir de un modelo digital. Los visitantes podrán comprender, a través de varios módulos, la diferencia que existe entre trabajar con dos dimensiones usando los ejes X e Y, y trabajar con tres, X, Y y Z. También comprobarán cómo se pasa de la idea o los datos a la impresión, las distintas formas de imprimir y los diferentes materiales que se pueden usar.

La impresión 3D se basa en la fabricación aditiva, que consiste en ir agregando material capa a capa para producir las piezas. La popularización de esta tecnología ha permitido la aparición de diversos materiales con sus propias características y adaptados a usos concretos, lo cual ha abierto un mundo de posibilidades para la ciencia, la industria..., y por supuesto, para las personas creativas con acceso a esta tecnología. Basta con dar rienda suelta a la imaginación para crear desde objetos cotidianos de pequeño formato hasta piezas de grandes dimensiones.



La muestra dedica un ámbito a hablar del uso de esta tecnología para la mejora de la salud.



Mobiliario hecho con arena (lámparas) y en PETG reciclado (asiento).



El mundo de la automoción también puede beneficiarse de la impresión 3D. En la foto, una motocicleta con gran parte de su estructura impresa con esta técnica.

CaixaForum Madrid exhibe en este ámbito una impresora Black Belt, que utiliza una cinta transportadora de fibra de carbono que le permite imprimir piezas de largo formato, así como producir en serie piezas individuales.

Print3D. Reimprimir la realidad

Del 7 de febrero al 21 de mayo de 2023

CaixaForum Madrid

P.º del Prado, 36, 28014 Madrid

Tel.: 91 330 73 00

Horarios:

De lunes a domingo y festivos: de 10 a 20 hrs

<https://caixaforum.org/es/madrid>

<https://fundacionlacaixa.org/es/>

Entrada general:

6 euros (incluye la entrada al museo y a las exposiciones).

Entrada gratuita para clientes de CaixaBank

La Fundación del Canal de Isabel II presenta la muestra 'Somos Agua'

La Comunidad de Madrid, a través de la Fundación del Canal de Isabel II, presenta la exposición *Somos Agua* (del 17 de diciembre de 2022 al 30 de junio de 2023), que busca poner de manifiesto la importancia del agua para la vida, para nuestra cotidianidad y para inspirar el cambio necesario para afrontar el mayor reto del siglo XXI: su conservación y gestión sostenible.

A través de una mirada ambiental, cultural e histórica, la exposición no solo ha querido destacar el valor del agua, sino que lo ha vinculado también a la labor esencial que realiza la empresa pública Canal de Isabel II como gestora del ciclo integral del agua en Madrid.

Somos Agua es una exposición concebida para entretener, sorprender y concienciar, dirigida a todos los públicos y con una mirada puesta en el público familiar y en estudiantes de todas las etapas. *Somos Agua* propone una mirada 360º al entorno del agua, con aproximaciones divulgativas en los contenidos técnicos y científicos, a través de instalaciones, imágenes y audiovisuales cautivadores. En el discurso expositivo se hace especial hincapié en una aproximación positiva, fundamentada en

las posibilidades de la innovación y la tecnología para lograr un futuro más sostenible.

Agua de principio a fin: 12 secciones desde el río hasta el mar pasando por la ciudad

La exposición sigue el ciclo natural e integral del agua a través de un recorrido que simula un río que fluye desde una tormenta inicial hasta su desembocadura en el mar.

Las primeras secciones hablan de **la riqueza del agua en la naturaleza**. Cómo el agua crea vida y paisajes naturales y culturales formando diversos ecosistemas. Cómo configura los paisajes naturales subterráneos, como las cuevas y los acuíferos, o los superficiales como los lagos y lagunas, los ríos y los mares. Incluso los entornos más áridos, que, aunque casi invisible también tienen agua y, por tanto, vida. Y cómo el agua configura los paisajes culturales, ya que el hombre siempre ha creado civilizaciones y culturas en torno al agua.

Además, en estas primeras secciones se muestran los diferentes estados del agua (sólido en glaciares, líquido en lagos y ríos y gaseoso en los géiseres) y sus propiedades. A través de varios microscopios se comprueba cómo el agua es vida y biodiversidad sea cual sea su condición: dulce, salada o en entornos extremos, y que siempre que hay agua hay vida.

