

INGENIERÍA CIVIL

Núm.: 201/2022
ISSN: 0213-8468

Quantum
140-00-9330
CF61373PH
W 84002 9145



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE TRANSPORTES, MOVILIDAD
Y AGENDA URBANA

VICEPRESIDENCIA
TERCERA DEL GOBIERNO

MINISTERIO
PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA
Y EL RETO DEMOGRÁFICO



AGENDA
2030

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 Olivas

Pablo Mira McWilliams

Luis Pujol Terés

Rafael Jiménez Sáez

Mª Asunción Morales Hortelano

Alfredo Arroyo Puente

Dolores Romero Muñoz

Comisión Asesora

Luis Pujol Terés

José-Carlos Pacheco Díaz

Secretaría

Diana de la Lama Jiménez

Mª 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

Inserver E-Learning Factory

Tel.: (+34) 622 57 03 78 | dani@inserver.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:

Controller electronics of a Quantum

ProDrive LPS 52AT 50MB hard drive

(Fuente: Shutterstock)



Sumario

La medida de la concentración de actividad de ²²²Rn en aire en recintos cerrados

A Method for Indoor ²²²Rn Activity Concentration Measurement

Luis Pujol Terés

5

Pequeños reactores modulares: el futuro de la energía nuclear

Small Modular Reactors: The Future of Nuclear Energy

Luis Felipe Durán Vinuesa, Samantha Larriba Del Apio,

Antonio Jiménez Carrascosa

23

Análisis de la red marítima del puerto de Barcelona

Analysis of the Maritime Network of the Port of Barcelona

Íñigo López Ansorena

45

Formas rítmicas en la costa: ondas de arena y problemas en las playas

Rhythmic Formations on Coasts: Edge Waves and Beach-Related Issues

José Manuel de la Peña Olivas

57

Análisis del comportamiento lateral de pilotes

Analysis of the Lateral Behavior of Piles

Gustavo Augusto Benito, Jesús González Galindo

67

Gabinete geológico de Francisco Hernández-Pacheco.

Colección histórica de materiales pétreos para la obra pública

Geological Office of Francisco Hernández-Pacheco.

Historical Collection of Stone Materials for Public Works

Isabel Rodríguez Martín, Mauro Muñoz Menéndez, José Luis Salinas Rodríguez

91

Caminos de Innovación en Ingeniería Civil

Identiflight: La automatización en la gestión ambiental de la energía eólica

Jon Domínguez del Valle

101

Computación cuántica

Antonio Acín

105

Noticias

108

Ediciones del CEDEX

111

Normas de redacción

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

114

La revista en formato digital está disponible en:

<http://ingenieriacivil.cedex.es/index.php/ingenieria-civil>

Medio Ambiente

Líneas de actividad

Aguas Continentales y
Marinas

Costa y Mar

Contaminación Industrial y
Economía Circular

Carreteras

Ferrocarriles

Puertos y Navegación

Estructuras y Materiales

Restauración con
Soluciones Basadas en la
Naturaleza

Cambio Climático y
Calidad del Aire

.....

Fields of Activity

*Continental Water and
Seawater*

Coastlines and Sea

*Industrial Contamination
and Circular Economy*

Roadways

Railways

Ports and Navigation

Structures and Materials

Nature-Based Solutions

*Climate Change and Air
Quality*

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

CEDEX

Centro de Estudios y Experimentación
de Obras Públicas



La medida de la concentración de actividad de ^{222}Rn en aire en recintos cerrados

A Method for Indoor ^{222}Rn Activity Concentration Measurement

Luis Pujol Terés^{1*}

Resumen

El ^{222}Rn es un gas radiactivo de origen natural procedente de la desintegración radiactiva del ^{226}Ra presente en el suelo y en rocas. A través de su desintegración emite radiación alfa, siendo por ello una de las principales fuentes de exposición de radiación a la población. El ^{222}Rn es considerado cancerígeno por la Organización Mundial de la Salud (OMS), basándose en estudios epidemiológicos, siendo la segunda causa de cáncer de pulmón por detrás del tabaco. La medida de la concentración de ^{222}Rn en recintos cerrados, esto es, en los lugares de trabajo y en el interior de edificios, ha sido objeto de numerosos estudios en diferentes países que han desarrollado normativa específica y programas nacionales para evitar los daños debidos al radón.

En este trabajo se ha desarrollado un método rápido y sencillo para la medida de la concentración de la actividad de ^{222}Rn en aire utilizando un sistema detector de centelleo sólido de $\text{ZnS}(\text{Ag})$ en el interior de un vial de 20 ml de capacidad donde se recoge el gas por difusión. Después de la exposición, se cierra el vial y se mide con el espectrómetro de centelleo Quantulus 1220. Este método permite alcanzar un límite de detección de 20 Bq m^{-3} . Este valor es un orden de magnitud inferior al que se recomienda en la Directiva 2013/59/Euratom y en el Real Decreto 732/2019 donde se establece el nivel de referencia de la concentración de radón en aire en 300 Bq m^{-3} .

Palabras clave: ^{222}Rn , detector de centelleo sólido de $\text{ZnS}(\text{Ag})$, protección radiológica, detectores pasivos, medida de ^{222}Rn .

Abstract

Radon is a naturally occurring radioactive gas and its presence in the environment is associated mainly with the ^{226}Ra in rocks and soils. During the decay process, radon radiation is released in the form of alpha particles. The largest fraction of the public's exposure to natural radiation comes from ^{222}Rn . Radon is considered a known human carcinogen by the World Health Organization (WHO), according to extensive studies of exposure by human beings, and constitutes the second leading cause of lung cancer after cigarette smoking. ^{222}Rn concentration measurement in workplaces and indoor has been investigated in several countries, and national radon programmes and regulations had been introduced.

In this study, a rapid and easy indoor radon measurement technique is developed. Indoor radon concentration is monitored with 20 ml vials with a thin plastic screen of $\text{ZnS}(\text{Ag})$ scintillator detector inside. After exposure, vials were then tightly capped and measured immediately in the laboratory using a low background scintillation system (Quantulus 1220). This method can measure indoor ^{222}Rn concentration activity with a detection limit above 20 Bq m^{-3} . This value is one order of magnitude lower than that recommended by Directive 2013/59/Euratom and by Royal Decree 732/2019 that is established in 300 Bq m^{-3} .

Keywords: ^{222}Rn , $\text{ZnS}(\text{Ag})$ Alpha scintillation detector, radiation protection, passive detectors, ^{222}Rn measurement.

1. INTRODUCCIÓN

Los niveles de ^{222}Rn en aire inciden de manera directa en la salud, ya que se trata de un gas radiactivo de origen natural cuya inhalación continuada en altas concentraciones puede producir serios daños en el sistema respiratorio, llegando incluso a ser el segundo factor causante de cáncer de pulmón, por detrás del tabaco, según la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2015). En consecuencia, la exposición al ^{222}Rn en recintos cerrados, esto es, en lugares de trabajo y en el interior de viviendas, representa un riesgo de exposición a la radiación ionizante. Por ello, la medida del gas ^{222}Rn en aire está teniendo gran interés en los últimos años. A finales del año 2013 se publicó la Directiva

2013/59/Euratom por la que se establecen las normas de seguridad básicas para la protección contra los peligros derivados de la exposición a radiaciones ionizantes (EURATOM, 2013), en adelante Directiva 2013/59/Euratom.

La Directiva 2013/59/Euratom estableció la necesidad de que los Estados miembros de la Unión Europea llevaran a cabo planes de acción para reducir a medio y largo plazo el riesgo de cáncer de pulmón atribuible a la exposición al radón. Este requisito aparece en los artículos 54 (radón en los lugares de trabajo), 74 (exposición al radón en recintos cerrados) y 103 (plan de acción para el radón), y en su anexo XVIII (lista de aspectos que deberán considerarse para la preparación del plan de acción nacional destinado a hacer frente a los riesgos a largo plazo derivados de las exposiciones al radón a que se refieren los artículos 54, 74 y 103).

Sin embargo, a fecha de hoy, la Directiva 2013/59/Euratom solo se ha transpuesto parcialmente mediante el

* Email: Luis.pujol@cedex.es

¹ Doctor en Física. Centro de Estudios de Técnicas Aplicadas (CETA), del CEDEX.

Real Decreto 732/2019 por el que se modifica el *Código Técnico de la Edificación* (CTE) (Ministerio de Fomento, 2019). En el artículo 74 de dicha Directiva se obliga a los Estados miembros a establecer niveles nacionales de referencia para las concentraciones de radón en recintos cerrados (viviendas) y a adoptar medidas adecuadas para limitar la penetración del radón en los edificios. Los niveles de referencia para el promedio anual de concentración de actividad en el aire no deben superar los 300 Bq m⁻³. Este nivel ya se había recomendado previamente en la Guía 11.2 del Consejo de Seguridad Nuclear (CSN, 2012a). En consecuencia, en el Real Decreto 732/2019, se introduce una nueva exigencia básica de salubridad HS 6, de protección frente al gas radón. Además, en el apartado 3.1 del Apéndice C de dicho Real Decreto 732/2019 se establece que la estimación del promedio anual de concentración de ²²²Rn en el aire podrá efectuarse mediante detectores de tipo pasivo o activo. Adicionalmente, en este mismo apartado, se indica que las entidades de medida que proporcionen los detectores y lleven a cabo, bien su análisis, o bien el procesamiento de los registros de medida, deberán estar acreditadas de acuerdo con la norma UNE-EN ISO/IEC 17025:2017 (UNE, 2017).

Así pues, la medida del ²²²Rn en aire tiene interés desde el punto de vista de protección radiológica: protección frente al radón del aire en los lugares de trabajo y en los recintos cerrados (viviendas). El principal responsable de la concentración de radón en los recintos cerrados (viviendas) es el gas proveniente del suelo que es generado a partir de la desintegración del ²²⁶Ra presente en los suelos sobre los que se ha edificado, que puede penetrar en el volumen de aire interior a través del suelo por presión (convección) o concentración (difusión) y, en menor medida, a través de los materiales de construcción (por exhalación).

Sin embargo, además del interés que suscita la medida del ²²²Rn en el campo de la protección radiológica, existen numerosas aplicaciones de la medida del ²²²Rn en aire en diferentes campos del conocimiento. Por citar algunos ejemplos: la determinación del fondo radiactivo de los descendientes del ²²²Rn en las medidas de espectrometría gamma ya que es una contribución a la fluctuación del fondo (Banjanac *et al.*, 2014; Dragounova y Rulik, 2013; Modéc, Korun, Martelanc y Vodenik, 2012), la medida del flujo de ²²²Rn en el aire permite entender los procesos volcánicos (Torres-González *et al.*, 2019), su utilización como trazador en aguas subterráneas (Ortega, Manzano, Custodio, Hornero y Rodríguez-Arévalo, 2015) o como trazador en modelos de transporte atmosférico (IAEA, 2012) aplicado al cambio climático. Una lista más detallada puede encontrarse en el capítulo 5 del Atlas Europeo de Radiación Natural publicado por la Comisión Europea (European Commission, 2019).

En este trabajo se ha propuesto un método para la medida de la concentración de ²²²Rn en aire en recintos cerrados que puede ser utilizado en diferentes aplicaciones como la medida de radón en edificios, en lugares de trabajo o para la exhalación del radón en materiales de construcción. Entre las ventajas de esta metodología cabe destacar, una sencilla preparación y toma de muestra y una reducción en el tiempo de obtención de resultados ya que la medida se puede hacer de forma inmediata una vez recogida la muestra de aire.

En el apartado 2 se resume brevemente la evolución de la normativa sobre el ²²²Rn hasta llegar a las actuales Directivas y algunas iniciativas a nivel estatal y autonómico llevadas a cabo. En el apartado 3 se realiza una breve introducción al gas ²²²Rn, su origen y sus efectos en la salud. En el apartado 4 se describen los equipos de medida de ²²²Rn en aire utilizando la clasificación habitual en detectores pasivos y activos. En el apartado 5 se explica el aseguramiento de la calidad metrológica en la medida del ²²²Rn en España y las normas UNE aplicables y, finalmente, en los siguientes apartados se describe el método propuesto en este trabajo.

2. EVOLUCIÓN DE LA NORMATIVA Y LA INVESTIGACIÓN SOBRE EL RADÓN

Los desarrollos normativos vigentes en la actualidad para la medida del radón en aire ya empezaron en la década de los 90. La Comisión Europea publicó en 1990 la recomendación 90/143/Euratom relativa a la protección de la población contra los peligros de una exposición al radón en interiores de edificios (EURATOM, 1990). Sin embargo, no fue hasta el año 2001 en que se transpuso la Directiva 96/29/Euratom a la legislación española en el Real Decreto 783/2001 que en dicho título VII relacionaba la necesidad de controlar la exposición de fuentes naturales de radiación en actividades laborales. En particular, la protección de los trabajadores contra la inhalación de radón en lugares de trabajo tales como establecimientos termales, cuevas, minas, lugares de trabajo subterráneos o no subterráneos en áreas identificadas. El Real Decreto 783/2001 se modificó en el 2010 con el Real Decreto 1439/2010 para definir la autoridad competente responsable de requerir el cumplimiento del título VII (fuentes naturales de radiación). Finalmente, a primeros del 2012, el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) publicó la Instrucción Técnica IS-33, sobre criterios radiológicos para la protección frente a la exposición a la radiación natural en lugares de trabajo. En particular, la concentración de radón en lugares de trabajo cuya superación requeriría la adopción de medidas correctoras o dispositivos de vigilancia. Sin embargo, dejaba sin cobertura la exposición al radón en las viviendas. Este problema se solventó con la inclusión de protección del radón en recintos cerrados en la Directiva 2013/59 y su incorporación en la legislación nacional en el Real Decreto 732/2019, como se ha indicado en la introducción de este trabajo.

Además, hay que recalcar los esfuerzos realizados por el Consejo de Seguridad Nuclear (en adelante, CSN) desde hace décadas, consciente este organismo regulador de la problemática del gas ²²²Rn. El CSN ya empezó a trabajar con diferentes grupos pertenecientes a universidades y organismos españoles en la determinación de las concentraciones de radón y descendientes en el interior de los edificios de España (CSN, 2004b). Posteriormente, el CSN empezó un acercamiento a la problemática que supone habitar en espacios con excesivas concentraciones de gas ²²²Rn y a trabajar con el Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (en adelante, IETcc-CSIC) en requisitos específicos destinados a limitar y mitigar la entrada de radón en los edificios (CSN, 2010b).

Por otra parte, la obligación de poner en marcha un Plan Nacional contra el radón en España (artículo 103 de

la Directiva 2013/59/Euratom) requiere articular una serie de objetivos específicos con un amplio alcance: fomentar el cumplimiento de la legislación, implantar políticas de apoyo, coordinar iniciativas a nivel estatal, autonómico y local, transferir el conocimiento, concienciar a la población e impulsar la iniciativa privada (García-Talavera, López, Sanz, Ramos y Sánchez-Ojanguren, 2017).

A nivel estatal, el Ministerio de Sanidad ha publicado recientemente un documento titulado “Acción frente al Radón” explicando la magnitud del problema mediante la elaboración de una guía para el público recopilando información básica sobre el radón y los riesgos que conlleva para la salud (Ministerio de Sanidad, 2021a). Por otra parte, el IETcc-CSIC, bajo la supervisión de la Dirección General de Agenda Urbana y Arquitectura del Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana (MITMA), ha elaborado una guía de rehabilitación frente al radón (IETcc, 2021). Esta guía, junto a otras guías de ayuda para el diseño de soluciones de protección frente al radón se pueden descargar en el enlace <https://www.codigotecnico.org/Guias/GuiaRadon.html>. Asimismo, cabe señalar diferentes proyectos de investigación financiados por el Ministerio de Ciencia e Innovación, como el proyecto Radoncero (BIA 2014-58887-R), o por proyectos de I+D financiados por el CSN sobre “Generación y validación de un modelo numérico para la predicción de la entrada de radón en edificios en base a una caracterización del terreno y a una definición tipológica de la construcción” (publicado en el BOE de 25 de febrero 2021).

A nivel autonómico, también se han publicado recientemente algunas guías de protección frente al gas radón como, por ejemplo, por la Junta de Extremadura (Junta de Extremadura, 2020a, 2020b) o por el Gobierno de Canarias (Gobierno de Canarias, 2020).

En el ámbito laboral, conviene señalar el papel de los agentes sociales en la divulgación de los riesgos de la exposición a altas concentraciones de ^{222}Rn en los lugares de trabajo. Así como las guías publicadas para los delegados de prevención (ISTAS-CCOO, 2019; UGT, 2019).

Finalmente, no hay que olvidar que tanto la web del CSN (<https://www.csn.es/radon>) como el Laboratorio de Radiactividad Ambiental de la Universidad de Cantabria (LaRUC) (<http://elradon.com/>) ofrecen información específica sobre el radón.

3. INTRODUCCIÓN AL ^{222}Rn

3.1. Origen y fuentes del ^{222}Rn

El radón es un gas incoloro, inodoro e insípido que procede de las tres series radiactivas naturales (^{238}U , ^{235}U y ^{232}Th) que se encuentran en las rocas de la corteza terrestre. El ^{222}Rn procede de la serie radioactiva natural del ^{238}U (figura 1) y los otros isótopos del radón menos comunes (^{219}Rn y ^{220}Rn) proceden de las series radiactivas naturales que tienen como elemento de cabecera el ^{235}U (^{219}Rn o actinón) o el ^{232}Th (^{220}Rn o torón). Desde un punto de vista epidemiológico y de salud pública, el ^{222}Rn es el más relevante, pues comprende un 80 % de todo el radón en la naturaleza. El ^{222}Rn procede directamente de la desintegración del ^{226}Ra y se desintegra en otros elementos. El ^{222}Rn tiene un periodo de semidesintegración de 3,8232 (8) días y emite radiación alfa en su descomposición a ^{218}Po .

El ^{222}Rn emana de los granos de las rocas del subsuelo a través de los poros del terreno y, posteriormente, es liberado a la atmósfera desde el suelo por exhalación (figura 2). Por ello los niveles de ^{222}Rn dependen de la naturaleza y características del terreno. En algunas regiones ricas en ciertos materiales como granitos o arcillas con elevados contenidos en ^{238}U presentan niveles muy elevados de dicho gas.

Posteriormente, a través de la difusión de sus átomos y por movimientos de convección, debido a las diferencias de presión existentes entre el gas de suelo y el interior y exterior de las viviendas, es liberado fácilmente en aquellas zonas más próximas al suelo, motivo por el cual se suelen alcanzar niveles más elevados de dicho gas, principalmente en aquellas zonas con poca ventilación o subterráneas

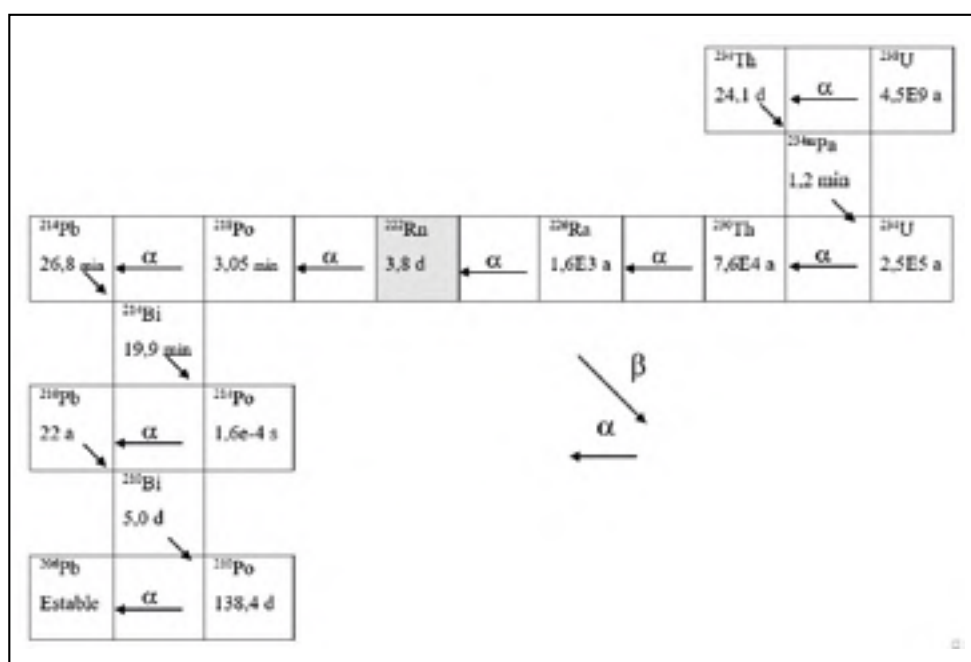


Figura 1. Cadena natural de desintegración del ^{238}U .

como bodegas, cuevas o sótanos (Poncela, García y Merino, 2006).

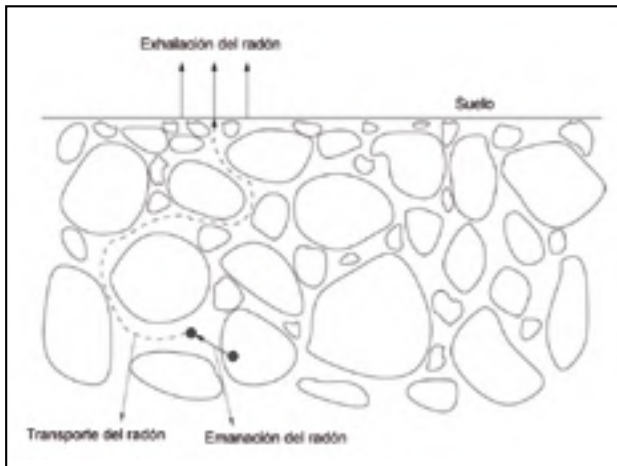


Figura 2. Procesos que conducen a la emisión de radón a la atmósfera (Ishimori, Lange, Martin, Mayya y Phaneuf, 2013).

Otra fuente de ^{222}Rn en el interior de viviendas, son los materiales de construcción empleados, como el hormigón y cemento que pueden estar fabricados por materias primas con mayor o menor contenido de ^{226}Ra , por lo que son liberadas ciertas cantidades de ^{222}Rn a través de las paredes (figura 3).

Por último, como el ^{222}Rn se disuelve en el agua y se libera también con facilidad, ésta puede llegar a ser una fuente significativa de ^{222}Rn en aquellos casos en los que la misma proceda de pozos profundos y sin depuración previa (Poncela *et al.*, 2006).

La concentración de la actividad de ^{222}Rn pueden experimentar importantes fluctuaciones temporales debido a diversos factores, por ejemplo, la ventilación de los recintos, la temperatura, la humedad del aire e incluso la presión atmosférica.

En resumen, las principales vías de entrada de radón en espacios cerrados (viviendas, lugares de trabajo y los edificios de uso público) son el suelo, los materiales de construcción y el agua corriente (García-Talavera *et al.*, 2017).

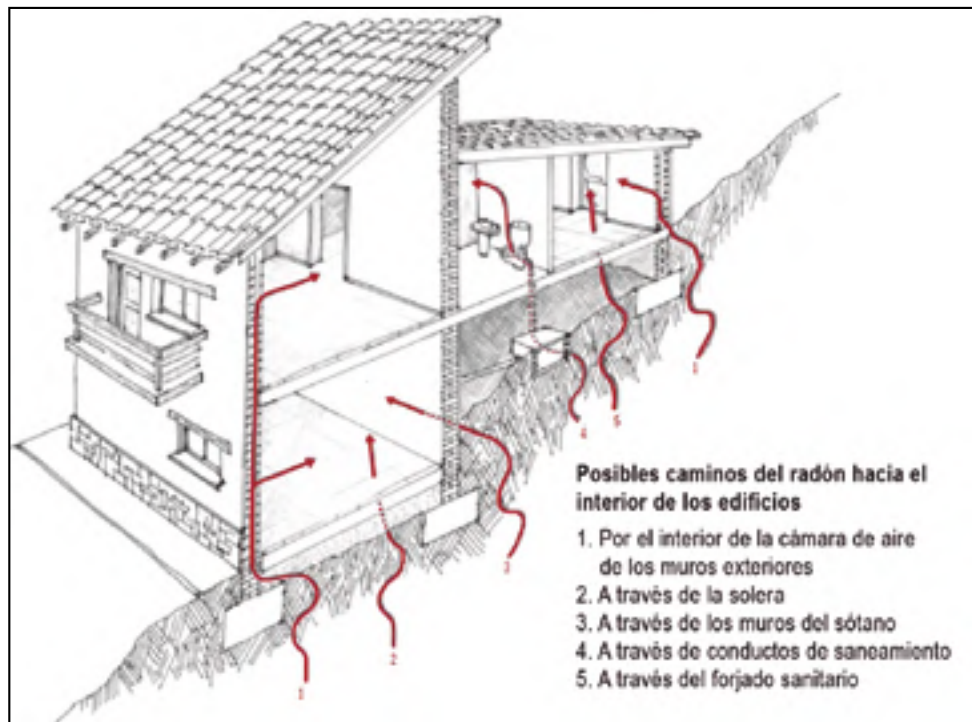


Figura 3. Posibles caminos del ^{222}Rn hacia el interior de los edificios (CSN, 2010b).

3.2. El ^{222}Rn en la salud

El ^{222}Rn es considerado cancerígeno por la Organización Mundial de la Salud (OMS), de acuerdo con la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC) y la Agencia de Protección Ambiental (EPA) de EEUU, que lo clasifican como cancerígeno del grupo 1 (CSN, 2010b). Advierten que el principal efecto adverso derivado de la inhalación de ^{222}Rn y, en especial, de sus productos de desintegración es el riesgo de contraer cáncer de pulmón, siendo la segunda causa detrás del tabaco (CSN, 2010b; OMS, 2015).

Al penetrar en un espacio cerrado, el ^{222}Rn se acumula aumentando su concentración. La inhalación de este gas puede llegar a generar cáncer de pulmón debido a que la

radiación que se produce de la desintegración del mismo y de sus descendientes emisores alfa y beta de corto periodo de semidesintegración (^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi y ^{214}Po) en el interior de nuestro organismo, es capaz de alterar el ADN de los tejidos pulmonares (CSN, 2010b). Así pues, los elementos verdaderamente dañinos son los denominados descendientes alfa de corto periodo de semidesintegración del ^{222}Rn , esto es, el ^{218}Po y el ^{214}Po , que tienen periodo de semidesintegración mucho menor y que al ser inhalados se depositan en el tracto respiratorio y emiten radiación alfa en cantidades comparativamente mucho más elevadas que el ^{222}Rn (Ministerio de Sanidad, 2021b; Samet, 1989). La energía emitida por las partículas alfa del ^{218}Po y el ^{214}Po es de 6,1 y 7,8 MeV, respectivamente, mientras que la energía emitida por las partículas alfa del ^{222}Rn es de 5,6 MeV.

4. EQUIPOS PARA MEDIR EL ^{222}Rn EN AIRE

Los equipos para medir el ^{222}Rn en aire se suelen clasificar en detectores pasivos y detectores activos tomando como criterio el muestreo (European Commission, 2019; IAEA, 2015; OMS, 2015; Papastefanou, 2002). Los dispositivos pasivos no requieren corriente eléctrica ni una bomba para funcionar en el entorno de muestreo, mientras que los dispositivos activos requieren electricidad y permiten obtener un registro continuo de la concentración y las fluctuaciones del gas radón durante el periodo de medición.

Otro aspecto importante, al abordar las mediciones de ^{222}Rn , es entre pruebas a corto y a largo plazo (Quindos, Fernandez y Soto, 1991). Teniendo en cuenta la duración de las medidas, hay tres tipos de mediciones (European Commission, 2019; Pantelic *et al.*, 2019; Papastefanou, 2002): 1) mediciones puntuales o instantáneas, en las que el radón es muestreado en un intervalo de tiempo muy corto (por ejemplo, minutos); 2) mediciones en continuo, en las que la concentración de ^{222}Rn es monitorizada de forma continua y cada periodo de tiempo (minutos u horas); y 3), mediciones integradas en las que el radón se mide y se promedia durante un largo periodo de tiempo (días o meses). En este caso la mayoría de los equipos son pasivos. Esta clasificación es clave ya que la concentración de radón, por ejemplo, en recintos cerrados tiene importantes variaciones diarias y estacionales (Tobar y Pujol, 2014). Así pues, una prueba de ^{222}Rn a corto plazo puede proporcionar una primera indicación de la concentración media de ^{222}Rn , pero no tiene en cuenta la elevada variación temporal del ^{222}Rn en interiores, lo que ocasiona que las mediciones a corto plazo resulten poco fiables para la mayoría de las aplicaciones (OMS, 2015).

En consecuencia, la selección del tipo de equipo para la toma de muestra (pasivo o activo) y el periodo de medición (medición instantánea, integrada a largo plazo o en continuo) dependerá de la aplicación y de los objetivos que se persigan en dicha medida.

A continuación, vamos a detallar algunos de los equipos habituales siguiendo la clasificación según sean detectores pasivos o detectores activos.

4.1. Detectores pasivos

Este tipo de detectores no requieren suministro eléctrico. Los más habituales son los detectores de trazas nucleares de estado sólido, los detectores de carbón activado y las cámaras iónicas de electreto. La mayoría de las mediciones de las concentraciones de ^{222}Rn en las viviendas se han hecho con detectores de trazas nucleares de estado sólido o con detectores de carbón activado (IAEA, 2015). A continuación, se describen las principales características de estos equipos (European Commission, 2019; IAEA, 2015; OMS, 2015).

4.1.1. Detectores de trazas nucleares de estado sólido

Los detectores de trazas nucleares de estado sólido consisten, por lo general, en un detector plástico situado dentro de un pequeño contenedor. El ^{222}Rn entra en el

contenedor por difusión, emitiendo partículas alfa, que dejan huellas de daños en el detector plástico. Para determinar la concentración de actividad de ^{222}Rn a la que ha estado expuesto el detector, el plástico se trata con una solución cáustica que graba las trazas del daño causado por la radiación de partículas alfa. Las trazas pueden contarse automáticamente bajo un microscopio o con un escáner de diapositivas. El plástico sensible de uso común es el CR-39 (Janik, Hasan, Bossew y Kavasi, 2021).

4.1.2. Detectores de carbón activado

Los detectores de carbón activado se denominan a veces, más formalmente, dispositivos de captación de carbón activado. Consisten en un pequeño recipiente con carbón activado que adsorbe el ^{222}Rn presente en el aire; el carbón está cubierto por una pantalla y, generalmente, por una barrera de difusión. Después del uso, el detector se sella y se devuelve al laboratorio para la medida de las emisiones de radiación gamma producidas por la progenie de periodo de semidesintegración corto del ^{222}Rn , que son el ^{214}Pb y el ^{214}Bi .

4.1.3. Cámaras iónicas de electreto

Una cámara iónica de electreto contiene un disco de electreto de politetrafluoroetileno (PTFE) que se ha cargado positivamente, hasta un potencial que suele ser del orden de 700 V. El electreto mantiene esta carga electrostática, que se neutraliza gradualmente a medida que las partículas alfa emitidas por el ^{222}Rn y su progenie ionizan el aire de la cámara. La medición de la carga del electreto al comienzo y al final del periodo permite calcular la concentración del ^{222}Rn . Al hacer este cálculo, debe tenerse en cuenta la ionización causada por la radiación natural de fondo. Además, la respuesta no es lineal, en términos de voltaje.

4.2. Detectores activos

Estos detectores necesitan suministro eléctrico. Algunos de uso común son (European Commission, 2019): cámaras de ionización, contadores proporcionales, tubos Geiger-Müller, celdas de Lucas, centelleadores, detectores de estado sólido de semiconductor, entre otros. A continuación, vamos a describir los dos tipos de dispositivos más utilizados: los dispositivos de integración electrónicos (DIE) y los Monitores Continuos de Radón (MCR).

4.2.1. Dispositivos de integración electrónicos (DIE)

Son dispositivos activos muy compactos, que funcionan a pilas y son fácilmente transportables. En general, consisten en una cámara de difusión de reducidas dimensiones en cuyo interior se encuentra un detector de semiconductor de partículas alfa (detector de silicio de estado sólido) que detecta y cuenta las emisiones del radón y sus productos de desintegración (Junta de Extremadura, 2020a). Por las reducidas dimensiones de la cámara de difusión, cuando las concentraciones de radón son moderadas a menudo se necesitan tiempos de integración prolongados (más de

dos días) para obtener una lectura estadísticamente estable. La humedad ambiente elevada puede afectar a la medición. En el caso de varios DIE de uso habitual no existen posibilidades de calibración periódica.

4.2.2. Monitores continuos de radón (MCR)

Existen varios tipos de MCR disponibles en el mercado, que emplean diferentes tipos de sensores como células de centelleo, cámara de ionización y detectores de silicio de estado sólido. Los MCR recogen el aire que analizan mediante una pequeña bomba o dejando que se difunda hacia el interior de una cámara sensora.

Entre los MCR más utilizados se encuentran el Alpha-GUARD PQ2000 PRO (Saphymo GmbH, Alemania) que tiene una cámara de ionización donde el radón entra por difusión, el RAD7 (Durrige Company, Inc.) y los detectores alfa RTM 2200 y EQF 3220 (Sarad, Alemania), ambos detectores de semiconductor con una cámara de electrodeposición (Shahrokh, Burghel, Fábán y Kovács, 2015; Tamakuma *et al.*, 2021). El RAD7 requiere que la humedad en el interior de la cámara de detección sea inferior al 10 %, por lo que el aire que entra en el detector debe pasar a través de una columna de desecante (drierita) que absorbe la humedad.

5. ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD METROLÓGICA

5.1. Laboratorios acreditados en la medida de radón en aire

Una pieza importante de la medida del gas radón en aire es garantizar la fiabilidad de las mediciones que tanto en el ámbito de cumplimiento obligatorio como en el voluntario se hagan en las viviendas y lugares de trabajo. En aras de esta fiabilidad, el CSN publicó en 2010 la Guía de Seguridad 11.01 (CSN, 2010a). En ella se establecían los requisitos fundamentales que debían cumplir los laboratorios y servicios de medida de radón en aire. Estos incluían requisitos generales relativos a la gestión, basados en la norma ISO/IEC 17025, y requisitos técnicos específicos a la medida de radón. La Guía 11.01 se completó con otra específica sobre la metodología a seguir en los estudios de exposición al radón en los lugares de trabajo: la Guía 11.4 (CSN, 2012b).

Garantizar una medida correcta de radón en el aire de los locales habitables de un edificio y en los lugares de trabajo es crítico para garantizar la salud de la población. De este modo, el Real Decreto 732/2019, por el que se modifica el Código Técnico de Edificación (CTE), incorpora la exigencia de que los laboratorios que realicen dicha medida deben estar acreditados por ENAC según la norma UNE-EN ISO/IEC 17025, ya que solamente los laboratorios acreditados aportan la máxima fiabilidad en la validez de sus resultados (ENAC, 2020). La acreditación permite que un laboratorio pueda demostrar que utiliza métodos y procedimientos técnicamente válidos y controlados, cuenta con los equipos e instalaciones necesarios, dispone de personal con los conocimientos técnicos y la experiencia adecuados, y desarrolla su actividad bajo un estricto control de calidad. Los laboratorios acreditados por ENAC en la actualidad para realizar este tipo de ensayos se presentan en la tabla 1.

Tabla 1. Laboratorios acreditados en el ámbito de la radiación natural. Medida de ^{222}Rn en aire

Laboratorio	Acreditación nº
CYE Control y Estudios S.L.	284/LE2630
LABS & TECHNOLOGICAL SERVICES AGQ, S.L.	305/LE1322
Universidad de Cantabria. Laboratorio de Radiactividad Ambiental (LARUC)	1204/LE2219
Universidad de Santiago de Compostela (USC). Laboratorio de Radón de Galicia	1352/LE2399
Universidad Politécnica de Valencia. Laboratorio de Radiactividad Ambiental	620/LE1050

La norma UNE-EN ISO/IEC 17025 incluye la participación en programas de intercomparación como un requisito básico de aseguramiento de calidad. El CSN, en 2004, financió la primera campaña de intercomparación de detectores de radón en nuestro país (CSN, 2004a); y en 2011, la primera campaña de intercomparación en condiciones de campo (Gutiérrez-Villanueva *et al.*, 2013). A partir de 2020, y en el marco del Plan Nacional contra el Radón, el CSN ha empezado a organizar cada dos años una campaña de intercomparación de monitores continuos e integradores de la concentración de radón en aire utilizando la cámara de radón tipo STAR (*System for Test Atmospheres with Radon*) del Laboratorio de los Estudios de Radón (LER) del Instituto de Técnicas Energéticas (INTE) de la Universidad Politécnica de Catalunya (UPC). Los resultados de esta campaña de intercomparación se han publicado recientemente en un documento del CSN (CSN, 2022).

El aseguramiento de la calidad metrológica de la cámara de radón del INTE de la UPC se asegura siguiendo la norma IEC 61577-4:2009 (*Radiation Protection Instrumentation-Part 4: Equipment for the production of reference atmospheres containing radon isotopes and their decay products*). Esta cámara está equipada con los equipos necesarios para controlar y medir la concentración de la actividad de radón. En los años 2018-2020, la cámara de radón del INTE-UPC participó en una campaña de intercomparación con la participación de distintas instituciones europeas que ofrecen servicio de calibración de detectores de la concentración de la actividad de radón en aire con el objetivo de evaluar las prestaciones y la precisión metrológicas de cámaras de radón europeas que calibran los equipos que miden radón en aire (Beck *et al.*, 2021).

5.2. Normas de referencia para la medida del ^{222}Rn en aire

Una norma es un documento de aplicación voluntaria que contiene especificaciones técnicas basadas en los resultados de la experiencia y del desarrollo tecnológico que se elabora por consenso entre todas las partes interesadas e involucradas en la actividad objeto de la misma y que debe ser aprobada por un Organismo de Normalización reconocido, Organismo que en España es AENOR. Las normas españolas se denominan UNE (Una Norma Española) y son elaboradas por los Comités Técnicos de Normalización (CTN) de AENOR. El CTN 73 se encarga con carácter general del área denominada Industria Nuclear y su campo de actividad es la normalización de la industria nuclear en sus aplicaciones pacíficas, incluyendo combustibles,

Tabla 2. Normas vigentes en la medida de ^{222}Rn en aire

Norma	Título
UNE-EN ISO 11665-1:2019	Parte 1: Orígenes del radón y sus productos de desintegración en vida corta y métodos de medición asociados. (ISO/FDIS 11665-1:2019).
UNE-EN ISO 11665-2:2019	Parte 2: Método de medición integrada para determinar la concentración promedio de energía potencial alfa de sus productos de desintegración de vida corta. (ISO 11665-2:2019).
UNE-EN ISO 11665-3:2019	Parte 3: Método de medición puntual de la concentración de energía potencial alfa de sus productos de desintegración de vida corta. (ISO 11665-3:2020).
ISO 11665-4:2021	<i>Part 4: Integrated measurement method for determining average activity concentration using passive sampling and delayed analysis.</i>
UNE-EN ISO 11665-5:2019	Parte 5: Método de medición en continuo para la concentración de actividad (ISO 11665-5:2020).
UNE-EN ISO 11665-6:2020	Parte 6: Método de medición puntual para la concentración de actividad (ISO 11665-6:2020).
UNE-EN ISO 11665-7:2020	Parte 7: Método de acumulación para estimar la tasa de exhalación en superficie. (ISO 11665-7:2012).
ISO 11665-8:2019	<i>Part 8: Methodologies for initial and additional investigations in buildings.</i>
ISO 11665-9:2019	<i>Part 9: Test methods for exhalation rate of buiding materials.</i>
BS ISO 11665-10	<i>Part 10: Determination of diffusion coefficient in waterproof materials using activity concentration measurement.</i>
UNE-EN ISO 11665-11:2019	Parte 11: Método de ensayo para gas de suelo con muestreo en profundidad (ISO 11665-11:2016).
UNE-CEN ISO/TS 11665-12:2021	Parte 12: Determinación del coeficiente de difusión en materiales impermeables: método de medición de la concentración de actividad de un lado de la membrana (ISO/TS 11665-12:2018)

diseño, construcción y explotación de las instalaciones, en especial en sus aspectos de gestión de calidad e higiene y seguridad frente a las radiaciones. A nivel internacional es el Comité Técnico (TC) 85 de la International Organization for Standardization (ISO) el que se dedica a la Energía Nuclear y Protección Radiológica. Las normas españolas e internacionales vigentes en la medida de ^{222}Rn en aire se presentan en la tabla 2.

6. MÉTODO EXPERIMENTAL

6.1. Instrumentación

La detección de la radiación alfa emitida por el ^{222}Rn y sus descendientes emisores alfa (^{218}Po y ^{214}Po) se ha realizado con un sistema detector de centelleo sólido. Este detector consiste en una fina lámina de plástico en que en una de sus caras se han depositado el ZnS(Ag) en forma de polvo policristalino (figura 4) y un tubo fotomultiplicador. El tamaño de los cristales se sitúa entre 7-20 μm , con una densidad específica de 4,1 g cm^{-3} y con una capa monocristalina de espesor másico entre 3 y 10 mg cm^{-2} (Theodórsson, 1996). Cuando las partículas alfa emitidas por el ^{222}Rn y sus descendientes emisores alfa inciden sobre la superficie del centelleador inorgánico de ZnS(Ag) , se emiten

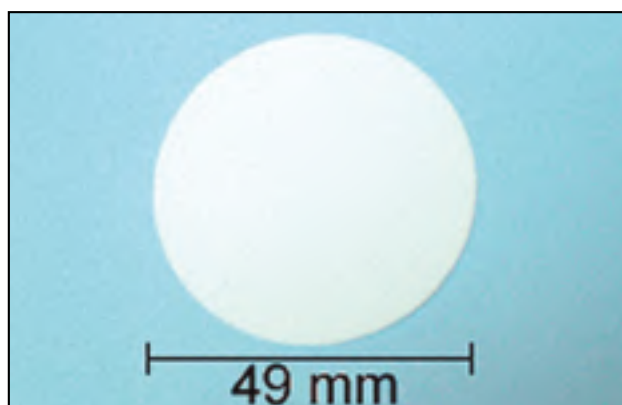


Figura 4. Láminas de plástico del centelleador sólido inorgánico de ZnS(Ag) .

fotones que son detectados por un tubo fotomultiplicador que los convierte en una señal eléctrica.

Las láminas de plástico en la que se ha depositado el ZnS(Ag) , se introducen en el interior de un vial, cubriendo la totalidad de la pared lateral interna. En los detectores se corta un segmento para que quepan dentro del vial y cubran la máxima superficie de las paredes laterales interiores (figura 5). La manipulación del disco de ZnS(Ag) se hace con sumo cuidado de forma que no se vea afectado por el corte y posterior doblado al introducirlo en el vial de centelleo. Los viales se cierran con el tapón y no se vuelven a abrir hasta su uso para la caracterización del fondo o para su medida en un ambiente con ^{222}Rn . Además, tal como se detalla en el apartado 7.2, una parte crítica en esta técnica es la caracterización del fondo del vial una vez se han introducido en su interior las dos láminas de ZnS(Ag) . Tal como se describe en dicho apartado aquellos viales que se encuentren fuera del intervalo de control son descartados para su uso en la medida del ^{222}Rn .

Los viales con las láminas de plástico de ZnS(Ag) en su interior se exponen en un ambiente con ^{222}Rn que se introduce en el vial por difusión. Una vez transcurrido el tiempo de exposición el vial se cierra. Los fotones emitidos por el ZnS(Ag) al interactuar los emisores alfa del gas ^{222}Rn y sus descendientes, que están en el interior del vial, son



Figura 5. Vial de polietileno teflonado con dos láminas de ZnS(Ag) en su interior. Se observa en el exterior: el tapón para cerrar el vial y una de las láminas antes de introducirla en el vial.

detectados por los tubos fotomultiplicadores de un sistema de medida de centelleo. En este trabajo se ha empleado un espectrómetro de centelleo Quantulus 1220 de PerkinElmer (figura 6), que dispone de dos tubos fotomultiplicadores detectores que convierten la señal luminosa emitida por el centelleador sólido de ZnS(Ag) en señales eléctricas.

Como equipo de referencia para realizar la calibración del método propuesto (ver apartado 7.3) se ha empleado el AlphaGUARD PQ 2000PRO (Saphymo GmbH, Alemania). Este equipo es un monitor continuo de radón que consiste en una cámara de ionización que permite la medida en continuo de la concentración de actividad de ^{222}Rn en aire por difusión (figura 7). Las medidas en modo difusión se pueden programar en intervalos de 10 o 60 minutos.



Figura 6. Espectrómetro de centelleo Quantulus 1220 de PerkinElmer utilizado para realizar la medida de los viales con las láminas de ZnS(Ag) en su interior una vez expuestos en un ambiente con ^{222}Rn .



Figura 7. Equipo AlphaGUARD PQ 2000PRO para medidas en continuo de ^{222}Rn . Este equipo se ha utilizado para la calibración del método propuesto.

6.2. Materiales

Se han utilizado los siguientes materiales:

- Viales de polietileno teflonado de baja difusión de 20 cm³ de capacidad nominal, modelo 6000477 (PerkinElmer).
- Láminas de plástico de ZnS(Ag) de 49,1 mm de diámetro, modelo EJ-440 (Eljen Technology).

6.3. Método propuesto para la Medida de ^{222}Rn en aire

El método propuesto en este trabajo para la medida del ^{222}Rn en aire en un recinto cerrado (lugares de trabajo o viviendas) consiste en la exposición durante 4 horas de un vial abierto donde en su interior se han introducido previamente las finas láminas de plástico de ZnS(Ag). El gas radón entra por difusión en el interior del vial abierto. Una vez transcurrido el tiempo de exposición, se coge el tapón y se cierra el vial con fuerza. El volumen de gas radón recogido corresponde con la capacidad máxima del vial. Los viales utilizados son de polietileno teflonado de baja difusión por lo que el radón atrapado en el vial no se puede escapar una vez cerrado. Finalmente, para determinar la concentración de actividad de ^{222}Rn en aire, el vial se mide con el equipo de centelleo Quantulus 1220 de PerkinElmer. Este equipo dispone de 2 tubos fotomultiplicadores que detectan los fotones que emiten las láminas del centelleador inorgánico de ZnS(Ag) al interactuar las partículas alfa emitidas por el ^{222}Rn del aire y sus descendientes con dicho centelleador.

Para la puesta a punto del método hay que tener en cuenta diferentes factores, como pueden ser: el número de finas láminas de ZnS(Ag) que se colocan en el interior del vial (1 o 2), la caracterización del fondo y la calibración (determinación de la eficiencia). Finalmente, el método es utilizado en diferentes ambientes (recintos cerrados) y validado con una cámara de radón de referencia. En consecuencia, en el apartado 7 se detallan los estudios realizados y en el apartado 8 se presentan y discuten los resultados.

7. ESTUDIOS REALIZADOS

7.1. Selección del número de láminas de ZnS(Ag)

Se estudió el número de láminas de ZnS(Ag) que se debían introducir en el interior del vial. Con una lámina no se cubre toda la superficie interior lateral, pero si se ponen dos láminas aumenta la superficie de detección, pero también puede aumentar el fondo. En consecuencia, para realizar este estudio se expusieron viales abiertos en un ambiente con ^{222}Rn durante 24 h utilizando viales con una lámina y viales con dos láminas. Transcurrido ese tiempo se cerraron y se midieron en el detector de centelleo Quantulus 1220 (6 ciclos de 360 minutos). Las pruebas se realizaron por duplicado. La elección de la mejor configuración se determinó utilizando la figura de mérito (*FM*) definida como:

$$FM = \frac{C^2}{B} \quad [1]$$

donde, *C* son el número de cuentas por minuto de la muestra, expresadas en cpm y *B* son el número de cuentas por minuto de fondo, expresadas en cpm.

7.2. Caracterización del fondo

La caracterización del fondo radiactivo de un equipo de medida es necesaria cuando se realizan medidas de radiactividad ambiental. Este fondo puede tener distintas contribuciones: radiación cósmica, radiación ambiental, radiación intrínseca del material detector, o interferencias como puede ser ruido electrónico o la quimioluminiscencia que se produce al interaccionar la luz del ambiente con el material centelleante. Por otra parte, el fondo es una magnitud de entrada en el cálculo de la concentración de actividad de la muestra con lo que su determinación es necesaria. En consecuencia, es necesaria la caracterización previa del fondo radiactivo para cada vial antes de utilizarlo para su medida.

En este apartado se realizan tres estudios para la caracterización del fondo:

- Determinación del fondo de los viales utilizados (apartado 7.2.1). Se evalúa la manera óptima de preparación de los viales que se van a utilizar para medir el fondo. Hay que caracterizar el valor del fondo para cada vial y una vez utilizados hay que volverlos a medir para comprobar si se pueden reutilizar. Por este motivo, determinar la forma óptima de su preparación es requisito para el desarrollo de esta nueva metodología.
- Estudio de la evolución temporal del fondo en distintos viales con el objetivo de estudiar la estabilidad del fondo para la reutilización de los viales una vez caracterizado su fondo (apartado 7.2.2).
- Determinación de los parámetros de control del fondo de los viales para su reutilización en un gráfico de control (apartado 7.2.3).

7.2.1. Determinación del fondo de los viales utilizados

Se estudiaron tres métodos distintos para preparar los viales utilizados en las medidas. Este aspecto es crítico ya que el límite de detección de la técnica propuesta depende del valor del fondo de cada vial y es necesaria la caracterización del fondo de cada vial antes de utilizarlo en la medida del ^{222}Rn en aire. En todos los casos se utilizaron viales con dos láminas de ZnS(Ag) en su interior. Los métodos estudiados para preparar los viales utilizados fueron:

- Método 1. Limpieza del interior del vial mediante aire forzado utilizando un ventilador.
- Método 2. Exposición del vial a niveles muy bajos de radón en un ambiente exterior donde los niveles de radón son menores. La exposición se realizó en una azotea externa del laboratorio con sombra. Los tiempos de exposición fueron de 2 horas (método 2a) y 4 horas (método 2b).
- Método 3. Preparación de un vial nuevo, sin exposición al aire forzado, ni en el exterior. Los viales se han preparado en el laboratorio.

Hay señalar que, en los métodos 1 y 3, los viales se preparan en el interior del laboratorio sin contacto con el exterior, y en el método 2, los viales se exponen en el exterior. Los viales, una vez preparados, se colocan en el interior del

detector de centelleo Quantulus 1220. Se establece un protocolo de medida de tiempo de espera de aproximadamente 6 horas entre la preparación y la medida para adaptar la temperatura del vial y para disminuir la quimioluminiscencia. Finalmente, se miden los viales durante un tiempo total de 2.160 minutos (6 ciclos de 360 minutos).

7.2.2. Estudio de la evolución temporal del fondo

Para estudiar la evolución del fondo de los viales a lo largo del tiempo para su posible reutilización, se utilizaron viales con dos detectores de ZnS(Ag) en su interior, todos ellos con la misma preparación de fondo (método 2a, ver apartado 7.2.1). Estos viales una vez cerrados se midieron de forma sistemática a lo largo de varias semanas.

7.2.3. Estudio del fondo con dos láminas de ZnS(Ag). Gráfico de control del proceso

Para establecer un criterio de control de la medida de fondos con dos láminas de ZnS(Ag), se analizaron los resultados obtenidos de todas las pruebas realizadas, para comprobar si el método se encontraba bajo control estadístico. Para ello el primer paso es el ajuste del proceso, donde se toman los datos de los fondos obtenidos y se calculan los límites de control:

$$\text{Límite Superior: } \bar{x} + 3\sigma \quad [2]$$

$$\text{Límite Inferior: } \bar{x} - 3\sigma \quad [3]$$

donde,

$\bar{x}$ es la media de los datos experimentales;

σ es la desviación típica de los datos experimentales.

La elección de un valor de 3-sigma como límite de control es debido a la alta variabilidad que tiene el fondo de radón (Dragounova y Rulik, 2013). Se construye el gráfico de control con estos límites y se representan los valores de las medidas de la variable a controlar (número de cuentas por minuto del fondo, en adelante cpm). Si los valores de las medidas se encuentran dentro de los límites de control, el proceso está bajo control estadístico. Si por el contrario algún valor aislado se encuentra fuera del intervalo de control, se elimina por tratarse de un hecho aislado (causa aleatoria) y se elabora un nuevo gráfico de control calculando los límites sin el dato eliminado.

7.3. Calibración del detector

La eficiencia de detección (calibración) del método propuesto se determinó en función del tiempo de exposición de los detectores. Las pruebas se llevaron a cabo en un almacén subterráneo del edificio del Centro de Estudios de Técnicas Aplicadas (CETA), del CEDEX. El almacén presentaba una concentración de actividad de ^{222}Rn que variaba entre 200 y 300 Bq m⁻³. Esta concentración de actividad fue suficiente para obtener una estadística de recuento adecuada. Los tiempos de exposición de los detectores (viales con las láminas de ZnS(Ag) en su interior) fueron 30 minutos, 1 hora, 2 horas, 6 horas, 10 horas y 24 horas. Las medidas se realizaron por duplicado para cada uno de los

tiempos de exposición. Durante los tiempos de exposición, en la misma ubicación, se midió la concentración de ^{222}Rn en aire utilizando el detector activo AlphaGUARD PQ 2000PRO. Las medidas con este equipo son las que se utilizaron como valor de referencia para determinar la curva de eficiencia en función del tiempo de exposición (calibración). Finalmente, se seleccionó un tiempo de exposición de 4 horas para validar la calibración del método propuesto.

7.3.1. Medida de los viales para diferentes tiempos de exposición

Una vez los viales con las dos láminas de $\text{ZnS}(\text{Ag})$ fueron expuestos a diferentes tiempos, se cerraron y se midieron en el detector de centelleo Quantulus 1220 de PerkinElmer. Se estudiaron dos protocolos de medida:

- Protocolo 1. Medida de 6 ciclos de 360 minutos.
- Protocolo 2. Medida de 4 ciclos de 360 minutos. Transcurridas 36 horas se volvieron a medir otros 4 ciclos de 360 minutos.

En el apartado 3 de este trabajo se indicó que el periodo de semidesintegración (T) del ^{222}Rn es de 3,8232 (8) días. Así pues, en el momento en que se cierra el vial, el ^{222}Rn empezará a desintegrarse siguiendo la ley de desintegración radiactiva:

$$cpm = cpm_0 e^{-\lambda t} \quad [4]$$

donde,

cpm son el número de cuentas por minuto en un tiempo t , tiempo transcurrido entre el cierre del vial y el tiempo de medida en el detector de centelleo Quantulus 1220.

cpm_0 son el número de cuentas por minuto iniciales, esto es, en el momento en que el vial se cierra.

λ es la constante de desintegración radiactiva del ^{222}Rn , esto es, $2,0984 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}$. Esta constante se calcula como:

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T} \quad [5]$$

Expresando la ecuación 4 en forma logarítmica se obtiene:

$$\ln(cpm) = \ln(cpm_0) - \lambda \cdot t \quad [6]$$

Las cpm de las medidas realizadas, para cada uno de los tiempos de exposición, se ajustaron a una función lineal para calcular las cpm iniciales (cpm_0) de ^{222}Rn en el momento del muestreo (momento en el que se cierra el vial).

7.3.2. Determinación de la eficiencia en función del tiempo de exposición de los viales (curva de calibración)

Una vez obtenidas las cpm_0 , se calcula la eficiencia de recuento, ϵ , utilizando la siguiente expresión para cada uno de los tiempos de exposición:

$$\epsilon = \frac{cpm_0 - cpm_f}{V \cdot A_{ref} \cdot 60} \cdot 10^6 \quad [7]$$

donde,

cpm_0 son el número de cuentas por minuto de la muestra al cerrar vial, tiempo inicial, en cpm.

cpm_f son el número de cuentas por minuto del fondo, en cpm.

V es el volumen útil del vial, en cm^3 . El volumen útil es de $24,08 \pm 0,21 \text{ cm}^3$.

A_{ref} es la concentración de actividad de referencia utilizando el equipo AlphaGUARD PQ 2000PRO, en Bq m^{-3} . Esta actividad es un promedio durante el tiempo de exposición.

60 es un factor de conversión de segundos a minutos.

La incertidumbre relativa de la eficiencia, $u(\epsilon)$, es la siguiente:

$$(\epsilon) = \sqrt{\left(\frac{u(cpm_0)}{cpm_0}\right)^2 + \left(\frac{u(cpm_f)}{cpm_f}\right)^2 + \left(\frac{u(V)}{V}\right)^2 + \left(\frac{u(A_{ref})}{A_{ref}}\right)^2} \quad [8]$$

donde,

$u(cpm_0)$ es la incertidumbre del número de cuentas iniciales para cada muestra, en cpm.

$u(cpm_f)$ es la incertidumbre del número de cuentas por minuto del fondo, en cpm.

$u(V)$ es la incertidumbre del volumen del vial, en cm^3 . La incertidumbre se ha determinado por la repetibilidad de la pesada de 5 viales.

$u(A_{ref})$ es la incertidumbre de la actividad de referencia del AlphaGUARD PQ 2000PRO, en Bq m^{-3} .

La representación de la eficiencia en función del tiempo de exposición permite obtener la curva de calibración. La realización de la curva de calibración es necesaria realizarla al menos una vez y verificar periódicamente la eficiencia para el tiempo de exposición seleccionado.

7.3.3. Determinación de la eficiencia para un tiempo de exposición de 4 horas

Con la finalidad de comprobar que la curva de calibración obtenida en el apartado anterior era adecuada se realizó una verificación exponiendo cuatro viales, con el fondo previamente caracterizado, en el mismo almacén subterráneo del edificio CETA con un tiempo de exposición de 4 horas. Se calculó el valor medio de la eficiencia utilizando la ecuación 7 y se comparó el resultado con el valor obtenido con la curva de calibrado obtenida en el apartado anterior.

7.4. Medida de ^{222}Rn en diferentes ambientes

Se tomaron muestras en diferentes ambientes para un tiempo de exposición de 4 horas:

1. en un almacén subterráneo situado en el edificio CETA del CEDEX,
2. en el laboratorio de medida de baja actividad del CEDEX, y
3. en un almacén en la Sierra de Gredos (ver figura 8).

El tiempo de medida en el detector de centelleo Quantulus 1220 de la caracterización previa de los fondos fue de 6 ciclos de 180 minutos y el tiempo de medida de los detectores después de la exposición fue de 4 ciclos de 360 minutos. Transcurridos 36 horas se volvieron a



Figura 8. Disposición de los cuatro viales con el centelleo sólido de ZnS(Ag) (detectores) y monitor continuo de radón AlphaGUARD PQ 2000PRO en un almacén en la Sierra de Gredos.

medir las muestras. En cada zona se tomaron 4 muestras simultáneamente (4 viales) para realizar una media del resultado.

La actividad de la concentración de actividad de ^{222}Rn , A (Bq m^{-3}), se calcula utilizando la siguiente expresión:

$$A = \frac{\text{cpm} - \text{cpm}_f}{V \cdot \varepsilon \cdot 60 \cdot f_d} \cdot 10^6 \quad [9]$$

donde,

cpm son el número de cuentas por minuto de la muestra, en cpm.

ε es la eficiencia de recuento para un tiempo de exposición de 4 horas, en tanto por uno. La eficiencia calculada a partir de la curva de calibración es $\varepsilon = 1,24 \pm 0,08$.

f_d es la corrección por desintegración, que tiene en cuenta el tiempo transcurrido entre la toma de la muestra (cierre del vial) y la medida.

El resto de los términos han sido definidos previamente.

La actividad mínima detectable se calcula utilizando el límite de detección, que es un parámetro que permite conocer si la medida de una muestra es estadísticamente diferente del fondo. El límite de detección (L_D) de una muestra se define como (Currie, 1968):

$$L_D = 2,71 + 4,65 \cdot \sqrt{\mu_B} \quad [10]$$

donde μ_B es el número de cuentas del fondo.

La actividad mínima detectable, AMD (Bq m^{-3}), se define como:

$$AMD = \frac{L_D}{V \cdot T \cdot \varepsilon \cdot 60 \cdot f_d} \cdot 10^6 \quad [11]$$

donde,

T es el tiempo de media del fondo, en minutos.

La precisión de las medidas se evaluó con el resultado de la concentración de actividad media, A_{media} , de los cuatro viales calculando el coeficiente de variación, $CV(\%)$, utilizando la siguiente expresión:

$$CV(\%) = 100 \cdot \frac{\sigma}{A_{media}} \quad [12]$$

donde,

σ es la desviación típica de las cuatro medidas;

A_{media} es la media de las cuatro medidas.

La exactitud o sesgo relativo, $ER(\%)$, se evaluó utilizando como valor de referencia el obtenido con el AlphaGUARD PQ 2000PRO, A_{ref} , utilizando la siguiente expresión:

$$ER(\%) = 100 \cdot \frac{|A_{media} - A_{ref}|}{A_{ref}} \quad [13]$$

Otro criterio de aceptación de un valor ambiental es el E_n . Este criterio tiene en cuenta la incertidumbre del valor de referencia y la incertidumbre de la medida realizada. La expresión que se utiliza es la siguiente:

$$E_n = \frac{A_{media} - A_{ref}}{\sqrt{u^2(A_{media}) + u^2(A_{ref})}} \quad [14]$$

7.5. Aseguramiento de la calidad metrológica

El Laboratorio de los Estudios de Radón (LER) de la Universidad Politécnica de Catalunya (UPC) dispone de una cámara de radón que permite generar y controlar una concentración de ^{222}Rn con precisión metrológica (ver apartado 5.1). En consecuencia, se mandaron 3 series de 4 detectores (4 viales con dos láminas de plástico de ZnS(Ag) en su interior) a la UPC para exponer los detectores a una atmósfera controlada de concentración de ^{222}Rn . Posteriormente se midieron en el detector de centelleo Quantulus 1220 del laboratorio del CEDEX. La primera serie se denominó: E1-1, E1-2, E1-3 y E1-4, la segunda serie: E2-1, E2-2, E2-3 y E2-4, y la tercera serie: E3-1, E3-2, E3-3 y E3-4. Las concentraciones de actividad de ^{222}Rn para cada serie fueron: 10000 Bq m^{-3} , 2000 Bq m^{-3} y 250 Bq m^{-3} , respectivamente. El tiempo de exposición en la cámara de radón de la UPC fue de 4 horas. Una vez terminado el tiempo de exposición los viales se cerraron completamente con el tapón para evitar fugas y se mandaron al Laboratorio del CEDEX inmediatamente para su medida. Dado el corto período de semidesintegración del radón fue necesario minimizar el tiempo transcurrido entre que se cerró el vial (fin de la exposición) y su medida.

8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

8.1. Selección del número de láminas de ZnS(Ag)

En la tabla 3 se muestran los resultados de la medida de ^{222}Rn en aire. Los datos de fondo que se han utilizado para el cálculo son un valor promedio de todos los fondos medidos con 1 y 2 láminas. Se observa que el valor del fondo es aproximadamente el doble utilizando 2 láminas de ZnS(Ag) en lugar de 1. Sin embargo, para las medidas realizadas, se observa que el número de cuentas casi es triplicado con la utilización de 2 láminas. En consecuencia, la figura de mérito (FM) empleando 2 láminas de ZnS(Ag) es, aproximadamente, un 400 % superior a la FM empleando 1 lámina de ZnS(Ag). Por tanto, el método propuesto que se va a desarrollar es utilizando 2 láminas de ZnS(Ag) en el interior del vial debido a su mayor sensibilidad en la respuesta, lo que permitirá alcanzar mejores límites de detección.

Tabla 3. Resultados de la figura de mérito (*FM*) en la medida de la concentración de ^{222}Rn en aire con 1 y 2 láminas de ZnS(Ag) en el interior del vial

Número de láminas de ZnS(Ag)	Fondo (cpm)	Cuentas (cpm)	<i>FM</i> (cpm)	<i>FM</i> (cpm) valor medio
1	0,019 ± 0,009	0,063 ± 0,005	0,21 ± 0,10	0,22 ± 0,08
		0,065 ± 0,006	0,22 ± 0,11	
2	0,035 ± 0,004	0,177 ± 0,009	0,90 ± 0,14	0,90 ± 0,10
		0,177 ± 0,009	0,91 ± 0,14	

La incertidumbre está expresada como $k=1$.

8.2. Caracterización del fondo

8.2.1. Resultados de la determinación del fondo de los viales utilizados

Los resultados del estudio de la determinación del fondo de los viales utilizados se resumen en la tabla 4.

Tabla 4. Resultados de la caracterización del fondo de los viales utilizados

Método	Procedimiento de preparación	Cuentas por minuto (cpm)
1	Extracción con aire	0,130 ± 0,008
2a	Exposición exterior 2 horas	0,048 ± 0,005
2b	Exposición exterior 4 horas	0,044 ± 0,004
3	Vial nuevo sin exposición aire	0,110 ± 0,007

La incertidumbre está expresada como $k=1$.

El fondo más bajo es obtenido mediante la exposición de los viales en el exterior del edificio. Esto es lógico, ya que la concentración de actividad de ^{222}Rn en el exterior es, en general, inferior que en los interiores. La exposición de los viales en el exterior permite desplazar por difusión el ^{222}Rn del interior del vial disminuyendo el fondo. Tanto con la exposición de 2 horas como la de 4 horas se obtienen valores estadísticamente indistinguibles y significativamente inferiores con los otros métodos. En consecuencia, para la preparación del fondo del vial se procede a exponer el vial en el exterior durante 2 horas antes de su medida. De esta forma se optimiza el tiempo de preparación de los viales y se consigue el fondo más bajo.

8.2.2. Resultados del estudio de la evolución temporal del fondo

En la tabla 5 se recogen los resultados de las medidas de la evolución temporal del fondo en un vial con 2 láminas de ZnS(Ag) .

Tabla 5. Evolución temporal del fondo para un vial con 2 láminas de ZnS(Ag)

Tiempo (semanas)	Cuentas por minuto (cpm)
1	0,044 ± 0,008
4	0,032 ± 0,008
7	0,06 ± 0,01
10	0,022 ± 0,006
30	0,025 ± 0,004

La incertidumbre está expresada como $k=2$.

Los datos del seguimiento de la evolución temporal de fondo muestran que el fondo en el interior de los viales se mantiene prácticamente estable con el tiempo, con las fluctuaciones típicas de la estadística de bajo recuento (por ejemplo, valor de $0,06 \pm 0,01$ cpm en la séptima semana). Por eso es importante la caracterización del fondo de los viales antes de utilizarlos en medidas ambientales. En consecuencia, una vez preparado un vial con 2 láminas de ZnS(Ag) se puede volver a utilizar durante un largo periodo de tiempo. Se observa que existe un fondo que no es debido al radón y que no se puede eliminar y, por lo tanto, es necesario caracterizarlo.

8.2.3. Resultados del fondo en viales con dos láminas de ZnS(Ag) . Gráfico de control del proceso

En el proceso de ajuste de control para los fondos obtenidos con 2 láminas de ZnS(Ag) en el interior del vial, se encontraron tres puntos fuera de control (0,194 cpm; 0,088 cpm; 0,080 cpm) que fueron eliminados. En la figura 9 se muestra el gráfico de control.

Los datos de los fondos medidos (en cpm, número de cuentas por minuto) se distribuyen de forma homogénea alrededor de la media ($\bar{X}$) lo que verifica que la variabilidad del proceso se debe a causas aleatorias. Por ello se considera que el procedimiento de medida de fondo empleado se encuentra bajo control estadístico. El límite superior (L_{sup}) de control empleado en las medidas sucesivas de fondo se ha situado en 0,072 cpm. Esto significa que no se acepta un vial con 2 láminas de ZnS(Ag) con un fondo superior a 0,072 cpm.

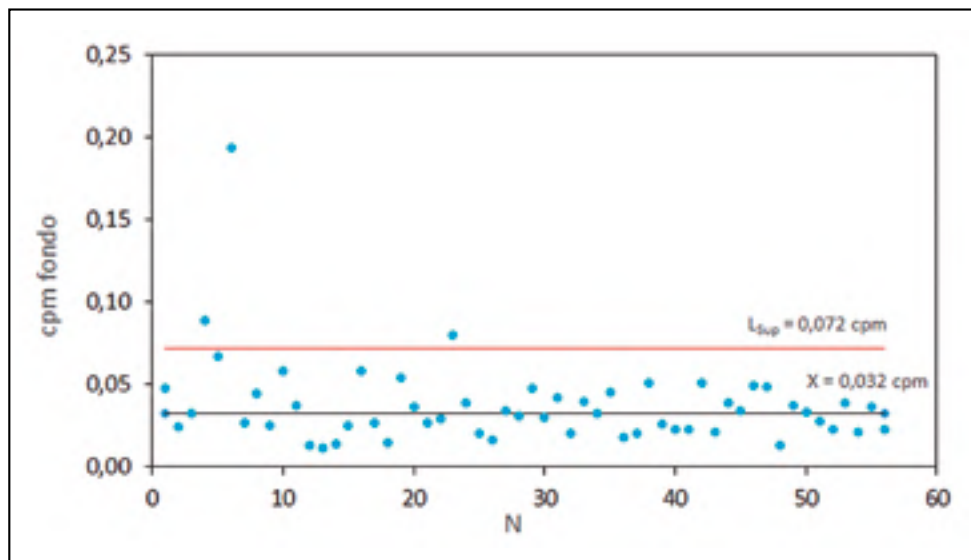


Figura 9. Gráfico de control de proceso de medida de fondo con 2 láminas de ZnS(Ag).

8.3. Calibración del detector

8.3.1. Medida de viales con 2 láminas de ZnS(Ag) para diferentes tiempos de exposición

En la figura 10 se muestran los resultados obtenidos midiendo 6 ciclos de 360 minutos (protocolo 1) y, en la

figura 11, los resultados obtenidos midiendo en dos periodos de 4 ciclos de 360 minutos (protocolo 2).

Se observa que el coeficiente de determinación mejora utilizando el protocolo 2 de medida (0,956 frente a 0,572) con lo que, finalmente, el protocolo utilizado para los obtener los datos de la curva de calibración fue el protocolo 2.

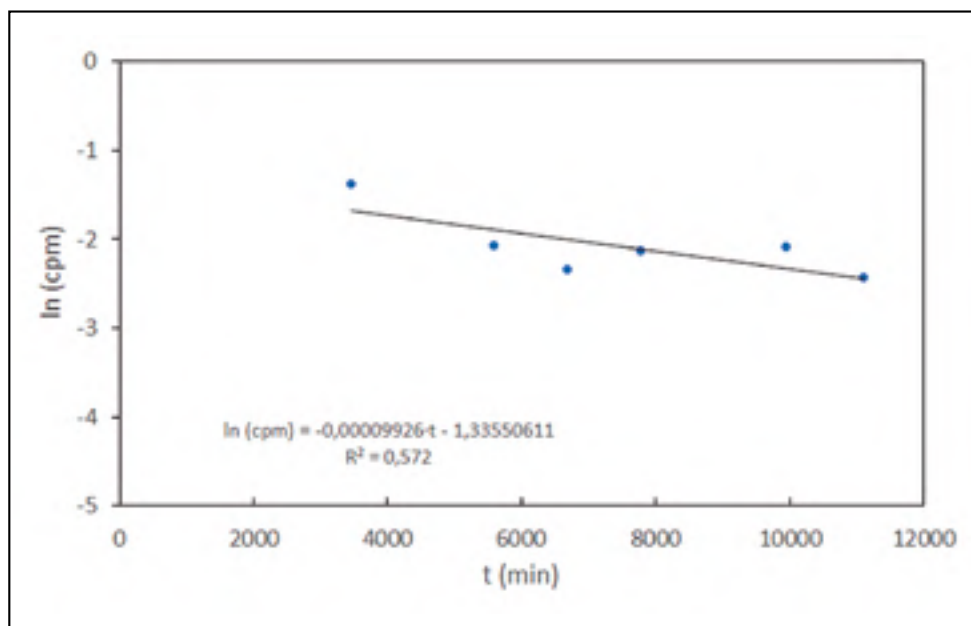


Figura 10. Ajuste lineal de los datos experimentales para 4 h (medida 6 ciclos de 360 minutos).

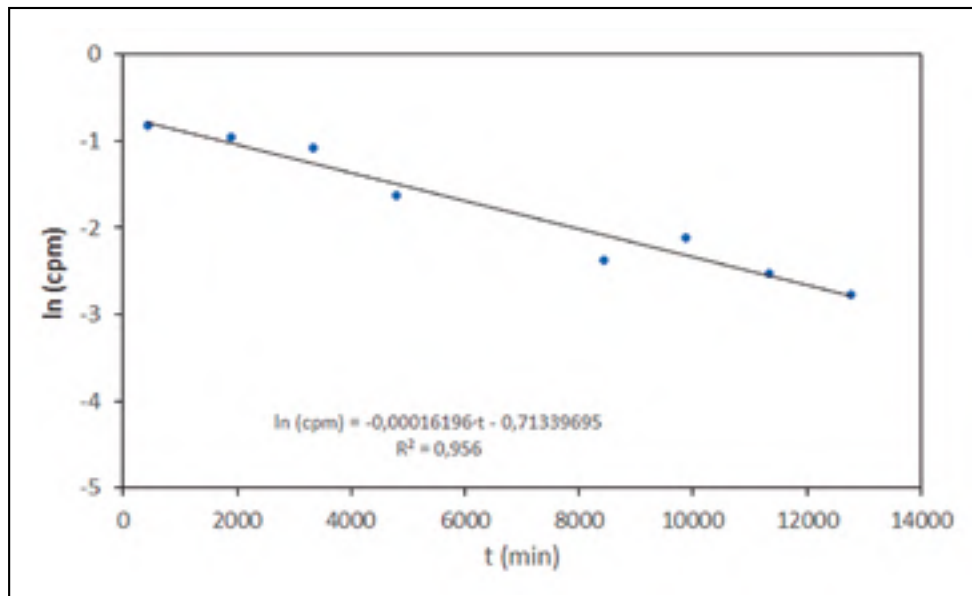


Figura 11. Ajuste lineal de los datos experimentales para 10 h de exposición (medida dos periodos de 4 ciclos de 360 minutos).

8.3.2. Determinación de la eficiencia en función del tiempo de exposición (curva de calibración)

La curva de calibrado relaciona la eficiencia de detección en función del tiempo de exposición de los viales con las dos láminas de ZnS(Ag). De acuerdo con la ecuación 6 se obtienen las cpm_0 para cada tiempo de exposición. La eficiencia promedio obtenida a través de la ecuación 7 para cada tiempo de exposición se ajusta a una curva siendo la ecuación de calibrado (figura 12):

$$\varepsilon(\%) = 11,343 \cdot \ln(x) + 107,452 \quad [15]$$

La curva de calibrado muestra un primer tramo a tiempos cortos (0,5 - 6 horas) con una pendiente ascendente, mientras que, a tiempos más largos, ese incremento se suaviza alcanzando un “equilibrio”. Este resultado

confirma que con tiempos cortos de exposición la eficiencia de detección obtenida es adecuada para medir ^{222}Rn en aire. Dicha ecuación permite conocer la eficiencia de detección experimental para cualquier tiempo de exposición de los viales. La incertidumbre en las medidas es elevada debido a la variabilidad en la actividad de concentración de radón a lo largo del día ya que la calibración se realiza en un almacén subterráneo del edificio CETA donde la concentración de radón no está controlada.

Es conveniente indicar que esta curva de calibración debe realizarla cada laboratorio, ya que puede variar en función tanto de parámetros físicos (viales y láminas de ZnS(Ag)), como de parámetros ambientales (presión, temperatura, humedad, etc.). En consecuencia, serían necesarios más estudios para realizar una curva extrapolable a todas las condiciones.

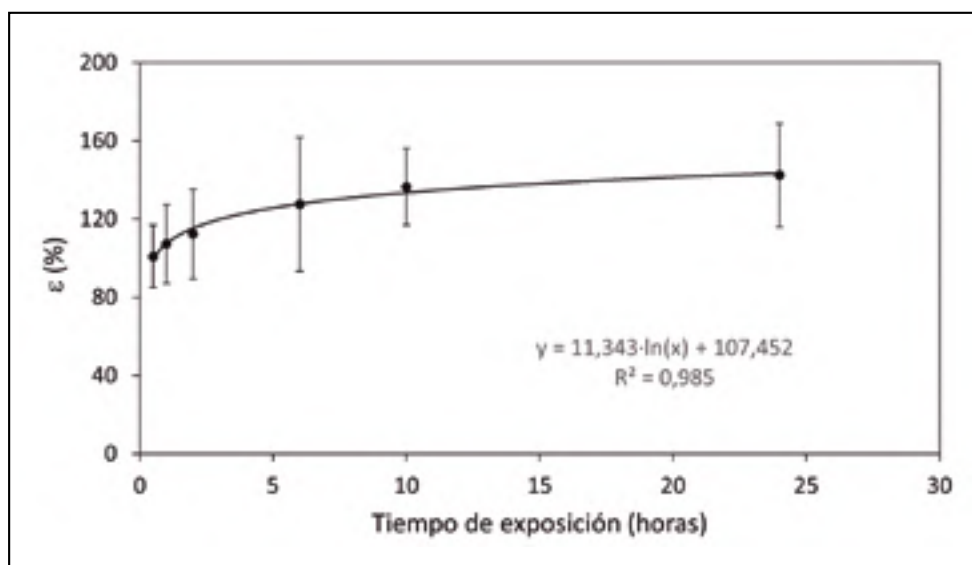


Figura 12. Curva de calibrado de ajuste logarítmico de la eficiencia con respecto al tiempo de exposición de los viales.

8.3.3. Determinación de la eficiencia para un tiempo de exposición de 4 horas

La tabla 6 presenta los resultados de la verificación realizada con cuatro viales para un tiempo de exposición de 4 horas en un mismo recinto. El error relativo entre el valor medio de la eficiencia experimental y el obtenido mediante la curva de calibrado es del 2 %. Este resultado sirve para verificar la curva de calibración obtenida en el apartado anterior. Las eficiencias son superiores al 100 % debido a que además de medir las emisiones alfa del ^{222}Rn , también se miden las emisiones alfa de sus descendientes ^{218}Po y ^{214}Po , tal y como se ha comentado en el apartado 6.1 Instrumentación.

Tabla 6. Comparación de la eficiencia media experimental y de la curva de calibrado para un tiempo de exposición de 4 horas

Vial	ϵ	ϵ (%)	ϵ_{media}	$\epsilon_{\text{calibrado}}$
1	$1,35 \pm 0,39$	135	$1,26 \pm 0,10$	$1,24 \pm 0,08$
2	$1,09 \pm 0,48$	109		
3	$1,52 \pm 0,63$	152		
4	$1,10 \pm 0,45$	110		

La incertidumbre está expresada como $k=1$.

8.4. Medida de ^{222}Rn aire en diferentes ambientes

En la figura 13 se presenta un espectro típico de una medida realizada.

El espectro muestra dos zonas diferenciadas: una zona de bajas energías (no presente en la figura 13), hasta el canal 400, que recoge un elevado número de cuentas que proceden de fenómenos de fotoluminiscencia y,

por otra parte, una zona de altas energías, donde aparece una señal en torno al canal 1020-1024 que corresponde a la señal de los impulsos de la desintegración alfa del ^{222}Rn y sus descendientes alfa ^{218}Po y ^{214}Po . El espectro que se obtiene es básicamente un solo pulso, no pudiéndose diferenciar entre el ^{222}Rn y sus descendientes de mayor energía.

El valor medio de la concentración de actividad de ^{222}Rn en aire en diferentes localizaciones, así como el valor de la medida con el AlphaGUARD PQ 2000PRO se presentan en la tabla 7. La actividad se ha obtenido con la media de las cuatro medidas en el caso del almacén subterráneo, y con 3 medidas en el caso del Laboratorio y de la Sierra de Gredos ya que se tuvo que eliminar un valor anómalo en ambos casos.

En la tabla 8 se observa que la precisión en todos los casos es inferior al 20 %. Respecto al error relativo o sesgo (ER), la medida en el almacén subterráneo tiene un valor del 2 %, mientras que en los otros puntos de muestreo, esto es, en el laboratorio y en la Sierra de Gredos, es superior, esto es, -18 % y -35 %, respectivamente. En este último caso, en el almacén de la Sierra de Gredos, la diferencia de concentración de actividad entre el método propuesto y la obtenida con el AlphaGUARD PQ 2000PRO puede deberse a la variación de las condiciones atmosféricas (presión, temperatura o humedad) que pueden afectar al resultado de la medida. Con estos datos de ER se podría pensar que la sensibilidad del método depende de la concentración de actividad de ^{222}Rn . Sin embargo, no se tienen los datos suficientes para asegurar dicha afirmación. En el caso del E_n se observa que solo el valor del almacén subterráneo del edificio CETA presenta un valor inferior a 1.

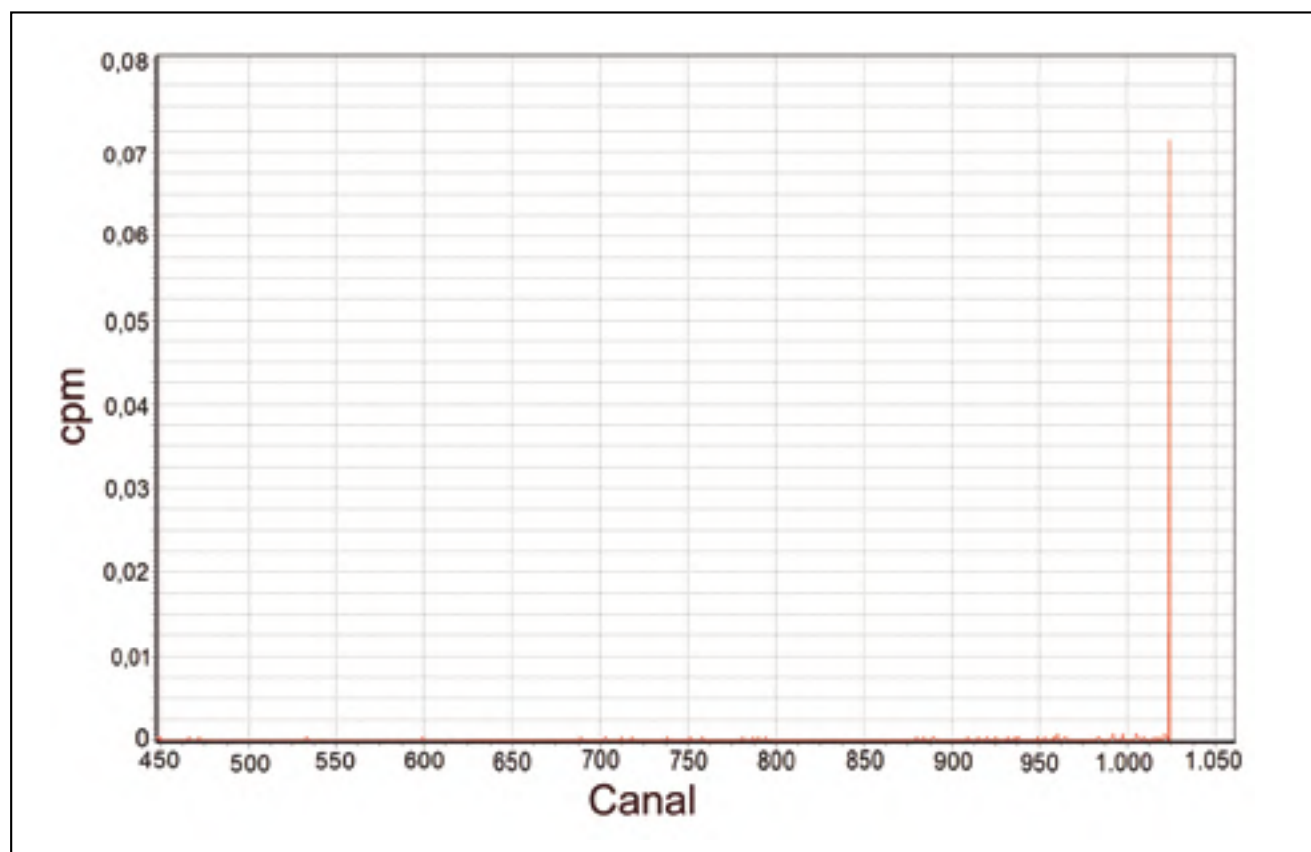


Figura 13. Espectro de medida de ^{222}Rn en aire en el detector de centelleo Quantulus 1220.

Tabla 7. Resultados de la concentración de actividad de ^{222}Rn en aire en diferentes localizaciones

Localización muestreo	Vial	A (Bq m ⁻³) método propuesto	A _{media} (Bq m ⁻³) método propuesto	A _{ref} (Bq m ⁻³) AlphaGuard
Almacén subterráneo del edificio CETA	1	293 ± 86	275 ± 63	270 ± 26
	2	238 ± 104		
	3	331 ± 136		
	4	239 ± 97		
Laboratorio baja actividad del CEDEX	1	134 ± 65	136 ± 21	166 ± 20
	2	valor anómalo		
	3	148 ± 86		
	4	126 ± 84		
Almacén de la Sierra de Gredos	1	87 ± 61	89 ± 13	138 ± 18
	2	valor anómalo		
	3	97 ± 74		
	4	84 ± 62		

La incertidumbre está expresada como k=2.

Tabla 8. Parámetros de aseguramiento de la calidad obtenidos en la comparación de las medidas con el método propuesto y el AlphaGUARD PQ 2000PRO (A_{ref})

Muestra	A _{ref} (Bq m ⁻³)	N	A _{media} (Bq m ⁻³)	Precisión CV(%)	Exactitud ER(%)	E _n
Almacén	270 ± 26	4	275 ± 63	16	2	0,07
Laboratorio	166 ± 20	3	136 ± 21	17	-18	-1,03
Sierra de Gredos	138 ± 18	3	89 ± 13	8	-35	-2,21

La incertidumbre está expresada como k=2.

La AMD obtenida en la medida de la concentración de actividad de ^{222}Rn en aire con el procedimiento propuesto es de 20 Bq m⁻³ para un tiempo de medida de 360 minutos. Este valor es un orden de magnitud inferior al que se recomienda en la Directiva 2013/59/Euratom y en el Real Decreto 732/2019 donde se establece el nivel de referencia de 300 Bq m⁻³.

8.5. Aseguramiento de la calidad metrológica

En la tabla 9 se presentan los resultados obtenidos en el aseguramiento de la calidad metrológica del método propuesto. Hay que señalar algunos aspectos relevantes en el diseño experimental para mostrar la importancia de aplicar correctamente el protocolo en la medida de estos detectores. Por una parte, ya se ha comentado que la caracterización del fondo previa a la medida es necesaria. Los viales de la serie E1 tenían el fondo más bajo, después los de la serie E2 y, finalmente, los viales de la serie E3 eran los que tenían el fondo más alto. Sin embargo, la

serie E1 fue sometida a los niveles más elevados de concentración de actividad, cuando hubiese sido necesario realizarlo al revés, esto es, que la serie sometida a la concentración de ^{222}Rn inferior tuviera el fondo más bajo. Otro aspecto importante para señalar es que la medida de ^{222}Rn hay que realizarla lo antes posible debido a su corto periodo de semidesintegración, sobre todo cuando las actividades son bajas, ya que si no el límite de detección (AMD) se incrementa en función de la corrección del factor de desintegración. En los resultados presentados en la tabla 9 se ha tenido que eliminar los resultados de la serie E3 debido a que la medida de dichas muestras se retrasó por temas técnicos y logísticos y, además, el fondo era alto, lo que incrementaba el límite de detección. Finalmente, se realizó un estudio de difusión de ^{222}Rn en los viales y se tuvo que descartar un vial en cada una de las series E1 y E2. Los parámetros de calidad (exactitud y precisión) se presentan en la tabla 9. Se observa que los resultados de exactitud y de precisión son satisfactorios para el método propuesto. Por otra parte, se observa que

Tabla 9. Resultados de la exposición de los detectores en una cámara de referencia y valor medio de la concentración de actividad con el método propuesto

Muestra	A _{ref} (Bq m ⁻³)	N	A _{media} (Bq m ⁻³)	Precisión CV(%)	Exactitud ER(%)	E _n
E1	10378 ± 1472	3	11050 ± 2129	10,4	6,5	0,26
E2	1911 ± 275	3	1837 ± 631	18,6	-3,9	-0,11

La incertidumbre está expresada como k=2.

el valor de E_n es inferior a 1, lo que confirma la idoneidad del método propuesto.

9. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha desarrollado un procedimiento de medida de ^{222}Rn en aire, rápido y sencillo, combinando el uso de láminas de ZnS(Ag) introducidas en el interior de un vial de baja difusión, y su posterior medida con el espectrómetro de centelleo Quantulus 1220. En la metodología presentada es necesario exponer los viales en un ambiente con bajos niveles de radón, inferiores a 10 Bq m^{-3} , durante 2 horas para alcanzar fondos suficientemente bajos, previo a la toma de muestra.

La curva de calibración presenta un primer tramo, para intervalos entre 30 minutos y 6 horas, con una pendiente ascendente, entre un 100-140 %, ese incremento se suaviza para tiempos de exposición más largos. Estos valores de la eficiencia son adecuados para determinar cuantitativamente ^{222}Rn en aire. Finalmente, se ha seleccionado y caracterizado la eficiencia para un tiempo de exposición de 4 horas. Es conveniente indicar que esta curva de calibración debe realizarla cada laboratorio, ya que puede variar en función tanto de parámetros físicos (tipo de vial, número de láminas de ZnS(Ag) , etc.), como de parámetros ambientales (presión, temperatura, humedad, etc.).

La calidad metrológica del método se ha asegurado exponiendo los detectores a concentraciones de ^{222}Rn controladas. Se ha determinado la exactitud y la precisión del método. Los resultados muestran que la exactitud del método utilizando el error relativo es menor del 10% y que la precisión, utilizando el coeficiente de variación es inferior al 20 % para la concentración de actividad de ^{222}Rn estudiada.

La actividad mínima detectable (AMD) obtenida de 20 Bq m^{-3} para un tiempo de medida de 6 horas es adecuada para controlar los niveles establecidos por la Directiva europea y la normativa española que sitúa el nivel de referencia en 300 Bq m^{-3} .

10. REFERENCIAS

Banjanac, R., Dragic, A., Udovicic, V., Jokovic, D., Maetic, D., Veselinovic, N., y Savic, M. (2014). Variations of gamma-ray background in the Belgrade shallow underground low-level laboratory. *Applied Radiation and Isotopes*, 87, pp. 70-72. doi:10.1016/j.apradiso.2013.11.091

Beck, T.R., Antohe, A., Cardellini, F., Cucoş, A., Fialova, E., Grossi, C., y Hening, K. (2021). The Metrological Traceability, Performance and Precision of European Radon Calibration Facilities. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(22), 12150. doi:10.3390/ijerph182212150

CSN (2004a). *Calidad metrológica y dosimetría del radón. Primera campaña nacional de intercomparación*. Colección Documentos I+D 12.2004. Madrid: CSN.

CSN (2004b). *Concentración de radón en viviendas españolas. Otros estudios de radiación natural*. Colección Informes Técnicos 13.2004. Madrid: CSN.

CSN (2010a). Guía de Seguridad 11.01. *Directrices sobre la competencia de los laboratorios y servicios de medida de radón en aire*. Madrid: CSN.

CSN (2010b). *Protección frente a la inmisión de gas radón en edificios*. Colección Informes Técnicos 24.2010. Madrid: CSN.

CSN (2012a). *Guía de Seguridad 11.2 Control de la exposición a fuentes naturales de radiación*. Madrid: CSN.

CSN (2012b). *Guía de Seguridad 11.4. Metodología para la evaluación de la exposición al radón en los lugares de trabajo*. Madrid: CSN.

CSN (2022). *Intercomparación 2020 de medidas de la concentración de radón en aire bajo diferentes condiciones ambientales. Equipos de medida continuo y detectores integrados*. Colección Informes Técnicos 55.2022. Madrid: CSN.

Currie, L.A. (1968). Limits for qualitative detection and quantitative determination. Application to radiochemistry. *Analytical Chemistry*, 40(3): pp. 586-593. doi:10.1021/ac60259a007

Dragounová, L., y Rulík, P. (2013). Low level activity determination by means of gamma spectrometry with respect to the natural background fluctuation. *Applied Radiation and Isotopes*, 81, pp. 123-127. doi:10.1016/j.apradiso.2013.03.017

ENAC (2020) (10 de mayo 2022). El nuevo Código Técnico de Edificación exige acreditación a los laboratorios que realicen la medida del radón en edificios. <https://www.enac.es/acreditacion-medida-radon>.

EURATOM (1990). *Recomendación de la Comisión, de 21 de febrero de 1990, relativa a la protección de la población contra los peligros de una exposición al radón en el interior de edificios (90/143/Euratom)*.

EURATOM (2013). *Directiva 2013/59/Euratom del Consejo de 5 de diciembre de 2013 por la que se establecen normas de seguridad básicas para la protección contra los peligros derivados de la exposición a radiaciones ionizantes, y se derogan las Directivas 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom y 2003/122/Euratom*.

European Commission (2019). Chapters 2 y 5. Radon. En: G. Cinelli, De Cort, M., y Tollefsen, T. (ed.), *European Atlas of Natural Radiation*. Luxembourg: Publications Office of the European Union.

García-Talavera, M., López, F.J., Sanz, M.T., Ramos, L., y Sánchez, M.F. (2017). Hacia un Plan Nacional contra el radón en España. *Alfa*, 173(34): pp. 23-29.

Gobierno de Canarias (2020). *Guía técnica de buenas prácticas frente a la exposición al radón en las instalaciones hidráulicas subterráneas de Canarias*. Tenerife: Gobierno de Canarias y Universidad de la Laguna.