El agua es fuente de energía. La exposición presenta los diferentes tipos de energía y explica cómo aprovechando la fuerza del agua es posible generar energías limpias que sustituyan el empleo de combustibles fósiles que emiten gases de efecto invernadero, responsables en gran medida del cambio climático. En la agricultura es un elemento esencial, supone el 80 % del consumo de agua, por eso se han ido desarrollando los sistemas de riego desde las acequias tradicionales a los riegos localizados o de precisión para reducir y optimizar su consumo.

La parte central de la exposición (secciones 6 y 7) comienza con la presentación del agua como **bien escaso y preciado cuyo uso se debe gestionar optimizando su consumo**, y asegurando su calidad como garantía de unos ecosistemas sanos. El visitante se sumerge en estas secciones en el desconocido y fascinante viaje del agua desde las montañas a las ciudades y vuelta a los ríos. La gestión del **ciclo integral del agua** requiere un perfecto engranaje de una complejísima red de infraestructuras que permite traer el agua a las casas e industrias con la calidad adecuada para ser consumida y, posteriormente, tratada y devuelta a los cauces de los ríos; incluso para regenerar parte de ella y reutilizarla para el riego y baldeo de nuestras ciudades.

A través de las infraestructuras e innovaciones de **Canal de Isabel II**, una empresa referente en el sector, se presenta una mirada global al ciclo integral del agua. Desde su captación en los embalses, el agua es potabilizada, almacenada y conducida a la ciudad, los hogares y la industria. El agua residual (agua ya utilizada) es conducida por el alcantarillado hasta las instalaciones depuradoras (EDAR), para ser depurada y vertida de nuevo a los cauces de los ríos con la calidad adecuada. La red de alcantarillado también recoge el agua de las lluvias que no filtra el terreno, y para ello son clave instalaciones como los tanques de tormentas y el empleo de pavimentos porosos o sistemas urbanos de drenaje sostenible en las ciudades.

La sección 7 de la exposición se centra en el **consumo responsable del agua** en tres subapartados: en la ciudad, en los hogares y en la industria. Además del uso público en ciudad, en fuentes y limpieza, esta sección presenta cómo fluye el agua dentro de los edificios y acerca al visitante a mecanismos térmicos como la vaporización, que se sigue realizando desde la antigüedad. En los hogares se pueden realizar múltiples gestos para reducir el consumo tanto en el aseo diario, como a través de la elección de los electrodomésticos. Este último subapartado también explica la huella hídrica de nuestra alimentación, a través de los alimentos de las neveras y despensas. El tercer subapartado muestra, a través de una mirada histórica, cómo el **agua ha sido y es un elemento central en la industria**, desde la utilización de la noria o la invención de la máquina de vapor hasta hoy. La industria aprovecha la fuerza y el valor del agua con innovaciones constantes para diseñar procesos y elaborar productos que consumimos.

En la exposición también está presente el **agua que no vemos** y que está en los productos que consumimos y en los procesos que los producen; es la llamada **huella hídrica**. O aquella presente en lugares de gran aridez como los desiertos, donde el ingenio del hombre permite obtenerla con interesantes innovaciones. Esta sección acoge, además, esa gran cantidad de agua que contiene el cuerpo humano y que da nombre a la exposición.

El agua también es soporte para el transporte de mercancías y pasajeros. Nos acercamos a conocer **los puertos**, así como las principales rutas fluviales y marítimas que permiten desarrollar actividades comerciales y turísticas cada vez más orientadas hacia un mayor respeto por el entorno.

En los **laboratorios** (sección 8) se analiza el agua como elemento: asociado al origen de la vida, los átomos que conforman la molécula de agua; sus principios físicos (como el de Arquímedes o el de los vasos comunicantes) o químicos. El control de la calidad del agua en todas las fases del ciclo integral, incluido el proceso de depuración, para ser devuelta al medio natural o para obtener otros productos que pueden ser utilizados para generar vida, como fertilizantes.

En la recta final de la exposición tiene lugar el espacio para los **retos que suponen los efectos del cambio climático**. Tanto por la escasez de agua, que requiere una gestión sostenible, como por su exceso, que provoca eventos extremos como las inundaciones, la variación de las lluvias y la subida del nivel del mar. Los efectos del cambio climático ya se



Maqueta del depósito elevado de Santa Engracia, propiedad de Canal de Isabel II.

están notando y por eso, tanto para combatirlo como para adaptarnos a él, se están tomando medidas, y la gestión sostenible del agua es hoy más importante que nunca.