Gutiérrez, J., Sainz, C., Fuente, I., Sáez, J.C., Correa, E., y Quindós, L.S. (2013). Intercomparison exercise on external gamma dose rate under field conditions at the laboratory of natural radiation (Saelices el Chico, Spain). *Radiation Protection Dosimetry*, 155(4): pp. 459-466.

IAEA (2012). *Sources and Measurements of Radon and Radon Progeny Applied to Climate and Air Quality Studies*. IAEA Proceedings Series. Viena: IAEA.

IAEA (2015). *Protection of the Public Against Exposure Indoors due to Radon and Other Natural Sources of Radiation*. Specific Safety Guide No. SSG-32. Viena: IAEA.

IETcc (2021). *Guía Rehabilitación frente al radón*. Madrid: CSIC.

Ishimori, Y., Lange, K., Martin, P., Mayya, Y., y Phaneuf, M. (2013). *Measurement and Calculation of Radon Releases from NORM Residues*. Technical Reports Series, N° 474. Viena: IAEA.

ISTAS-CCOO (2019). *Exposición laboral al radón. Guía para la prevención*.

Janik, M., Hasan, M.M., Bossew, P., y Kavasi, N. (2021). Effects of Storage Time and Pre-Etching Treatment of CR-

39 Detectors on Their Response to Alpha Radiation Exposure. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(16), 8346. <https://www.mdpi.com/1660-4601/18/16/8346>

Junta de Extremadura (2020a). *Guía para la protección de gas radón*. Volumen 1 - General. Mérida: Junta de Extremadura.

Junta de Extremadura (2020b). *Guía para la protección de gas radón*. Volumen 2 - Profesionales. Mérida: Junta de Extremadura.

Ministerio de Fomento (2019). *Real Decreto 732/2019, de 20 de diciembre, por el que se modifica el Código Técnico de la Edificación, aprobado por el Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo*. BOE, nº 311, 27 diciembre 2019. Madrid: Ministerio de Fomento.

Ministerio de Sanidad (2021a). *Acción frente al Radón*. Madrid: Ministerio de Sanidad.

Ministerio de Sanidad (2021b). *Mortalidad atribuible a la exposición a radón residencial en España*. Madrid: Ministerio de Sanidad.

Modéc, P.M., Korun, M., Martelanc, M., y Vodenik, B. (2012). A comparative study of the radon-induced background in low-level gamma-ray spectrometers. *Applied Radiation and Isotopes*, 70(1): pp. 324-331. doi:10.1016/j.apradiso.2011.09.023

OMS (2015). *Manual de la OMS sobre el radón en interiores*. Ginebra: Organización Mundial de la Salud.

Ortega, L., Manzano, M., Custodio, E., Hornero, J., y Rodríguez-Arévalo, J. (2015). Using ²²²Rn to identify and quantify groundwater inflows to the Mundo River (SE Spain). *Chemical Geology*, 395, pp. 67-79. doi: <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2014.12.002>

Pantelic, G., Celikovic, I., Zivanovic, M., Vukanac, I., Nikolic, J.K., Cinelli, G., y Gruber, V. (2019). Qualitative overview of indoor radon surveys in Europe. *Journal of Environmental Radioactivity*, 204, 163-174. doi:10.1016/j.jenvrad.2019.04.010

Papastefanou, C. (2002). An overview of instrumentantion for measuring radon in soil gas and groundwaters. *Journal of Environmental Radioactivity*, 63(3): pp. 271-283. doi:10.1016/s0265-931x(02)00034-6

Quindós, L.S., Arteché, J.L., y Fuente, I. (2006). Radon y Meteorología. *XXIX Jornadas Científicas de la Asociación Meteorológica Española, Pamplona, 19-26 abril, 2006*.

Quindós, L.S., Fernández, P.L., y Soto, J. (1991). Short-Term Vs. Long-Term Indoor Radon Measurements. *Health Physics*, 61(4): pp. 539-542. doi:10.1097/00004032-199110000-00010

Samet, J.M. (1989). Radon and Lung Cancer. *JNCI: Journal of the National Cancer Institute*, 81(10): pp. 745-758. doi:10.1093/jnci/81.10.745

Shahrokhi, A., Burghele, B.D., Fábíán, F., y Kovács, T. (2015). New study on the correlation between carbon dioxide concentration in the environment and radon monitor devices. *Journal of Environmental Radioactivity*, 150, pp. 57-61. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2015.07.028>

Tamakuma, Y., Kranrod, C., Jin, Y., Kobayashi, H., Nugraha, E. D., Sanpei, A., y Tokonami, S. (2021). Characterization of Commercially Available Active-Type Radon-Thoron Monitors at Different Sampling Flow Rates. *Atmosphere*, 12(8), 971. doi:10.3390/atmos12080971

Theodórsson, P. (1996). *Measurement of weak radioactivity*. Singapore: World Scientific.

Tobar, J.G., y Pujol, L. (2014). Influencia de la meteorología en el nivel de radón en un laboratorio de medidas de radioactividad ambiental. *Ingeniería Civil*, nº 173, pp. 61-70.

Torres-González, P., Moure-García, D., Luengo-Oroz, N., Villasante-Marcos, V., Iribarren, I., Blanco, M.J., y García-Fraga, J. (2019). Geochemical signals related to the 2011–2012 El Hierro submarine eruption. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 381, pp. 32-43. doi:10.1016/j.jvolgeores.2019.05.018

UGT (2019). *Manual. Cuestiones que Delegados/as de Prevención han de conocer sobre el gas Radón*.

UNE (2017). UNE-EN ISO/IEC 17025:2017. *Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración (ISO/IEC 17025:2017)*.

Pequeños reactores modulares: el futuro de la energía nuclear

Small Modular Reactors: The Future of Nuclear Energy

Luis Felipe Durán Vinuesa^{1*}, Samantha Larriba Del Apio², Antonio Jiménez Carrascosa³

Resumen

Los pequeños reactores modulares son reactores nucleares capaces de producir hasta 300 MW de potencia eléctrica. El interés en esta tecnología ha aumentado de forma significativa con el objetivo de afrontar los retos que plantea el paradigma energético, tecnológico y económico actual. Diferentes agentes ponen en el punto de mira las características de la energía nuclear para complementar un *mix* eléctrico con alta penetración renovable, mientras que la industria nuclear vela por su viabilidad económica en un entorno en el que las energías renovables son cada vez más competitivas, además de mejorar aspectos relacionados con la seguridad. Estos reactores parecen ser la respuesta a este cambio de paradigma: por su pequeño tamaño, pueden adaptarse a las infraestructuras eléctricas más modestas, pudiendo ser transportados y utilizados para suplir necesidades estacionales. Desde el punto de vista de la seguridad, integran sistemas pasivos que reducen el número de componentes, así como el coste de inversión inicial, mejorando la fiabilidad de la planta ante un evento tipo Fukushima. Su construcción modular reduce los tiempos de construcción, así como los costes de construcción, y sus nuevas aplicaciones, el coste de la energía producida. Estas mejoras atraerían la inversión de capital para acelerar el reto de la descarbonización. En este artículo se proporciona una visión integral de los factores que han suscitado el interés en estos nuevos diseños, haciendo un recorrido por sus aspectos económicos y características técnicas, así como por sus diversas aplicaciones y los desarrollos que son esperables en el medio plazo.

Palabras clave: energía, reactor nuclear, modular, tecnología, diseño, seguridad.

Abstract

Small modular reactors are nuclear reactors capable of producing up to 300 MW of electrical power. The ongoing energy transition poses many challenges and the agents involved in the next years' energy policies are focused on the characteristics of nuclear energy, such as its ability to adapt to energy systems with a large renewable component and its economic viability. On the other hand, the nuclear industry puts its efforts to face the future economic paradigm characterized by lower energy prices based on the foreseen energy costs, while improving the response of the nuclear power plant to adverse conditions. Small modular reactors are a scalable technology highly adaptative to poorly developed infrastructures. Some designs can even be transported to provide seasonal energy supply. From the nuclear safety perspective, these reactors rely on passive systems to avoid or mitigate accidental scenarios such as the Fukushima nuclear accident in 2011, also reducing the reactor cost. Modular designs that reduce the reactor's building time also reduce overnight costs, and their new applications can increase the utilization of the energy resource. These design improvements are attracting potential investors, boosting the energy transition to a low-carbon electricity mix. This article provides an overall picture of the reasons leading to the increasing interest in these new designs and their technical features, going from economic and technical aspects to their applications and development in the midterm.

Keywords: Energy, nuclear reactor, modular, technology, design, safety.

1. CONTEXTO ENERGÉTICO ACTUAL

En la actualidad, la energía nuclear enfrenta un gran reto al postularse en muchos países como una opción rápida y eficaz para disminuir sus niveles de emisiones de gases de efecto invernadero en un escenario energético cambiante que durante los últimos meses nos ha dejado

entrever más de sus debilidades que de sus muchas fortalezas. El escenario energético actual está caracterizado por una situación coyuntural motivada por el encarecimiento del precio del gas antes de la invasión a Ucrania, que produjo el 25 % de la energía en Europa durante el pasado año 2020 (BP, 2021), por el aumento del precio de los derechos de emisiones de CO₂, que en tan solo un año han aumentado un 80 % de media, desde los 24,75 a los 44,92 €/tCO₂ como puede consultarse en SENDECO2 (SENDECO2, 2021), el sistema europeo de negociación de CO₂. También ha influido el histórico climatológico de temporales alrededor del planeta o el brusco aumento de la demanda energética resultado de la recuperación económica global durante 2021, al margen de otros hechos puntuales que han podido influir en la capacidad de abastecimiento de los grandes suministradores como los accidentes industriales, y hasta cuestiones relacionadas con la geopolítica como la invasión ucraniana o las tensiones con Argelia, que han dado la vuelta al abastecimiento de gas, el cual,

* Autor de contacto: luisfelipe.duran@upm.es

¹ Ingeniero de la energía e investigador predoctoral. ETS de Ingenieros Industriales. Universidad Politécnica de Madrid (UPM). Jóvenes Nucleares (Sociedad Nuclear Española).

² Ingeniera de la energía e investigador predoctoral. ETS de Ingenieros Industriales. Universidad Politécnica de Madrid (UPM). Jóvenes Nucleares (Sociedad Nuclear Española).

³ Ingeniero de la energía e investigador predoctoral. ETS de Ingenieros Industriales. Universidad Politécnica de Madrid (UPM). Jóvenes Nucleares (Sociedad Nuclear Española).

actualmente se importa hasta en un 60 % por buques metaneros. Son muchos los factores que han puesto de manifiesto las debilidades de la dependencia energética del gas y la necesidad de llevar a cabo una reforma en el mercado eléctrico, poniendo sobre la mesa otras cuestiones como la formación del precio de la tarifa regulada o PVPC (Precio Voluntario para el Pequeño Consumidor). En definitiva, el efecto combinado de todas estas circunstancias ha sido un aumento del precio de la electricidad del 98 % entre diciembre de 2020 y junio de 2021 según las estimaciones del Banco de España (Pacce *et al.*, 2021), al que todavía habrá que sumar los efectos colaterales del conflicto ucraniano y las respuestas del Gobierno durante los últimos 6 meses.

Otra piedra angular del paradigma energético es el grupo de científicos que analiza las posibles causas y efectos del calentamiento global, el *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), que cuenta con 195 estados miembros y que extrae el consenso científico de un grupo de casi 2.900 expertos de 105 países diferentes. Añadiendo más tensión a la situación actual, el pasado mes de agosto se hizo público el informe de la sexta evaluación del grupo de trabajo I (Masson-Delmotte *et al.*, 2021), que comienza con la frase “Es un hecho unívoco que la influencia humana ha calentado la atmósfera, el océano y la tierra”. En lo fundamental, el informe establece la necesidad de reducir las emisiones CO₂ antrópicas en torno a un 45 % para 2030, tomando como referencia la tasa de emisiones en 2010, para poder alcanzar la neutralidad de emisiones de CO₂ en 2050, y evitando así un aumento de la temperatura media del planeta y de olas de calor extremo. Otros pronósticos con un nivel de confianza medio son los que se refieren a inundaciones y a sequías en algunas regiones habitadas del planeta.

En definitiva, se trata de reducir los riesgos que supone la modificación de los ecosistemas y la dinámica del planeta, como la circulación termohalina del Atlántico Norte, responsable de atemperar los climas en el norte de Europa y que actúa como uno de los sumideros más importantes de CO₂ de la Tierra. Estas dinámicas podrían verse alteradas, causando un impacto en las condiciones climáticas que modificarían los hábitats terrestres, de no limitar el aumento de la temperatura media del planeta a 1,5 °C para 2050 respecto a niveles preindustriales (Masson-Delmotte *et al.*, 2018). Hasta ahora, ha habido un aumento de 1 °C respecto al nivel referenciado.

Para terminar de contextualizar el escenario donde nos encontramos, tras resumir brevemente el contexto del mercado energético y su impacto en Europa e introducir la motivación de la necesaria transición energética en la que estamos inmersos, es necesario conectar ambos bloques. La conferencia de la Organización de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (COP26) que tuvo lugar el pasado mes de noviembre puso de manifiesto los esfuerzos de la comunidad internacional, que traslada los objetivos en materia de reducción de emisiones y electrificación del transporte, alineados con las conclusiones de los informes del IPCC, a las líneas políticas de acción conjunta de todos los países y que también están ligados a los ya conocidos Objetivos de Desarrollo Sostenible.

Los principales logros de la COP26 fueron varios, entre ellos la creación de un programa de trabajo para definir el objetivo global de adaptación a los impactos climáticos

que ya ocurren en varias regiones del planeta y abordar el apoyo económico a los países en desarrollo en esta materia, ya que son los más vulnerables, o el compromiso de los países más contaminantes de reducir de forma gradual el uso del carbón, que supone hoy en día el 27 % de la energía primaria a nivel mundial. También se han finalizado las directrices para la aplicación del Acuerdo de París de 2015 con un compromiso para garantizar la igualdad de condiciones en el mercado de CO₂, y han concluido las negociaciones en materia de transparencia para establecer un entorno de confianza que promueva la cooperación internacional. Mediante acuerdos, los diferentes gobiernos trabajan en paquetes de medidas enfocados a perseguir los objetivos marcados por la comunidad internacional. Así, por ejemplo, Europa desarrolla su nueva taxonomía verde para promover, haciendo más atractiva su financiación, aquellas fuentes energéticas que, bajo el criterio de los expertos y el consenso político, se consideran valiosas en – la transición hacia – ese nuevo horizonte energético, y España tiene su Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021-2030 (PNIEC) (MITERD, 2021), publicado en el «BOE» núm. 77, de 31 de marzo de 2021, que persigue la neutralidad en emisiones de CO₂ para el año 2030. Los diferentes países tienen diversos intereses y herramientas de las que disponer para enfrentar la fuerte reducción de emisiones que debe ocurrir durante las próximas décadas. Es aquí donde entra en juego la energía nuclear.

Son varios los países con un alto grado de dependencia de las energías fósiles, mayoritariamente petróleo, carbón y gas natural. Como se puede ver en el gráfico de la figura 1, el mundo aún depende en gran medida de estos combustibles, si bien, los países más desarrollados han podido

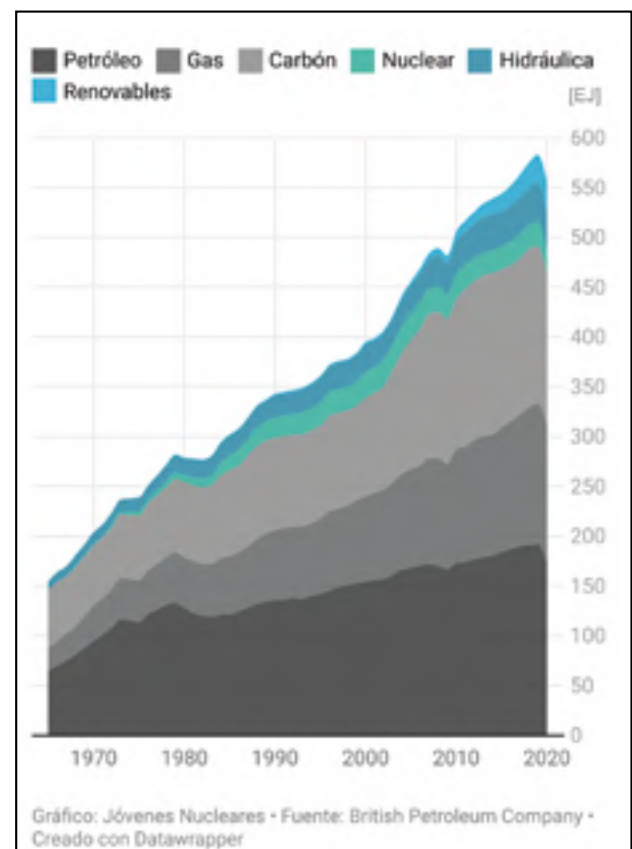


Figura 1. Consumo mundial de energía primaria en el periodo 1965 – 2020 (BP, 2021).

reducir esta dependencia. En línea con los objetivos que marcan las organizaciones internacionales, es necesario aplicar políticas energéticas de descarbonización que deben tener un efecto rápido y, por tanto, deben impactar en los sectores más emisores, que actualmente son la producción de electricidad y calor, y el transporte (Ritchie y Roser, 2020), como se puede apreciar en las figuras 2 y 3.

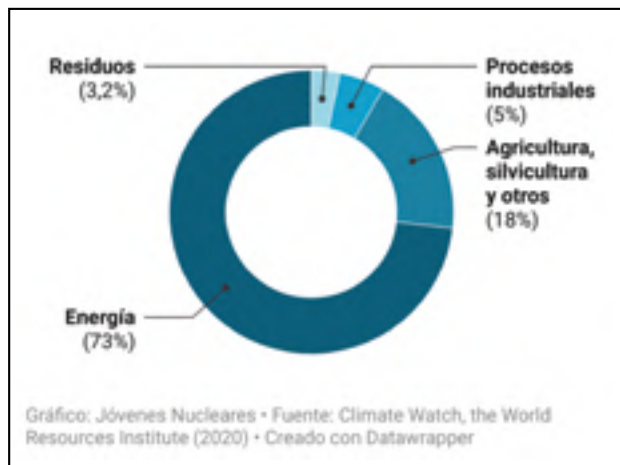


Figura 2. Origen de las emisiones globales agrupadas por sector (Ritchie y Roser, 2020).

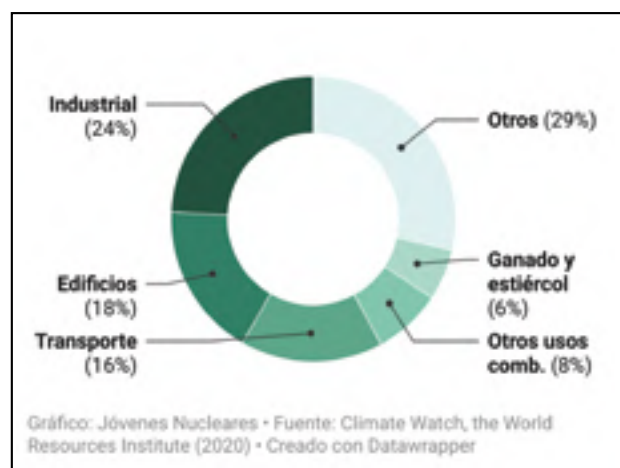


Figura 3. Emisiones asociadas al uso de energía desglosadas por subsectores (Ritchie y Roser, 2020).

Estas medidas pasan por la electrificación del transporte, la cual tendría un impacto positivo también en la contaminación local de las grandes ciudades, o ciudades que por su situación orográfica pueden llegar a retener la contaminación local (*smog* fotoquímico). También son importantes las medidas en materia de eficiencia energética, que contrarrestarían parcialmente el aumento de la demanda energética previendo y ralentizando el crecimiento de la tasa de emisiones. Pero, sin duda, todas estas medidas pierden fuerza o carecen de sentido (en el caso de la electrificación del transporte) si no van acompañadas de un cambio en los parques de generación eléctrica.

Es por ello por lo que los países desarrollados centran sus esfuerzos en descarbonizar el sistema eléctrico, y aquéllos en vías de desarrollo en configurar sus parques para desarrollarse minimizando su huella de carbono. Estos sistemas de producción energética del futuro estarían basados en fuentes de bajas emisiones como las energías

renovables, la energía nuclear o la energía hidráulica, que se sitúan en el podio de las energías con menores emisiones de CO₂ por unidad de energía producida. En el caso concreto de la energía nuclear, esta compete en otros indicadores que miden el impacto que tiene la generación energética en el ecosistema, como el consumo intensivo de materiales o el uso intensivo de suelo que, en este contexto, han perdido importancia relativa. Para trasladar estos proyectos a la realidad, es una condición *sine qua non* el análisis económico de cada fuente, materia en la que actualmente se centran los esfuerzos de las grandes empresas y los centros de investigación, que tienen por objetivo aumentar la competitividad económica de la energía nuclear mediante la conocida como *Long Term Operation (LTO)*, o las nuevas tecnologías de reactores modulares pequeños o *Small Modular Reactors (SMR)*, por sus siglas en inglés.

2. CONTEXTO DE LA ENERGÍA NUCLEAR

En 2011 tuvo lugar el accidente de Fukushima, que tuvo un impacto negativo en la generación nuclear en Europa, ya que Alemania tomó la decisión de cerrar de manera progresiva sus reactores nucleares, que suministraban el 22,4 % de su demanda eléctrica, con el objetivo de desnuclearizar su producción para finales de 2022. Su política de transición energética, la *Energywende*, prevé el fin de la generación con carbón en el año 2030. Ese mismo año se cerraron 8 reactores de los 17 que operaban entonces, y actualmente solo 6 permanecen en operación. En 2011 Suiza también se sumó a esta desnuclearización y en 2017 realizó un referéndum sobre su nueva política energética. Entonces, el 35 % de la demanda de electricidad era cubierta con energía nuclear y desde ese mismo año ha cerrado uno de los cinco reactores que tenía en operación, aunque el cierre de los cuatro restantes aún no tiene una fecha definitiva. Esta tendencia configura un escenario en el que Europa ha sido el único continente en disminuir su producción nuclear, mientras que, en el resto del mundo, el tamaño del parque permanece constante o en crecimiento, con mención especial a China.

El gigante asiático, que solo en la última década ha conectado 37 reactores nucleares a la red (más del 70 % de su parque nuclear), cuenta con 18 reactores en construcción, habiendo anunciado, en el último trimestre de 2021, un ambicioso plan de construcción nuclear de 150 reactores nucleares a construir en 10 años para reducir el peso del carbón como fuente de energía, desde un 52 % actual hasta un 3 % en 2060. Otro caso digno de mención es el de Japón, que para 2011 generaba el 30 % de su electricidad con energía nuclear, y que tras el accidente de Fukushima apagó todos sus reactores nucleares. En la actualidad ha fijado un objetivo del 20 % de producción nuclear para 2030 para poder cumplir con sus objetivos climáticos y reducir su dependencia de los combustibles fósiles.

España recoge en el anteriormente mencionado PNIEC (MITERD, 2021) su estrategia energética, en el que figura un calendario de cierre del parque nuclear que culminaría en 2035. Este plan de cierre es el resultado de un acuerdo con ENRESA, la empresa nacional encargada del desmantelamiento de las instalaciones nucleares y de la gestión de los residuos radiactivos, y con las empresas propietarias de las centrales nucleares. Este plan de cierre tendría lugar

de forma progresiva, a la par que se produce un aumento de la penetración de las energías renovables en el *mix* eléctrico español. Durante la transición a un sistema eléctrico descarbonizado, se prevé contar con el respaldo de los ciclos combinados de gas que fueron impulsados durante la década de los 2000 y que reducen las emisiones respecto a la generación eléctrica basada en el carbón. En esta misma época, y de forma simultánea a la instalación de los ciclos combinados, se produjo el cese de actividad de las centrales nucleares de José Cabrera (2006) y de Santa María de Garoña (2011), aunque también tuvo lugar la repotenciación del parque nuclear español para aumentar la potencia nuclear instalada en 810 MW eléctricos (MWe), un poco menos de lo que hubiera supuesto la construcción de un nuevo reactor (*Plans for New Nuclear Reactors Worldwide*, 2021). La evolución de la potencia instalada y del abastecimiento de la demanda eléctrica desde el año 2007 se muestra en las figuras 4 y 5, respectivamente.

Actualmente, hay 445 reactores nucleares en operación repartidos en 32 países y 19 reactores nucleares en construcción, según la *World Nuclear Association (WNA)*. Bangladesh, Bielorrusia, Egipto, Turquía y Emiratos Árabes Unidos se encuentran entre los denominados *newcomers*, países que están implementando un programa nuclear para producir energía, mientras que otros países que actualmente no disponen de generación nuclear, como Kenia, Ghana, Filipinas y Uzbekistán, están considerando formalmente entrar en el grupo de países nucleares, según Rafael Mariano Grossi, director general de la Organización Internacional de la Energía Atómica (OIEA), de la Organización de las Naciones Unidas (ONU). En el mapa de la figura 6 se muestra el estado de implantación de tecnología nuclear para generar electricidad a nivel mundial.

Con el aumento de penetración de las energías renovables en el *mix* eléctrico, el entorno económico en el que se encuentra la energía nuclear ha cambiado significativamente, ya que las tecnologías con las que debe equipararse

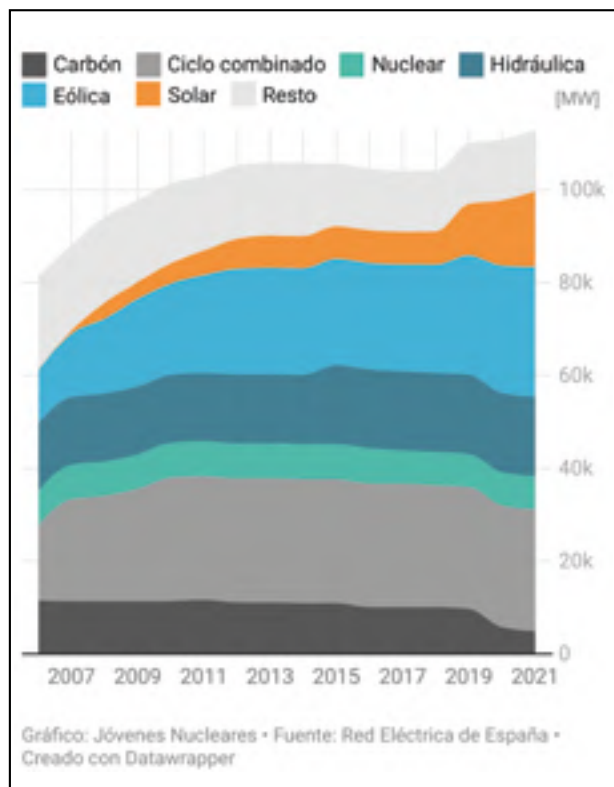


Figura 4. Evolución de la potencia instalada en sistema eléctrico nacional entre 2007 y 2021.

han disminuido de forma significativa sus costes. Aquí introducimos el papel del coste nivelado de la energía o *LCOE* por sus siglas en inglés (*Levelized Cost Of Energy*). El *LCOE* es un indicador que mide el coste total de construir y operar una instalación de generación a lo largo de su vida útil, en unidades de €/MWh (o USD/MWh). Un *LCOE* bajo respecto al resto de energías colocaría a la energía nuclear en una posición favorable en términos económicos, como muestra el último informe conjunto entre la *International*

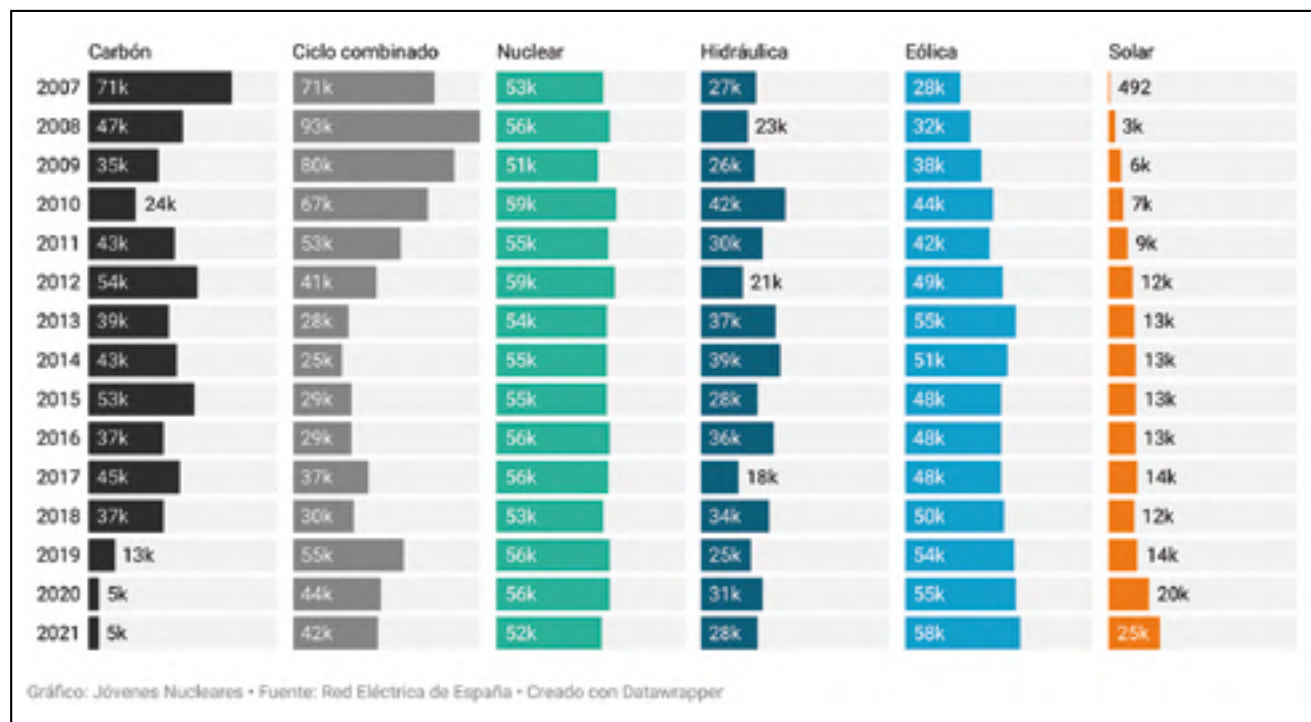


Figura 5. Evolución de la cobertura de demanda del sistema eléctrico nacional por fuente entre 2007 y 2021 en GWh (REE, 2022).

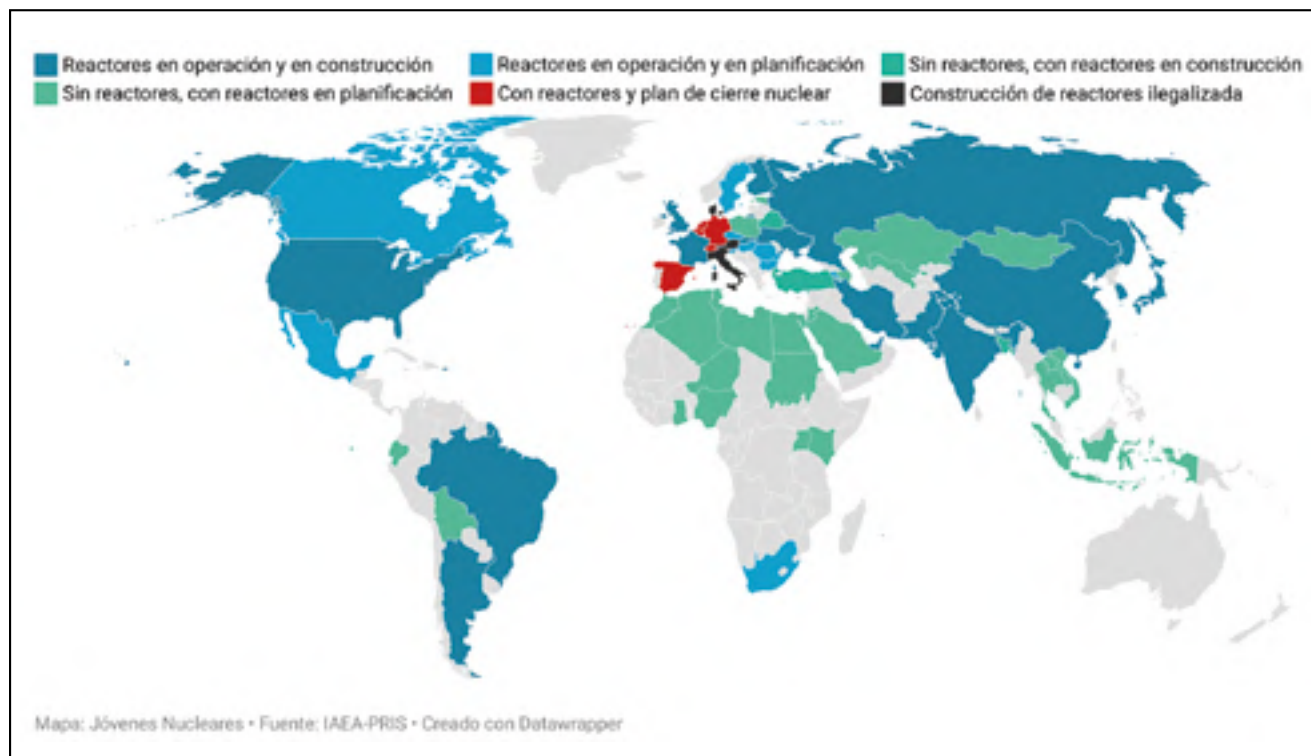


Figura 6. Estado de desarrollo de la producción de energía eléctrica basada en tecnología nuclear en 2020 (IAEA, PRIS, 2022).

Energy Agency y la OECD Nuclear Energy Agency sobre la competitividad de las energías bajas en emisiones de CO₂ (IEA, OECD/NEA, 2020). Dentro de la comunidad científica, existen voces críticas con el papel del LCOE como indicador de la rentabilidad de las diversas fuentes de energía desde el punto de vista del consumidor final, o del *mix* eléctrico en el que se desarrollan, puesto que el LCOE no tiene en cuenta el coste de cubrir la demanda eléctrica durante los periodos de no disponibilidad de la instalación en cuestión, ni bonifica la disponibilidad de aquellas fuentes de energía necesarias para abastecer la demanda instantánea de electricidad.

3. CARACTERÍSTICAS DE LOS REACTORES MODULARES PEQUEÑOS

Los reactores modulares pequeños o *Small Modular Reactors* (SMR), por sus siglas en inglés, producen una potencia inferior a los 300 MWe, y constituyen un ejemplo de la característica escalable de la energía nuclear. Son instalaciones modulares, ya que su construcción no se realiza completamente *in situ*, sino que se pueden fabricar por módulos en serie en una fábrica y, además, tienen gran capacidad de adaptación a la red eléctrica a la que pretenden conectarse, ya que agrupaciones de varias unidades pequeñas pueden dar lugar tanto a instalaciones de mayor potencia, como a configuraciones de generación distribuida aptas para las infraestructuras de transporte y distribución más sencillas.

Antes de hablar de las características técnicas de los reactores es necesario incidir en los diferentes criterios que se utilizan para clasificarlos según la tecnología que utilizan. En primer lugar, atendiendo al tipo de combustible que utilizan, se pueden encontrar reactores de uranio natural o reactores de uranio enriquecido, aunque en los últimos años, con el reciclado de combustible, también se

aprovecha el contenido de plutonio del combustible irradiado para fabricar un combustible de óxidos mixtos de uranio y plutonio (MOX). En segundo lugar, los reactores pueden clasificarse según el espectro energético de su flujo neutrónico. Cuando los neutrones se producen en las reacciones de fisión lo hacen con una energía elevada de 2 MeV en promedio. Si los neutrones necesitan «frenarse» para inducir nuevas fisiones, como es el caso de los reactores que utilizan uranio-235 como combustible, en el reactor debe existir un material contra el que los neutrones choquen y puedan perder energía mediante colisiones inelásticas, ralentizándose. A este material se le denomina *moderador*, y a este tipo de reactores se les conocer como *reactores térmicos*. Sin embargo, si no es necesario frenar los neutrones de fisión para mantener la reacción de fisión en cadena, estaremos hablando de *reactores rápidos*. Otro criterio usado es el tipo de moderador que utilizan los reactores, que puede ser agua ligera, agua pesada, sales fundidas o grafito, dependiendo del combustible que utilicen. Y, por último, los reactores también pueden clasificarse según el refrigerante que evacua el calor del reactor, que puede ser agua, CO₂, helio, sodio o plomo fundido, o sales fundidas como el fluoruro de litio o el fluoruro de berilio.

3.1. Contexto tecnológico e innovación en los SMR

En la actualidad, los reactores que constituyen el grueso del parque nuclear mundial son los denominados reactores de segunda generación o Generación II, que fueron construidos durante el último tercio del siglo XX. Estos reactores ya suponen una evolución respecto a la primera generación de reactores nucleares, cuya misión era demostrar la producción de energía eléctrica de origen nuclear con un amplio abanico de tecnologías de potencia eléctrica reducida no estandarizada, desde los 5 MWe hasta los 190 MWe. Sin embargo, los reactores de Generación II tienen

tamaños estandarizados con una potencia eléctrica de alrededor de los 1.000 y los 1.500 MWe, o de forma equivalente, una potencia térmica entre 3.000 y 4.500 MWt. El diseño que domina el parque de generación nuclear actual es el del reactor térmico de uranio enriquecido que utiliza agua ligera como moderador, es decir, que utiliza agua para ralentizar el movimiento de los neutrones, lo cual hace más probable que se produzca la reacción de fisión, así como para refrigerar el núcleo del reactor y extraer la energía térmica producida. Estos son los reactores de agua ligera o *Light Water Reactors (LWR)*.

Dentro de los *LWR* podemos diferenciar aquellos que utilizan agua a presión y los que utilizan agua en ebullición. Los primeros, conocidos como *Pressurized Water Reactors (PWR)*, tienen elevadas presiones en el circuito del reactor, alrededor de los 15 MPa, por lo que el agua no llega a cambiar de fase, produciéndose únicamente una leve ebullición nucleada subenfriada. Los segundos trabajan a una presión inferior, de alrededor de 7 MPa, y se sirven del cambio de fase para refrigerar el reactor, por ello se denominan *Boiling Water Reactors (BWR)*. En España, los reactores de Almaraz I y II, Ascó I y II, Vandellós II y Trillo son reactores PWR, y el reactor de Cofrentes es de tipo BWR. Estos diseños son “mega factorías” de energía por su gran potencia instalada, entre los 1.000 MWe y los 1.400 MWe tras las subidas de potencia respecto a su diseño inicial. Debido a su diseño, a la cantidad de sistemas de seguridad que utilizan y a la cualificación nuclear que requieren los equipos -esto es, la certificación de que cumplen con los más altos estándares de la industria-, han necesitado una fuerte inversión inicial, y largos periodos de construcción de alrededor de los 10 años. En Canadá y en Rumanía también existen otras tecnologías de Generación II, mucho menos extendidas, como los reactores tipo *CANDU (Canadian Deuterium Uranium)* moderados y refrigerados por agua pesada, y que utilizan uranio natural como combustible.

Los primeros diseños de *SMR* trasladan el diseño tradicional de los reactores de agua ligera a la pequeña escala en un movimiento ágil de la industria, que busca el escalado de tecnología ya probada en las generaciones anteriores para agilizar los procesos de diseño y licenciamiento. Tanto los diseños *PWR* como los diseños *BWR* han encontrado sus equivalentes en modelos como el de la empresa NuScale o el BWRX-300 de General Electric. En un estadio temprano de implantación de la tecnología, la innovación de los *SMR* no se encuentra en la física del reactor, sino en su nuevo tamaño, que le confiere una mejora en su competitividad económica, y en los sistemas pasivos que utiliza, los cuales consiguen reducir los costes del proyecto a la vez que aumentan el grado de seguridad de estos reactores.

Otros conceptos innovadores en los *SMR* es que su capacidad de adaptación a la demanda ya se incorpora en el diseño inicial y, por tanto, hacen del recurso energético nuclear una fuente de generación de energía eléctrica despachable, con mayor capacidad para el seguimiento de la demanda eléctrica que sus hermanos mayores. En el medio y largo plazo, se investigan otras tecnologías resucitadas de la primera generación de reactores nucleares, y que ahora se consideran Generación IV, en tamaño *SMR*, como los reactores refrigerados por gas a alta temperatura, los reactores de espectro neutrónico rápido y los reactores de sales fundidas, entre otros. El funcionamiento de estos reactores

supone un cambio sustancial en la física del reactor, con el objetivo de obtener mayor energía del combustible y reducir la cantidad y la duración del residuo radiactivo generado. Esto tiene como consecuencia un aumento de la duración de las reservas de uranio actuales, además de poder aprovechar otros combustibles como el torio, que cuenta con mayores reservas que el uranio. Actualmente hay más de 50 diseños de *SMR* en desarrollo (IAEA, 2020).

3.2. Componentes principales de un reactor nuclear PWR

Para ilustrar algunas diferencias entre los reactores actuales y los *SMR* utilizaremos, como ejemplo, el reactor *SMR* de NuScale Power LLC de la figura 7. Pero antes de entrar en el análisis de las diferencias entre los diseños de los primeros *SMR* y los reactores nucleares actuales, es



Figura 7. Perspectiva de corte del reactor *SMR* de NuScale (Fuente: NuScale Power LLC).

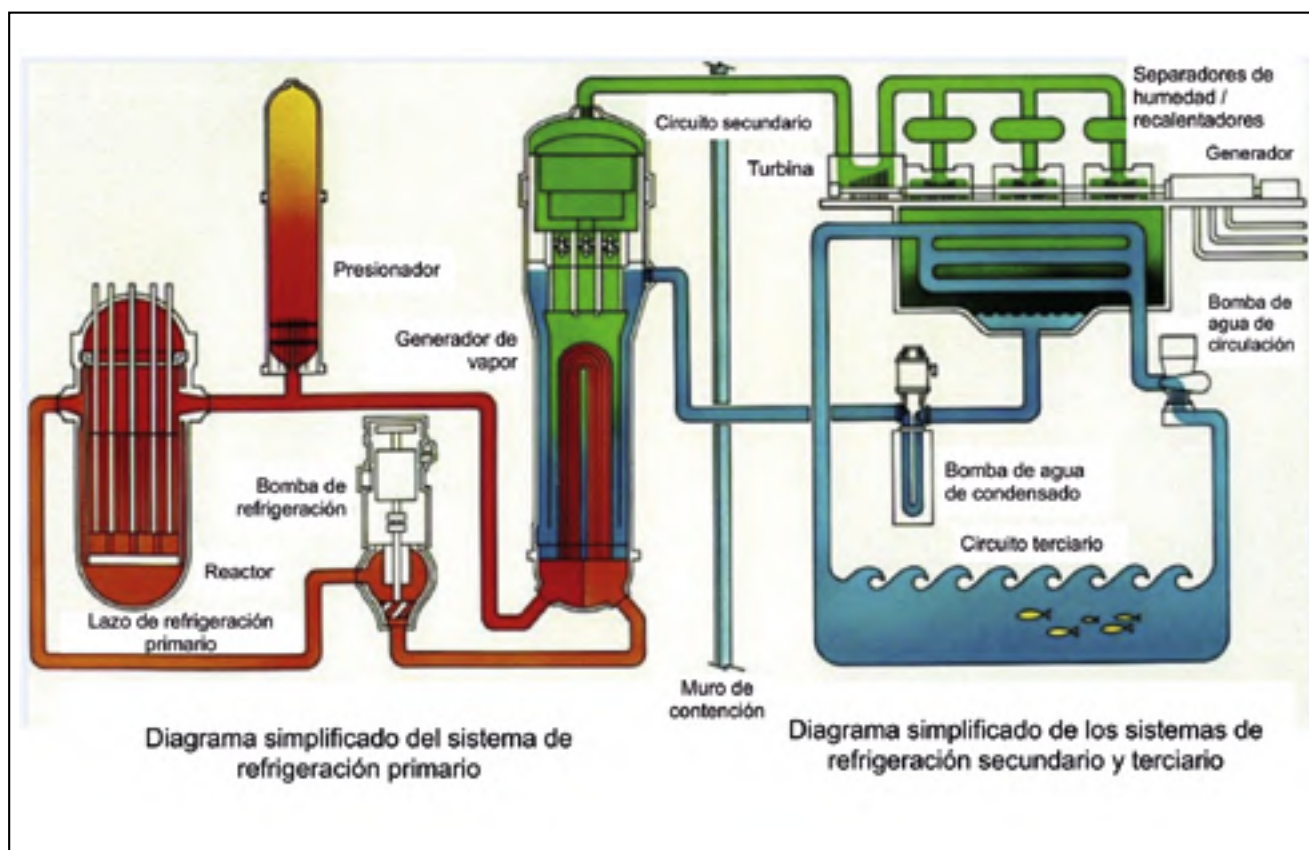


Figura 8. Diagrama simplificado de los circuitos de refrigeración en un reactor tipo PWR. Adaptación al castellano (Cummins y Matzie, 2018).

preciso introducir los circuitos y componentes principales de un reactor nuclear para describir su funcionamiento. Para ello, se utilizará como ejemplo el diseño de un reactor tipo PWR, que, para extraer el calor del reactor y transformarlo en electricidad, utiliza hasta tres circuitos de agua denominados *primario*, *secundario* y *terciario* (figura 8).

3.2.1. Circuitos de refrigeración en una central nuclear

En primer lugar, el circuito de refrigeración primario es el que se encuentra en contacto directo con el reactor nuclear y tiene la función de transmitir la potencia térmica generada en el núcleo del reactor hasta el circuito de refrigeración secundario. El primer elemento de este circuito es la vasija del reactor, que contiene los elementos combustibles, que componen el núcleo del reactor, en su interior, y por el que circula el agua a presión, recorriendo el núcleo en dirección ascendente. Cuando el agua sale del reactor puede hacerlo a través de una de las ramas calientes de los tres lazos que componen el circuito primario. En cada lazo encontramos, por orden, un intercambiador de calor de carcasa y tubos, llamado generador de vapor, y una bomba que devuelve el agua a la vasija del reactor. En uno de los tres lazos se encuentra otro elemento denominado presionador, que tiene la misión de regular la presión del circuito primario, absorbiendo los cambios de volumen del agua durante los procesos de calentamiento y enfriamiento del circuito. Todos estos sistemas se encuentran dentro de la contención de hormigón armado del reactor. El agua del circuito primario circula por el lado de los tubos en el generador de vapor, cediendo su energía térmica al agua que se encuentra

en el lado de la carcasa, por el que circula el agua del circuito secundario, y que se transforma en vapor durante el intercambio de energía por encontrarse a una presión inferior. El circuito secundario es donde tiene lugar el ciclo termodinámico, y, por tanto, transfiere el vapor seco desde el generador de vapor hasta las diferentes etapas de la turbina. Una vez que el agua atraviesa la turbina, entra en el condensador, donde cambia de nuevo de fase para ser bombeada a través de las bombas de alimentación principal hacia el generador de vapor. Estos sistemas se encuentran en el edificio de turbinas de la central. El último circuito es el circuito de refrigeración terciario, que tiene la misión de evacuar el calor que resulta del proceso de condensación que ocurre en el circuito secundario. Para ello, utiliza una corriente de agua externa, por ejemplo, de un río o del mar, que actúa como sumidero último de calor durante la operación normal del reactor. Con este propósito también puede servirse de torres de refrigeración, que son esenciales para reducir el impacto del calentamiento del agua en los ríos, de modo que parte de la corriente es evaporada en torres de refrigeración para limitar el salto térmico del caudal aguas abajo de la central nuclear.

3.2.2. Ciclo de operación en un reactor PWR

Desde el punto de vista de la operación, en los reactores PWR actuales se introduce combustible de uranio enriquecido hasta el 5 % en isótopos de uranio-235 para lograr un ciclo de operación de 18 meses aproximadamente, y producir una potencia térmica de más de 3.000 MW. Con este enriquecimiento tienen que asegurar que pueden mantener la reacción en cadena de forma estable

durante todo el ciclo de operación, es decir, que pueden mantenerse en lo que denominamos estado “crítico”. Ese enriquecimiento irá disminuyendo a medida que avance el ciclo de operación debido a que los isótopos de uranio-235 se consumen durante la producción de energía, disminuyendo la capacidad de producir reacciones de fisión en el reactor, o, reactividad. Por tanto, si no hiciésemos nada al respecto, no tendríamos concentración de uranio suficiente para mantener la reacción de fisión en cadena. La solución reside en el mecanismo de control de la reactividad empleado. Al principio del ciclo, el enriquecimiento es superior al necesario para mantener la reacción en cadena, pero, para evitar que el uranio reaccione de forma rápida y la reacción en cadena se acelere (estado “supercrítico”), se introduce un absorbente neutrónico en el reactor, el boro-10, en forma de ácido bórico disuelto en el refrigerante.

El boro-10 tiene la misión de absorber los neutrones que nos conducirían a ese estado supercrítico (el exceso de reactividad), de modo que al principio de ciclo el reactor se mantiene en estado crítico. Durante el ciclo de operación, conforme se consume el uranio-235 y disminuye la reactividad del reactor, también se disminuye la concentración de absorbente para compensar esta pérdida de reactividad, en lo que se denominan diluciones de boro, por lo que la reacción en cadena se mantiene y el reactor se encuentra crítico durante todo el ciclo de operación. Este llega a su fin cuando la concentración de boro es nula, de modo que ya no se puede seguir diluyendo para compensar la disminución de la concentración de uranio-235.

Si bien el boro es un mecanismo de compensación de la reactividad, se trata de un mecanismo de control «lento», y que no es práctico cuando se quiere variar significativamente la potencia del reactor de manera instantánea. Con este propósito, actúa el sistema de barras de control, un sistema de control de la reactividad más rápido. Las barras están compuestas por materiales absorbentes de neutrones, como la plata, el indio y el cadmio (AIC), o el carburo de boro (B_4C). Al ser introducidas en el reactor nuclear, absorben los neutrones de forma instantánea, y, por tanto, tienen un efecto inmediato sobre la reacción en cadena, que puede ser detenida en menos de 5 segundos.

Una vez que se ha hecho hincapié en el funcionamiento básico de un reactor nuclear PWR de segunda generación, en los siguientes subapartados nos centraremos en analizar qué características han experimentado un cambio sustancial y cuáles se mantienen en el diseño del reactor de NuScale.

3.3. Características del SMR de NuScale

El reactor de NuScale es un reactor de 77 MWe, por lo que su núcleo debe ser capaz de producir en torno a 250 MW de potencia térmica (MWt), sustancialmente inferior a los 4.000 MWt de sus hermanos mayores. En este reactor *SMR* podemos encontrar la vasija del reactor, que contiene el núcleo constituido por elementos combustibles de sección cuadrada de 2 m de altura activa frente a los aproximadamente 4 m de los reactores grandes, y que se encuentra localizado en la parte inferior de la vasija. Los elementos combustibles, de color rojo en la figura 7,

están constituidos por agrupaciones de vainas de circonio que contienen pastillas de óxido de uranio apiladas en su interior. Mientras que la sección transversal de los elementos es igual a de los grandes PWR, de geometría rectangular de 17 x 17 barras de combustible con 25 tubos de agua para alojar las barras de control del reactor, su altura es considerablemente inferior, poco más de la mitad. El núcleo está constituido por 37 elementos combustibles, frente a los 157 de los reactores PWR de segunda generación o los 241 del reactor *EPR* (*European Pressurized Reactor*) de tercera generación. Los diseños *SMR* de agua ligera muestran una densidad de potencia considerablemente inferior, aproximadamente la mitad, en comparación con los diseños grandes, aunque otros diseños de *SMR* basados en flujos neutrónicos de espectro rápido pueden obtener densidades de potencia muy superiores. El óxido de uranio utiliza los mismos enriquecimientos de hasta el 5 % que los reactores actuales, aunque algunos diseños *SMR* también estarían habilitados para utilizar combustible *MOX* y desarrollar ciclos de operación superiores a los dos años actuales. En el caso de otros diseños de *SMR*, podría utilizarse combustible con un enriquecimiento superior de hasta el 19 %, conocido como *HA-LEU*, para obtener ciclos de operación de hasta 20 años.

3.3.1. Sistemas de refrigeración pasivos

En el caso de NuScale hablamos de un reactor de diseño integral, en el que los elementos del circuito de refrigeración primaria están contenidos en el mismo recipiente: la vasija del reactor. Esta es una diferencia clave frente a los reactores PWR, que se explicaron anteriormente y en los que todos los componentes del circuito primario del reactor se encuentran fuera de la vasija, ya que simplifica sustancialmente el diseño del circuito, así como la operación y el mantenimiento de la unidad. La vasija del reactor, a su vez, está rodeada de vacío en el interior de una segunda vasija, denominada *vasija de contención*.

En la figura 9 se muestran los principales componentes del reactor. Para evacuar el calor de todo el conjunto, el refrigerante recorre el núcleo desde su parte inferior hasta las cotas más altas. Al llegar a la parte superior del núcleo, entra en un conducto más largo que el núcleo, pero más estrecho, conocido como *riser*, generando efecto chimenea para circular el refrigerante sin necesidad de motobombas. Al salir de este conducto, el flujo alcanza al presionador en el espacio superior de la vasija del reactor y cambia su dirección hacia abajo por la periferia exterior del *riser*, llegando a los generadores de vapor por el lado del circuito primario, y que también se encuentran dentro de la vasija del reactor. Este calor se transfiere a través de las paredes de un generador de vapor helicoidal hacia el circuito secundario donde se genera el vapor que será llevado hacia el sistema de generación de potencia eléctrica, escapando de la vasija del reactor y de la vasija de contención mediante unos conductos hacia el grupo generador del módulo. Por último, en este *SMR* la bomba que recircula el flujo desde el generador de vapor a la parte inferior del núcleo desaparece, ya que el flujo está impulsado por la circulación natural. No obstante, en otros diseños de *SMR* sí que podremos encontrar otro tipo de bombas,

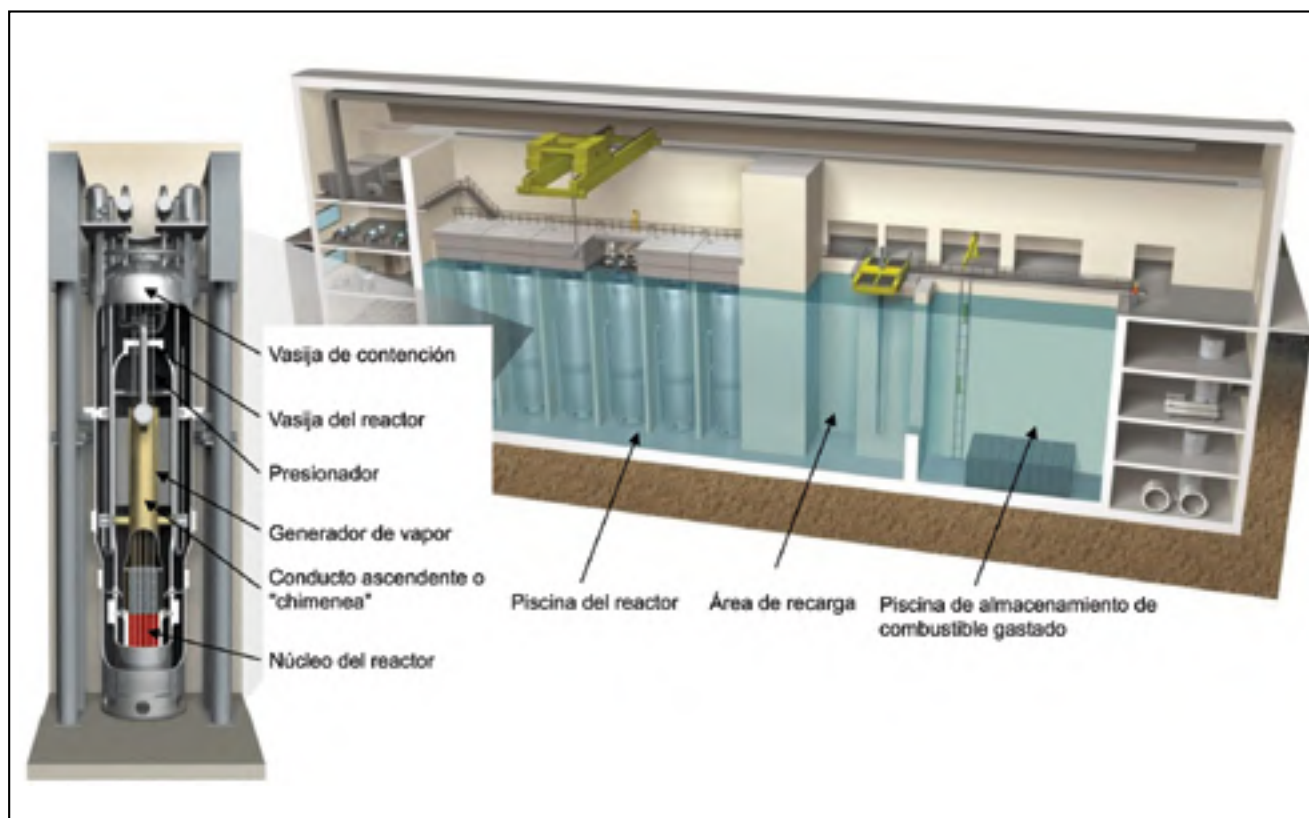


Figura 9. Componentes del reactor de NuScale, en una instalación que agruparía 12 módulos, todos ellos sumergidos en una piscina que actuaría como sumidero último de calor (Ingersoll *et al.*, 2014).

mucho más compactas en comparación con las de los reactores de segunda generación.

3.3.2. Ciclo de operación y control de la reactividad

Desde el punto de vista del control de la potencia (o de la reactividad), los elementos de control son completamente análogos a los de los reactores PWR actuales: utilizan boro para compensar la pérdida de reactividad debida al consumo del uranio mediante diluciones de boro, y utilizan barras de control compuestas por dos secciones diferentes: la sección inferior de la barra de control (la primera que se introduce en el reactor, ya que las barras se introducen de arriba hacia abajo) está compuesta de plata, indio y cadmio, y la parte superior de las barras está compuesta por carburo de boro, que tiene un mayor poder de absorción de neutrones para detener o ralentizar de forma más eficaz la reacción en cadena. Cabe mencionar que todas las similitudes que encontramos con los reactores actuales tienen un impacto positivo tanto en el diseño del reactor como en su licenciamiento, ya que el marco regulatorio que debe desarrollarse para licenciar estos reactores es otro foco del esfuerzo que actualmente desarrollan los grandes organismos reguladores en materia de seguridad nuclear.

4. VENTAJAS DE LOS REACTORES MODULARES PEQUEÑOS

4.1. Modularidad

La modularidad, en el contexto de los SMR, hace referencia a la capacidad de fabricar componentes y módulos

de estos reactores. Esta característica modular ya se practica en los reactores de Generación III+. Sin embargo, en el caso de los SMR las acciones necesarias para su construcción se han limitado sustancialmente, con lo que se pueden reducir los tiempos de construcción de forma significativa, además de los costes de fabricación. Esta filosofía permitiría producir en cadena los componentes y módulos necesarios, que se pueden fabricar, transportar y montar con mayor facilidad. Si las plantas chinas de más reciente construcción, como Tianwan 5 y 6 y Fuqing 5, han alcanzado tiempos de construcción de entre 5 y 6 años, la agrupación de módulos de NuScale podría estar acabada antes de los 3 años tras el vertido del primer hormigón, u hormigón nuclear. La modularidad también supone una ventaja desde el punto de vista de la seguridad energética, ya que los periodos de recarga se pueden llevar a cabo de forma planificada e independiente para cada módulo, por lo que este periodo no supone la pérdida completa de la producción energética de la planta, al poder llevarse a cabo de forma secuencial para los diferentes módulos.

4.2. Emplazamiento

Un factor limitante a la hora de construir una central nuclear es el emplazamiento, ya que existen restricciones a la hora de ubicar un reactor en emplazamientos que, por ejemplo, no tienen una infraestructura adecuada para instalar una central nuclear de gran tamaño (accesos difíciles, redes eléctricas limitadas, limitación de refrigeración si no se dispone de un gran sumidero de calor como puede ser un río o el mar, etc.). Los SMR pueden adaptarse a este tipo de emplazamientos ya que tienen menores necesidades del entorno exterior en cuanto a tamaño de la red eléctrica se

refiere, o de fuentes de refrigeración por sus potencias inferiores y diseños de evacuación de calor mejorados basados en la convección natural.

4.3. Integración en el parque de generación

Por su inferior tamaño y su versatilidad, los SMR pueden dar lugar a configuraciones más versátiles en el parque de generación junto con las energías renovables, pues integran sistemas más avanzados de seguimiento de carga y pueden adaptar su producción funcionando en régimen de cogeneración para producir calor industrial, calefacción de distrito, o producción de hidrógeno mediante electrólisis. Esto permite maximizar el aprovechamiento del combustible, ya que pueden operar en un entorno de demanda y producción de energía cambiante, acumulando energía cuando esta no sea necesaria en forma de hidrógeno, listo para ser utilizado también como vector energético.

4.4. Seguridad nuclear

Desde el punto de vista de la seguridad nuclear, los reactores modulares han implementado técnicas de diseño de los sistemas de seguridad que en su conjunto han logrado disminuir hasta cuatro órdenes de magnitud la frecuencia de daño al núcleo. Esta frecuencia de daño al núcleo, o *Core Damage Frequency, CDF* por sus siglas en inglés, es un parámetro utilizado en seguridad nuclear para medir el grado de seguridad de un reactor nuclear. Se obtiene como resultado de un análisis probabilista de seguridad que contempla todos los sucesos iniciadores de accidentes, a los que se les asocia una probabilidad de ocurrencia, y los combina con las respectivas secuencias de respuesta de la planta a dicho suceso iniciador, sistema por sistema, componente a componente, incorporando en el cálculo la probabilidad de fallo de todos los equipos. Para los reactores de Generación II estaríamos hablando de una cifra de 10^{-6} , es decir, que podría ocurrir un accidente severo con una frecuencia de una entre un millón, para los reactores de Generación III y III+ esta cifra ya se había disminuido

hasta 10^{-8} , mientras que para los diseños actuales de reactores SMR, la probabilidad de accidente severo sería de una entre diez mil millones. Esto es consecuencia de la disminución de componentes y de la incorporación de sistemas de refrigeración pasiva, tanto para la operación normal del reactor, como para su respuesta en caso de secuencia accidental.

En el caso concreto de NuScale, el diseño contempla la refrigeración por circulación natural en todo momento, por lo que no requiere de bombas para la refrigeración del núcleo. También se ha disminuido el número de componentes activos, que implica que los componentes no requieren de alimentación eléctrica (por lo que disminuirían la probabilidad de accidente motivada por un *Station Blackout, SBO*, o un suceso de *Loss Of Off-site Power, LOOP*), y que disminuye su probabilidad de fallo al depender de fuerzas naturales como la gravedad de forma directa o indirecta mediante la diferencia de densidades como fuerza motora de la circulación de los fluidos. Durante la operación normal, la energía producida en la reacción nuclear calienta el circuito primario del reactor, haciendo que el fluido caliente ascienda por el reactor por convección natural, como se ha explicado anteriormente.

Desde el punto de vista del accidente severo, los SMR tienen una mayor relación superficie volumen y una estrategia de refrigeración basada en sistemas de seguridad pasiva, por lo que aumenta la eficiencia de la evacuación de calor. En este diseño, la vasija de contención se encuentra rodeada de agua al estar sumergida en una piscina que tiene una doble función: último sumidero de calor y blindaje de la radiación. En consecuencia, teniendo en cuenta la baja potencia del reactor, se asegura la refrigeración a largo plazo sin necesidad de alimentación de potencia eléctrica del exterior por convección natural en caso de accidente.

Este diseño implica que el *coping time*, o tiempo entre el inicio de la secuencia accidental y el momento en el que se produce una pérdida de geometría en el núcleo que impida la refrigeración del reactor, es ilimitado en el caso de ocurrencia de eventos similares al que se produjo en el accidente de Fukushima, un *SBO*. En caso de accidente, al producirse el disparo del reactor, esto es, la introducción

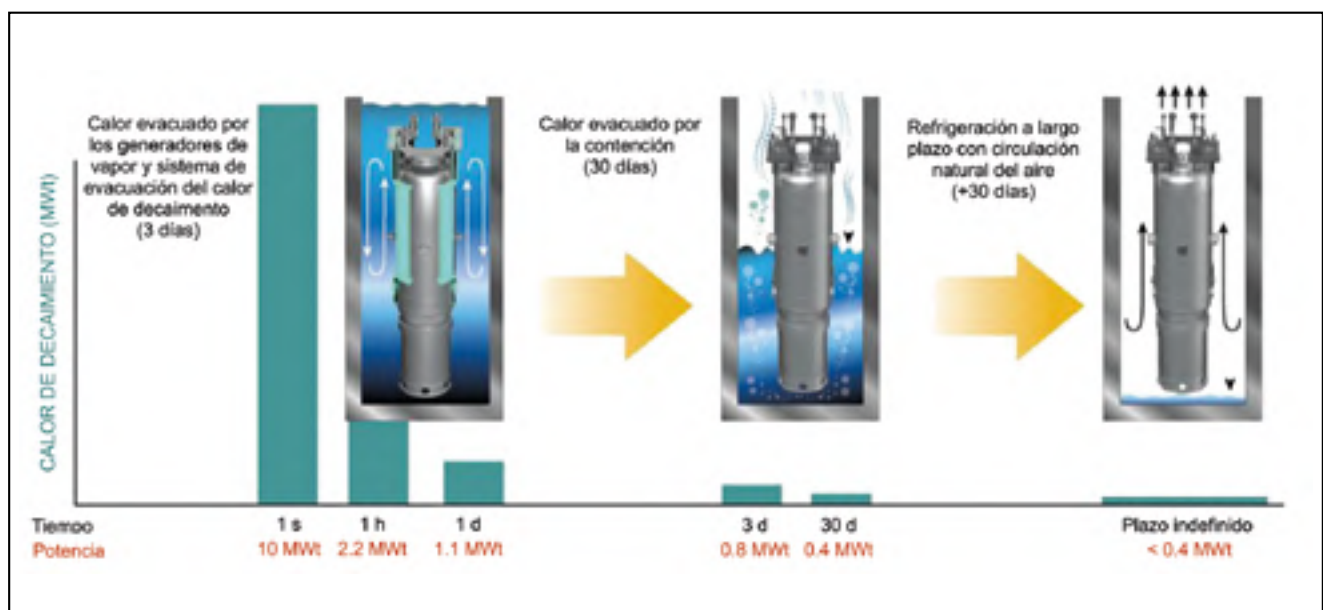


Figura 10. Evolución de los mecanismos de refrigeración hasta el largo plazo en caso de accidente SBO para NuScale (Di Giuli, 2015).

repentina de las barras de control para ejecutar su parada, la potencia nuclear, que proviene de reacciones de fisión, se hace prácticamente cero de forma instantánea. Sin embargo, en el núcleo se sigue produciendo calor debido, principalmente, a la desintegración de todos los núcleos inestables que se generan como resultado de la escisión en dos o más partes de los átomos de uranio. Este es el calor de las desintegraciones radiactivas, que muestra una evolución como la de la figura 10. Si no se encuentra operativo otro sistema que pueda retirar esta energía, el sistema de seguridad pasiva del reactor debe estar diseñado para eliminar gradualmente este calor residual mediante diferentes mecanismos. En los primeros instantes, el refrigerante que se encuentra dentro de la vasija del reactor se calienta, aumentando la presión de esta hasta alcanzar el *set-point* de las válvulas de alivio, que al abrirse permiten al refrigerante inundar el espacio existente entre la vasija del reactor y la vasija de contención. En ese momento, el calor empezará a transmitirse a través de las paredes de la vasija de contención hacia la piscina del reactor, que podrá retirar el calor mediante convección natural como muestra la figura 10 (derecha) en el caso de un único módulo dentro de la piscina del reactor.

4.5. Seguridad física

Desde el punto de vista de la seguridad física, los SMR incluyen en su diseño barreras que pueden resistir el impacto de aviones entre otras amenazas naturales o de dolosa índole. Algunos SMR están diseñados para operar durante largos ciclos de operación sin realizar recargas de combustible, pudiendo ser sellados en fábrica, y minimizando las operaciones de recarga, para las que el reactor podría ser trasladado de nuevo a fábrica, minimizando el trasiego del combustible nuclear y las dosis a los trabajadores. Algunos SMR utilizarán combustible con un enriquecimiento idéntico al que se utiliza en los grandes reactores, aunque también estarán capacitados para funcionar con el combustible MOX y aprovechar el plutonio que resulta de las actividades de reciclado del combustible irradiado en los reactores que operan en la actualidad, aumentando el aprovechamiento del recurso de uranio del parque nuclear actual.

5. ASPECTOS ECONÓMICOS DE LOS SMR

Actualmente, nos encontramos en la implementación a gran escala de los reactores de Generación III y III+, también conocidos como reactores LWR avanzados y evolucionarios, respectivamente. Durante los años 80, el *Electrical Power Research Institute (EPRI)* de los Estados Unidos sentó las bases del diseño de las nuevas generaciones de reactores nucleares con el objetivo de mejorar su competitividad económica y su seguridad como respuesta al cambio de paradigma económico mencionado anteriormente (EPRI, 1986). En los diseños de Generación III se aumenta la competitividad aumentando su potencia y la vida de diseño (de los conocidos 40 años a los 60 años), y se mejorará la seguridad de los reactores, aumentando el número de redundancias en los sistemas de seguridad e incluyendo sistemas de seguridad que contemplan la ruptura de la vasija durante un accidente severo de fusión del núcleo.

Los reactores de Generación III+ incrementan su competitividad incluyendo además la construcción modular, que reduce los tiempos de construcción del reactor hasta un 50 %, e incluyendo sistemas de refrigeración del núcleo en operación normal, y sistemas de seguridad pasivos, mucho más fiables que los activos que dependen de alimentación eléctrica del exterior y que reducen el número de componentes necesarios como bombas y válvulas de forma drástica, con la reducción directa de costes que ello implica. Como reactor representativo de la Generación III podemos destacar el reactor *EPR* de Areva, que ya se encuentra en operación, siendo el primero en alcanzar criticidad en 2018 la unidad I de la Central Nuclear de Taishan (China) de 1660 MWe de potencia, con un coste de 3.800 millones de euros y un tiempo de construcción de 10 años. Otro diseño representativo de la Generación III+ es el reactor AP1000 de Westinghouse, cuyo primer modelo entró en operación en 2018, también, en la Central Nuclear de Sanmen (China), que consta de dos unidades de 1157 MWe de potencia, con un tiempo de construcción de 10 años, pero con un coste conjunto de 6.900 millones de euros. Es preciso aclarar que estos tiempos de construcción también son más largos que los previstos, ya que se trata de los reactores *First Of A Kind (FOAK)*, es decir, los primeros de su clase y que, por tanto, conllevan sobrecostes asociados y demoras en los tiempos de construcción.

Estos nuevos diseños comienzan a responder a las necesidades del contexto actual, en los que las necesidades de ritmo de la transformación energética requieren disminuir aún más los tiempos de construcción, y aumentar la competitividad de la energía nuclear en relación con la competitividad económica de las energías renovables para favorecer su participación en los mixes eléctricos de cero emisiones netas. Las ventajas ya mencionadas de los SMR contribuyen a favorecer su viabilidad económica en comparación con otras tecnologías de cero emisiones por su larga vida útil, el coste de su construcción, y de su operación vaticinan efectos positivos sobre la reducción del LCOE. Además, no solo es necesario disminuir el LCOE de las nuevas plantas, sino también disminuir el coste de la inversión inicial para hacer más atractiva su financiación, obteniendo como resultado un producto más atractivo para la inversión pública y privada. Esta presión sobre la viabilidad económica se ha visto amplificada por la disminución del LCOE de las energías renovables que han configurado un nuevo entorno al que la industria nuclear está respondiendo, extendiendo la operación de las centrales nucleares ya existentes hasta 80 años. Esta extensión de vida útil disminuye el LCOE de la energía nuclear igualándolo al de las energías renovables, como se muestra en la figura 11, y aumenta la competitividad económica de sus reactores con tecnologías como los SMR (Solan *et al.*, 2010).

Es de reseñar, que, aunque la energía nuclear se encuentra actualmente en el podio de energías con menor LCOE, el cálculo considera factores de capacidad del 85 %, por lo que teniendo en cuenta factores más elevados este resultado sería susceptible de mejora. Sin embargo, hay que indicar que el LCOE de una tecnología que se utiliza como potencia de base muestra gran sensibilidad al factor de capacidad de la planta, por lo que en un escenario

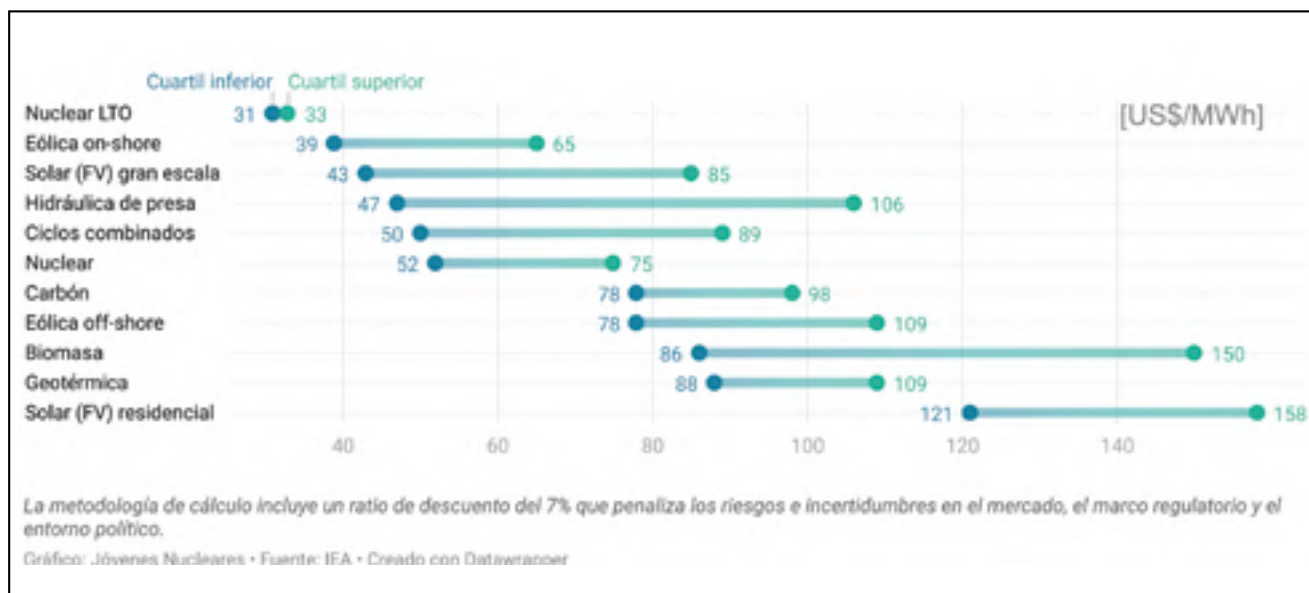


Figura 11. Cuartiles del LCOE para varias tecnologías de generación eléctrica (IEA, OECD/NEA, 2020).

en el que la energía nuclear participa con otras fuentes de energía con mayor variabilidad, es necesaria una respuesta tecnológica para mantener unos valores de LCOE competentes.

Los SMR y sus diversas aplicaciones ya se postulan como una respuesta ante este tipo de escenarios y aparecen en escena para resolver los problemas que enfrenta la industria nuclear en la actualidad. Abordan, por ejemplo, la reducción del LCOE para competir con otras fuentes de energía y asegurar el suministro de energía baja en emisiones de CO₂. No obstante, su mayor ventaja desde el punto de vista económico es la reducción de los costes iniciales o capitalizados al aprovechar las ventajas de la estandarización, la fabricación en serie y la economía de escala, lo que supone un atractivo desde el punto de vista del inversor. Según las estimaciones de la U.S. Nuclear Regulatory Commission, el organismo competente en materia de regulación y seguridad nuclear de los Estados Unidos, un reactor SMR de 100 MWe tendría un coste inicial de alrededor de 500 millones de euros (Solan *et al.*, 2010), sustancialmente inferior a los 5000 millones de euros de los reactores de Generación III y III+.

En el caso del reactor de NuScale, su LCOE ya es competitivo respecto de la construcción de nuevos reactores de tamaño convencional en su versión FOAK, según estimaciones de la propia compañía realizadas para una agrupación de 12 módulos, cada uno de ellos constituido por su propio reactor y grupo de generación eléctrica correspondiente, que supondrían una potencia instalada de 920 MWe (NuScale LLC., 2020). El informe conjunto de la IEA y la OECD/NEA (IEA, OECD/NEA, 2020) establece una horquilla para el LCOE de los reactores de 1.300 MWe de nueva construcción entre los 40 y los 95 €/MWh, pudiendo competir con las energías emisoras como los ciclos combinados de gas. Las estimaciones de NuScale establecen un LCOE de 60 €/MWh para su reactor FOAK, que ya se encuentra dentro de esa horquilla, aunque lejos de los 30 €/MWh de las nucleares actuales con extensión de vida. Por otro lado, en la tabla 1 también se muestra una descomposición de los costes capitalizados por unidad de potencia instalada para reactores grandes y una estimación para el

FOAK de NuScale basada en proyecciones de la Idaho Public Utilities Commission en 2019 (Black *et al.*, 2019).

La comparativa entre los reactores, sin tener en cuenta la extensión de vida para el NuScale, es justa, ya que para el cálculo de ambos tipos de planta se han contemplado 60 años de vida útil: por un lado, los 60 de diseño de los nuevos reactores nucleares y de NuScale, y por otro lado los 40 años de diseño más los 20 de extensión para los reactores construidos durante los años 80. Este LCOE podría disminuir sustancialmente si se consolida una cadena de producción para los reactores NOAK (*Nth Of A Kind*), ya que se reducirían de forma sustancial los costes de construcción. La inversión inicial en reactores SMR mejora a los reactores LWR convencionales en los costes directos de construcción (equipos, materiales, etc.) y ahorra alrededor del 70 % de los costes indirectos asociados a los servicios de diseño, gestión y supervisión de campo. Tanto el efecto de la LTO sobre el LCOE, como futuras mejoras de diseño

Reactor	LWR grande
Costes directos capitalizados (€/kW)	2517
Costes indirectos capitalizados (€/kW)	2800
Costes capitalizados totales (€/kW)	5317
Reactor	NuScale FOAK
Costes directos capitalizados (€/kW)	2411
Costes indirectos capitalizados (€/kW)	887
Costes capitalizados totales (€/kW)	3298

Tabla 1. Costes de inversión por unidad de potencia instalada para NuScale y reactores LWR de tamaño convencional y nueva construcción en USA a diciembre de 2020 (Black *et al.*, 2019).

apuntan a que este reactor podría ganar aún más ventaja durante los próximos años, aunque actualmente las estimaciones contienen un nivel no desdeñable de incertidumbre asociado.

6. APLICACIONES DE LOS SMR

Las nuevas tecnologías de generación renovable y la consideración de nuevos vectores energéticos como el hidrógeno despliegan un amplio abanico de aplicaciones en las que los SMR tienen un papel muy importante que jugar, y no solo desde el punto de vista de la producción de electricidad. Las principales aplicaciones no eléctricas de los reactores SMR van desde el apoyo a la calefacción de distrito, en régimen de cogeneración, hasta su uso para la industria de producción de hidrógeno, pasando por su uso en el suministro de electricidad a zonas poco accesibles o la propulsión espacial.

6.1. Cogeneración

La cogeneración para la producción de calor y electricidad está adquiriendo una importancia cada vez mayor en todo el mundo debido a la creciente demanda de energía

no solo en forma de energía eléctrica. La importancia de la producción combinada de calor y electricidad se deriva de la mejora de la eficiencia en el uso de combustible, y de la reducción de las emisiones de dióxido de carbono (CO_2), óxidos de nitrógeno (NO_x) y dióxido de azufre (SO_2). Debido a que las plantas de cogeneración tienen más de una aplicación, consiguen mayor eficiencia que la generación de electricidad o subproductos de forma individual. Se considera que las grandes plantas de producción eléctrica, como nucleares o térmicas, son la opción más adecuada para la instalación de plantas de cogeneración (IAEA, 2017a). Centrándonos en las centrales nucleares, el calor generado puede emplearse en calefacción de distrito, desalinización o producción de hidrógeno, entre otras aplicaciones. El empleo de estas centrales para la producción conjunta de electricidad y calor para cualquiera de estos procesos consigue aumentar la eficiencia de la planta y los beneficios económicos de las mismas, así como reducir las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas al empleo de combustibles fósiles para conseguir el vapor a altas temperaturas requerido para algunas aplicaciones, como las derivadas de la industria petroquímica. Sin embargo, no todas las centrales son capaces de dar soporte a las mismas aplicaciones, pues dependerá del tipo de tecnología,

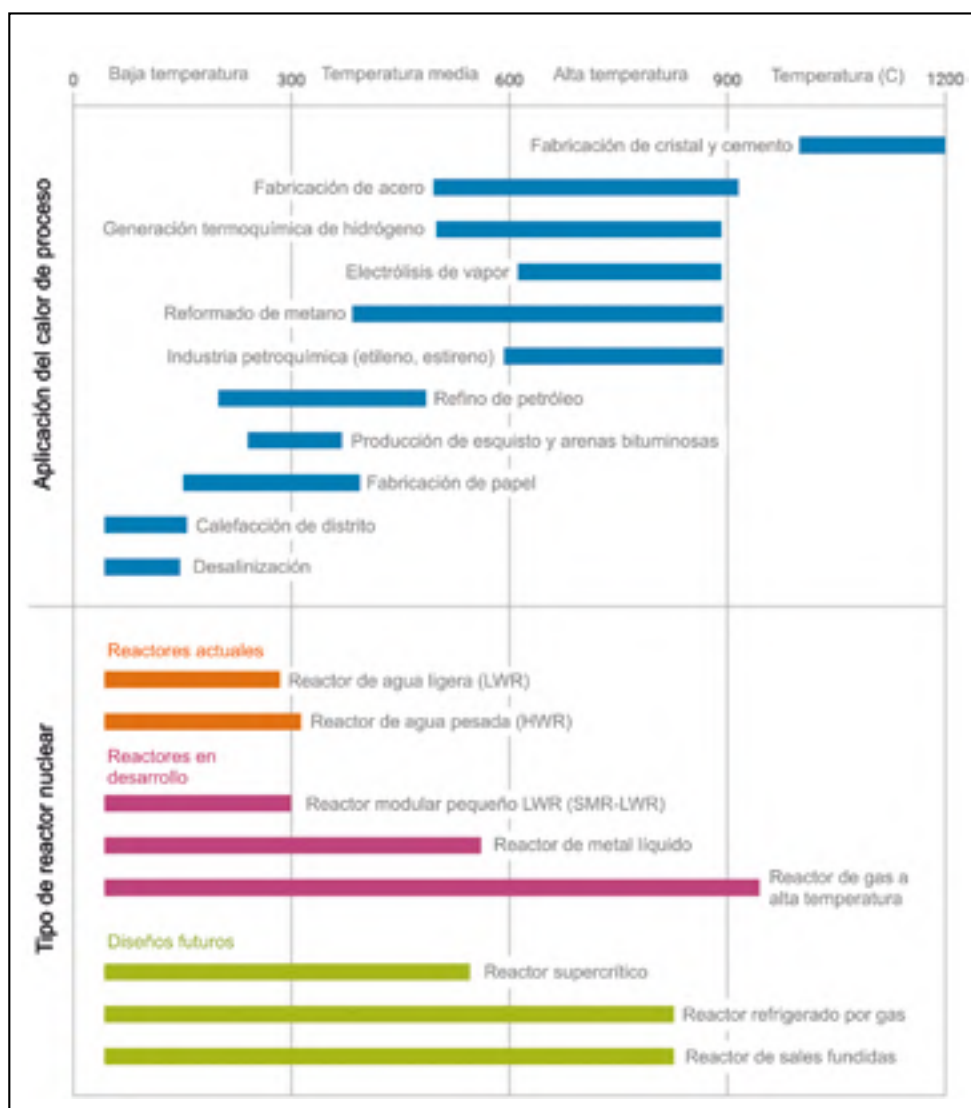


Figura 12. Rangos de temperatura para la aplicación del calor de proceso y tipos de reactores nucleares. Adaptación al castellano (IAEA, 2017b; WNA, 2021).

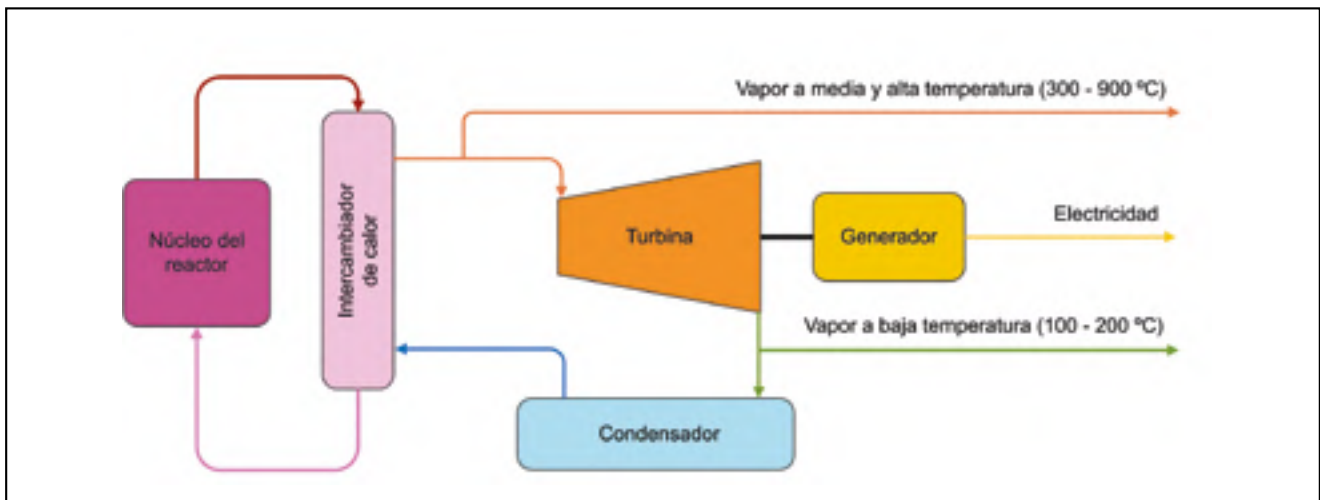


Figura 13. Posibles extracciones de vapor en el circuito secundario de un reactor nuclear para obtener vapor de diferentes características (Fuente: elaboración propia).

del combustible y de la temperatura requerida por el proceso de cogeneración (IAEA, 2017b).

Como se observa en la figura 12, las aplicaciones de cogeneración de los reactores nucleares se encuentran sujetas a la temperatura que son capaces de alcanzar (IAEA, 2020). Nos encontramos con que los reactores de agua ligera pueden emplearse como apoyo a la calefacción de agua de distrito o a la desalinización. Sin embargo, otras aplicaciones de ámbito más industrial como la producción de hidrógeno necesitan temperaturas más elevadas que se corresponden mayoritariamente al rango de aplicación de los reactores de Generación IV que funcionan a mayor temperatura y que, por tanto, invitan a introducir características de este tipo de reactores avanzados a la escala SMR.

Sabiendo que las aplicaciones consideradas para la cogeneración demandan unas condiciones distintas de presión y temperatura, parece lógico que las extracciones de vapor del ciclo se deben dar en distintos puntos (The Royal Society, 2020). En la figura 13 se encuentra esquematizado un reactor tipo PWR y sus puntos de extracción de vapor. Se consideran aplicaciones de baja temperatura (de 100 a 200 °C) para las que se emplean las condiciones de salida de turbina, aprovechando así el calor residual que en otras circunstancias se evacuaría en el condensador, perdiéndose y condenando la eficiencia del ciclo. Algunos ejemplos de estas aplicaciones serían la calefacción de distrito y la desalinización. Debido a que las condiciones necesarias para estas plantas de cogeneración se alcanzan en los reactores de agua ligera, son las aplicaciones con mayor experiencia operativa acumulada en todo el mundo y encontramos en la literatura numerosos casos (IAEA, 2009). Además, nos proporcionan los ejemplos de ciclos con mayores incrementos de eficiencia de aprovechamiento térmico.

Los reactores convencionales refrigerados por agua han sido tradicionalmente los más empleados como fuente de calor para la calefacción de agua de distrito, sin embargo, la instalación de SMRs ofrece distintas ventajas frente a los grandes reactores. Gracias a los estándares de calidad que cumplen y a su reducido tamaño, la construcción se puede realizar más cerca del núcleo de la población, reduciendo tanto los costes como las pérdidas térmicas asociadas al transporte. Además, debido a la disminución del tiempo de

construcción, se abre la posibilidad de cubrir la demanda con menores periodos de planificación.

6.2. Producción de hidrógeno

Uno de los procesos que está adquiriendo más relevancia a nivel mundial es la producción de hidrógeno (The Royal Society, 2020). La energía nuclear puede dar soporte a este proceso mediante dos vías: empleo del calor en ciclos termoquímicos, o empleo de calor y electricidad en procesos de electrólisis (Yildiz y Kazimi, 2006). La tecnología con mayor desarrollo en la producción de hidrógeno mediante procesos termoquímicos es el reformado con vapor. Este proceso, pese a ser el más económico, genera considerables cantidades de CO₂. También existen procesos de separación de agua, que gracias al bajo coste del agua y la no producción de CO₂ tienen mayores beneficios, estos procesos tienen un gran potencial de aplicación comercial.

Para aplicaciones que requieran mayor temperatura de proceso como la producción de hidrógeno (IAEA, 2017a), se requiere intercambiar calor antes de la turbina, donde se produce la reducción de presión y temperatura. Además, en la mayoría de estos casos, las temperaturas se alcanzan en reactores de Generación IV, donde el ciclo termodinámico principal no es un ciclo de Rankine. Es el caso de la industria petroquímica, de papelera o de la generación de hidrógeno.

En la actualidad, países como Reino Unido apuestan por la producción de hidrógeno basada en energía nuclear. Si a principios de 2021 el *Nuclear Industry Council* (NIC) estimaba que hasta un tercio de la producción de hidrógeno podría tener origen nuclear en 2050 (Nuclear Industry Council, 2021), aproximadamente 75 TWh producidos con entre 12 y 13 GWe nucleares mediante electrólisis y reformado de vapor, en agosto de 2021, Boris Johnson anunciaba que, en 2030, Reino Unido ya contaría con 5 GWe nucleares para la producción de hidrógeno.

6.3. Zonas remotas de difícil acceso

Los SMR concebidos para suministrar energía a zonas remotas ya son una realidad, y en este caso, Rusia es



Figura 14. La primera central nuclear flotante de la historia, *Akademik Lomonosov* (Fuente: Rosatom).

pionera con su central nuclear flotante *Akademik Lomonosov* (figura 14). Esta central se encuentra en operación desde mayo de 2020 con el objetivo de suministrar energía a la red de Chukotka, en el extremo nordeste de Rusia, en la costa del mar de Bering. Este distrito tiene alrededor de 50.000 habitantes que viven dispersos entre varias aldeas, y posee grandes reservas de petróleo, gas natural, carbón, oro y tungsteno, por lo que su población vive de la minería principalmente y, además, tiene una red eléctrica aislada que sirve a toda la región.

Esta central nuclear flotante consta de dos reactores SMR de modelo KLT-40S de diseño PWR, con una potencia eléctrica de más de 35 MWe cada uno, y con una vida de diseño de 40 años. El reactor KLT-40S utiliza uranio enriquecido hasta un 20 % para obtener ciclos de operación de hasta 3 años (*Akademik Lomonosov Floating NPP, Pevek, Chukotka, Russia*, 2020). El núcleo del reactor mide 1,22 m de diámetro y 1,22 m de altura, y consta de 121 elementos combustibles. El *Akademik Lomonosov* es un proyecto piloto que nació en 2007 y que supone el comienzo de un proyecto más grande, que comprenderá toda una flota de centrales nucleares flotantes destinadas a suministrar energía a las poblaciones aisladas y a campos de extracción de recursos energéticos como gas y petróleo off-shore. Reactores más avanzados de su clase son los diseños RITM-200, también de diseño PWR integrado, y que desde octubre de 2020 propulsan el rompehielos *Arktika*, con hasta cuatro proyectos similares en marcha que se pondrán en funcionamiento entre 2022 y 2026. Uno de los avances más importantes de los reactores RITM-200 respecto del KLT-40S es, además de su diseño integrado, una vida de diseño de hasta 60 años y ciclos de operación que se extienden desde los 3 a los 10 años, dependiendo del modelo, por lo que se minimiza la indisponibilidad del reactor por las maniobras de recarga.

6.4. Exploración espacial

La aplicación de los SMR en la exploración espacial ya es una de las propuestas de la oficina para el comercio

espacial de la NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) en una orden ejecutiva sobre los SMR aplicados a la defensa y al espacio (*Executive Order on Small Modular Reactors for Defense and Space – Office of Space Commerce*, 2021). Esta orden ejecutiva tiene el propósito de revitalizar el programa de exploración espacial de Estados Unidos desarrollando diferentes opciones de suministro energético para satisfacer las necesidades de defensa. Utilizar tecnología SMR permitiría a Estados Unidos mantener su liderazgo tecnológico a la vez que postula una opción de exploración sostenible en la Luna y Marte entre otras localizaciones. Estos SMR se fabricarían en la Tierra y serían llevados a los emplazamientos seleccionados para ser operados de forma remota. La propia NASA ya ha calificado como difícil de conseguir, si no imposible, su meta de establecer una base lunar sin contar con la energía nuclear. Estas bases que tomarían suministro de energía nuclear podrían estar habitadas por astronautas o servir como estaciones de exploración remotas en diferentes lugares del sistema solar, aunque las aplicaciones de los SMR no se limitarían solo al suministro de energía *in situ* en las bases proyectadas, sino que también se extenderían a retomar los diseños de reactores nucleares para la propulsión nuclear (Brown, 2022).