La **política internacional** en materia de agua tiene marcados unos objetivos claros para los que se establecen medidas e iniciativas que permiten conservar el agua en condiciones ambientalmente óptimas, y procurando que todas las personas tengan acceso a agua potable y a sistemas de saneamiento. La Unión Europea está alineada con los objetivos internacionales de desarrollo sostenible, pero con objetivos y medidas más concretas, puesto que tiene capacidad para emitir normativa que obliga directamente a los Estados miembros.

Acabando el recorrido del río el visitante se adentra en las profundidades marinas, dentro de un gran túnel LED, el más largo de Europa, de más de 30 metros. **El mar** tiene una entidad propia de tal magnitud, su importancia para el planeta es tal, que requiere una sección completa y espectacular. Además de mostrar su belleza, destaca su importancia como fuente de alimento dada su riqueza de flora y fauna, como medio de transporte y medio de vida para muchas personas. Se incide sobre la necesidad de su adecuada conservación, protegiendo la buena salud de sus ecosistemas, evitando la sobreexplotación de sus recursos, desarrollando cultivos marinos sostenibles, y por supuesto eliminando los vertidos al mar como los acumulados en inmensas islas de plásticos. La **gestión sostenible de los ríos y los mares** es absolutamente esencial para su conservación y para el desarrollo de actividades como la pesca. Técnicas alternativas como la **acuicultura** sostenible contribuyen a evitar la sobrepesca y a alimentar a la creciente población mundial.

El visitante termina el recorrido conociendo la historia de **Canal de Isabel II** y sus grandes hitos en el desarrollo de la Comunidad de Madrid. Esta empresa líder en la gestión sostenible del agua presenta al público varios de sus proyectos más innovadores.

Por su parte, el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX-MITMA) colabora en esta exposición con el préstamo de tres maquetas pertenecientes a la Colección de Maquetas de Historia de las Obras Públicas de CEHOPU, cuyos fondos forman parte de distintas exposiciones temporales en el ámbito del patrimonio de la obra pública.

Somos Agua permanecerá abierta hasta el 30 de junio de 2023 en la Fundación Canal, en su sala del madrileño Paseo de la Castellana nº 214

La **tarifa general** de acceso está entre los 2 y los 8 euros, y contempla descuentos y entradas gratuitas para diferentes colectivos como familias numerosas, usuarios del Abono Joven, grupos, menores de edad, personas con discapacidad, mayores de 65 años o personas en situación de desempleo. Asimismo, hay precios especiales para grupos escolares

Las entradas están disponibles en:
www.fundacioncanal.com/somosagua/

NORMAS DE REDACCIÓN

INTRODUCCIÓN

Ingeniería Civil (IC) se define como una publicación científico-técnica especializada en ingeniería civil y medioambiental. Es editada con periodicidad cuatrimestral por el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), organismo público de referencia en los campos de la ingeniería civil, la edificación y el medioambiente, al que han estado ligados eminentes ingenieros españoles como Eduardo Torroja o José A. Jiménez Salas. IC cuenta con un sistema de revisión por pares que permite la evaluación externa de todos los artículos científico-técnicos recibidos, y acepta para su publicación artículos sobre trabajos relacionados con las siguientes áreas temáticas y tecnológicas de actividad: Aguas, Estructuras y Materiales, Puertos y Costas, Transporte y Movilidad, Carreteras, Sostenibilidad, Transición Ecológica, Geotecnia, Interoperabilidad Ferroviaria, Patrimonio Histórico de Obras Públicas, Economía Circular y Transferencia de Conocimiento. En este sentido, la revista realiza una labor fundamental como vehículo de difusión y transferencia tecnológica dentro de las áreas de conocimiento mencionadas.

PRESENTACIÓN Y ESTRUCTURA DE LOS ARTÍCULOS

Los originales, que deberán ser inéditos, se harán llegar por correo electrónico a la dirección ingcivil@cedex.es, haciendo constar en el asunto del mensaje que se trata de un artículo presentado para su publicación en la revista IC. Ésta, por su parte, se compromete a adoptar una decisión sobre la publicación de originales en el plazo de seis meses, reservándose el derecho de publicación por un plazo de dos años de acuerdo con las necesidades de la misma.