Utilizar energía nuclear en la propulsión espacial puede aumentar considerablemente el aprovechamiento al reducir hasta un 25 % los tiempos de viaje en comparación con los sistemas de propulsión química (*6 Things You Should Know About Nuclear Thermal Propulsion*, 2021). La aplicación de la energía nuclear en la propulsión espacial no es algo nuevo, de hecho, en 1965 la NASA puso en órbita su reactor SNAP-10A como parte del *SNAPSHOT program* (SNAP-10, -10A and SNAPSHOT – *Beyond NERVA*, s. f.), siendo el primer reactor nuclear en ser colocado en órbita que probó el funcionamiento de la tecnología de propulsión iónica de aeronaves, aunque dejó de funcionar poco más de un mes después debido a un fallo del sistema eléctrico no relacionado con la parte nuclear de la instalación.

Actualmente, la NASA lleva a cabo varios programas que estudian diferentes opciones de propulsión nuclear. El programa Kilopower es un proyecto experimental lanzado por la NASA y el DOE (*Department of Energy*) en 2017, que tiene por objetivo el diseño de un reactor nuclear que genere entre 1 y 10 kWe de potencia eléctrica, utilizando para este propósito un motor lineal Stirling que alimente el generador eléctrico de la aeronave. El generador eléctrico sometería una corriente de Xe a una diferencia de potencial lo suficientemente elevada como para ionizar el xenón y generar un plasma que puede ser acelerado para propulsar la aeronave. Estos diseños inicialmente contemplaban el empleo de uranio enriquecido al 93 %, aunque examinan las ventajas de utilizar enriquecimientos más reducidos, que, aunque aumenten el peso de la aeronave debido a la mayor masa del combustible, tamaño y blindajes de neutrones y radiación gamma necesarios para proteger a la tripulación, son un material más accesible por los centros de investigación. Otra opción desde el punto de vista de la propulsión nuclear es la propulsión térmica (Houts *et al.*, 2014), basada en el funcionamiento del reactor desde un punto de vista más convencional y menos sofisticado, aprovechando la energía térmica producida para calentar el hidrógeno almacenado en un tanque y generar así el empuje necesario para propulsar la aeronave. Este sistema tiene como ventajas respecto a la propulsión eléctrica que aligera el peso de la aeronave y genera un mayor empuje. Sin embargo, la gestión del propelente es más complicada al tratarse de hidrógeno.

Uno de los avances más recientes en este campo ha sido la demostración del funcionamiento de un nuevo tipo de reactor nuclear en el marco del programa Kilopower mencionado anteriormente, que permitirá misiones tripuladas de larga duración a la Luna y a Marte, en un experimento llevado a cabo en el Nevada National

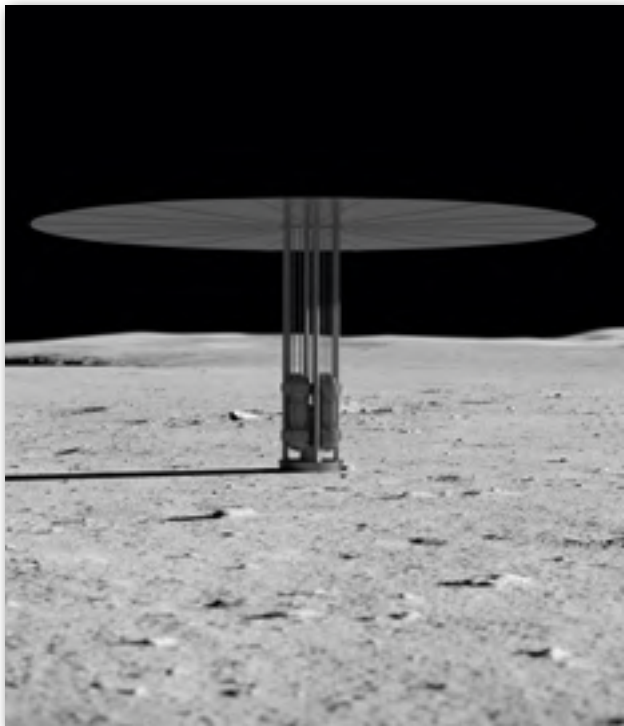


Figura 15. Recreación artística del concepto de reactor nuclear con aplicación espacial en la superficie lunar (Fuente: NASA).

Security Site en 2017 (Potter, 2018). El diseño probado (figura 15), suministraría 10 kWe de potencia eléctrica durante 10 años. Según sus cálculos, cuatro reactores de este tipo podrían abastecer una base habitada en la luna, donde la generación de energía con paneles solares, por ejemplo, no es posible debido a la duración de las noches lunares de hasta 14 días.

7. REACTORES SMR AVANZADOS

Como ya se ha comentado anteriormente, alrededor de 70 diseños distintos de SMR se encuentran bajo consideración actualmente (IAEA, 2020). Se puede encontrar una amplia variedad en cuanto a las tecnologías propuestas para estos diseños, destacando que prácticamente la mitad son SMR refrigerados por agua. Estos diseños adoptan, por tanto, una tecnología madura con gran recorrido operacional y, de hecho, varios de ellos se encuentran en fases avanzadas de su diseño e implementación. No obstante, surgen nuevas líneas de desarrollo basadas en otras tecnologías como pueden ser los reactores refrigerados por gas a alta temperatura, los reactores de espectro neutrónico rápido o los reactores de sales fundidas. En general, estas tecnologías avanzadas se encuentran en una fase más preliminar de su diseño y se espera que jueguen un papel relevante a más largo plazo. En este apartado se destacan los aspectos más interesantes de cada una de estas líneas de desarrollo con el objetivo de aportar una visión más general sobre el futuro de los SMR.

7.1. Reactores refrigerados por gas a alta temperatura

Los reactores refrigerados por gas a alta temperatura o *High Temperature Gas Cooled Reactors (HTGR)* son de gran interés gracias a la gran variedad de aplicaciones a las que dan acceso. Considerando que proporcionan calor de proceso a temperaturas por encima de los 750 °C, estos reactores se pueden emplear para una producción eléctrica más eficiente, así como para distintas aplicaciones industriales como la producción de hidrógeno o la desalinización. Es importante indicar que pese a incluir esta tecnología entre los diseños SMR avanzados, hay actualmente varios reactores de este tipo en operación, destacando el HTR-PM, construido en China y en operación desde 2021. Así mismo, una notable experiencia operativa rodea a esta tecnología en su vertiente de grandes reactores en países como Sudáfrica o Reino Unido.

Estos reactores están refrigerados generalmente por helio y moderados por grafito, encontrando el combustible en forma de elementos esféricos recubiertos. Este tipo de combustible, en su variante más extendida, se conoce como *TRISO (TRi-structural ISOTopic particle fuel)*. En este diseño, una esfera o *pebble* de combustible contiene en su interior gran cantidad de esferas de óxido de uranio, recubiertas de diferentes capas (figura 16) con distintas funciones, como el almacenamiento de los productos de fisión o la aportación de integridad estructural al combustible. Esta tecnología aporta grandes ventajas en términos de la seguridad inherente del sistema, debido principalmente a las altas temperaturas que puede soportar el combustible y al almacenamiento individual de los productos de fisión en cada una de las esferas.

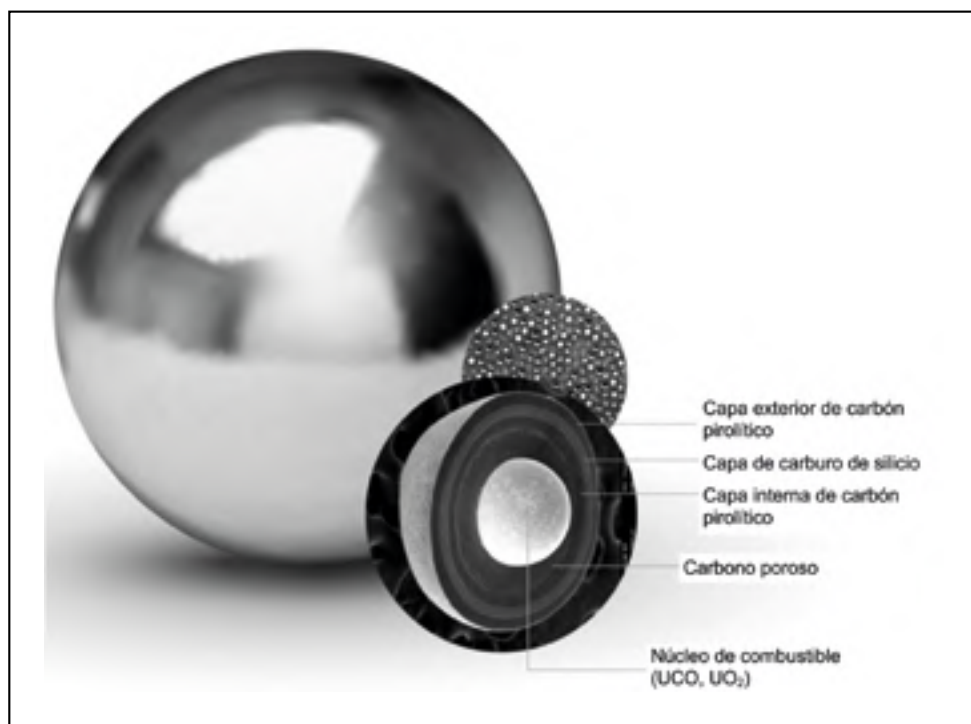


Figura 16. Visión de la composición de combustible *TRISO* (*Media Kit (Triso-X)* — *X-Energy*, 2021).



Figura 17. Esquema de distribución del circuito primario del reactor BREST-OD-300 (Fuente: Rosatom).

7.2. Reactores de espectro neutrónico rápido refrigerados por metales fundidos

Los reactores de espectro neutrónico rápido también llevan captando la atención de la industria durante décadas gracias a las ventajas que aportan en cuanto a los ciclos de combustible a los que puede accederse con ellos. Son reactores refrigerados por metales fundidos como el sodio, el plomo o el plomo-bismuto. Con la utilización de estos refrigerantes, el reactor cuenta con un espectro neutrónico rápido, es decir, el sistema opera con neutrones mucho más energéticos en comparación con los diseños tradicionales *LWR*. Con este aspecto técnico, la utilización

del combustible es notablemente más sostenible dado que se puede acceder a todo el potencial del combustible nuclear reduciendo sustancialmente la radiotoxicidad del combustible gastado. Es por ello por lo que muchos países han dedicado esfuerzos al desarrollo de esta tecnología, que aporta también una considerable experiencia operativa incluyendo reactores de potencia comercial.

Una docena de *SMRs* de espectro rápido han sido propuestos, aunque la mayoría de ellos están en su fase inicial de diseño. Rusia y Estados Unidos son los principales países involucrados en el desarrollo de esta tecnología, destacando el diseño ruso BREST-OD-300 de la figura 17, cuya operación está prevista para 2026. Estos diseños están

planteados para cerrar el ciclo de combustible, recibiendo combustible quemado en reactores *LWR* que se puede reproducir en plutonio gracias a la utilización del espectro rápido. No obstante, su viabilidad técnica y económica está aún por determinar, por lo que aquellos reactores que se introduzcan en un futuro cercano tendrán que actuar como demostradores de esta tecnología.

7.3. Reactores refrigerados por sales fundidas

Gran atención está recibiendo en los últimos años los reactores refrigerados por sales fundidas. Esta tecnología no cuenta con una experiencia operativa que los avale, pero se presenta como una variante muy prometedora gracias sobre todo a sus ventajas desde el punto de vista de la seguridad. Estos reactores suponen un cambio radical en su funcionamiento puesto que el combustible, en fase líquida, está mezclado y circula por el sistema mezclado con el refrigerante, las sales fundidas. Partiendo desde aquí ya se puede observar una ventaja notable dado que no hay riesgo de fusión del combustible puesto que ya está en fase líquida. Por tanto, la integridad de la vasija no está en riesgo y no hay posibilidad de liberación de productos de fisión.

Esta tecnología también recibe gran interés debido a que se presenta como el complemento definitivo para acceder al ciclo de torio. Es por ello por lo que prácticamente todos los diseños de *SMRs* refrigerados por sales fundidas cuentan con un combustible que incluye torio. Estados Unidos es el país que más diseños basados en esta tecnología está estudiando. No obstante, es importante incidir en que prácticamente todos estos diseños se encuentran en

fases de diseño muy preliminares y se presentan, por tanto, como una alternativa muy prometedora a largo plazo.

7.4. Micro-reactores

Recientemente ha surgido una variante de *SMRs* muy interesante por los bajos rangos de potencia eléctrica que contempla, desde 1,5 a 10 MWe. Estos diseños se enmarcan en una categoría denominada micro-reactores y surgen para alimentar sistemas eléctricos pequeños de regiones aisladas o también para cubrir las necesidades de industria o minería. Así mismo pueden ser también reactores transportables dedicados a resolver necesidades estacionales. No se pueden calificar como una tecnología en sí dado que los diseños incluidos en esta categoría pueden ser muy variados, desde *HTGR* hasta reactores refrigerados por sales fundidas. Es por ello por lo que se puede encontrar una amplia variedad de combustibles o refrigerantes en estos micro-reactores. Por tanto, las características técnicas y retos a superar de cada diseño dependerán directamente de la tecnología escogida y el refrigerante empleado.

De nuevo, Estados Unidos acoge el desarrollo de gran parte de estos diseños, donde destaca el reactor eVinci de Westinghouse (figura 18). Esta propuesta surge desde los diseños utilizados para exploración espacial y se intenta reconvertir en un reactor transportable para producción tanto de calor como de electricidad. Las grandes ventajas para el desarrollo de los micro-reactores son la accesibilidad económica dado que son de 100 a 1000 veces más pequeños que un reactor nuclear convencional además de la posibilidad de una rápida construcción y puesta en marcha.

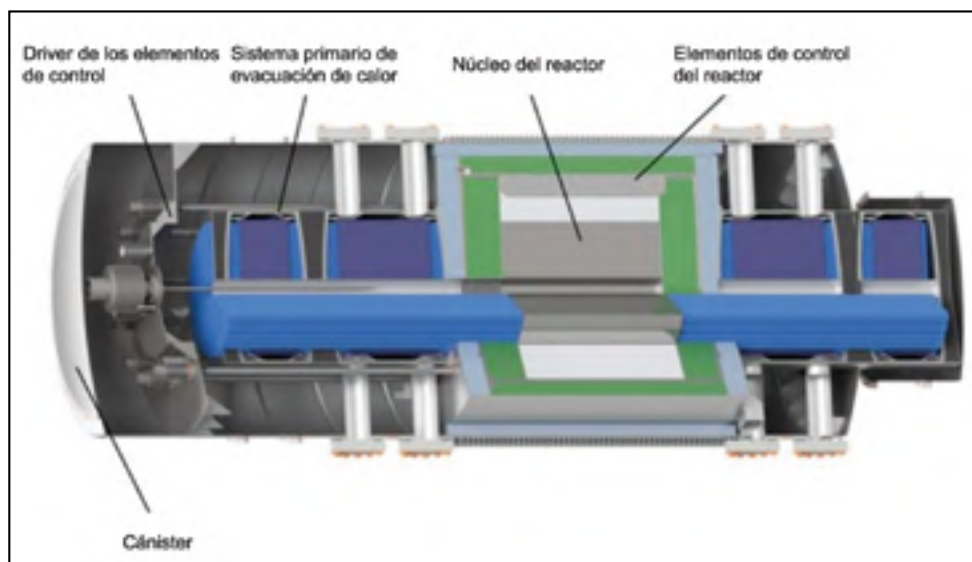


Figura 18. Esquema de los componentes de reactor eVinci de Westinghouse (Fuente: Westinghouse Electric Company).

8. CONCLUSIONES

Los *SMR* van a suponer una revolución en el sector energético y nuclear por diferentes razones. Sus diseños mejoran muchos aspectos que potencian el crecimiento de la energía nuclear en el mundo, como su respuesta ante accidentes, su menor potencial de contaminación en caso de liberación de material radiactivo debido a su inventario

reducido en comparación con los grandes reactores, o su mayor capacidad para realizar el seguimiento de carga, característica esencial de un *mix* eléctrico de gran componente renovable.

Otro aspecto esencial es su versatilidad para adaptarse a diferentes entornos, como islas energéticas o incluso polígonos industriales potenciando la eficiencia de la red de transporte eléctrico motivada por la generación

distribuida. Los pequeños reactores modulares son una tecnología emergente en un contexto de transición energética que necesita la ayuda de todas las herramientas disponibles para conseguir sus objetivos de descarbonizar el sistema energético mundial. Sin embargo, durante los próximos años tienen que demostrar que son capaces de hacerlo de una forma eficiente, adaptándose al cambio rápido de una estructura de generación más renovable y demostrando su viabilidad económica.

Otro gran esfuerzo que se realiza de forma paralela es la adaptación de los organismos reguladores en materia de seguridad nuclear, que también tienen que desarrollar y adaptar nuevos criterios de seguridad a las características de este tipo de reactores con todo el esfuerzo de investigación y simulación que conlleva. Las perspectivas y los análisis económicos que han realizado varias instituciones internacionales vaticinan un éxito para el sector. Sin embargo, en un entorno cambiante, será necesario satisfacer diferentes necesidades además de la producción de energía eléctrica, como la producción de hidrógeno como vector energético y el suministro de calor de forma variable en el tiempo, lo cual supone un nuevo reto en la operación de estos reactores.

Por otro lado, debido a su reducido tamaño, a la mejora en sus características de seguridad y a la reducción de los costes de inversión inicial, estos reactores pueden impulsar el desarrollo de muchos países que en la actualidad se encuentran en vías de desarrollo, y que gozan de infraestructuras eléctricas modestas para hacer crecer sus economías utilizando sistemas de producción energética de bajas emisiones de CO₂.

Tras hacer un breve repaso de sus aplicaciones no destinadas a la producción de energía eléctrica convencional, es probable que en los próximos años ocurra un gran avance en esta dirección, en la que los sistemas de generación nuclear se postulan como la única opción que posibilita la exploración espacial para establecer bases (habitadas o no) en otros planetas, donde la intensidad de la luz solar o la propia demanda de estas bases imposibilitan utilizar el recurso solar. Ante este panorama, disponer la tecnología adecuada podría resultar determinante en la carrera por disponer de los recursos minerales que se encuentren en otros planetas de forma rentable. Actualmente se ha disparado la cantidad de *start-ups* que lideran proyectos de reactores modulares pequeños para satisfacer otro tipo de demanda energética, constituida principalmente por la necesidad del calor de proceso, en la que empresas de nueva creación ponen sus ojos en diferentes sectores industriales, como por ejemplo, en la industria farmacéutica, como público objetivo de sus nuevos diseños de reactores SMR, y que ya ha manifestado interés en este tipo de tecnología.

En definitiva, la tecnología SMR se postula como una tecnología más versátil, segura, barata y eficiente en términos de aprovechamiento del recurso energético y de los recursos minerales necesarios para producir energía no relacionados con el combustible. Como consecuencia de las diferentes aplicaciones que se proponen para este tipo de reactores, de forma simultánea o no a la producción eléctrica civil, es conveniente llevar a cabo inversiones en investigación y desarrollo que nos permitan beneficiarnos de esta tecnología a nivel industrial y a nivel usuario cuando así sea compatible con el interés de las empresas y de la sociedad.

Es necesario poner de relieve la importancia de la investigación en este campo, que se encuentra en su fase de despegue, sin subestimar su potencial crecimiento, sobre todo apuntando hacia las aplicaciones en las que no existe una tecnología alternativa, como en el sector aeroespacial, y sin dejar de lado los aspectos positivos de la energía nuclear y la importancia de una estrategia adecuada y responsable de la gestión de los residuos radiactivos. Tanto las aplicaciones de la tecnología nuclear, como la solución a cuestiones que son de especial relevancia en el debate social, tales como la gestión de los residuos y la viabilidad económica, necesitan de mayor inversión en I+D para lograr desarrollar fuentes de energía más accesibles, sostenibles y menos perjudiciales para el medio ambiente.

9. REFERENCIAS

- Beyond Nerva (s. f.). SNAP-10,-10A and SNAPSHOT. <https://beyondnerva.com/fission-power-systems/systems-for-nuclear-auxiliary-power-snap/snap-10-10a-and-snapshot/>
- Black, G.A., Aydogan, F., y Koerner, C.L. (2019). Economic viability of light water small modular nuclear reactors: General methodology and vendor data. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 103, pp. 248-258. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.12.041>
- British Petroleum (2021). Statistical Review of World Energy. N° 70. <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2021-full-report.pdf>
- Brown, D.W. (2022). NASA's NuclearOption May Be Crucial for Getting Humans to Mars. *Scientific American*. <https://www.scientificamerican.com/article/nasas-nuclear-option-may-be-crucial-for-getting-humans-to-mars/>
- Cummins, W.E., y Matzie, R. (2018). Design evolution of PWRs: Shippingport to generation III+. *Progress in Nuclear Energy*, Vol. 102, pp. 9-37. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2017.08.008>
- Di Giulio, M. (2015). Severe Accident Simulation of Small Modular Reactors. Disertación Tesis Doctoral. Bolonia: Universidad de Bolonia. <https://doi.org/10.6092/UNIBO/AMSDOTTORATO/7079>
- EPRI (1986). Designing the Advanced LWR. *EPRI JOURNAL*, 11. <http://eprijournal.com/wp-content/uploads/2016/01/1986-Journal-No.-5.pdf>
- Houts, M.G., et al (2014). The Nuclear Cryogenic Propulsion Stage. 50th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference. 50th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, Cleveland, OH, 28-30 July, 2014. <https://doi.org/10.2514/6.2014-3724>
- IAEA (2009). Non-electric applications of nuclear power: Seawater desalination, hydrogen production and other industrial applications. *Proceedings of an International Conference, Oarai, Japan, 16-19 April 2007*. <https://www.iaea.org/publications/7979/non-electric-applications-of-nuclear-power-seawater-desalination-hydrogen-production-and-other-industrial-applications>
- IAEA (2017a). Industrial Applications of Nuclear Energy. N° NP-T-4.3. Viena: IAEA. <https://www.iaea.org/publications/10877/opportunities-for-cogeneration-with-nuclear-energy>
- IAEA (2017b). Opportunities for Cogeneration with Nuclear Energy. N° NP-T-4.1. Viena: IAEA. <https://www.iaea.org/publications/10877/opportunities-for-cogeneration-with-nuclear-energy>
- IAEA (2020). Advances in Small Modular Reactors and Technology Developments. Viena: IAEA.

IAEA-PRIS (2022). Nuclear Power Reactors in the World, Reference Data Series, N° 2. Viena: IAEA. <https://pris.iaea.org/pris/home.aspx>

IEA (2020). Projected Costs of Generating Electricity. <https://www.iea.org/reports/projected-costs-of-generating-electricity-2020>

Ingersoll, D.T., *et al* (2014). NuScale small modular reactor for Co-generation of electricity and water. *Desalination*, Vol. 340, pp. 84-93. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2014.02.023>

IPCC (2021). Summary for Policymakers. En: *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, pp. 3–32. doi:10.1017/9781009157896.001.

Masson-Delmotte, V., *et al* (2018). Summary for Policymakers. En: *Global Warming of 1.5 °C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty* (p. 32). World Meteorological Organization. <https://www.ipcc.ch/sr15/chapter/spm/>

MITERD (2021). Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) 2021-2030. Madrid: Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. <https://www.miteco.gob.es/es/prensa/pniec.aspx>

NASA (2018). Demonstration Proves Nuclear Fission Can Provide Exploration Power. <http://www.nasa.gov/press-release/demonstration-proves-nuclear-fission-system-can-provide-space-exploration-power>

NS Energy (2020). Akademik Lomonosov Floating Nuclear Power Plant. <https://www.nsenergybusiness.com/projects/akademik-lomonosov-floating-npp/>

Nuclear Industry Association (NIA) (2021). Forty by '50: The Nuclear Roadmap. <https://www.niauk.org/forty-by50-the-nuclear-roadmap/>

NuScale-LLC (2020). Featured Topic: Cost Competitive. <https://www.nuscalepower.com/newsletter/nucleus-spring-2020/featured-topic-cost-competitive>

Office of Nuclear Energy (2021). 6 Things You Should Know About Nuclear Thermal Propulsion. <https://www.energy.gov/ne/articles/6-things-you-should-know-about-nuclear-thermal-propulsion>

Office of Space Commerce (2021). Executive Order on Small Modular Reactors for Defense and Space. <https://www.space.commerce.gov/executive-order-on-small-modular-reactors-for-space-missions/>

Pacce, M., Sánchez, I., y Suárez-Varela, M. (2021). Recent developments in Spanish retail electricity prices: The role played by the cost of CO2 emission allowances and higher gas prices. *Documentos Ocasionales*, n° 2120. Madrid: Banco de España.

Red Eléctrica Española (2022). Red Eléctrica al Día. <https://www.ree.es/es/datos/aldia>

Ritchie, H., y Roser, M. (2020). CO₂ and Greenhouse Gas Emissions. <https://ourworldindata.org/emissions-by-sector>

SENDECO2 (2021). Sistema europeo de negociación de CO₂. <https://www.sendeco2.com/es/>

Solan, D., *et al* (2010). Economic and Employment Impacts of Small Modular Nuclear Reactors. Idaho Falls, ID/EE UU: The Energy Policy Institute.

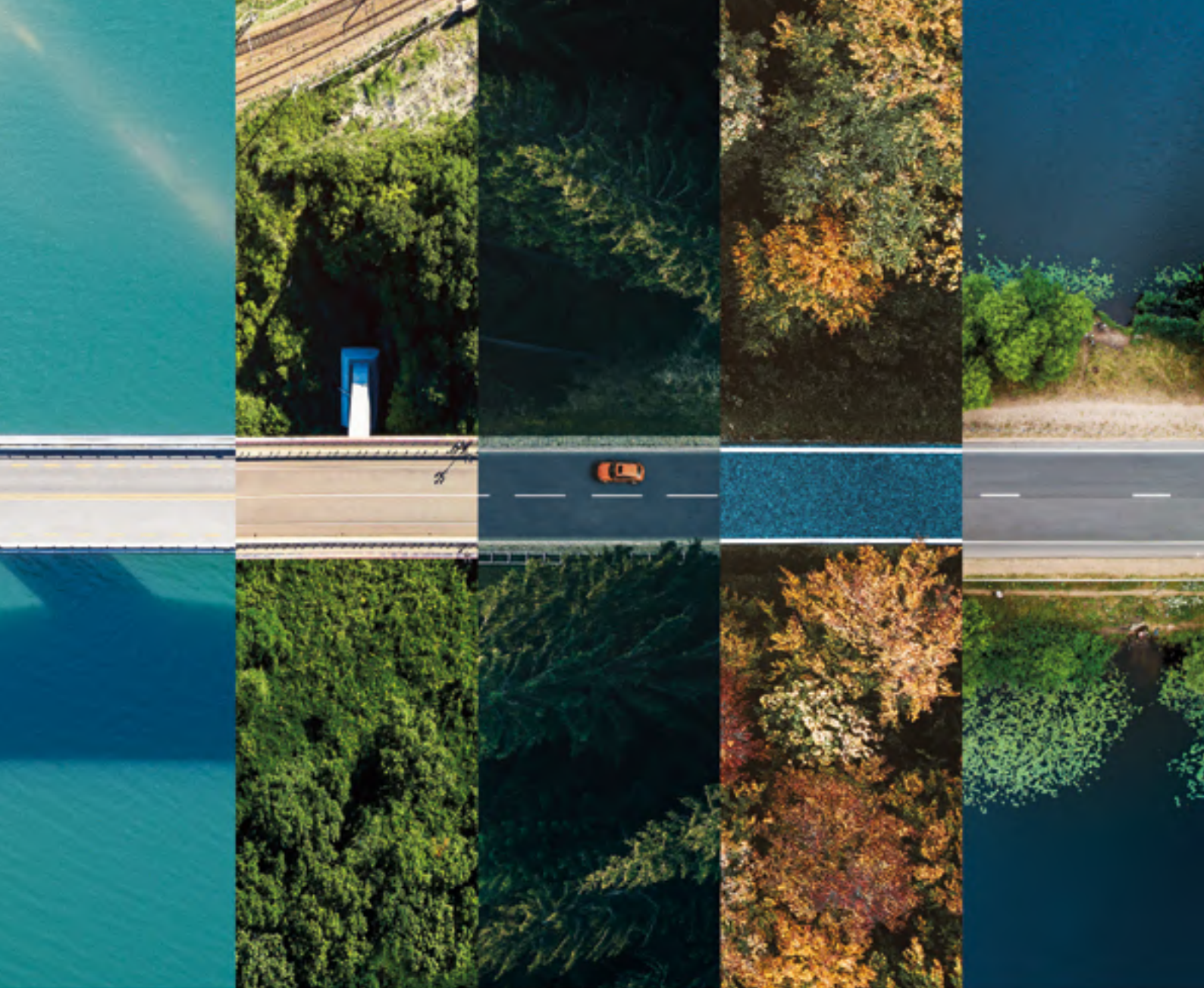
The Royal Society (2020). Nuclear cogeneration: Civil nuclear energy in a low-carbon future. Policy briefing. <https://royalsociety.org/-/media/policy/projects/nuclear-cogeneration/2020-10-7-nuclear-cogeneration-policy-briefing.pdf>

World Nuclear Association (2021a). Plans for New Nuclear Reactors Worldwide. <https://world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/plans-for-new-reactors-worldwide.aspx>

World Nuclear Association (2021b). Nuclear Process Heat for Industry. <https://world-nuclear.org/information-library/non-power-nuclear-applications/industry/nuclear-process-heat-for-industry.aspx>

X-energy (2021). Media Kit (Triso-X) — X-Energy: HTGR | Nuclear Reactors (SMR) & TRISO Fuel. <https://x-energy.com/media/triso-x>

Yildiz, B., y Kazimi, M.S. (2006). Efficiency of hydrogen production systems using alternative nuclear energy technologies. *International Journal of Hydrogen Energy*, 31(1): pp. 77-92. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2005.02.009>



Asfaltos Repsol, abriendo el camino a la eficiencia y a la innovación

En Repsol innovamos cada día para adaptarnos a las nuevas necesidades en pavimentación. Por eso, ahora te ofrecemos **5 gamas de asfaltos de alto nivel** para crear carreteras y pavimentos más seguros, eficientes y sostenibles:

PAVE, PERFORM, COLOR, ADVANCE e ISOLATE.

- **Altas prestaciones:** asfaltos de calidad y garantía certificada con nuestra asistencia técnica y desarrollo.
- **Más eficientes:** soluciones eficientes y comprometidas con el medioambiente desarrolladas en el Repsol Technology Lab.
- **A tu medida:** elige el que mejor se adapte a ti entre más de 120 referencias, con diversidad de formatos.



REPSOL

Inventemos el futuro

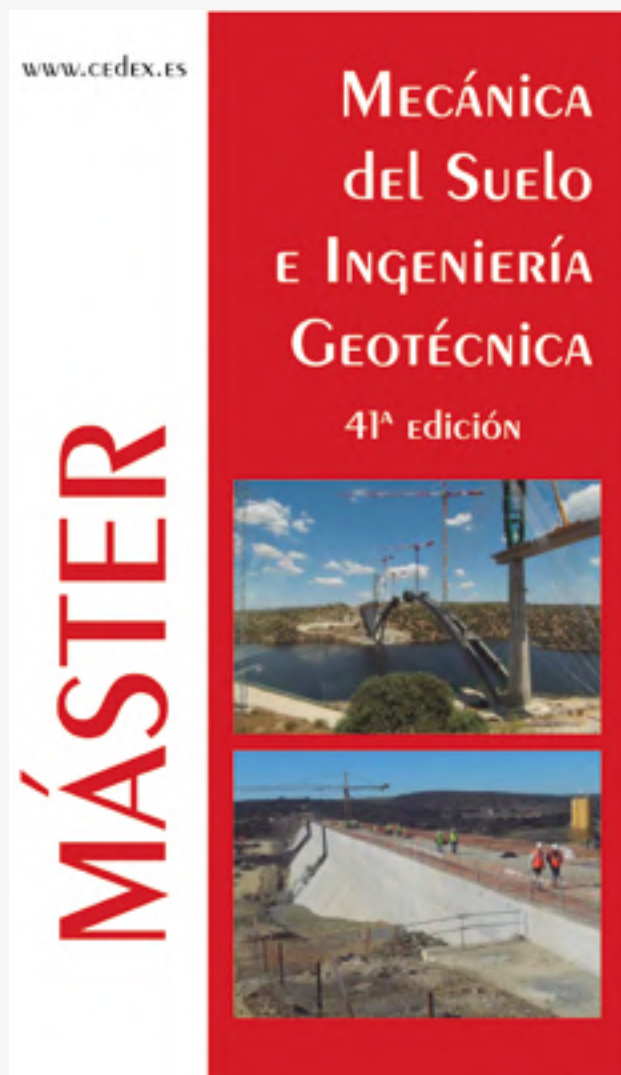


Repsol. Compromiso
Cero Emisiones Netas
2050



Descubre más
aquí

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.

Análisis de la red marítima del puerto de Barcelona

Analysis of the Maritime Network of the Port of Barcelona

Íñigo López Ansorena^{1*}

Resumen

El puerto de Barcelona es un gran nodo marítimo del Mediterráneo occidental que mueve cada año cerca de 70 millones de toneladas y más de 3 millones de contenedores. Sin embargo, poco se conoce sobre las características de su red marítima. El presente artículo pretende arrojar luz sobre ella mediante un análisis de dos etapas. En primer lugar, se utiliza un enfoque de agrupación para revelar grupos de puertos bien conectados con Barcelona. A continuación, se utilizan dos métricas de centralidad (grado e intermediación) con el objeto de identificar los puertos que ocupan una posición especial en la red. Los resultados muestran que la red tiene una estructura jerárquica en la que se distinguen tres grupos de puertos bien conectados. En el artículo se discuten esos grupos y los puertos dominantes en cada área geográfica. Los hallazgos son importantes no sólo desde la perspectiva de las navieras interesadas en el diseño de servicios regulares a/desde Barcelona, sino también desde la perspectiva del propio puerto. La Autoridad Portuaria puede utilizar los resultados de la investigación para reforzar la cooperación con los puertos más relevantes de su red a través de acuerdos de hermanamiento.

Palabras clave: conectividad marítima, teoría de grafos, métricas de centralidad, centralidad de grado, centralidad de intermediación, Barcelona, servicios regulares.

Abstract

The port of Barcelona is a major maritime hub in the Western Mediterranean, handling around 70 million tonnes and more than 3 million containers every year. However, little is known about the characteristics of its maritime network. This article aims to shed light on it through a two-stage analysis. First, a clustering approach is taken to reveal groups of ports well connected to Barcelona. Then, two centrality metrics (degree and betweenness) are used to identify the ports that occupy a special position in the network. The results show that the network has a hierarchical structure in which three groups of well-connected ports can be distinguished. The article discusses these clusters and the dominant ports in each geographical area. The findings are important not only from the perspective of shipping lines interested in designing scheduled services to/from Barcelona, but also from the perspective of the port itself. The Port Authority can use the results of the research to strengthen cooperation with the most relevant ports in its network through twinning arrangements.

Keywords: Maritime connectivity, graph theory, centrality metrics, degree centrality, betweenness centrality, Barcelona, regular services.

1. INTRODUCCIÓN

El transporte marítimo es un pilar fundamental sobre el que se apoya el comercio internacional. Según UNCTAD (2019) el volumen total de las mercancías transportadas por vía marítima en todo el mundo alcanzó en el año pre-pandémico de 2018 los 11.000 millones de toneladas. Teniendo presente su importancia, Kringelum (2019) identificó los cuatro desafíos fundamentales a los que se enfrentan hoy en día los puertos: 1) la diversificación de los clientes; 2) los requisitos para la creación de nuevo valor; 3) las limitaciones de la captura de valor en un mundo cambiante; y 4), las asociaciones estratégicas, los *clusters* y los efectos de red. Este último reto no es solo de vital importancia para las autoridades portuarias, también lo es para las compañías navieras que transbordan los contenedores en servicios regulares. Cuanto mayor es el número de servicios regulares y mayor es el número de escalas en un puerto, mejor es la integración de ese puerto en las redes marítimas globales.

En los últimos años muchas investigaciones han utilizado conceptos de la teoría de grafos para analizar y extraer información de las redes marítimas. Sin embargo, hasta donde sabemos, pocas se han ocupado de la red marítima de los puertos del mediterráneo occidental y nuestro objetivo es precisamente llenar este vacío con el análisis de la red del puerto de Barcelona. Según la Autoridad Portuaria de Barcelona (2020), el puerto movió en 2019 más de 67 millones de toneladas siendo China su socio comercial más destacado, si bien los intercambios con Egipto, Turquía y Arabia Saudí también registraron un gran dinamismo.

El presente artículo pretende arrojar luz sobre su red marítima con el objetivo principal de detectar grupos de puertos bien conectados, lo cual revelará los principales corredores marítimos hacia/desde Barcelona. El segundo objetivo es analizar los puertos a través de métricas de centralidad, lo cual permitirá identificar los puertos más dominantes en la red desde diferentes perspectivas. Por lo tanto, debemos responder a dos preguntas de investigación en el campo del análisis clásico de redes:

P-1: ¿Qué puertos están bien conectados?

P-2: ¿Qué puertos son centrales en la red?

¹ Dr. Ingeniero de caminos, canales y puertos.

* Email: inigo.lopezansorena@unir.net

Las dos cuestiones, que se pueden incluir en el cuarto de los desafíos de Kringelum (2019), pues son cruciales para el puerto y pueden afectar a sus futuras estrategias. En otras palabras, la Autoridad Portuaria de Barcelona podría reforzar la cooperación e impulsar acuerdos de colaboración, o hermanamiento, con los puertos más centrales de su red.

Organizamos el resto del artículo de la siguiente manera. La siguiente sección, fuentes, aborda el papel de la teoría de grafos en el contexto de las redes marítimas, incidiendo en los métodos de agrupación y las métricas centralidad, para seguidamente sentar las bases de la investigación con unas breves reflexiones. Luego la siguiente sección describe la metodología que se descompone en dos partes: en la primera se explica el método de agrupación de Louvain, y en la segunda se explican las métricas de centralidad utilizadas en la investigación. A continuación, se presentan los principales resultados, así como su discusión, y finalmente, la última sección trae las conclusiones y sugiere las futuras investigaciones derivadas del presente estudio.

2. ESTADO DEL ARTE

2.1. La teoría de grafos en el contexto de las redes marítimas

La teoría de grafos es una rama de las matemáticas que se ocupa de cómo se pueden construir (codificar) las redes y medir sus propiedades, véanse Newman (2010) o Rodrique (2017). Aunque la incorporación de la teoría de grafos al estudio de redes marítimas es relativamente reciente, ha ganado gran popularidad en los últimos años. Normalmente las redes marítimas se abstraen en grafos donde los nodos son puertos y los enlaces son rutas marítimas. Según sea el tipo de enlace podemos definir los grafos en función de su dirección (grafos dirigidos o no dirigidos) y en función del peso de las conexiones (grafos ponderados o no ponderados), véanse los dos primeros ejemplos en la figura 1 (A y B). Por otro lado, según la forma en que se elabora el grafo que representa la red marítima existen dos posibilidades, el Grafo con Enlaces Directos (GED) y el Grafo con Todos los Enlaces (GTE). En el primero (GED) solo se conectan los puertos consecutivos dentro de la ruta o servicio de línea, es decir, dos puertos están conectados por un servicio de línea solo si en ellos se escala de forma consecutiva. Por su parte, el GTE incluye no solo las conexiones directas, consecutivas o adyacentes, sino también las

indirectas proporcionadas por los servicios de línea, véase la figura 1 (C y D).

Todos estos aspectos se reflejan en el contexto de las redes marítimas. Algunos estudios utilizan grafos ponderados (generalmente el factor de peso se expresa en TEUs, movimientos o número de servicios) y tienen en cuenta la dirección de las conexiones, por ejemplo, Wang y Cullinane (2016) o Park *et al.*, (2017), mientras que otros estudios no dan relevancia a la dirección de las conexiones, por ejemplo, Ansorena y Valdecantos (2021). En cuanto a la configuración GED o GTE, tampoco hay una unanimidad sobre cuál de las dos representan mejor el contexto marítimo. Algunas investigaciones utilizan el enfoque GTE, por ejemplo, Ansorena (2020), mientras que otros utilizan tanto el GED como el GTE, por ejemplo, Ducruet y Noteboom (2012).

Con respecto a las fuentes de información que estudios anteriores han utilizado para elaborar el grafo, podemos destacar Containerization International (CI) y Alphaliner (AL), véase, por ejemplo, Wang y Cullinane (2011), y otros se apoyan en Lloyd's List Intelligence (LLI), véase, por ejemplo, González Laxe *et al.* (2015) o Wang *et al.* (2017). El principal inconveniente de todas estas fuentes es que no son libres. Una fuente alternativa de acceso libre son las memorias anuales de la Autoridades Portuarias que, en el caso de los puertos españoles, suelen facilitar toda la información relativa a los servicios regulares de línea desde el puerto en cuestión.

2.2. Métodos de agrupación y métricas centralidad en las redes marítimas

La competencia ha llevado a las compañías navieras a fortalecer su cooperación para encontrar nuevas oportunidades en un mercado globalizado, véase Caschili *et al.* (2014). En las redes marítimas los puertos se agrupan y forman grupos relativamente densos y bien conectados, denominados comunidades en la teoría de grafos. En general, las comunidades no se conocen de antemano, sin embargo, el enfoque de *clustering* puede ayudarnos a detectar las comunidades existentes en nuestra red. Esto también debería revelar la mejor estrategia para operar en el mercado del Mediterráneo occidental a través de Barcelona.

Para detectar comunidades en la red se pueden utilizar diversos procedimientos, y uno de los más conocidos es la optimización de la modularidad. La idea básica es que una función objetivo (modularidad) debe ser optimizada para encontrar nodos con conexiones densas y fuertes

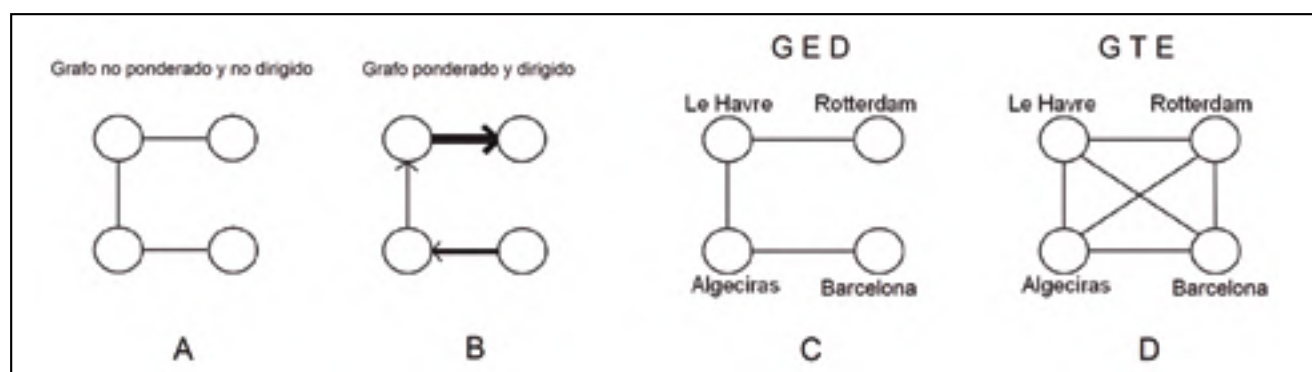


Figura 1. Elaboración de la red marítima. Tipos de configuración.

entre ellos, y al mismo tiempo con conexiones más escasas y débiles con otros nodos. Entre los algoritmos más populares y citados en la literatura de detección comunitaria por optimización de la modularidad se encuentra el denominado *algoritmo de Louvain*, propuesto originalmente en Blondel *et al.* (2008). Un análisis comparativo desarrollado en Lancichinetti y Fortunato (2009) reveló que este algoritmo era uno de los más rápidos y de mejor rendimiento entre los existentes. Con respecto a las redes marítimas, ya se ha utilizado la optimización de la modularidad. Véase así, por ejemplo, la minimización de la modularidad en Kaluza *et al.* (2010), el método de búsqueda heurística de Girvan-Newman, en Bartholdi *et al.* (2016), o más recientemente, la aplicación del método de Louvain para analizar la red marítima mundial en Ansorena (2018) y la del puerto de Algeciras en Ansorena (2020).

La segunda etapa del estudio debe seleccionar una métrica (o varias métricas) para responder a la pregunta “¿Qué nodos son importantes?”. La respuesta se da en términos de cómo se debe cuantificar la importancia de cada nodo, o en otras palabras, cómo deben clasificarse los nodos. Los estudios anteriores ya han utilizado métricas de centralidad, por ejemplo, la Centralidad de Grado, la Centralidad de Intermediación, la Centralidad de Cercanía o la Centralidad de Eigen, cada una tiene sus propias características y objetivos. Por lo general, una métrica de centralidad que es relevante en un contexto no es apropiada en un contexto diferente, véase como ejemplo el análisis de centralidades de la red del puerto de Valencia en Ansorena y Valdecantos (2021).

En general, dos son las medidas que aparecen en la mayoría de los estudios marítimos: centralidad de grado y centralidad de intermediación. Por un lado, la centralidad de grado cuenta para cada puerto el número de enlaces directos con otros puertos, es decir, es una medida de conectividad local. Por otro lado, la centralidad de intermediación es vista como una medida más global que suma para cada puerto el número de sus posiciones en las rutas más cortas posibles dentro de toda la red, es decir, es una medida de accesibilidad a través de escalas intermedias.

2.3. Reflexiones sobre la literatura revisada

En esta sección hemos revisado algunos de los estudios más notables o relevantes para el nuestro. Podemos concluir que las redes marítimas tienen una base matemática obvia, que tiende a ser definida por los puertos (nodos) y las rutas marítimas (enlaces) y que en este contexto la teoría de grafos es una herramienta muy poderosa para su análisis. Hay que destacar que la teoría de grafos ya ha sido utilizada anteriormente en el análisis de áreas marítimas específicas, por ejemplo, el Atlántico Sur, el noreste de Asia, el Canal de Suez y el Canal de Panamá, e incluso los puertos españoles del mediterráneo (González Laxe *et al.*, 2015), si bien éste último estudio no abordó la red marítima del puerto de Barcelona desde la perspectiva que se propone en esta investigación y esto sí es una novedad.