Los originales seguirán la siguiente estructura: (1) página de título; (2) introducción que defina la finalidad del estudio; (3) objetivos perseguidos; (4) metodología utilizada; (5) resultados obtenidos y su significación; (6) conclusiones principales; (7) agradecimientos; y (8), referencias.

La página de título, a su vez, ha de incluir los siguientes componentes: (a) título en español e inglés; (b) nombre completo del autor/es así como su filiación académica y lugar de trabajo; (c) dirección de correo electrónico y postal del correspondiente autor/a de contacto o corresponding author; (d) resumen (español)/abstract (inglés), con una extensión entre 150-250 palabras; y (e), palabras clave (español) y keywords (inglés), con 5 términos como mínimo y 10 como máximo.

Los originales habrán de ir en español y su extensión, incluyendo las correspondientes imágenes, será entre 15 y 40 páginas, tamaño A4, en formato Word, a doble espacio y usando Times New Roman con un tamaño de fuente de 12 puntos. En casos excepcionales podrán publicarse artículos de mayor extensión, cuya aceptación quedará sujeta al criterio del Comité de Redacción de la revista.

Las figuras, cuyo objeto es simplificar y/o complementar el texto, se ordenarán según el orden de aparición en el texto, siendo identificadas con la expresión “figura 1”, “figura 2”, etc. Todas las figuras deberán llevar un pie de imagen o descriptor que ha de ser simple y claro. Más importante de todo, las figuras habrán de enviarse en los formatos propios de imagen (tiff., jpg., png., gif., etc.) para conformar los estándares de calidad plástica y gráfica establecidos por la revista. La resolución de las imágenes, para posterior impresión en papel, ha de ser 300 ppp (píxeles por pulgada), aunque 240 también se puede considerar un valor aceptable.

En el caso de las tablas, se seguirá el mismo criterio de numeración que en las figuras, utilizando la expresión “tabla 1”, “tabla 2”, etc. Todas las tablas llevarán un título en cursiva que ha de ser breve y explicativo.

Los títulos de los ejes de coordenadas y cualquier elemento de texto que se incorpore a las figuras y gráficos deben estar realizados en la misma fuente y tamaño (preferentemente en Minion Pro).

Por su parte, es conveniente que las fórmulas y ecuaciones incluidas en el artículo sean realizadas en Cambria Math con un tamaño de fuente de 9 puntos. En todo caso, y al igual que las figuras y tablas, dichas fórmulas/ecuaciones habrán de ir numeradas correlativamente, poniendo el número de orden entre corchetes [1], [2], etc.

Las citas de libros y artículos aparecerán preferentemente en el cuerpo del texto y no a pie de página. Las referencias que se inserten dentro del texto incluirán, entre paréntesis, el autor/res y el año que corresponda.

En lo que se refiere a la citación de fuentes bibliográficas o de cualquier otro tipo, se recomienda la utilización de un programa de gestión bibliográfica para insertar las referencias (EndNote, Mendeley, etc.), utilizando el estilo Harvard-APA (American Psychological Association: <https://www.apa.org/>). Sirvan a este respecto los ejemplos que siguen a continuación:

Libros

Dean, E.T.R. (2010). *Offshore Geotechnical Engineering*. London: Thomas Telford Publishing.

Fernández Casado, C. (2013). *Historia del puente en España. Puentes romanos*. Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC).

Jiménez Salas, J.A., de Justo, J.L., y Serrano, A. (1981). *Geotecnia y Cimientos II. Mecánica del Suelo y de las Rocas*. Madrid: Editorial Rueda.

Capítulos de libros

Richardson, W.J. (1995). Documented Disturbance Reactions. En W.J. Richardson, C.R. Greene, C.I. Malme y D.H. Thomson (eds.), *Marine Mammals and Noise* (pp. 241-324). San Diego, CA (EE UU): Academic Press.

Artículos de revistas

Casagrande, A. (1965). Role of the Calculated Risk in Earthwork and Foundation Engineering. Terzaghi Lecture. *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division*, 91(4): pp. 1-40.

Dapena, E., Alaejos, P., Lobet, A., y Pérez, D. (2011). Effect of Recycled Sand Content on Characteristics of Mortars and Concretes. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23(4): pp. 414-422.

Tamarit, J., e Iglesias, J.I. (2016). Los sistemas de señalización en España: el ERTMS y el ASFA Digital. *Ingeniería Civil*, nº 182, pp. 27-39.