En suma, proponemos un enfoque de dos etapas que combina la optimización de modularidad y el análisis de centralidad. Este doble marco debería arrojar nueva luz sobre la red marítima del puerto de Barcelona. Las principales diferencias con los estudios anteriores son:

1. esta investigación se centrará en un único puerto, es decir, analizaremos la red marítima desde la perspectiva de Barcelona;
2. obtenemos los datos de la *Memoria Estadística* del 2017 (Autoridad Portuaria de Barcelona 2018) que es una fuente gratuita y de libre acceso;
3. elegimos la configuración GTE en lugar de la GED; y
4. el peso de las conexiones será el número de servicios de línea en lugar del número de TEU o los movimientos de buques utilizados en otros estudios.

Estimamos que estas cuatro características permitirán una mejor representación de la red marítima del puerto de Barcelona.

3. METODOLOGÍA

3.1. Detección de comunidades

Tomamos prestada la técnica de detección comunitaria propuesta originalmente por Blondel *et al.* (2008), también conocida como el *método de Louvain*. En este método la estructura de comunidades se obtiene a través de la optimización de una función objetivo denominada modularidad, que se define como:

$$Q = \frac{1}{2m} \sum_{ij} \left[A_{ij} - \frac{k_i \times k_j}{2m} \right] \delta(c_i, c_j) = \frac{1}{2m} \sum_c \left[e_c - \frac{K_c^2}{2m} \right] \delta \quad [1]$$

El algoritmo trata de maximizar la diferencia entre el número real (actual) de conexiones en una comunidad (e_c) y el número esperado de conexiones en esa misma comunidad, que se expresa como el segundo sumando dentro del sumatorio.

Donde:

Q es la función de Modularidad

A_{ij} representa el peso de la arista entre los nodos i y j

k_i y k_j son la suma de los pesos de las aristas de los nodos i y j

K_c es la suma de los grados de todos los nodos en la comunidad c .

m es la suma de todas las conexiones existentes en la red.

δ toma el valor 1 cuando los nodos i y j caen en la misma comunidad y el 0 en caso contrario.

Como se explica en Blondel *et al.* (2008), el algoritmo se establece en dos pasos o niveles que se repiten de forma iterativa. En primer lugar, se buscan grupos “pequeños” optimizando la modularidad de forma local. En el punto de partida, el algoritmo asigna una comunidad diferente a cada nodo de la red. Así, en esta partición inicial hay tantas comunidades como nodos. Luego, para cada nodo i , el algoritmo toma los vecinos j de i y evalúa la ganancia de modularidad que tendría lugar eliminando i de su comunidad y colocándolo en la comunidad de j . El nodo i se coloca en otra comunidad para la que esta ganancia sea máxima, pero sólo si es positiva. Si no es posible ninguna ganancia positiva, i permanece en su grupo original. Este proceso se aplica repetida y secuencialmente a todos los nodos hasta que no se puede lograr ninguna mejora adicional y se completa la primera etapa. En otras palabras,

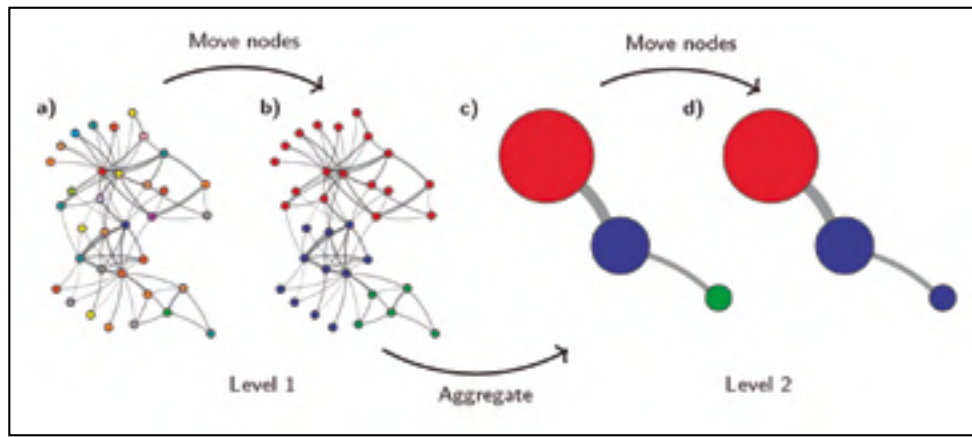


Figura 2. Cómo funciona el algoritmo de Louvain.

esta etapa se termina cuando se alcanza un máximo local de la modularidad, es decir, cuando ningún movimiento individual puede mejorar la modularidad.

El siguiente paso consiste en construir una nueva asociación cuyos nodos son las comunidades previamente establecidas. Para ello, los pesos de los enlaces entre los nuevos nodos vienen dados por la suma del peso de los enlaces entre los nodos de las dos comunidades correspondientes. Los enlaces entre nodos de una misma comunidad conducen a bucles propios para esta comunidad en la nueva red. Una vez completado este segundo nivel, es posible volver a aplicar la primera etapa del algoritmo a la red ponderada resultante e iterar. Estos dos pasos se repiten de forma iterativa hasta que se alcanza un máximo de modularidad.

En suma, tal y como se muestra en la figura 2, adaptada de Traag *et al.* (2019), el método parte de una partición individual en la que cada nodo está en su propia comunidad, figura 2-a. El algoritmo mueve nodos individuales de una comunidad a otra para encontrar una partición, vea la figura 2-b. Basada en esta partición, se crea una red agregada, véase la figura 2-c. El algoritmo entonces mueve nodos individuales en la red agregada, véase la figura 2-d. Estos pasos se repiten hasta que la calidad (modularidad o función objetivo) no se puede aumentar más. Como resultado se obtienen grupos de nodos (puertos) bien conectados.

3.2. Determinación de la centralidad

La segunda fase de la metodología es independiente de la anterior, suponemos un grafo dado $G := (n, e)$ con nodos 'n' y 'e' enlaces, y pasamos a estudiar la centralidad de los nodos de la red.

En primer lugar, definimos grado de un nodo como el número de sus conexiones (entrantes o salientes), siendo la Centralidad de Grado (CG) del nodo 'i' la medida más simple de su centralidad. Se calcula como el número de conexiones que inciden en el nodo mediante:

$$CG(i) = \sum_{j=1} a_{ij} \quad [2]$$

Donde $a_{ij} = 1$ si hay un enlace entre los nodos 'i' y 'j', $a_{ij} = 0$ en caso contrario.

Alternativamente, podemos considerar que las conexiones están ponderadas por un factor de peso. En este caso, la centralidad del grado ponderado (CGP) del nodo 'i' es:

$$CGP(i) = \sum_{j=1} w_{ij} \times a_{ij} \quad [3]$$

Donde w_{ij} es el factor de peso del enlace que conecta el nodo 'i' a 'j' (en nuestro caso de estudio es el número de servicios de línea entre dos puertos de la red). Como se mencionó antes $a_{ij} = 1$ si hay conexión entre 'i' y 'j', $a_{ij} = 0$ en caso contrario.

Por tanto, se puede utilizar la CG para revelar la conectividad local de los puertos (estrictamente como número de enlaces a otros puertos), o la CGP tomando no solo las conexiones con otros puertos, sino el número de servicios de líneas (la conexión entre dos puertos puede tener más de un servicio de línea). Pero en algunos casos, un mayor número de conexiones (CG), o incluso un mayor número de conexiones ponderadas (CGP), puede no dar una mayor influencia en la red. Esta es la razón detrás de la inclusión de la centralidad de intermediación (CI) en nuestro análisis. Este concepto suele estar vinculado a las políticas de transbordo y está establecido como un buen indicador de la accesibilidad marítima. La CI permite detectar los puertos de transbordo que ocupan posiciones intermedias clave en la red.

La CI del nodo 'i' es el número de veces que el nodo 'i' actúa como puente a lo largo de la ruta más corta entre otros dos nodos y se calcula desde la perspectiva de una red no ponderada, no dirigida y con relaciones estrictamente binarias entre nodos, véase Freeman (1977). Por tanto, la idea básica es medir todas las rutas más cortas entre pares de puertos y luego contar cuántas veces un puerto está en la ruta más corta entre dos puertos más. La CI del nodo 'i' se calcula mediante la expresión:

$$CI(i) = \sum_{j,k} g_{jk}(i) / g_{jk} \quad [4]$$

Donde ' g_{jk} ' es el número de rutas más cortas que conectan los nodos 'j' y 'k', y ' $g_{jk}(i)$ ' el número de rutas más cortas entre 'j' y 'k' en las que está el nodo 'i'.

A continuación, exponemos un ejemplo para clarificar los conceptos de CG y CI, véase la figura 3. En la red marítima de la figura se observa que tanto el nodo B como el C tienen el mismo número de conexiones a otros puertos (misma centralidad de grado). Sin embargo, el nodo B tiene una mejor posición dentro de red, al ser un punto de paso en 26 caminos mínimos (4 veces entre nodos A y C, 16 veces entre nodos A y D, y 6 veces entre nodos A y D), mientras que el nodo C solo actúa de puente en 20 caminos mínimos (16 veces entre nodos A y D, 4 veces entre nodos B y D). Por tanto, B desempeña un papel de “intermediación” que le da más relevancia en la red.

La tabla 1 resume para cada uno de los nodos de la red anterior su CG (que como se ha indicado es una medida de la conectividad local del nodo) y el valor de $\Sigma g_{jk}(i)$ para el cálculo de la CI (que como se ha indicado es la facultad de un nodo de dar accesibilidad global a la red). Este es un caso sencillo que puede ser resuelto sin mucha dificultad. Sin embargo, para casos más complejos, con mayor

número de nodos y enlaces, es conveniente especialmente en el cálculo de la CI la aplicación de algún algoritmo de resolución, por ejemplo, el de Brandes (2001).

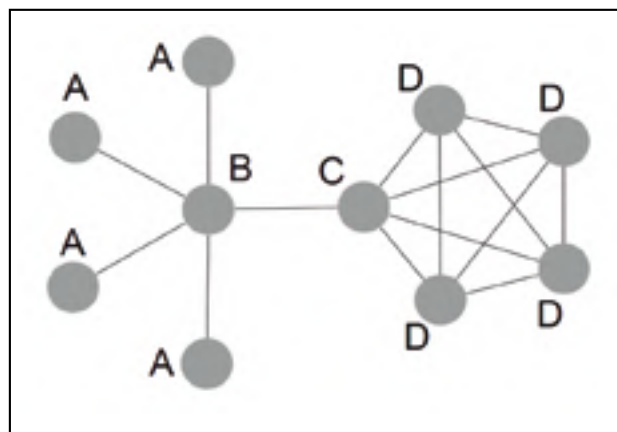
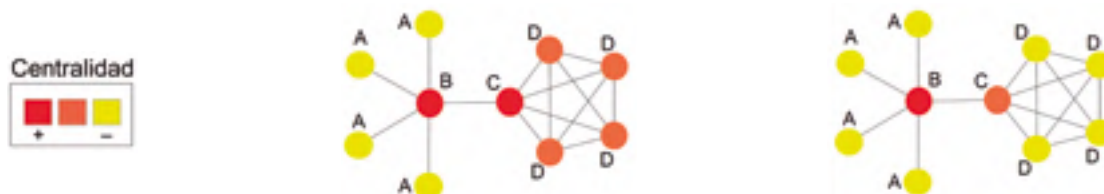


Figura 3. Ejemplo de centralidades de grado e intermediación.

Tabla 1. Métricas de centralidad

Nodos	Grado	Intermediación $\Sigma g_{jk}(i)$
A	1	0
B	5	26
C	5	20
D	4	0



4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La red marítima del puerto de Barcelona sobre la que trabajamos es el GTE que incluye 212 puertos y 3.139 conexiones. La aplicación del *método de Louvain* a la red revela 3 grupos de puertos bien conectados, véase la figura 4. En este primer grafo el color de los nodos indica el grupo al que pertenecen y el tamaño de los mismos da una idea del número de conexiones del puerto (proporcional al grado del nodo). Se observa un grupo dominante que incluye al puerto de Barcelona (Grupo 1) y que, además, es el más numeroso (112 puertos). El segundo grupo con un total de 56 puertos incluye algunos puertos importantes del Mediterráneo occidental (Algeciras y TangerMed), central (Livorno) y oriental (El Pireo). Finalmente, el Grupo 3 es el menos numeroso con 44 puertos.

A continuación, la figura 5 muestra una transformación del grafo anterior. En ella el tamaño de los nodos es equivalente al número de puertos en el respectivo grupo y el grosor de las conexiones es proporcional al número de enlaces existentes, bien entre grupos o bien entre puertos del mismo grupo (bucles). La transformación confirma la correcta aplicación del método de agrupamiento. También se confirma que el grupo 1 no solo es el más importante en términos de número de puertos (112), sino también lo

es en número de enlaces tanto internos, dentro del grupo, como externos hacia otros grupos de la red. En otras palabras, el grupo 1 proporciona una buena accesibilidad a los otros grupos de la red (nótese que grupo 2 y el 3 están peor conectados entre sí). Es interesante también observar como el grupo 3, el de menor número de puertos de la red, tiene una estructura más densa que el grupo 2. Es decir, los 44 puertos del grupo 3 están mejor integrados dentro de su propio grupo que los puertos del grupo 2 (508 conexiones internas frente a 446). ¿Cuál es el motivo de que un grupo más pequeño presente una estructura más densa de enlaces? Si bien la figura 5 da una visión más profunda de la red marítima, todavía no es suficiente para responder a determinadas cuestiones como esta.

En estas primeras representaciones, aunque claramente se percibe que los puertos forman entidades más o menos homogéneas dentro de la red, no podemos descubrir las ubicaciones predominantes, por ejemplo, puertos muy distantes como Jeddah (en Oriente Medio) y Antwerp (Europa) forman parte del mismo grupo. Para lograr una mejor comprensión de la red resulta imprescindible la geo-localización de los nodos. Esto último permite descubrir algunas características que todavía permanecen escondidas.

En la figura 6 es fácil comprobar que en determinadas zonas hay una cierta correlación entre la ubicación

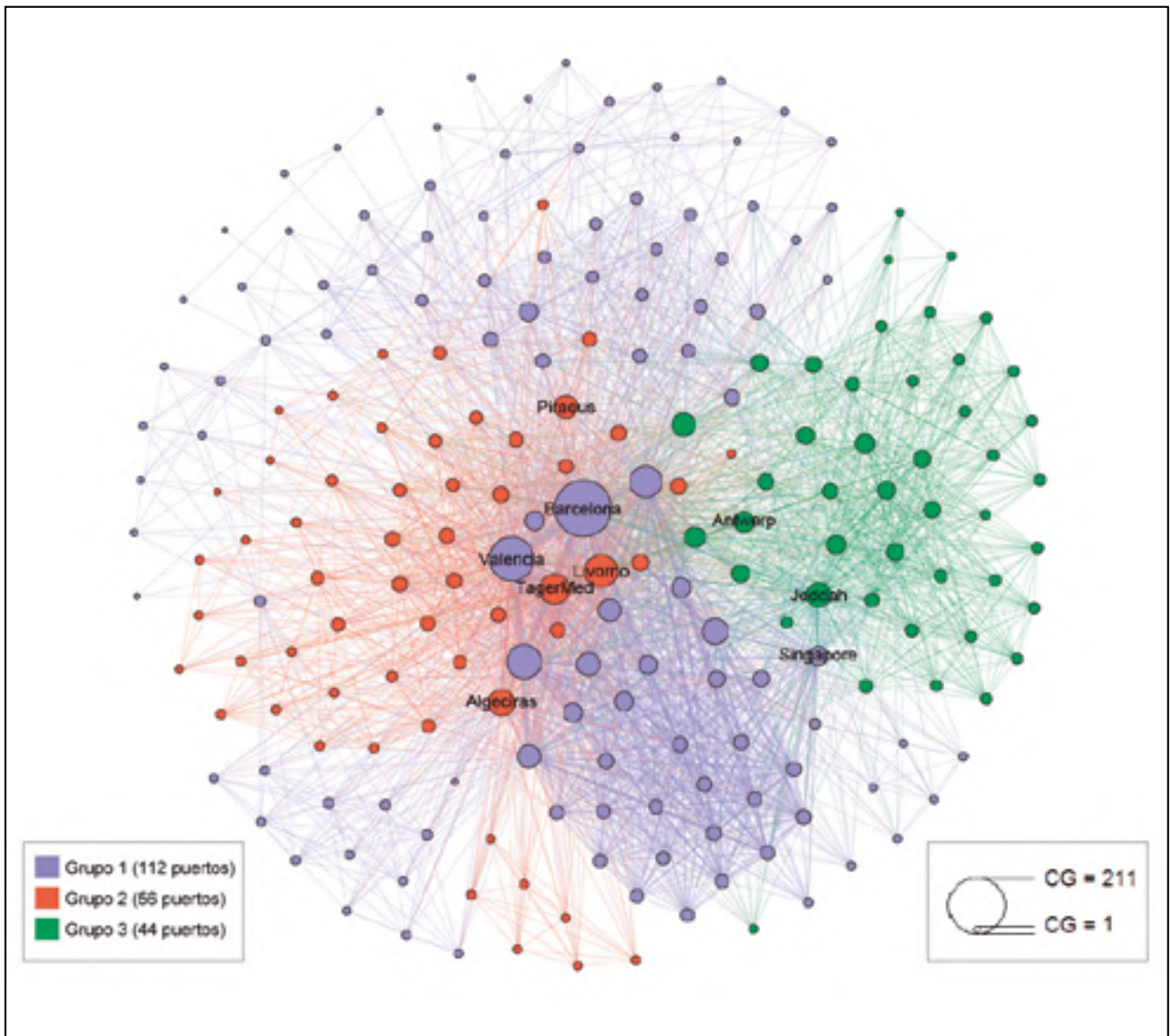


Figura 4. Grupos de puertos en la red marítima de Barcelona.

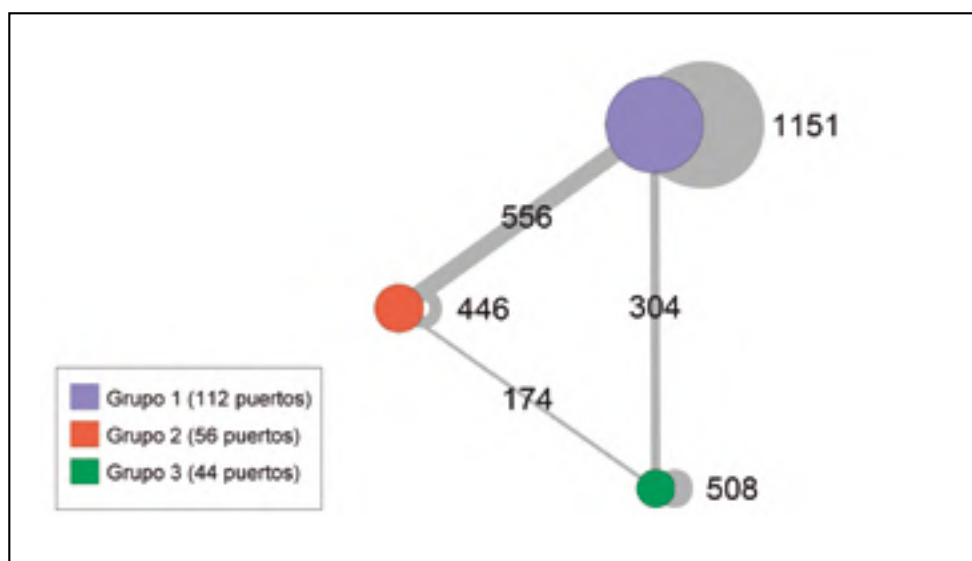


Figura 5. Vínculos entre grupos y dentro del mismo grupo.

geográfica de los puertos y el grupo al que pertenecen. Por ejemplo, los puertos americanos del Pacífico Sur forman parte del mismo grupo y lo mismo sucede en otras áreas

del globo como el golfo de México, o el Atlántico Sur. En definitiva, la red marítima de Barcelona no está completamente desconectada de la faceta geográfica o espacial de

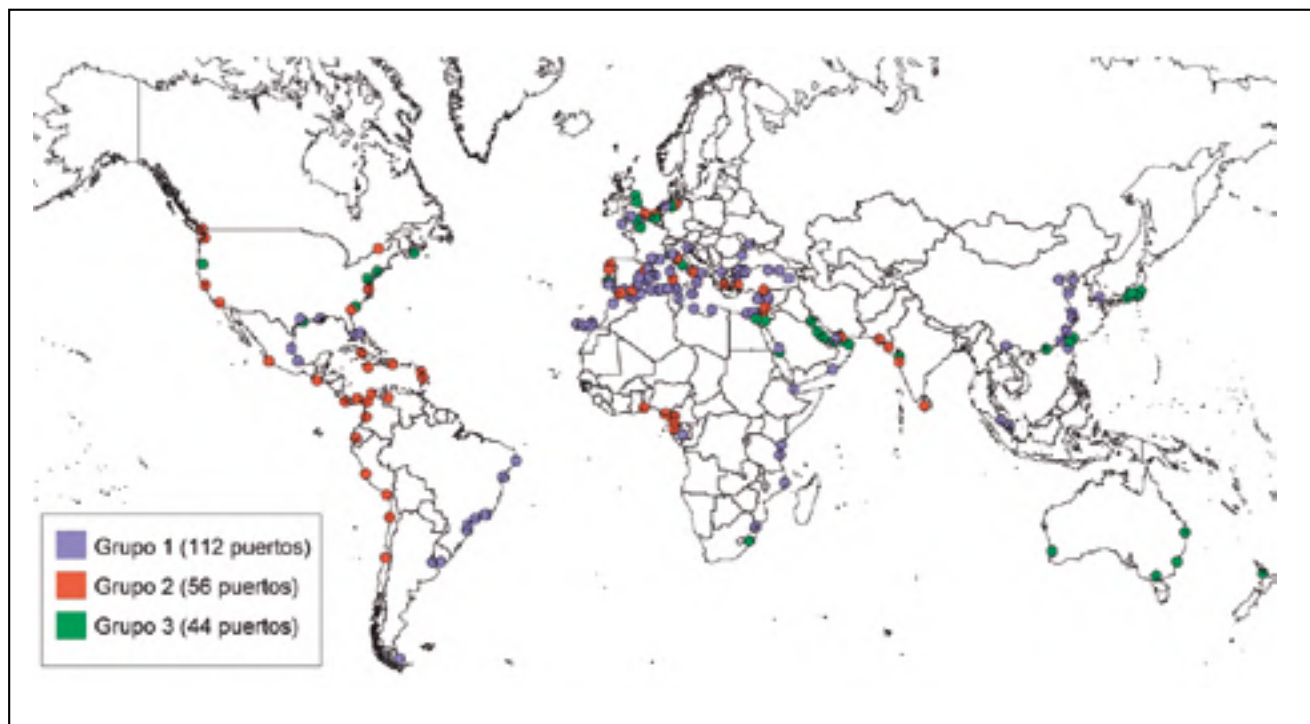


Figura 6. Ubicación de los puertos en la red.

los puertos (distancias). Ahora podemos encontrar una posible respuesta a la pregunta que formulamos anteriormente. ¿Por qué el grupo 3 tiene más conexiones internas que el grupo 2 que sin embargo cuenta con más puertos? La respuesta está en la “fortaleza” de los nodos. Como se observa en la figura 6, el grupo 2 no está presente en ningún puerto del mercado de Asia Oriental, el más potente del mundo y el que aglutina la mayor cantidad de *hubs*. Por tanto, es razonable pensar que los grupos 1 y 3 presentes en esa región tengan una red interna más densamente conectada, producto en parte de la alta competitividad portuaria.

Por otro lado, también es interesante observar que algunos puertos lejanos, en términos de distancia, también forman parte del mismo grupo, es decir, están bien conectados dentro la red. Estos vínculos son especialmente importantes entre algunos puertos del norte de Europa y del lejano oriente (grupos 1 y 3), lo que es coherente con la importancia de los dos polos, Asia como principal generador de manufacturas y Europa como principal receptor de las mismas. Llegados a este punto se debe aclarar que el hecho de que el grupo 2 no esté presente en el lejano oriente, no implica que los puertos de ese grupo no dispongan de enlaces a ese polo. Solo quiere decir que sus vínculos con aquella región son más débiles (tienen un menor número de enlaces). Además, esto solo es estrictamente cierto en la red marítima del puerto de Barcelona, que es la que estamos estudiando. Existen más posibilidades y más conexiones entre puertos en la red global.

Una vez completada la 1ª fase, nos centramos ahora en el análisis de las métricas de centralidad. Al igual que antes, hay que tener en cuenta que los resultados de esta 2ª fase se basan en las métricas calculadas en la red de Barcelona y esto en sí mismo es una limitación. Dejando a un lado el puerto de Barcelona, que lógicamente es el puerto más importante dentro de la red y el que tiene medidas más altas de CG y CI, observamos que en los tres grupos el puerto

que tiene mejor conectividad (mayor CG) es también el que proporciona mejor accesibilidad a toda la red (mayor CI). Esto es una señal clara que apunta al puerto más fuerte de cada grupo: Valencia en el grupo 1, Livorno en el grupo 2 y Jeddah en el grupo 3. Los resultados son coherentes con la ubicación y papel de cada puerto. Valencia es el principal competidor de Barcelona como *gateway* en la península ibérica, Livorno juega un papel muy importante en las líneas de *Short Sea Shipping* entre España e Italia, y Jeddah es un puerto de transbordo en la ruta comercial entre el norte de Europa y el sudeste asiático.

La figura 7 separa la red en una triada de grandes polos: América, Europa-África, y Asia-Oceanía. En ella se identifica el grupo/s dominante/s en cada zona marítima, así como algunos corredores marítimos claramente definidos por su grupo. Esta información junto con las medidas de centralidad incluidas en el apéndice, pueden facilitar el proceso de elección de puerto, es decir, la elección del mejor puerto de entrada a un determinado mercado. Aquí se entiende como mejor puerto el que ofrece una mayor versatilidad, es decir, el que ofrece más conexiones locales (CG) y mejor accesibilidad global (CI) al resto de la red.

Por ejemplo, los puertos mejor conectados en la costa americana del Pacífico son todos del grupo 2: Seattle, Vancouver, Long Beach y, más al sur, Manzanillo (México). En la costa americana del atlántico la mejor estrategia sería utilizar conexiones del grupo 1 a través de dos *hubs*: Freeport (Bahamas) para entrar en el golfo de México-Caribe y Santos (Brasil) para operar en el Atlántico Sur. En el continente africano no hay un puerto ni un grupo que destaque especialmente como la mejor opción, a la costa occidental se accede por el grupo 2 mientras que a la oriental se entra por el 1. En Oriente Medio e India son buenos puertos de escala tanto Jeddah (grupo 3) como Colombo (grupo 2). Ambos cuentan con un buen número de servicios desde/hacia otros mercados gracias a su ubicación geográfica.

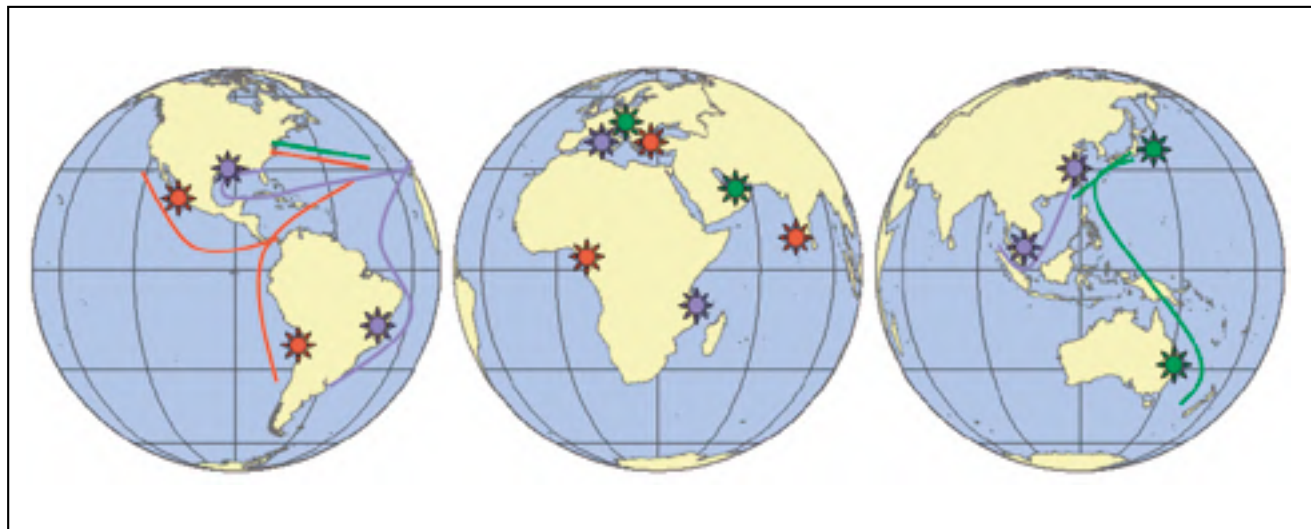


Figura 7. Visión de conjunto. Elección de puerto.

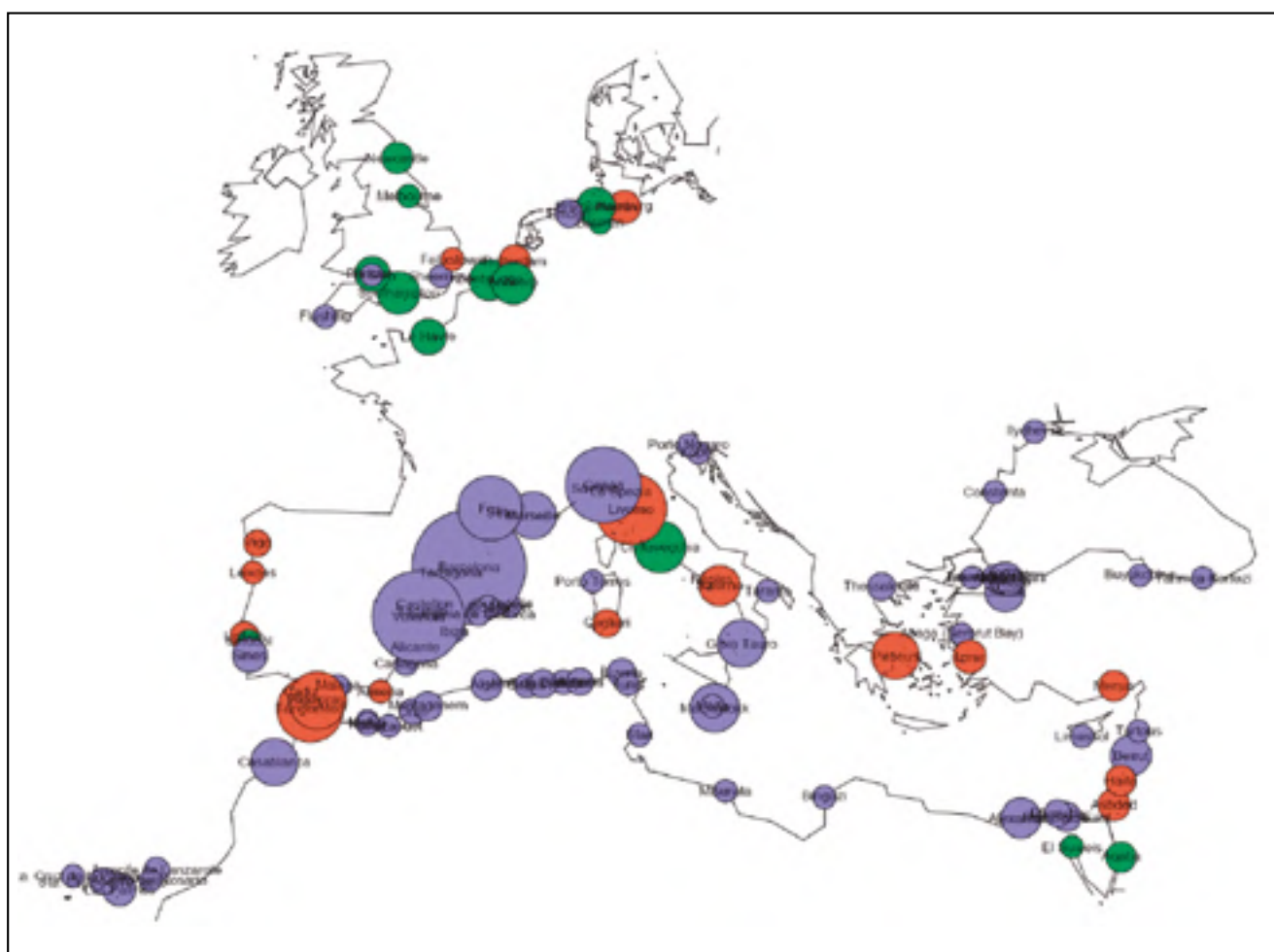


Figura 8. Network core. Centralidad de intermediación.

Finalmente, en el sudeste asiático destaca la función de Singapur como nodo intermedio entre puertos del grupo 1 y 3. Finalmente, Japón y Australia solo son accesibles vía puertos del grupo 3.

El caso de Europa en el que se encuentra el núcleo de la red es más complejo, pues se observa una gran variedad de líneas que se entrelazan entre puertos de los tres grupos. Sin embargo, no todos los puertos proporcionan la misma accesibilidad dentro de la red. Ese aspecto se puede descubrir analizando el *network core* de Europa (figura

8) a través de la CI. En esa figura el tamaño de los nodos es proporcional a la centralidad de intermediación (CI). A mayor diámetro, mejor accesibilidad del nodo dentro de la red y en particular dentro de su mismo grupo. Excluyendo Barcelona, que lógicamente es el puerto más importante, destaca el rol protagonista de algunos puertos del grupo 1 como Valencia, Genoa y Livorno. También se observa que los puertos del Estrecho de Gibraltar (TangerMed y Algeciras), con una privilegiada posición a la entrada del mediterráneo, tienen muy buenas conexiones con tres grandes

hubs europeos: Rotterdam, Hamburg y Felixstowe (los tres del grupo 2). Finalmente, en el grupo 3 destaca la influencia de los puertos de Antwerp, Zeebrugge y Bremerhaven como origen/destino en el norte de Europa. Todos los detalles (grupos, CG, CI, etc.) se pueden consultar en el apéndice.

5. CONCLUSIONES

En este trabajo hemos analizado la red marítima del puerto de Barcelona a través de un enfoque de doble etapa. En primer lugar, la fase de agrupamiento nos permite entender cómo las navieras organizan sus servicios de transporte marítimo de línea en relación con Barcelona. Como resultado de la primera fase y de acuerdo con las clases de modularidad, obtenemos tres grupos de puertos con perfiles de conexión similares. Aunque los principales puertos y corredores hacia y desde Barcelona no son visibles *a priori*, se pueden deducir fácilmente a través de la geo-localización de los nodos. La segunda etapa se centra en el análisis de la centralidad y permite comprender mejor cómo se distribuye la influencia a través de la red, arrojando luz sobre los puertos dominantes.

Nuestros hallazgos son importantes no sólo desde la perspectiva de las navieras interesadas en el diseño de servicios regulares, sino también desde la perspectiva del puerto de Barcelona. La Autoridad Portuaria de Barcelona cuenta ahora con una valiosa referencia para fomentar el tráfico y atraer volúmenes de transbordo. Por ejemplo, puede utilizar los resultados de la investigación para reforzar la cooperación con otros puertos, los puertos más centrales de la red, mediante acuerdos de hermanamiento o de colaboración.

Somos conscientes de que nuestra investigación tiene una serie de limitaciones y esto es importante para evitar una generalización excesiva de los resultados. En primer lugar, la CG mide el número de conexiones sin tener en cuenta su calidad. Sin embargo, en la vida real, la calidad de los servicios marítimos también desempeña un papel importante. Por ejemplo, no es lo mismo la conexión de un servicio de transporte marítimo de corta distancia, con buques portacontenedores de pequeño porte, que la de un servicio de transporte marítimo transoceánico con barcos de gran porte.

En segundo lugar, el tráfico marítimo entre dos puertos no siempre asumirá el trayecto más corto por fuerza. En la práctica, el transporte marítimo de línea regular opera en un entorno más complejo y dinámico caracterizado por numerosos factores, como las políticas de transbordo, la estructura de la demanda, la capacidad de los buques, la competencia portuaria, etc. En este sentido, también es importante remarcar que el estudio da una visión estática de la red, cuando en la práctica las compañías navieras pueden ajustar en cierta medida sus servicios a la demanda existente, es decir, la red puede sufrir modificaciones (la red es dinámica).

Por último, pero no menos importante, hemos estudiado sólo una parte de la red global. Así, cuando analizamos la accesibilidad portuaria (es decir, la ruta que usan los buques para completar la conexión entre pares de puertos), sólo consideramos una fracción de las rutas marítimas

posibles (exclusivamente las incluidas en la red de Barcelona). En otras palabras, hay más servicios de línea y más posibilidades dentro de la red marítima mundial.

Dejando a un lado estas consideraciones, nuestra investigación indudablemente ha arrojado luz sobre la red marítima del puerto de Barcelona. El trabajo futuro debería orientarse hacia la adición de nuevos atributos a los nodos y a sus conexiones dentro de la red actual. Por ejemplo, aquí hemos analizado la red como un grafo ponderado y no dirigido, sin embargo, si consideramos la dirección real de las conexiones podremos obtener una información más completa de la red. Así, en el caso de la CG obtendremos dos nuevas medidas. La primera definirá el número de conexiones que apuntan a los nodos (CG de entrada), mientras que la segunda definirá el número de conexiones que los nodos dirigen a otros (CG de salida). Esta distinción será crucial para revelar el papel de cada puerto como atractor o emisor de servicios regulares de línea. Además, en el futuro también podría considerarse la posibilidad de ampliar la red, incluyendo un mayor número de puertos y servicios.

6. REFERENCIAS

- Ansorena, Í.L. (2018). Bilateral connectivity in the liner shipping network: an overview. *World Review of Intermodal Transportation Research*, 7(4): pp. 295-309.
- Ansorena, Í.L. (2020). Analysing the maritime network of the port of Algeciras Bay. *World Review of Intermodal Transportation Research*, 9(3): pp. 245-263.
- Ansorena, Í.L., y Valdecantos, V.N. (2021). The port of Valencia maritime network: an analysis of centralities and tree-optimisation. *International Journal of Logistics Systems and Management*, 39(1): pp.127-139.
- Autoridad Portuaria de Barcelona (2018). Puerto de Barcelona. *Memoria Estadística 2017*. Barcelona: Autoridad Portuaria de Barcelona.
- Autoridad Portuaria de Barcelona (2020). El Port de Barcelona cerró 2019 con una cifra de negocio de 172 millones de euros. *Memoria Anual 2019*. http://www.portdebarcelona.cat/es/home_apb
- Bartholdi, J., Jarumaneeroj, P., y Ramudhin, A. (2016). A new connectivity index for container ports. *Maritime Economics and Logistics*, 18(3): pp. 231-249.
- Blondel, V.D., Guillaume, J.L., Lambiotte, R., y Lefebvre, E. (2008). Fast unfolding of communities in large networks. *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, nº 10, p.10008. <https://doi.org/10.48550/arXiv.0803.0476>
- Brandes, U. (2001). A Faster Algorithm for Betweenness Centrality. *Journal of Mathematical Sociology*, 25(2): pp.163-177.
- Caschili, S., Medda, F., Parola, F., y Ferrari, C. (2014). An Analysis of Shipping Agreements: The Cooperative Container Network. *Networks and Spatial Economics*, 14(3): pp. 357-377.
- Ducruet, C., y Notteboom, T. (2012). The Worldwide Maritime Network of Container Shipping: Spatial Structure and Regional Dynamics. *Global Networks*, 12(3): pp. 395-423. <https://doi.org/10.1111/j.1471-0374.2011.00355.x>
- Freeman, L.C. (1977). A Set of Measures of Centrality Based on Betweenness. *Sociometry*, 40(1): pp. 35-41.
- González Laxe, F., Freire, M.J., y Pais Montes, C. (2015). La conectividad de los puertos españoles del Mediterráneo. *Investigaciones Regionales – Journal of Regional Research*, nº 31, pp. 7-34.

Kaluza, P., Kölzsch, A., Gastner, M.T., y Blasius, B. (2010). The Complex Network of Global Cargo Ship Movements. *Journal of the Royal Society Interface*, 7(48): pp.1093-1103. <https://doi.org/10.1098/rsif.2009.0495>

Kringelum, L.B. (2019). Reviewing the challenges of port authority business model innovation. *World Review of Intermodal Transportation Research*, 8(3): pp. 265-291.

Lancichinetti, A., y Fortunato, S. (2009). Community detection algorithms: a comparative analysis. *Physical Review E*, 80(5): pp. 1-12. <https://doi.org/10.48550/arXiv.0908.1062>

Newman, M. (2010). *Networks: An Introduction*. Oxford, UK: Oxford University Press.

Park, K.S., Seo, Y.J., y Kim, R. (2017). Seaport Network based on Change of Korean Liner Service Pattern. *The Asian Journal of Shipping and Logistics*, 33(4): pp. 221-228. <https://doi.org/10.1016/j.ajsl.2017.12.005>

Rodrigue, J.P. (2017). *The Geography of Transport Systems* (3rd ed.). New York, US: Routledge.

Traag, V.A., Waltman, L., y van Eck, N.J. (2019). From Louvain to Leiden: guaranteeing well-connected communities. *Scientific Reports*, 9: 5233. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-41695-z>

UNCTAD (2019). *Review of Maritime Transport 2019*. New York, US: United Nations Publications.

Wang, L., Zhu, Y., Ducruet, C., Bunel, M., y Lau Y. (2017). From hierarchy to networking: the evolution of the “twenty-first-century Maritime Silk Road” container shipping system. *Transport Reviews*, 38(4): pp. 416-435. <https://doi.org/10.1080/01441647.2018.1441923>

Wang, Y., y Cullinane, K. (2011). Network Flow Analysis of Freight Traffic Consolidation in the Container Port Industry. *Annual Conference of the International Association of Maritime Economists (IAME 2011)*, Santiago de Chile, October 25-28.