Ponencias, congresos, conferencias y seminarios

Stive, M.J.F., De Schipper, M.A., Luijendijk, A.P., Ranasinghe, R.W.M.R.J.B., Van Thiel de Vries, J.S.M., Aarninkhof, S., Van Gelder-Maas, C., De Vries, S., Henríquez, M., y Marx, S. (2013). The Sand Engine: A Solution for Vulnerable Deltas in the 21st Century? En *Coastal Dynamics: 7th International Conference on Coastal Dynamics, Arcachon, France, 24-28 June, 2013* (pp. 1537-1546). Bordeaux (France): Bordeaux University.

Tesis no publicadas

Toledo, M.A. (1997). *Presas de escollera sometidas a sobrevertido: estudio del movimiento del agua a través de la escollera y de la estabilidad frente al deslizamiento en masa* [tesis doctoral inédita]. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid (UPM).

Recursos electrónicos

A la referencia correspondiente según el tipo de documento (libro, artículo, etc.), se añadirá a continuación, si se estima oportuno, el número de identificación digital (DOI, por sus siglas en inglés), que es un identificador único y permanente para las publicaciones electrónicas, y si no lo tuviese se consignará la URL que corresponda poniendo a continuación “Disponible en: <http://xxxxx>”

García de Arquer, F.P. et al (2021). Semiconductor quantum dots: Technological progress and future challenges. *Science*, 373, eaaz8541. DOI: 10.1126/science.aaz8541

United States Environmental Protection Agency (EPA) (2018). *Guide to Purchasing Green Power*. Washington, DC (EE UU): EPA. Disponible en: <https://www.epa.gov/greenpower/guide-purchasing-green-power>



AGENDA ESTRATÉGICA

**CEDEX
2023-2025**



Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas

DIRECCIÓN

Directora: **Áurea Perucho Martínez**
C/ Alfonso XII, 3 y 5 - 28014 Madrid
Tel.: (+34) 91 335 75 14/15

SECRETARÍA DEL CEDEX

Secretaria: **Sonia Fernández-Pacheco Rodríguez**
C/ Alfonso XII, 3 y 5 - 28014 Madrid
Tel.: (+34) 91 335 75 01

GABINETE DE RELACIONES EXTERNAS Y
ACTIVIDADES COMERCIALES

Jefe: **Miguel González Portal**
C/ Alfonso XII, 3 y 5 - 28014 Madrid
Tel.: (+34) 91 335 74 90

CENTRO DE ESTUDIOS HIDROGRÁFICOS

Director: **Federico Estrada Lorenzo**
Pº Bajo de la Virgen del Puerto, 3 - 28005 Madrid
Tel.: (+34) 91 335 79 00

CENTRO DE ESTUDIOS DE PUERTOS Y COSTAS

Director: **José María Grassa Garrido**
C/ Antonio López, 81 - 28026 Madrid
Tel.: (+34) 91 335 77 00

CENTRO DE ESTUDIOS DEL TRANSPORTE

Directora: **Laura Parra Ruiz**
Autovía de Colmenar Viejo, PK. 18,2 - 28760 El Goloso, Madrid
Tel.: (+34) 91 335 78 00

CENTRO DE ESTUDIOS DE TÉCNICAS APLICADAS

Director: **Francisco Javier Cachón de Mesa**
C/ Alfonso XII, 3 y 5 - 28014 Madrid
Tel.: (+34) 91 335 72 00

LABORATORIO CENTRAL DE ESTRUCTURAS Y MATERIALES

Directora: **Pilar Alaejos Gutiérrez**
C/ Alfonso XII, 3 y 5 - 28014 Madrid
Tel.: (+34) 335 74 11/13

LABORATORIO DE GEOTECNIA

Director: **Fernando Pardo de Santayana Carrillo**
C/ Alfonso XII, 3 y 5 - 28014 Madrid
Tel.: (+34) 91 335 73 43/46

LABORATORIO DE INTEROPERABILIDAD FERROVIARIA

Director: **Jorge Ignacio Iglesias Díaz**
C/ Julián Camarillo, 30 - 28037 Madrid
Tel.: (+34) 91 335 71 50

CENTRO DE ESTUDIOS HISTÓRICOS DE OBRAS PÚBLICAS Y
URBANISMO (CEHOPU)

Dolores Romero Muñoz/Ángel González Santos
C/ Alfonso XII, 3 y 5 - 28014 Madrid
Tel.: (+34) 91 335 74 56