Wang, Y., y Cullinane, K. (2016). Determinants of port centrality in maritime container transportation. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Vol. 95, pp. 326-340. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tre.2016.04.002>

7. APÉNDICE

Puerto	Frecuencia	CG	CGP	CI	Grupo
Barcelona	465	211	6105	7697,48	1
Valencia	398	160	4793	2445,32	1
Genoa	276	119	3893	1224,35	1
Fos	173	109	3439	691,47	1
Jebel Ali	128	83	2919	285,11	1
Marsaxlokk	271	72	3399	238,89	1
Gioia Tauro	110	73	2034	209,36	1
Casablanca	21	54	230	205,30	1
Marseille	24	57	283	202,08	1
La Spezia	177	70	2296	168,77	1
Singapore	174	57	2527	140,59	1
Beirut	73	57	1911	106,26	1
Alexandria	11	41	165	99,91	1
Gemlik	19	37	230	96,03	1
Altamira	60	43	1540	53,07	1
Veracruz	60	43	1540	53,07	1
Freeport (Bah)	49	54	1599	44,68	1
King Abdullah	49	54	1599	44,68	1

Puerto	Frecuencia	CG	CGP	CI	Grupo
Sines	58	54	1599	44,68	1
Sagunto	8	36	132	40,82	1
Las Palmas	21	23	199	32,45	1
Istanbul	8	38	139	31,75	1
Castellón	15	18	131	20,36	1
Alger	12	24	88	18,61	1
Miami	74	39	1712	14,72	1
Alicante	13	15	57	13,98	1
Salalah	48	38	1376	12,09	1
Port Said East	132	38	2664	12,09	1
Mostaganem	12	33	130	11,76	1
Bizerte	5	14	44	8,88	1
Derince	6	32	120	8,81	1
Port de Djendjen	9	32	120	8,81	1
Sete	5	27	89	8	1
Emden	4	17	48	7,62	1
Thessaloniki	14	11	106	6,58	1
Qingdao	95	37	2205	6,46	1
Ningbo	95	37	2205	6,46	1
Busan	95	37	2205	6,46	1
Shanghai	120	37	2205	6,46	1
Yantian	135	37	2205	6,46	1
Salvador	18	20	252	5,62	1
Itapoa	27	20	252	5,62	1
Santos	36	20	252	5,62	1
Sta. Cruz de Tenerife	16	12	64	5,47	1
New Orleans	56	35	1496	5,13	1
Houston	56	35	1496	5,13	1
Shekou	65	36	1695	5,02	1
Annaba	6	18	62	4,76	1
Istanbul-Ambarli	12	14	106	4,66	1
Damietta	70	22	655	4,39	1
Gebze	4	17	50	4,03	1
Oran	6	17	59	3,48	1
Xiamen	70	34	1830	1,73	1
Nansha	70	34	1830	1,73	1
Arrecife de Lanzarote	6	9	40	0,96	1
Skikda	5	15	54	0,22	1
Bejaia	5	15	54	0,22	1
Port Everglades	40	32	1320	0	1
Dalian	40	32	1320	0	1
Naples	40	32	1320	0	1
Xingang	40	32	1320	0	1
Tartous	3	26	81	0	1
Koper	3	26	81	0	1
Constanta	3	26	81	0	1
Limassol	3	26	81	0	1
Buyukcukur	3	26	81	0	1
Ilychevsk	3	26	81	0	1
Tunis	4	26	83	0	1
Malta	6	26	81	0	1
Port Kelang	30	16	510	0	1

Puerto	Frecuencia	CG	CGP	CI	Grupo
Kaohsiung	25	15	375	0	1
Tekirdag	3	14	42	0	1
Suape	9	14	135	0	1
Navegantes	9	14	135	0	1
Paranagua	9	14	135	0	1
Montevideo	9	14	135	0	1
Rio de Janeiro	18	14	135	0	1
Flushing	3	13	42	0	1
Portbury	3	13	42	0	1
Yenikoy	3	13	42	0	1
Itajai	9	12	117	0	1
Buenos Aires	9	12	117	0	1
Rio Grande	9	12	117	0	1
Sepetiba (Itaguaí)	18	12	117	0	1
Maputo	4	11	48	0	1
Nacala	4	11	48	0	1
Djibouti	8	11	48	0	1
Mombasa	8	11	48	0	1
Dar es Salaam	8	11	48	0	1
Bingazi	4	8	36	0	1
Misurata	4	8	36	0	1
Sfax	4	8	36	0	1
Aliaga (Nemrut Bay)	10	8	90	0	1
Yarimca-Korfezi	10	8	90	0	1
Ambarli	1	7	8	0	1
Sta. Cruz de la Palma	2	6	14	0	1
Ghazaouet	2	6	14	0	1
Puerto del Rosario	3	6	21	0	1
Cartagena	3	6	21	0	1
Málaga	4	6	14	0	1
Sheerness	1	5	6	0	1
Cádiz	2	5	12	0	1
Mellila	2	5	12	0	1
Porto Nogaro	4	4	16	0	1
Taranto	4	4	16	0	1
Nador	3	3	10	0	1
Mahón	1	2	3	0	1
Porto Torres	2	2	3	0	1
Alcudia	2	2	6	0	1
Ciudadella	4	2	6	0	1
Palma de Mallorca	4	2	9	0	1
Ibiza	2	1	4	0	1
Livorno	106	111	1603	1000,69	2
TangerMed	148	101	1661	741,95	2
Algeciras	163	86	2741	450,84	2
Piraeus	41	72	691	211,73	2
Salerno	39	44	538	106,84	2
Hamburg	14	44	369	35,77	2
Izmir	24	30	300	34,16	2
Savannah	45	42	729	26,49	2
Ashdod	39	35	513	25,69	2
Rotterdam	12	40	318	22,57	2

Puerto	Frecuencia	CG	CGP	CI	Grupo
Manzanillo (Pan)	28	31	472	20,87	2
Cartagena (Col)	40	31	472	20,87	2
Mersin	22	19	270	19,28	2
Caucedo	40	31	596	19,05	2
Haifa	27	37	513	18,19	2
Seattle	21	39	483	15,55	2
Vancouver	21	39	483	15,55	2
Manzanillo (Mex)	33	39	483	15,55	2
Oakland	33	39	483	15,55	2
Long Beach	33	39	483	15,55	2
Lisbon	19	23	262	12,65	2
Tarragona	39	16	255	11,26	2
Mundra	29	36	559	7,78	2
Karachi	29	36	559	7,78	2
Mumbai-Nhava Sheva	29	36	559	7,78	2
Cagliari	46	22	534	6,75	2
Vigo	4	13	36	4,01	2
Norfolk (Va)	36	18	450	2,84	2
Cristóbal	9	30	279	0	2
Montreal	9	30	279	0	2
Colombo	9	30	279	0	2
Felixstowe	18	30	279	0	2
Balboa	18	30	279	0	2
Ilo (Per) (1/2-B)	12	17	216	0	2
Antofagasta (1/2-A)	12	17	216	0	2
Buenaventura	12	17	216	0	2
Kingston	12	17	216	0	2
Callao	12	17	216	0	2
San Antonio	12	17	216	0	2
Guayaquil	24	17	216	0	2
Puerto Quetzal	12	16	204	0	2
Port Gentil	3	13	42	0	2
Douala	3	13	42	0	2
Malabo	3	13	42	0	2
Onne (1/2)	3	13	42	0	2
Bata	3	13	42	0	2
Libreville	3	13	42	0	2
Lome	6	13	42	0	2
Khor Fakkan	20	13	280	0	2
Turbo	4	12	52	0	2
Fort de France	4	12	52	0	2
Moin (~Puerto Limon)	4	12	52	0	2
Pointe Pitre	8	12	52	0	2
Leixoes	3	10	30	0	2
Almeria	3	10	30	0	2
Mariel (Havana)	4	6	28	0	2
Jeddah	146	79	2065	369,98	3
Civitavecchia	27	74	685	298,87	3
Southampton	42	58	882	133,17	3
Antwerp	33	62	795	130,75	3
New York	61	61	1113	123,87	3

Puerto	Frecuencia	CG	CGP	CI	Grupo
Zeebrugge	29	49	563	110,13	3
Durban	34	49	754	105,02	3
Halifax	42	42	690	89,05	3
Bremerhaven	39	51	840	79,45	3
Abu Dhabi	39	53	852	77,71	3
Savona	14	47	221	74,18	3
Charleston	25	50	663	62,21	3
Le Havre	20	43	403	55,68	3
Bristol	23	40	467	49,66	3
Bahrain	35	46	796	41,48	3
Kuwait	35	46	796	41,48	3
Hong Kong	39	35	697	39,38	3
Newcastle	17	33	361	22,56	3
Aqaba	20	33	440	17,11	3
Damman	9	25	146	8,20	3
Sohar	21	30	474	5,21	3
Doha	21	30	474	5,21	3
Port Elizabeth	16	24	384	0	3
Melbourne	16	24	384	0	3
Brisbane	16	24	384	0	3
Bombay	16	24	384	0	3
Fremantle	16	24	384	0	3
Port Kembla	16	24	384	0	3
Brunswick	16	24	384	0	3
Chiba	14	23	322	0	3
Keelung	14	23	322	0	3
Muscat	14	23	322	0	3
Bremen	14	23	322	0	3
Hitachi	14	23	322	0	3
Setubal	14	23	322	0	3
Yokosuka	14	23	322	0	3
Yokohama	14	23	322	0	3
Taichung	14	23	322	0	3
Toyohashi	14	23	322	0	3
El Suweis	5	17	90	0	3
Jubail	4	13	56	0	3
Baltimore	4	10	44	0	3
Jacksonville	4	10	44	0	3
Galveston	4	10	44	0	3

Formas rítmicas en la costa: ondas de arena y problemas en las playas

Rhythmic Formations on Coasts: Edge Waves and Beach-Related Issues

José Manuel de la Peña Olivas^{1*}

Resumen

En ocasiones aparecen a lo largo de las playas una serie de formaciones rítmicas cuyo origen se señala en este artículo. Pueden tener un doble origen diferente: formadas por inestabilidades debidas a la oblicuidad de oleaje; y producidas debido a que la playa ha entrado en resonancia y se han formado ondas de orilla o “edge waves”.

Palabras clave: formas rítmicas, inestabilidades, oblicuidad de oleaje, resonancia en playas, ondas de arena.

Abstract

Sometimes, a series of rhythmic formations appear along beaches whose origin is indicated in this article. They may have a different dual origin: Formed by instabilities due to wave obliquity, and produced because the beach has come into resonance, resulting in the formation of edge waves and beach cusps.

Keywords: Rhythmic formations, instabilities, wave obliquity, beach resonances, beach cusps.

1. INTRODUCCIÓN

Algunos de los problemas que nos podemos encontrar en las playas vienen asociados a formaciones rítmicas, entrantes y salientes a espacios regulares, que se suceden al largo de ellas, que se producen en su topografía y acaban apreciándose en la línea de orilla en forma de ondulaciones (CEM, 1998). Estas sinuosidades o formas rítmicas se caracterizan y clasifican por su longitud de onda. No todas ellas tienen la misma naturaleza y, por lo general su estudio es básicamente teórico. No suele tenerse en cuenta a la hora de abordar problemas costeros, a veces por desconocimiento y a veces porque se considera este fenómeno como “peculiar” y “curioso”; pero, lo cierto es que puede producir o agravar problemas en la costa que hay que conocer y tener en cuenta a la hora de abordar estudios de playas.

Al conocimiento de ellas se ha dedicado durante mucho tiempo el doctor ingeniero de caminos Antonio Lechuga Álvaro, durante muchos años mi jefe y siempre mi amigo. De él aprendí lo que significan estas ondas de orilla o formas rítmicas, de las que es un experto y dedico a ellas su tesis doctoral en 1984: a él mi recuerdo y homenaje.

No sé por qué casualidad de la vida, en muchos de los congresos en los que he participado normalmente antes de mí presentaba sus trabajos Albert Falqués, y, a fuerza de la costumbre, nos hicimos amigos. Él también se dedica a las formas rítmicas y, esperando a presentar mis ponencias, aprendí de él cómo se formaban esas lenguas sucesivas en la costa. He recurrido a Albert en alguna ocasión que mi

trabajo lo ha requerido y al tratar de las formas rítmicas no podía faltar la contribución que aprendí de él.

De manera práctica, estas ondas de orilla pueden aparecer en dos casos casi extremos: Cuando el oleaje es muy oblicuo respecto de la costa (Falqués *et al.*, 2005, 2011, 2013 y 2017) o cuando el oleaje es normal o con un ángulo de oblicuidad no muy elevado, produciéndose el fenómeno conocido como resonancia de una playa (Lechuga, 1983, 1984, 1985, 1991 y 1997).

Este artículo lo he enfocado desde una perspectiva práctica de ingeniero de costas. Primeramente, abordaré el concepto y diversidad de las formas rítmicas; a continuación, se dan unas pinceladas teóricas del concepto, características y tipos; y finalmente, se ponen algunos ejemplos prácticos con los que me he topado en alguno de los informes realizados.

2. TIPOS DE LAS FORMAS RÍTMICAS POR SU ORIGEN

Las formas rítmicas que se producen en las playas son la resultante de la acción del oleaje sobre la costa, que en determinadas condiciones provocan estas ondulaciones, también conocidas como ondas de arena, que vienen gobernadas por el ángulo de incidencia del oleaje en la costa, entre otras variables

Estas condiciones del oleaje pueden diferenciarse, por tanto, según el ángulo de incidencia sobre la costa, como se ha mencionado anteriormente. Cuando el ángulo de incidencia es grande y está más próximo a la línea de orilla que a su normal, o cuando éste no es muy grande y está próximo a la normal a la línea de orilla. Podríamos remontarnos, para comprenderlo mejor a los estudios del ingeniero portugués Castanho (1966) sobre el transporte sólido litoral (figura 1), en la que aparece la curva de variación del transporte sólido litoral (q_s) respecto al ángulo de incidencia del oleaje (α_o). La curva muestra que existe un ángulo

* 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.

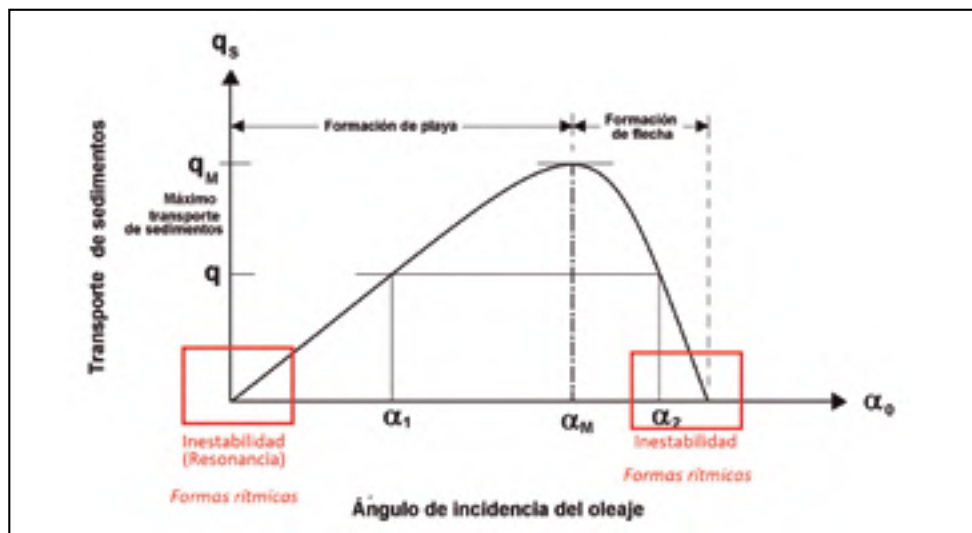


Figura 1. Variación del transporte sólido litoral en función del ángulo de incidencia, donde se aprecia que para un ángulo determinado en la costa se forman flechas o formas rítmicas (según Castanho, 1966).

α_M de incidencia del oleaje, Castanho en el LNEC, obtuvo que el valor del ángulo de transición playa-flecha dependía de la pendiente de la playa; así, para una pendiente del 2 % el valor de α_M tenía un valor entre 50° y 60° que era el que se obtiene un transporte sólido litoral máximo. Para ángulos mayores se tiende a formaciones tipo flechas y para ángulos menores las formaciones son tipo playas. Así pues, un mismo caudal sólido q puede generarse por dos ángulos distintos de incidencia del oleaje, pudiendo producir el mayor de ellos formaciones tipo flecha cuando las condiciones morfológicas de la costa, saliente, etc., lo permitan.

Cuando nos encontramos en la parte de la curva donde se tiende a formación de flecha, y los oleajes inciden sobre la costa con oblicuidad importante, mayor de 45° (más frecuentemente >70°), se produce la inestabilidad, apareciendo ondas de arena en la costa. Falqués estudió este efecto en diversas costas como Namibia y las costas del Maresme (Falqués *et al.*, 2013).

Este tipo de oleaje es el que estudió Falqués con otros autores ya mencionados, dando una explicación teórica y poniendo ejemplos de ello a lo largo de las costas, como por ejemplo de Namibia (figura 2).

En el otro lado de la gráfica (figura 1), con oleajes con ángulo de incidencia pequeño o normal a la costa también pueden producirse inestabilidades, aunque el mecanismo sea diferente. Esta otra forma de producir esas

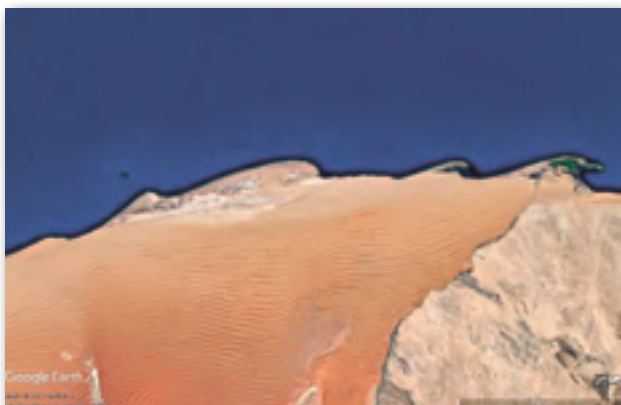


Figura 2. Formaciones rítmicas con ángulos de incidencia grandes en las costas de Namibia (Fuente: Google Earth).

ondulaciones en la costa con el ángulo de incidencia pequeño se da cuando, en determinadas condiciones, se produce lo que se llama resonancia en playas. Estas formas rítmicas u ondas de orilla son las que estudió Antonio Lechuga y dan lugar igualmente a ondulaciones o en el término anglosajón “beach cusps”, u ondas de arena, en las playas.

Aun siendo tan sencillo el concepto apuntado, en ocasiones uno y otro se confunden por lo que tratamiento conjunto en este artículo ha parecido lo más correcto. A uno y otro nos vamos a ocupar en los apartados siguientes, finalizando con ejemplos que se producen en la costa que han dado lugar a problemas con los que me he encontrado en diversos informes.



Figura 3. Ondas de arena en la playa del Saler en Valencia.

3. FORMAS RÍTMICAS POR OLEAJE MUY OBLICUO

En los ensayos que realizó en el LNEC, Castanho obtuvo que el valor del ángulo de transición playa-flecha dependía de la pendiente de la playa; así, para una pendiente del 2 % el valor de α_M tenía un valor entre 50° y 60°. Por tanto, la formación de flecha por oleajes muy oblicuos depende tanto de la oblicuidad de oleaje como de la pendiente de la playa. Falqués, que en ningún caso menciona a Castanho, supone que la inestabilidad de la playa por este concepto se produce con máxima intensidad cuando el ángulo

de incidencia está entorno a 70° (Falqués *et al.*, 2017). Un ejemplo espectacular de este tipo de formaciones debido al oleaje muy oblicuo lo hallamos en la isla Djerba en Túnez donde estas formas rítmicas se han desarrollado hasta formar dos enormes flechas en los extremos de la isla de cerca de 8 km cada una (figura 4).



Figura 4. Flechas al norte y sur de la isla de Djerba en Túnez (Fuente: Google Earth).

Según los trabajos de Falqués y su equipo (Falqués *et al.*, 2005, 2011, 2013 y 2017) estas formaciones son debidas a las diferencias en la propagación de la energía de las ondas refractivas entre los lados ascendentes y descendentes de la ondulación costera (figura 5).

Este efecto de formaciones rítmicas por oblicuidad es dominante sólo para oleajes con oblicuidad importante, mayor de 45° , que es cuando se produce la inestabilidad, apareciendo ondas de arena en la costa. Falqués estudió este efecto en diversas costas como Namibia (figura 2), y las costas del Maresme (Falqués *et al.*, 2013). Según Falqués *et al.* (2013), cuando el oleaje, en condiciones medias, alcanza la costa con ángulos inferiores a 40° , respecto a la línea de orilla, se producen “inestabilidades” que dan lugar a ondas de arena de longitudes de onda muy grandes, del orden del km y muestra cómo la costa del Maresme, entre la desembocadura del río Tordera y Arenys de Mar está afectada por ello.

Para su estudio Falqués *et al.* (2005 y 2013) han desarrollado un modelo de 1D asentado solamente en tener en cuenta el transporte longitudinal, basado en el flujo de energía, pero no explícitamente el transporte transversal, cuyo resumen se muestra en las figuras 6 y 7, facilitadas por el autor. Las conclusiones a las que llega este trabajo son que las ondas de arena por inestabilidad debido a la acción del oleaje se situarían entre 1 y 1,4 k de longitud de onda, en el caso del Maresme.

Este fenómeno puede ser el responsable de determinadas formas de acumulación de sedimento que se aprecian a lo largo de la costa del Maresme, como sucede en el espigón norte de Vilassar y que explicarían la diferencia de comportamiento entre éste y el espigón sur.

El temporal de enero de 2017 que afectó a la costa de Maresme, vino con oleajes muy oblicuos e hicieron que

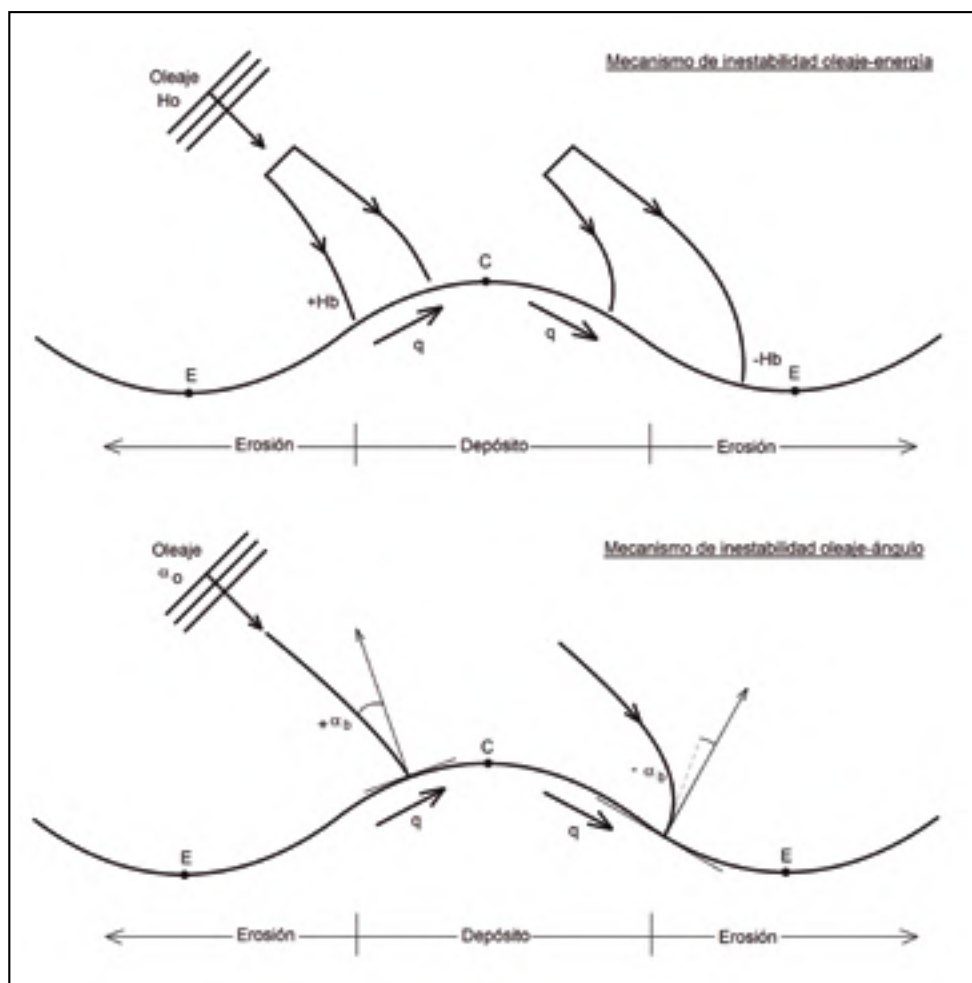


Figura 5. Esquema del mecanismo de inestabilidad del oleaje-energía y oleaje-ángulo, según Falqués *et al.* (2017).

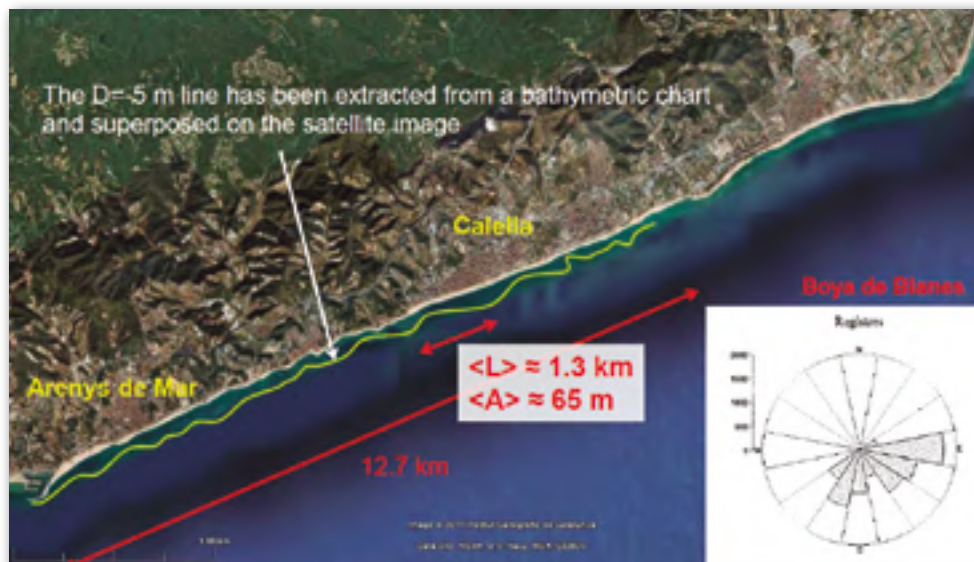


Figura 6. Zona de estudio y característica de las ondas de arena en la zona norte del Maresme (según Falqués *et al.*, 2013) (Foto cortesía de Albert Falqués).

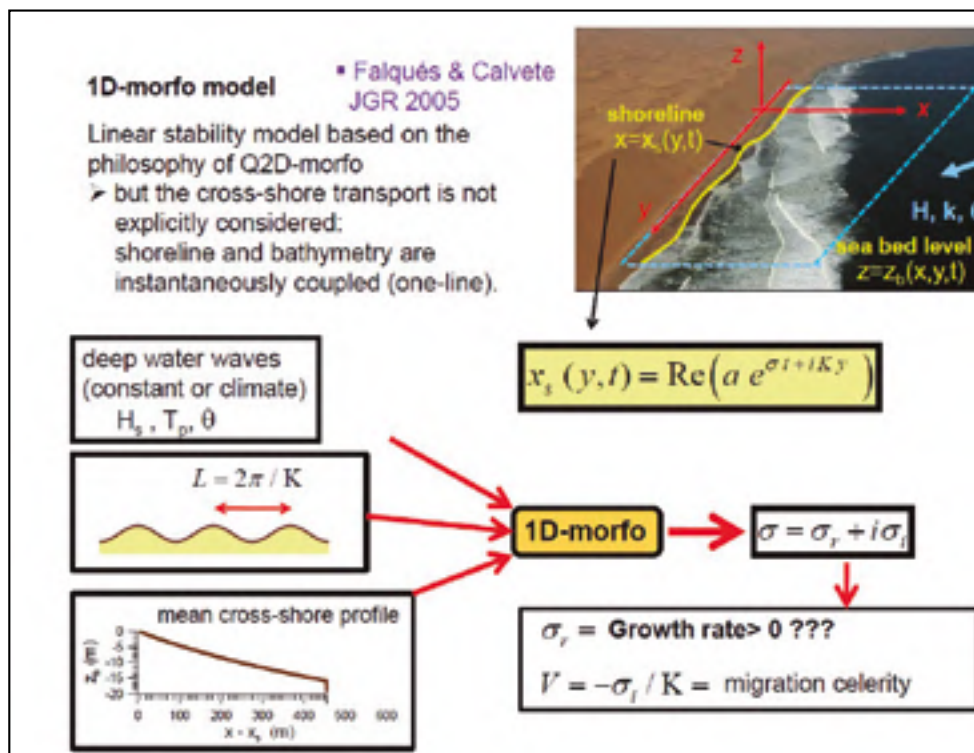


Figura 7. Esquema del modelo de una línea desarrollado por Falqués y Cavete (2005) para analizar los fenómenos de ondulación de la costa debido a la incidencia oblicua del oleaje (Falqués *et al.*, 2013) (Foto cortesía de Albert Falqués).

en la playa de Pineda se produjera una posible resonancia de la playa con ondas de unos 260 m de longitud media, lo que llevó a formar alternativamente avances y retrocesos,

con un valor máximo de la concavidad entre 20 y 30 m (figura 8) que unido a la erosión media de las playas produjo daños en el paseo marítimo (Peña-CEDEX, 2017).

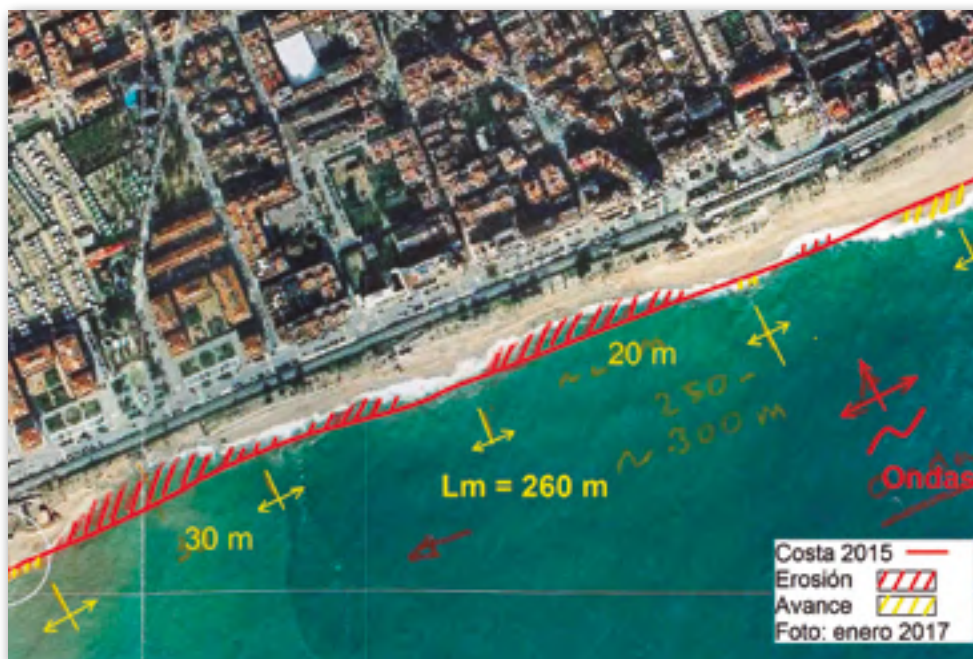


Figura 8. Evolución entre 2015 y enero de 2017 en Pineda de Mar (Fuente: Institut Cartogràfic de Catalunya).

4. FORMAS RÍTMICAS POR OLEAJE CON ÁNGULOS MENORES: RESONANCIA EN PLAYAS

Estas formas suelen ser las más corrientes. Alguna vez cuando hemos ido a la playa nos encontramos con que no es recta; se han formado una serie de entrantes y salientes, como ondas, en la orilla (figura 9). Estas formas, llamadas formas rítmicas u ondas de arena, “beach cusp” en la acepción anglosajona, se han producido debido a que la playa ha entrado en resonancia y se han formado ondas de orilla o “edge waves” (Lechuga, 1983), y a ellas nos vamos a dedicar en las próximas líneas y párrafos, para así dar unas pinceladas a su conocimiento.



Figura 9. Formas rítmicas en la playa de Nules.

4.1. Concepto de ondas de orilla y ondas de arena

En determinadas condiciones de incidencia del oleaje, éste provoca ondas de orilla estacionarias que Antonio Lechuga (1983) como “... movimientos ondulatorios periódicos del agua a lo largo de la costa ...”, pudiendo tener carácter progresivo o estacionario. Son más fáciles que se den en playas con rotura tipo oscilante (*surging*) o de colapso (*collapsing*), reflejantes, que con roturas en voluta (*plunging*) o derrame (*spilling*), disipativas.

La acción de las ondas de orilla sobre las playas produce ondas de arena, o más genéricamente formas rítmicas o “beach cusps”; definidas por Lechuga (1983) como “... formaciones topográficas rítmicas de una longitud de onda casi regular a lo largo de una playa ...”. Vienen caracterizadas por la longitud de la onda, la profundidad de la cresta y la pendiente de la playa (figura 10). Lo picudo de la cresta depende del tipo de material que forma la playa; así playas de grava (figura 9), son más picudas, mientras que las playas de arena (figura 3), son más romas.

Por tanto, el origen de estas formas rítmicas es debido a las llamadas ondas de orilla estacionarias, conocidas a veces por su acepción inglesa de “edge waves” y su formación es sencilla: Cuando un oleaje de frecuencia ω_i incide normalmente, o casi normalmente, sobre una playa y es fuertemente reflejado en ella, provoca una onda a lo largo de la playa, perpendicular a la onda incidente, que decrece exponencialmente desde la orilla hacia el mar. Estas ondas de orilla son progresivas y no tienen una incidencia sobre la batimetría de la playa; pero si las ondas, en su progresión a lo largo de la playa se encuentra con un obstáculo de suficiente entidad, la onda se refleja interaccionando ambas ondas, incidente y reflejada, pudiendo entrar en resonancia

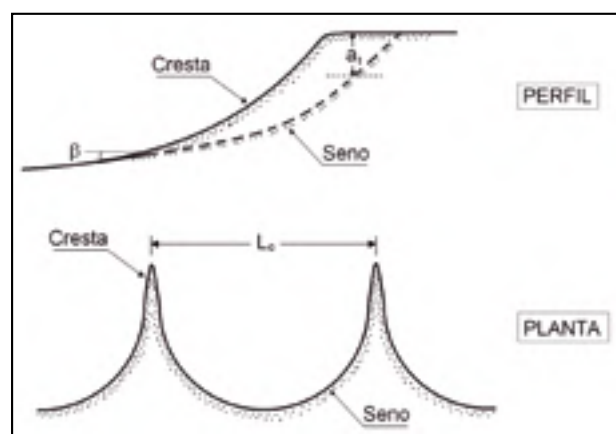


Figura 10. Planta y perfil de una forma rítmica (según Lechuga, 1983).

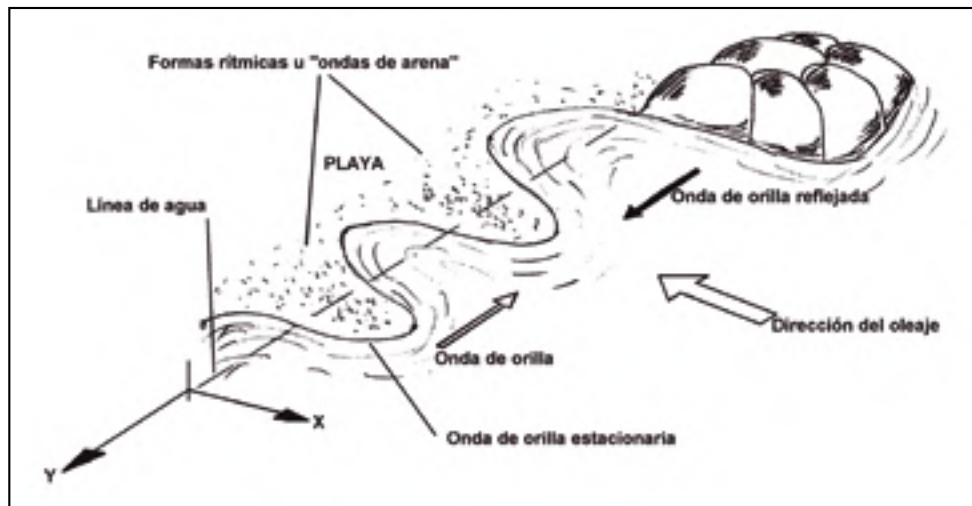


Figura 11. Esquema de formación de las ondas de orilla estacionarias y las formas rítmicas u "ondas de arena" que generan.

y formarse una onda estacionaria, onda de orilla estacionaria, que sí puede alterar los fondos de la playa.

Si ambas, ondas incidentes y ondas transversales reflejadas entran en resonancia se produce una onda de orilla estacionaria, que es la responsable que se produzcan unas modulaciones u ondas de material sedimentario de la playa, "ondas de arena", denominadas formas rítmicas, que se caracterizan por unos montículos de material en sus crestas y el agua entrando sobre sus senos, al interaccionar con el fondo de la playa.

4.2. Características de las ondas de orilla

La solución lineal de las ondas de orilla se conoce desde Stokes (1847); pero la solución para aguas poco profundas, tanto para ondas de orilla estacionarias como progresivas, se debe a Eckart (1951) y a Ursell (1952), que obtuvo una solución general para ondas de orilla de pequeña amplitud. La solución general para aguas poco profundas (Eckart, 1951) del potencial de velocidades de una onda de orilla es para ondas estacionarias (Lechuga, 1983 y 1985):

$$\phi_e = \frac{a_n g}{\omega} e^{-kx} L_n(2kx) \cos ky \cos \omega t \quad [1]$$

Y para ondas progresivas:

$$\phi = \frac{a_n g}{\omega} e^{-kx} L_n(2kx) \cos(ky - \omega t) \quad [2]$$

Dónde: a_n es la amplitud en $x=0$, x es la coordenada normal a la costa, y la coordenada a lo largo de la costa, k el número de onda en la dirección de la costa, n el modo, y $L_n(2kx)$ los polinomios de Laguerre de orden n ; teniendo un valor para $n=0, 1$, y 2 , de:

$$\begin{aligned} L_0(2kx) &= 1 \\ L_1(2kx) &= 1 - 2kx \\ L_2(2kx) &= 1 - 4kx + 2(kx)^2 \end{aligned}$$

Y la relación de dispersión para ambas ondas de orilla, estacionaria y progresiva, es:

$$\omega^2 = k g (2n + 1) \tan \beta \quad [3]$$

Donde $\tan \beta$ es la pendiente de la playa.

Los perfiles de superficie del agua, para la onda estacionaria, valen:

$$\eta_e = \frac{1}{g} \frac{\partial \phi}{\partial t} = a_n L_n(2kx) e^{-kx} \cos ky \sin \omega t \quad [4]$$

Cuya representación de un perfil normal a la costa, $x = \text{cte.}$, en un instante t determinado se muestra en la figura 12 (Lechuga, 1983) para los modos $n = 0, 1, 2$ y 3 , apareciendo en abscisas la variable adimensional:

$$\chi = \frac{\omega_e^2 x}{g \tan \beta} \quad [5]$$

Y en ordenadas el perfil de la superficie del agua, que viene dado por:

$$\eta = a_n L_n(2kx) e^{-kx} \cos ky \sin \omega_e t \quad [6]$$

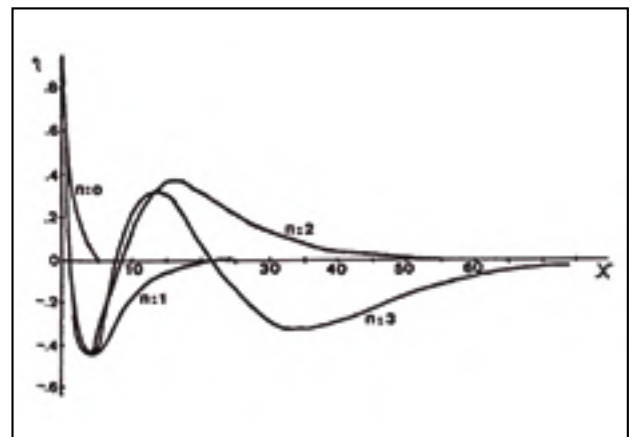


Figura 12. Perfil de onda de orilla estacionaria normal a la playa (Cortesía de A. Lechuga, 1983).

Estas ondas de orilla estacionarias poseen una frecuencia propia, ω_e , teniendo una relación con la frecuencia de la onda incidente que se puede aproximar a (Guza y Davis 1974; Guza y Bowen, 1976):

$$\omega_e = \frac{\omega_i}{2} \quad [7]$$

Por tanto, se establece una resonancia subarmónica. La amplitud de las ondas de orilla estacionarias comienza a crecer hasta un límite. La forma de la playa y sus fondos se irá adoptando a una estructura rítmica. Experimentalmente se comprueba que las ondas de orilla más susceptibles de aparecer son aquellas con frecuencia la mitad de la frecuencia del oleaje incidente, $\omega_e = 1/2 \omega_i$, de modo $n = 0$ (Lechuga, 1983).

La relación de dispersión para una onda de orilla estacionaria viene dada por (Lechuga, 1983 y 1985; Peña, 2007):

$$\omega_e^2 = k g (2n + 1) \tan \beta \quad [8]$$

Donde ω_e es la frecuencia de la onda de orilla estacionaria, $\tan \beta$ es la pendiente de la playa, k el número de onda en la dirección de la costa, n el modo, y g la aceleración de la gravedad; pero:

$$k = \frac{2\pi}{L_e} \quad [9]$$

Siendo L_e la longitud de la onda estacionaria, que es la doble que la longitud de onda de la forma rítmica L_c , y la frecuencia de la onda de orilla es la mitad de la onda incidente (Guza y Davis, 1974; Guza y Bowen, 1976), operando:

$$\omega_e = \frac{\omega_i}{2} = \frac{2\pi}{2T_i} = \frac{\pi}{T_i} \quad [10]$$

$$\omega_e^2 = \left(\frac{\pi}{T_i}\right)^2 = \frac{2\pi g}{L_e} (2n + 1) \tan \beta \quad [11]$$

$$L_e = \frac{2T_i^2 g}{\pi} (2n + 1) \tan \beta \quad [12]$$

$$L_c = \frac{L_e}{2} = \frac{T_i^2 g}{\pi} (2n + 1) \tan \beta \quad [13]$$

Cuando el oleaje incidente lo hace con una cierta oblicuidad la resonancia se produce entre el oleaje incidente y dos sistemas progresivos de ondas de orilla de sentido contrario (Guza y Bowen, 1975; Lechuga, 1983). En la figura 13 se muestra la solución gráfica de la onda de orilla del modo 1 con oleaje oblicuo (Lechuga, 1997).

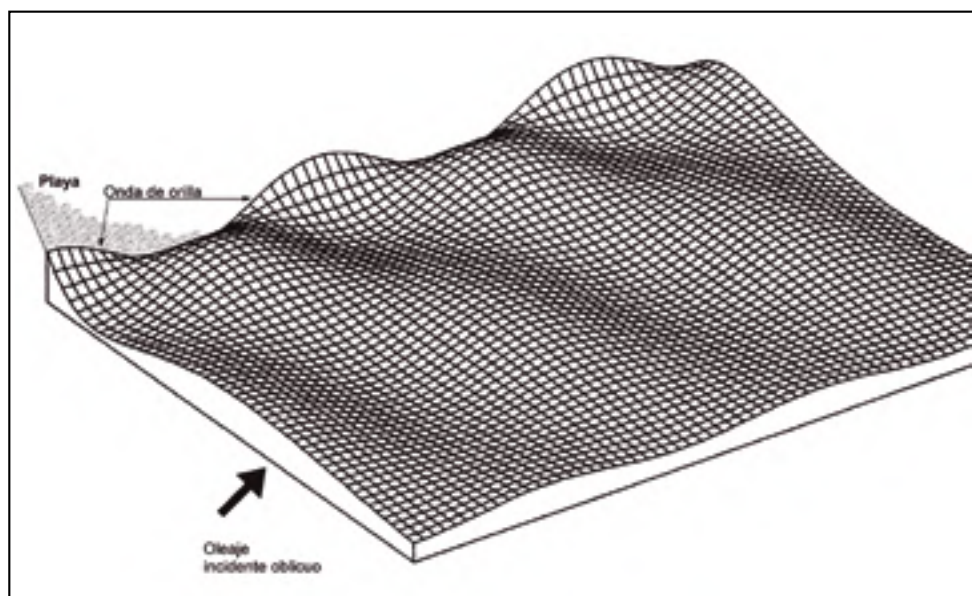


Figura 13. Onda de orilla del modo 1 con oleaje oblicuo (Cortesía de A. Lechuga, 1997).

4.3. Características de las ondas de arena como formas rítmicas

Las formas rítmicas que producen las ondas de orilla estacionarias se caracterizan por su longitud de onda, L_c , y por la altura del escalón, a_e , que se produce entre cresta y seno. La longitud de onda de la onda de orilla estacionaria, L_e , es el doble de la longitud de onda de la forma rítmica, L_c , que genera. El abanico de dimensiones que aparecen en la naturaleza es muy grande: variando L_c entre algunos metros o varios miles de metros. Entre una de sus clasificaciones por tamaños, se pueden dividir en (Lechuga, 1983):

1. Típicas: entre 8 y 25 m
2. De temporal: entre 70 y 120 m
3. Gigantes: entre 700 y 1.500 m

Las ondas de orilla, como sabemos, provocan las ondas de arena, como formas rítmicas, cuya concavidad se interna en la playa seca provocando una diferencia de cotas

entre el seno y la cresta de la forma rítmica generada en la playa (a_e) (figura 12). Si se hace una evaluación teórica del valor de esa amplitud máxima que puede provocar la onda de orilla, se tendría, al menos de forma aproximada, el valor de S_{ir} (figura 12) que podría acercarse a la amplitud de la onda estacionaria, u onda de orilla, a_e . La relación fundamental que liga la longitud de la onda de orilla L_e , la amplitud de la onda de estacionaria a_e y el parámetro de no linealidad del oleaje incidente ε_i es (Guza y Bowen, 1976; Lechuga 1983, 1985):

$$a_e = \frac{0,77 \tan \beta}{K_e} \varepsilon_i^{\frac{1}{2}} \quad [14]$$

Donde:

$$\varepsilon_i = \frac{a_i (2\omega)^2}{g \tan^2 \beta} \quad [15]$$

Pudiendo tomar un valor aproximado de 1, en condiciones óptimas de resonancia y de 2 en estados límites, según Guza y Bowen, 1976, y Lechuga, 1983, 1985.

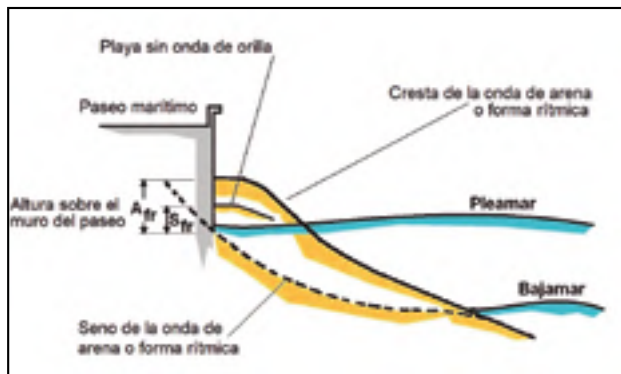


Figura 14. Esquema del comportamiento de las ondas de orilla cuando se interrumpen por un paseo marítimo.

5. EJEMPLOS DE PROBLEMAS EN PLAYAS GENERADOS POR LAS FORMAS RÍTMICAS

En algunas ocasiones esta curiosidad que alguna vez cuando hemos ido a la playa nos encontramos con que no es recta y se han formado una serie de entrantes y salientes, como ondas, en la orilla, pasa a ser un problema, o en sí mismo o como complementario a otros problemas erosivos, etc. que puede tener la playa. No suelen ser frecuentes; pero por ello, suelen pasar desapercibidos a los técnicos. A continuación se exponen algunos ejemplos con los que me he encontrado en la actividad profesional en el Centro de Estudios de Puertos y Costas.

5.1. Playa de Salinas

El primero de ellos se encuentra en el norte de España, concretamente en la emblemática playa de Salinas en Castrollón, cerca de Avilés, en Asturias donde se realizó un informe técnico para la Dirección general de Sostenibilidad de la Costa y del Mar en 2010. Entre los elementos detectados que condicionaban, y condicionan, el comportamiento de la playa aparecían las ondas de orilla que ya fueron vistas en un informe previo del CEDEX de 1992 (Medina, 1992), realizado a raíz de sufrir daños importantes el paseo marítimo, en sus conclusiones indicaba la existencia de estas ondas de orilla en la playa corroborado por las fotografías que entonces se realizaron (figura 15). Estas mismas ondas de orilla se siguieron seguido produciendo.

Estas formas rítmicas también se observaron en las fotografías aéreas de 2001 y de 2007, pudiéndose medir su longitud de onda que es aproximadamente de 400 m (figura 16), detectándose también en la playa al este de la

desembocadura, de Xagó las mismas formaciones de ondas de orilla con la misma longitud de onda.

Aplicando al caso de Salinas, tomando valores: $L_c = 406$ m y $\tan \beta = 0,0114$, operando se obtiene:

$$T_i = \frac{106,8}{\sqrt{2n+1}}$$

Que, dando valores para $n = 0, 1, 2$, y 3 , se obtienen unos periodos de onda incidente de: 106,8 s, 61,7 s, 47,8 s, y 40,4 s, respectivamente. Siendo éstos los más frecuentes de aparición, por lo que las ondas que provocan las ondas de orillas deben ser las llamadas ondas de acompañamiento u ondas largas asociadas a un tren de oleaje en temporal. Introduciéndose el seno de la onda de orilla en la playa seca hasta que el paseo marítimo lo interfiere, formando esas ondulaciones en el paseo que se observan en las fotografías horizontales, dejando al descubierto el paramento del paseo marítimo que facilita las reflexiones del oleaje sobre él. Si se hace una evaluación teórica del valor de la amplitud máxima que puede provocar la onda de orilla, se tendría, al menos de forma aproximada, el valor de S_{tr} , que, como se ha indicado anteriormente, se asemeja a la amplitud de la onda estacionaria, u onda de orilla, a_e .

La relación fundamental que liga la longitud de la onda de orilla L_e , la amplitud de la onda de estacionaria a_e y el parámetro de no linealidad del oleaje incidente ε_i es (Guza, 1976; Lechuga, 1983 y 1985) se rige por la ecuación [1]. Y aplicado a la playa de Salinas: siendo: $\tan \beta = m = 0,0114$; $L_e = 2 L_c = 800$ m y $K_e = 2\pi/L_e$. Y sustituyendo queda:

$$a_e = \frac{0,77 \cdot 0,0114}{2\pi} 800 \varepsilon_i^{\frac{1}{2}}$$

Donde:

$$\varepsilon_i = \frac{a_i (2\omega)^2}{g \tan^2 \beta}$$

Pudiendo tomar un valor aproximado de 1, en condiciones óptimas y de 2 en estados límites. Tomando el primero de los valores se obtiene:

$$a_e = 1'118 \text{ m}$$

Pudiendo alcanzar en un estado límite:

$$a_e = 1,118 \cdot 2^{1/2} = 1,58 \text{ m}$$

Por tanto, el valor del “socavón” que produce la onda de orilla en el muro del paseo marítimo de Salinas se



Figura 15. Ondas de orilla en la playa de Salinas en 1991 (Medina-CEDEX, 1992).



Figura 16. Ondas de orilla en 2001 en la playa de Salinas de 400 m aproximadamente de longitud de onda (Peña-CEDEX, 2010).

encontraría comprendido entre 1,118 y 1,58 m, siendo más probable que esté más próximo al primero de los valores.

5.2. Playas del Maresme

La formación de ondas en las playas del Maresme se ha comentado al tratar de estas formaciones rítmicas debidos a la gran oblicuidad del oleaje. Fueron estudiadas por Falqués *et al.* (2013) y por el CEDEX en 2013-14 (Peña-CEDEX, 2017). También entonces se detectaron formas costeras en la zona de Vilassar de Mar (figura 17) que condicionarían cualquier actuación.

5.3. Playa de Babilonia en Guardamar del Segura

Recientemente el CEDEX (Peña, 2017) realizó un informe sobre las playas de Guardamar del Segura. El análisis de la situación y los problemas existentes sacaron a la luz la existencia de formaciones rítmicas, ondas de orilla y ondas de arena en las proximidades del dique de encauzamiento sur del río Segura, concretamente frente a las casas conocidas como de Babilonia en la playa del mismo nombre. En las fotografías aéreas se aprecian estas formaciones (figura 18). En ellas no siempre son nítidas y claras ya que están condicionadas al terreno. La longitud de onda que se observó se encontraba en torno a 60 m.



Figura 17. Posibles formas rítmicas por gran oblicuidad del oleaje en la costa de Vilassar de Mar (Barcelona) (Fuente: Falqués, *et al.*, 2013, y Google Earth).



Figura 18. Formas rítmicas, ondas de arena, en la playa de Babilonia de Guardamar del Segura (Fuente: Google Earth).



Figura 19. Ondas de orilla en la playa de Babilonia de Guardamar del Segura (Foto cortesía de Carlos Cañadillas).

El efecto sobre las casas de estas ondas de orilla se sumó al erosivo de la playa, afectando notablemente a las instalaciones como se aprecia en las fotografías horizontales tomadas para este trabajo.

6. CONCLUSIONES

Las conclusiones a las que se llega en este pequeño trabajo se pueden englobar en dos aspectos diferentes; pero importantes: El primero de ellos corresponde al origen de las formas rítmicas que pueden aparecer en una playa; pudiéndose diferenciar aquellas que tienen su origen en la fuerte oblicuidad del oleaje, que pueden derivar en flechas litorales, aunque a menudo solamente se quedan en ondulaciones ya que la configuración orográfica de la costa no lo suele permitir. Y aquellas conocidas como ondas de orilla, o en terminología anglosajona “beach cusps” que se forman cuando entra en resonancia la playa, esto es; cuando la oscilación natural de la orilla es múltiplo de la frecuencia del oleaje que la excita. El segundo de ellos es el efecto que producen en la costa, que como hemos visto puede que se sume a otros efectos como la erosión costera, provocando puntas con efectos erosivos mayores que en condiciones normales donde no se produzcan estas ondas.

Finalmente, debe recalcar que habitualmente no se tiene en cuenta la formación de estas formas rítmicas que pueden dar lugar a confusiones o no llegar a un diagnóstico del problema adecuado.

7. AGRADECIMIENTOS

No puedo finalizar este artículo sin manifestar mi agradecimiento al doctor Antonio Lechuga Álvaro, que me enseñó a conocer estas formaciones y me honró con su amistad.

8. REFERENCIAS

Castanho, José Pires (1966). *Rebentação das ondas e transporte litoral*. Laboratorio de Engenharia Civil de Lisboa (memoria nº 275).

Eckart, C. (1951). Surface Waves on Water of Variable depth. Scripps Institute Oceanographic, Universidad de California-San Diego-La Jolla (Wave report nº 100).

Falqués, A., y Calvete, D. (2005). Large-scale dynamics of Sandy coastlines: Diffusivity and instability. *Journal of Geophysical Research*, 110(3), C03007.

Falqués, A., Calvete, D., y Ribas, F. (2011). Shoreline instability due to very oblique wave incidence: some remarks on the physics. *Journal Coastal Research*, 27(2): pp. 291-295.

Falqués, A., Caballería, M., Ribas, F., y Van den Berg, N. (2013). Shoreline sand waves along the Catalan coast. *Coastal Dynamics* (pp. 575-584).

Falqués, A., Kakeh, N., y Calvete, D. (2017). A new shoreline instability mechanism related to high-angle waves. *Coastal Dynamics*, Paper nº 155, pp. 1863-1873.

Guza, R.T., y Davis, R.E. (1974). *Journal Geophysics Research*, 79(9): pp. 1285-1291.

Guza, R.T., y Bowen, A.J. (1976). Finite Amplitude Edge Waves. *Journal Marine Research*, 34(2): pp. 269-293.

Lechuga Álvaro, A. (1983). Formas rítmicas en playas. *Revista de Obras Públicas*, 130(3213): pp. 353-357.

Lechuga Álvaro, A. (1985). Resonancia en playas. *Revista de Obras Públicas*, 132(3233): pp. 97-106.

Lechuga Álvaro, A. (1991). Una nueva solución a las ecuaciones de las ondas de orilla en playas con pendiente no uniforme. *Ingeniería Civil*, nº 82, pp. 127-133.

Lechuga Álvaro, A. (1997). Corrientes de retorno (rip currents) y ondas de orilla en playas. *Ingeniería Civil*, nº 107, pp. 89-93.

Medina Villaverde, J.M. (1992). Dinámica litoral de las playas de El Espartal y Salinas. Centro de Estudios de Puertos y Costas del CEDEX (nº 22-491-9-113, para la Dirección General de Costas) (CEDEX, 1992).

Peña Olivas, J.M. de la (2007). *Guía técnica de estudios litorales. Manual de costas*. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos (Colección Seinor, nº 39).

Peña Olivas, J.M. de la (2010). *Análisis de la playa de salinas (Castrillón-Asturias) y posibles mejoras de su comportamiento*. Centro de Estudios de Puertos y Costas del CEDEX (nº 22-410-5-001, para la Dirección General de Sostenibilidad de la Costa y del Mar).

Peña Olivas, J.M. de la (2017a). 3.3 estudios de dinámica litoral, defensa y propuestas de mejora en las playas con problemas erosivos, considerando los efectos del cambio climático: 3.3.2 Estudio de problemas específicos: Nota técnica: análisis de la evolución de la costa del Maresme entre Malgrat y el puerto de Arenys de mar tras el temporal de enero de 2017 y propuestas de actuación. Centro de Estudios de Puertos y Costas del CEDEX (Informe técnico nº 22-414-5-006, para la D.G. de Sostenibilidad de la Costa y del Mar) (CEDEX, 2017).

Peña Olivas, J.M. de la (2017b). 3.1. Estudios de Ingeniería. Análisis de alternativas de actuación de las playas de Guardamar del Segura (Alicante). Centro de Estudios de Puertos y Costas del CEDEX (nº 22-417-5-001, para la Dirección General de Sostenibilidad de la Costa y del Mar) (CEDEX, 2017).

Stokes, G.C. (1847). On the Theory of Oscillatory Waves. *Transactions of the Cambridge Philosophical Society*, Vol. 8, pp. 441-455.

U.S. Army Corps of Engineers (USACE) (1998). Engineering and Design. *Coastal Engineering Manual*, Part III (Chapter 2). Circular nº EC 1110-2-292, Department of the Army, pp. 48-53.

Ursell, F. (1952). *Edge Waves on a Sloping Beach*. Proceeding of Royal Society of London (Serie A, Vol. 214, pp. 79-97. <https://doi.org/10.1098/rspa.1952.0152>

Análisis del comportamiento lateral de pilotes

Analysis of the Lateral Behavior of Piles

Gustavo Augusto Benito^{1*}, Jesús González Galindo²

Resumen

El objetivo de este artículo es presentar el desarrollo del Trabajo Final del Máster en Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica del CEDEX, cuyo tema ha sido el análisis del comportamiento de pilotes frente a acciones horizontales. En este trabajo se buscó desarrollar, inicialmente, un completo estado del arte para que el lector pueda conocer el tema en su globalidad. Posteriormente, se procedió a un análisis de las normativas para conocer las diferentes metodologías existentes para el estudio de pilotes frente a cargas horizontales. Finalmente, se procedió a resolver un caso práctico real, aplicando los métodos de cálculo más destacados en la bibliografía y en las normativas al objeto de conocer aquellos métodos con los cuales se obtienen resultados más representativos de la realidad.

Palabras clave: pilotes, cargas laterales, método de las curvas p-y, reacción lateral del terreno, deflexiones laterales, coeficiente de balasto horizontal, método elástico, muelles.

Abstract

The objective of this article is to present the development of the Final Work of the Master in Soil Mechanics and Geotechnical Engineering of CEDEX, which has focused on the analysis of the behaviour of piles against horizontal actions. Initially, the aim of this work was to lay out a complete state of the art so that the reader could get to know the subject completely. Subsequently, an analysis of the regulations was carried out in order to learn about the different existing methodologies for the study of piles under horizontal loads. Finally, we proceeded to solve a real practical case, applying the most important calculation methods in the bibliography and standards, and taking the aim of finding out which methods would enable us to obtain results that are most representative of reality.

Keywords: Lateral loads, p-y curves, soil lateral reaction, lateral deflections, horizontal subgrade modulus of the soil, elastic method, springs.

1. INTRODUCCIÓN

Un pilote en reposo sin ningún tipo de carga lateral tendrá una distribución de presiones horizontales uniforme en su perímetro. Terzaghi (1955) enunció que, en los pilotes perforados, la presión horizontal es similar a la de reposo y en pilotes hincados esta puede ser mayor, como consecuencia de la densificación del terreno en el proceso hincado. Sin embargo, al aplicarle una sollicitación en la dirección perpendicular al eje longitudinal del pilote (desplazamiento, rotación inducida o cargas distribuidas) se desarrolla un aumento de tensiones horizontales en toda su longitud. Este fenómeno se puede observar en la figura 1.1. Dicho incremento de tensión se opone al desplazamiento del pilote como consecuencia de la sollicitación.

Si integramos el bulbo de tensiones, obtenemos la reacción lateral del terreno [F], la cual aporta la resistencia lateral del pilote. Si se representa la evolución de la resistencia lateral del pilote en función de las deformaciones horizontales, se obtienen los gráficos conocidos como curvas p-y. Estas curvas dependen de las características del terreno, del

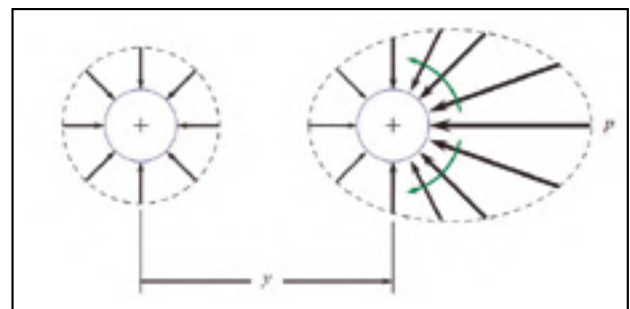


Figura 1.1. Distribución de tensiones antes y después de inducir el desplazamiento "y" (Isenhowe *et al.*, 2016).

diámetro y material del pilote, de la naturaleza de las cargas (estáticas, cíclicas o dinámicas) y de la profundidad analizada. Por lo general, se espera que a mayor profundidad las propiedades del terreno mejoren y las curvas p-y presentan menor desplazamiento y mayor resistencia lateral última. En la figura 1.2 se pueden observar las curvas p-y obtenidas por Reese y Van Impe (2011) en pilotes a escala real.

Las curvas p-y tienen un comportamiento inicialmente lineal y al incrementar las deformaciones el comportamiento se vuelve no lineal. Si se calcula la pendiente inicial, obtenemos el módulo de reacción lateral del terreno "E_{py}", el cual representa la resistencia lateral desarrollada como consecuencia de un desplazamiento unitario del pilote. En la figura 1.3 podemos observar la variación del módulo de reacción lateral en función de las deflexiones del pilote, es decir, movimiento lateral del pilote.

* Autor de contacto: gustavoaugustobenito@gmail.com

¹ Doctorando, Departamento de Ingeniería y Morfología del Terreno, ETSI de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid (UPM).

² Profesor contratado doctor, Departamento de Ingeniería y Morfología del Terreno, ETSI de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid (UPM).

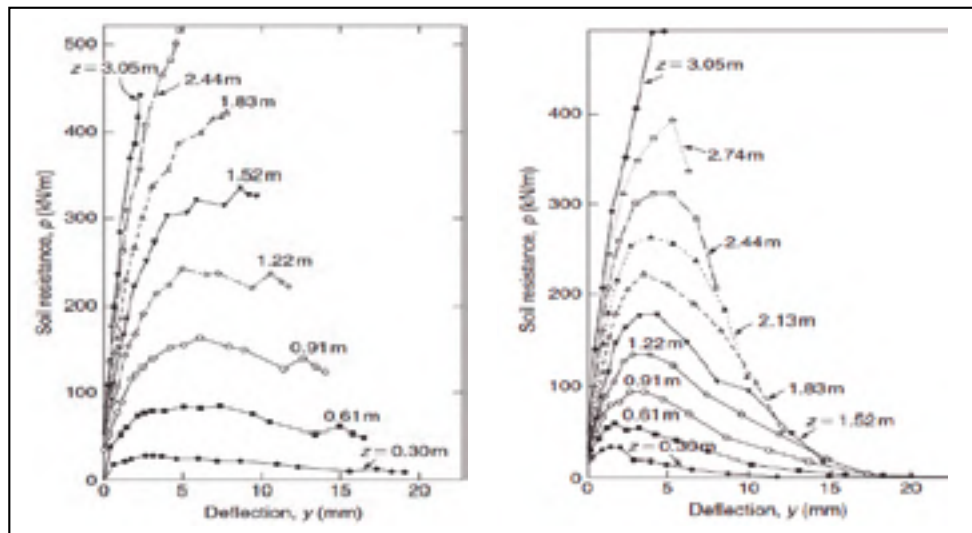


Figura 1.2. A) Curvas p-y desarrolladas en ensayo de carga estática en un pilote de 641 mm. B) Curvas p-y desarrolladas en ensayo de carga cíclica en un pilote de 641 mm (Reese y Van Impe, 2011).

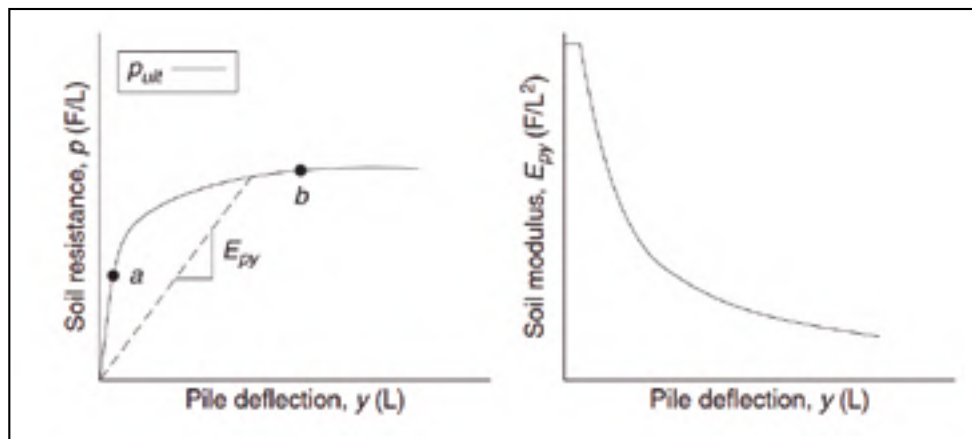


Figura 1.3. Resistencia lateral del terreno “p” en función de las deflexiones “y” (Isenhower *et al.*, 2016).

2. TEORÍAS DESARROLLADAS

2.1. Método del terreno elástico

Hetényi (1946) propuso analizar el terreno como un medio elástico a través del método de la viga elástica de Winkler. En este método se representa al terreno a través de constantes de resorte con comportamiento lineal. Por lo tanto, analizando las curvas p-y, correspondería el tramo inicial de la misma. La rigidez del muelle indica la fuerza necesaria para generar un desplazamiento unitario y tiene unidades [F/L]. El coeficiente de balasto horizontal del terreno [F/L³], indica la presión necesaria para generar una deformación unitaria y se calcula según la Ec. 1.

$$k_h = \frac{p}{y} = \frac{E_{py}}{b} \quad [1]$$

Si el coeficiente de balasto horizontal se multiplica por el diámetro del pilote y por la separación de los muelles, Ec. 2, se obtiene la rigidez del muelle [F/L].

$$k_{muelle} = k_h b s \quad [2]$$

Kmuelle: rigidez del muelle [F/L]

Kbalasto: coeficiente de balasto horizontal [F/L³]

b: diámetro del pilote [L]

s: separación entre muelles [L]

Terzaghi (1955) enunció que, para arcillas sobreconsolidadas muy rígidas, el coeficiente de balasto del terreno es uniforme con la profundidad. Sin embargo, para el caso de las arenas y arcillas normalmente consolidadas, Terzaghi señaló que se puede asumir, con poco error, que el módulo de reacción lateral crece de manera proporcional en la profundidad.

Terzaghi (1955) propuso los siguientes valores del coeficiente de balasto horizontal para las arenas. Define “nh” como el coeficiente de reacción horizontal del terreno [t/cm³], y “A” como un coeficiente que depende de la densidad de las arenas y relaciona el módulo de elasticidad del terreno con la presión efectiva a en la profundidad analizada (tabla 2.1.1).

También, Terzaghi propuso calcular el coeficiente de balasto horizontal en función del diámetro del pilote y el coeficiente de balasto vertical (ks1) con la Ec. 3 (Terzaghi, 1955):

$$k_h = \frac{1}{B} k_{h1} = \frac{1}{1.5 B} k_{s1} \quad [3]$$

Por su parte, la tabla 2.1.2 presenta los valores (k_{s1}) para arcillas en función de su consistencia.

Tabla 2.1.1. Valores de A y n_h para las arenas en $[t/cm^3]$, para un pilote de sección rectangular de ancho 30 cm (Terzaghi, 1955)

Valores propuestos de A y n_h	Densidad Relativa de la Arena		
	Densidad baja	Densidad media	Densidad alta
Rango de valores de A	100 - 300	300 - 1000	1000 - 2000
Valores adoptados de A	200	600	1500
Arena húmeda y seca - valores n_h	7	21	56
Arena sumergida - valores de n_h	4	14	34

Tabla 2.1.2. Valores del coeficiente de balasto vertical $[t/ft^3]$, para una placa de 30 x 30 cm (Terzaghi, 1955)

Consistencia de la arcilla	Rígida	Muy Rígida	Dura
Valores de q_u $[t/ft^2]$	1 - 2	2 - 4	> 4
Rango de valores de K_{s1}	50 - 100	100 - 200	>200
Valores propuestos de K_{s1}	75	150	300

Diferentes autores propusieron otras expresiones empíricas para el cálculo del coeficiente de balasto horizontal:

$$k_h = 1.67 \frac{E_{50}}{B} \quad (\text{Broms, 1964a}) \quad [4]$$

$$k_h = (80 \text{ a } 320) \frac{c_u}{B} \quad (\text{Skempton, 1953}) \quad [5]$$

$$k_h = 67 \frac{c_u}{B} \quad (\text{Davisson, 1970}) \quad [6]$$

$$k_h = 3.3 \frac{E_{pm}}{B} \quad (\text{Chen, 1978}) - \text{Suelo no cohesivos} \quad [7]$$

$$k_h = 1.6 \frac{E_{pm}}{B} \quad (\text{Chen, 1978}) - \text{Suelo cohesivos} \quad [8]$$

2.2. Método de las curvas p-y

El método de las curvas p-y consiste en modelizar el terreno a través de una serie de muelles que presentan comportamiento no lineal. Las curvas p-y representan la evolución de la resistencia lateral del terreno a medida que aumentan las deformaciones. En dichas curvas se pueden identificar tres partes características. Inicialmente, se observa un comportamiento lineal del terreno; luego se pasa a un comportamiento no lineal debido a la plastificación del terreno; y finalmente se llega a una resistencia lateral última. En esta última fase, las deformaciones aumentan sin incremento de resistencia. La forma de este último tramo de la curva depende principalmente del tipo de terreno y de la naturaleza de la carga.

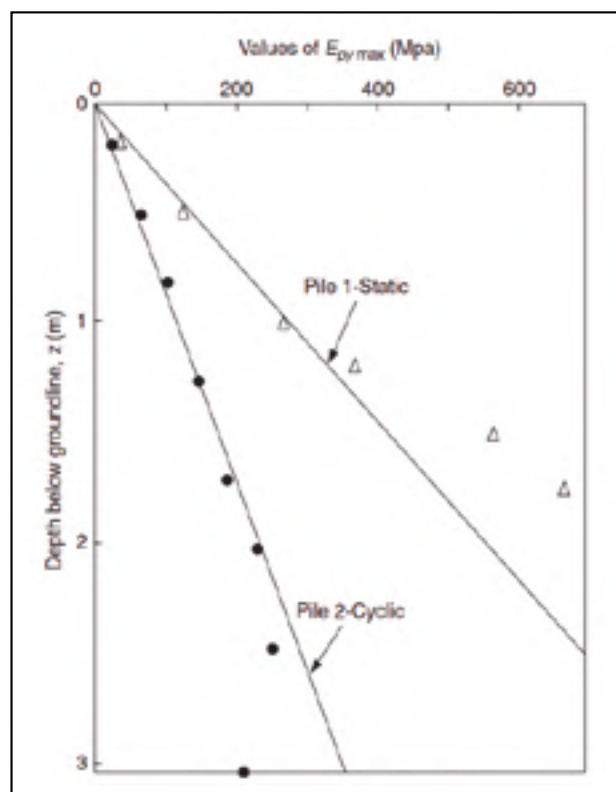
2.2.1. Parámetros de las curvas p-y

La aplicación del método de las curvas p-y implica definir las curvas que representarán adecuadamente el comportamiento del terreno en donde se construirán los pilotes. Esto implica definir adecuadamente los parámetros que definen las curvas p-y.

La pendiente inicial de la curva p-y se denomina módulo de reacción lateral “Epy max”. Skempton, 1951, relacionó el módulo de elasticidad del terreno con el módulo de reacción lateral del terreno. Dicha relación está definida por la constante “ξ”, la cual depende de la rigidez del pilote y del coeficiente de Poisson del terreno. La constante “ξ” varía en profundidad a medida que cambia el perfil litológico del terreno.

En la figura 2.2.1.1 se observa que el módulo de reacción lateral del terreno aumenta considerablemente en profundidad y disminuye si la carga es de naturaleza cíclica.

Otra variable que debe ser definida para obtener las curvas p-y es la resistencia lateral última del terreno. (Hansen, 1961b) propuso una expresión para determinar la resistencia última del terreno para el caso de pilotes rígidos cargados lateralmente. Es un método complejo debido a la cantidad de variables que intervienen: sobrecarga aplicada al terreno, naturaleza del terreno (friccional o cohesivo) y la presencia del nivel freático (figura 2.2.1.2).

**Figura 2.2.1.1.** Valores experimentales de “Epy max” (Reese y Van Impe, 2011).

Hansen (1961b) presentó tres casos para determinar la resistencia última del pilote: reacción lateral última en la zona cercana a la superficie del terreno, a una profundidad intermedia y a grandes profundidades. Para profundidades bajas y moderadas, Hansen (1961b) expone que se desarrolla una cuña de rotura (figura 2.2.1.3).

A grandes profundidades no se puede desarrollar una cuña debido a que el plano de falla o línea de rotura no puede llegar a la superficie. Los planos de rotura que se desarrollan en ese caso son horizontales. Entonces se particularizó el desarrollo que hizo Hansen (1961a), obteniendo una expresión para obtener la resistencia lateral última del terreno a grandes profundidades. En suelos cohesivos, Thompson (1977) propuso expresiones para calcular

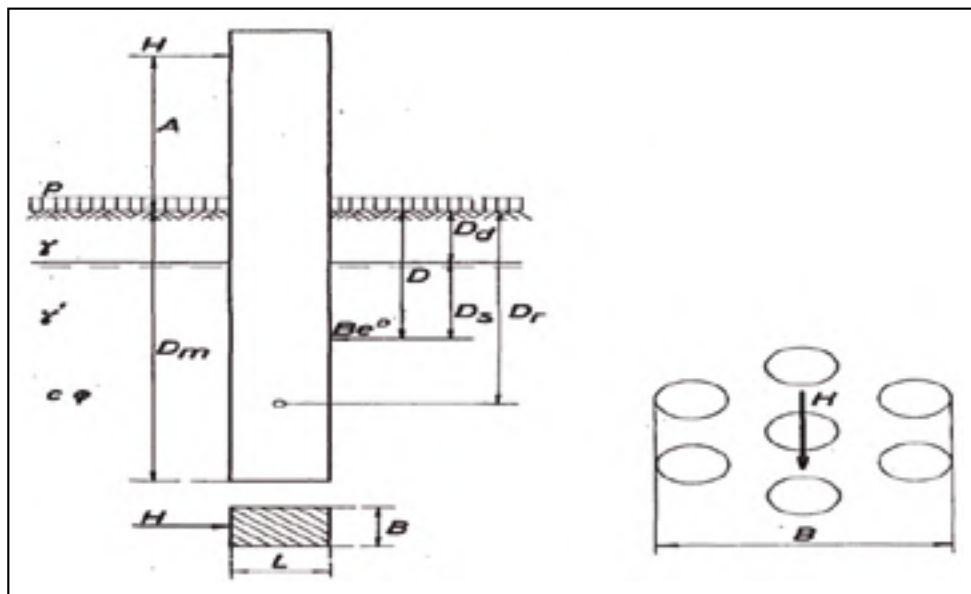


Figura 2.2.1.2. Esquema propuesto para determinar la capacidad de carga lateral última del terreno (Hansen, 1961b).

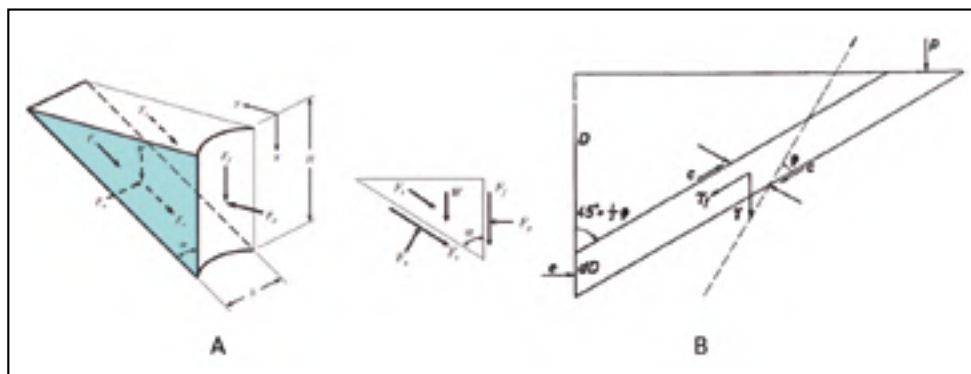


Figura 2.2.1.3. Modelo de Cuña para estimar la resistencia lateral del pilote. A) (Isehower et al., 2016), B) (Hansen, 1961b).

la resistencia última del terreno, basándose en los mismos mecanismos de rotura para el caso del terreno en la superficie y a grandes profundidades. El método se basa en suponer a la arcilla saturada y define a la resistencia lateral última en función de la cohesión no drenada (Isehower et al., 2016). También propone para suelos no cohesivos una expresión en función del coeficiente de empuje en reposo, coeficiente de empuje activo y el ángulo de rozamiento del contacto suelo-pilote.

2.2.2. Construcción de las curvas p-y

Terzaghi enunció dos métodos para definir las curvas p-y. Uno para analizar las arcillas sobreconsolidadas y otro para las arcillas normalmente consolidadas y las arenas. Para arcillas sobreconsolidadas estableció que el módulo de reacción lateral es constante en profundidad. Para arenas y arcillas normalmente consolidadas propuso una variación lineal proporcional a la profundidad analizada. El autor establece que esta simplificación es solo aplicable si se trabaja con un rango de tensiones igual o menor al 50 % de la capacidad portante del terreno.

McClelland y Focht (1958) propusieron un método a través de los resultados obtenidos en un ensayo triaxial representando al terreno en diferentes profundidades. A

través del ensayo triaxial se obtiene una curva de tensión desviadora en función de la deformación específica. Aplicando este método se puede transformar la curva de tensión deformación en una curva p-y con la Ec.9 y Ec.10.

$$p = 5.5 b \Delta \sigma \quad (\text{McClelland y Focht, 1958}) \quad [9]$$

$$y = 0.5 b \epsilon \quad (\text{McClelland y Focht, 1958}) \quad [10]$$

También se puede utilizar el método propuesto por Skempton en 1951, que consiste en realizar el mismo procedimiento ya mencionado aplicando las Ec.11 y Ec.12.

$$p = 4.5 b \Delta \sigma \quad (\text{Skempton, 1951}) \quad [11]$$

$$y = 2 b \epsilon \quad (\text{Skempton, 1951}) \quad [12]$$

Reese y Van Impe, en 2011, enunciaron que la rigidez de las curvas p-y depende del valor de la deformación específica para el 50 % de la tensión última (ϵ_{50}). La determinación del valor de ϵ_{50} es importante para calcular las deflexiones para cargas relativamente bajas. Para tensiones altas, tiene mayor relevancia la resistencia lateral última en la determinación de los momentos flectores desarrollados.

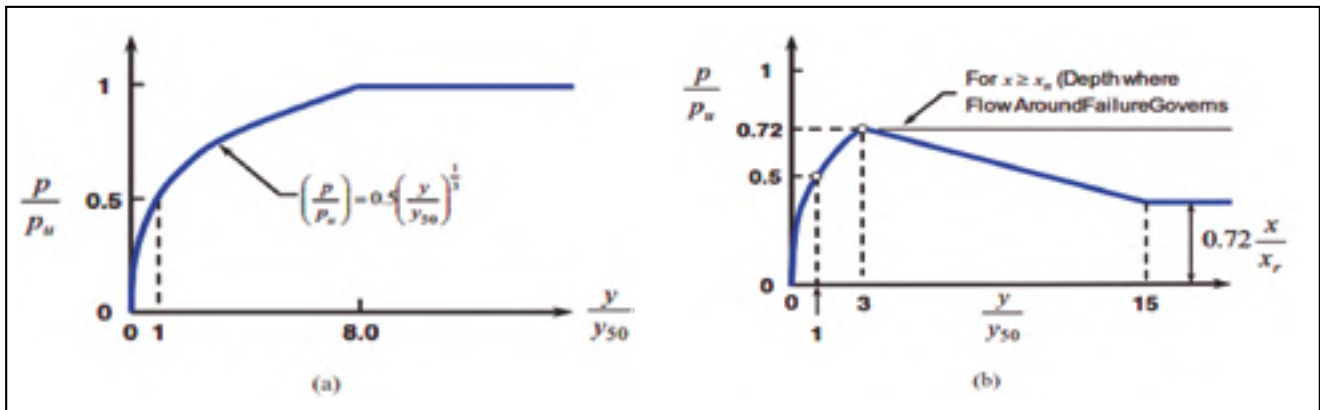


Figura 2.2.2.1. Curva p-y para arcillas blandas con agua libre. A) Carga estática, B) Carga cíclica, Isenhowe et al., 2016.

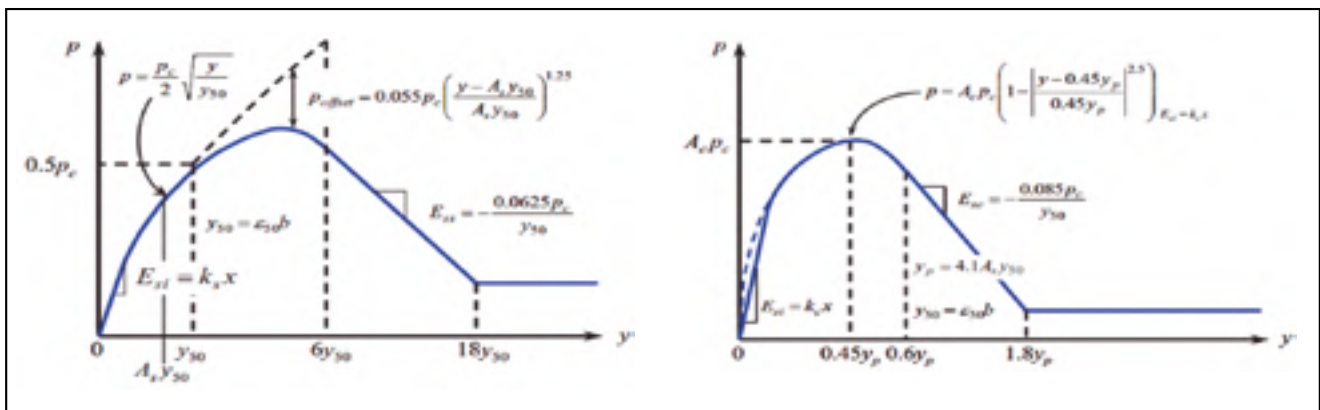


Figura 2.2.2.2. Curva p-y para arcillas duras con agua libre. A) Carga estática, B) Carga cíclica, Isenhowe et al., 2016.

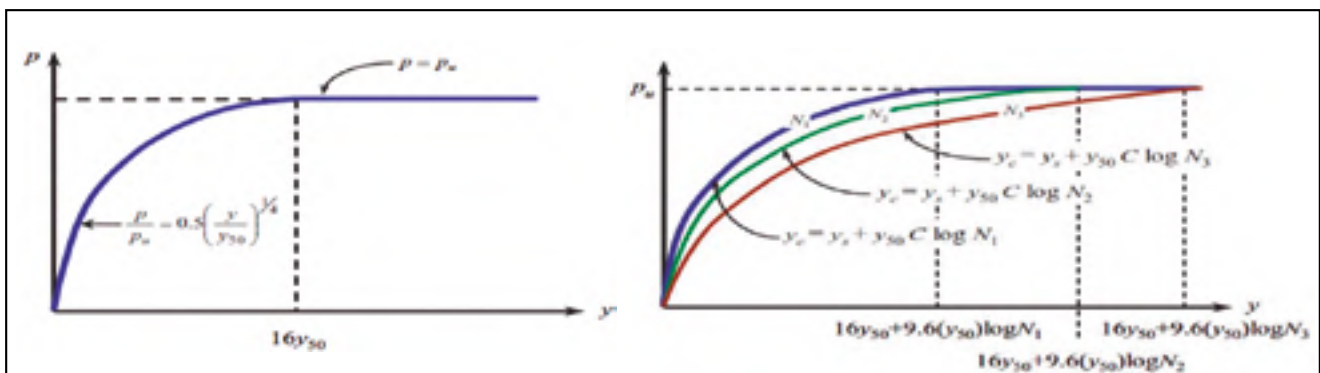


Figura 2.2.2.3. Curva p-y para arcillas duras sin agua libre. A) Carga estática, B) Carga cíclica, Isenhowe et al., 2016.

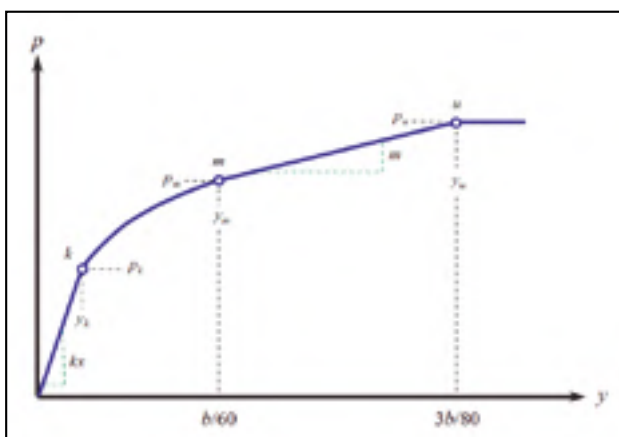


Figura 2.2.2.4. Curva p-y para arenas para cargas estática y dinámicas, Isenhowe et al., 2016.

Isenhowe et al., 2016, presentan varias figuras en las cuales se puede observar la forma típica de las curvas p-y para distintos tipos de terreno y cargas (figuras 2.2.2.1 a 2.2.2.4).

3. ANÁLISIS DE REGLAMENTOS

A continuación, se presentan los reglamentos analizados en la tesina y un breve resumen de los aportes de cada uno de ellos.

- *Guía de Cimentaciones en Obras de Carreteras* – GCOC. Ministerio de Fomento.
- *Código Técnico de la Edificación* – Seguridad Estructural y Cimientos - CTE-SE-C. Ministerio de Vivienda.
- *Recomendaciones Geotécnicas para Obras Marítimas y Portuarias* – ROM 0.5-05. Ministerio de Fomento.

- *Foundation and Earth Structures – Design Manual* – NAVFAC 7.02. Naval Facilities Engineering Command.
- *Design and Construction of Driven Pile Foundations* – Vol. I – FHWA. National Highway Institute.
- *Bridge Design Specifications* (8th ed.) – American Association of State Highway and Transportation Officials - AASHTO.
- American Petroleum Institute – API 2000.
- *Eurocode 7: Geotechnical Design* – Part 1: General Rules – EN 7. European Committee for Standardization.

CTE-SE-C indica que la verificación ante cargas horizontales solo se debería realizar cuando dicha carga supere el 10 % de la carga vertical del pilote. En el caso de realizar pruebas de carga, el reglamento permite disminuir los factores de seguridad hasta un 30 %.

GCOC, 2002, y ROM 0.5, 2005, proponen definir la carga horizontal de rotura a través del método de equilibrio límite. También propone utilizar los ábacos desarrollados por Broms, 1964a y 1964b, para suelos cohesivos y suelos granulares, respectivamente. GCOC, 2002, recomienda despreciar la resistencia lateral del terreno en una profundidad igual a 1.5 diámetros, pero sí se tiene en cuenta el peso que aporta ese terreno a la hora de realizar el cálculo de las presiones verticales.

NAVFAC DM 7.02, 1986, propone un método adimensional para la estimación de las deflexiones y momentos flectores. Los ábacos dependen de las condiciones de borde de la cabeza del pilote y de la rigidez relativa entre el pilote y el terreno. Dependiendo de la rigidez relativa podemos identificar a los pilotes flexibles y a los pilotes rígidos. Timoshenko enunció que si el cociente entre la longitud y la rigidez relativa cumple con $L/T < 4$, el pilote se comporta como rígido o pilote corto. Este criterio puede aplicarse en cualquiera de las normativas analizadas en este documento. Para definir la rigidez relativa, ROM 0.5, 2005, GCOC, 2002, NAVFAC DM 7.02, 1986, API, 2000, FHWA, 2016, Isenhowe *et al.*, 2016, y Terzaghi, 1955, proponen diferentes recomendaciones en función del tipo del suelo. Para

suelos granulares proponen un coeficiente de reacción lateral del terreno en función de la densidad relativa diferenciando si existe, o no, nivel freático. En las figuras 3.1 y 3.2 podemos observar el coeficiente de reacción lateral propuestos por las diferentes normativas para suelos granulares sin y con presencia del nivel freático, respectivamente.

Observando los valores del coeficiente de reacción lateral (n_h) propuestos por los diferentes reglamentos representados en las figuras 3.1 y 3.2 se concluye que GCOC, 2002, ROM 0.5, 2005, y NAVFAC DM 7.02, 1986, tienen valores de similar magnitud. Los reglamentos más conservadores son API, 2000, y FHWA, 2016. Es interesante destacar que GCOC, 2002, ROM 0.5, 2005, y NAVFAC DM 7.02, 1986, están en el orden de las recomendaciones de Terzaghi (1955). También se puede concluir que la presencia del nivel freático disminuye considerablemente el coeficiente de reacción lateral. Por este motivo, debido a su influencia, es fundamental identificar correctamente el nivel freático en los sondeos. NAVFAC DM 7.02, 1986, no propone valores de “ n_h ” para suelos granulares con presencia del nivel freático.

Las diferentes normativas también presentan recomendaciones para suelos cohesivos en función de la resistencia al corte no drenado. En la tabla 3.1 se presentan los valores del coeficiente de reacción lateral en suelos cohesivos en función de la resistencia al corte sin drenaje “ c_u ”.

Se observa que los valores propuestos por GCOC, 2002, ROM 0.5, 2005, y NAVFAC DM 7.02, 1986, están en el rango propuesto por Terzaghi, 1955. Los valores propuestos por FHWA, 2016, tiene unidades $[F/L^3]$. Para poder compararlos con los anteriores $[F/L^2]$, se debe multiplicar por la separación adoptada de los muelles y el diámetro del pilote.

GCOC, 2002, y ROM 0.5, 2005, proponen también el método del pilote equivalente para estudiar los pilotes sometidos a acciones horizontales. Este método consiste en modelizar el pilote como una barra rígida empotrada en el terreno. La longitud de esta barra dependerá de la longitud real del pilote y de la rigidez relativa entre el terreno y el pilote. Esta suposición genera que solo el método sea aplicable para pilotes flexible. Por esta razón GCOC, 2002,

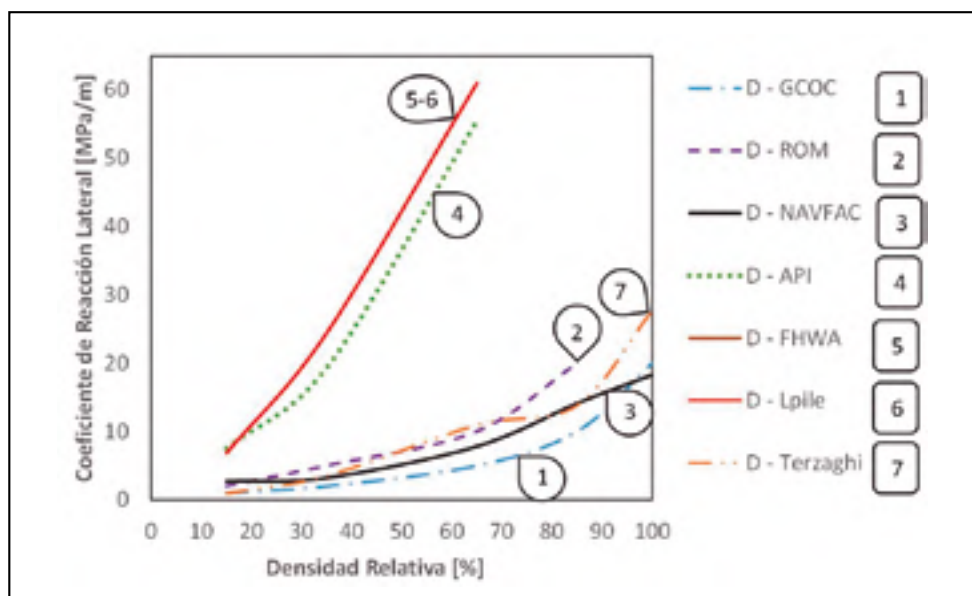


Figura 3.1. Coeficiente de reacción lateral sin presencia de nivel freático.

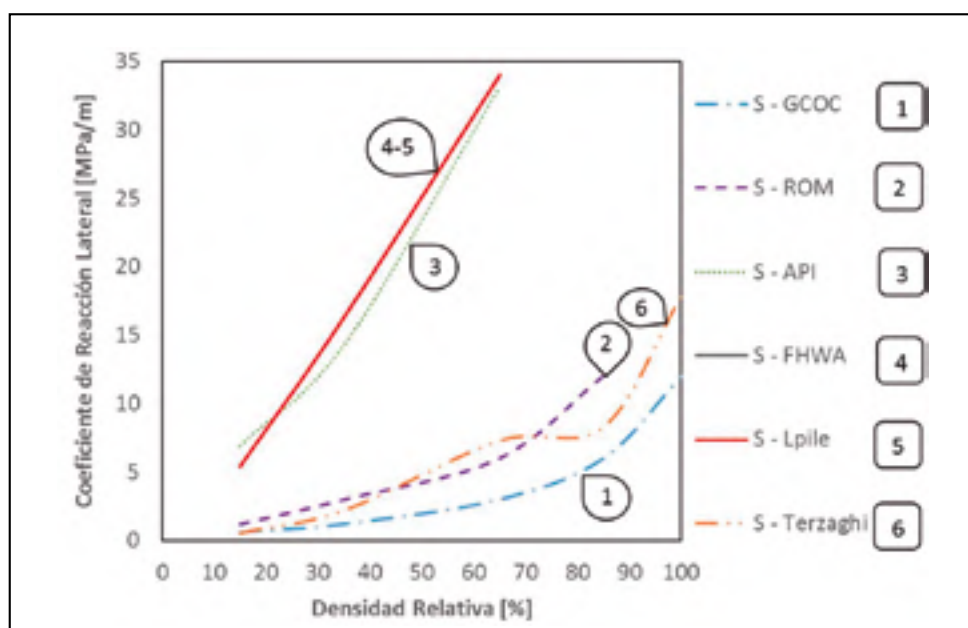


Figura 3.2. Coeficiente de reacción lateral con presencia del nivel freático.

Tabla 3.1. Valores de coeficiente de reacción lateral para suelos cohesivos

Arcilla	Coeficiente de reacción lateral K_h						
	cu [kPa]	FHWA [MPa/m]	LPILE M. [MPa/m]	Terzaghi [MPa]	GCOC [MPa]	ROM [MPa]	NAVFAC [MPa]
Floja	12 – 24	8.2	--	--	1.35	1.8	0.9
Media	24 – 48	27.2	--	--	2.7	3.6	1.8
Rígida	48 – 96	136	135	7.5	5.4	7.2	3.6
Muy Rígida	96 – 192	272	270	15.0	10.8	14.4	7.2
Dura	192 – 384	544	540	30.0	21.6	28.8	14.4

y ROM 0.5, 2005, establecen que se debe cumplir $L/T > 2.5$, distinto a lo propuesto por Timoshenko (1930), $L/T > 4$.

El método de las curvas p-y solo está descrito en API, 2000. Propone un procedimiento para arcillas blandas y otro para arenas. El reglamento distingue entre la resistencia lateral última en función de la profundidad.

Generalmente los pilotes no están trabajando individualmente, sino que se pueden diseñar constituyendo grupos (se suele considerar que existe efecto grupo si la separación entre los ejes de los pilotes es inferior a 3 diámetros). El efecto grupo implica un cambio en el comportamiento de los pilotes. Por lo general, la resistencia total, no es la suma de las resistencias. Este fenómeno depende de la disposición geométrica en planta de los pilotes, separación y diámetro. CTE-SE-C y AASHTO, 2017, proponen métodos para tener en cuenta este efecto grupo.

4. CÁLCULO DE PILOTES

Se ha desarrollado el análisis de un pilote cargado lateralmente con datos reales de un proyecto de un viaducto. Este caso particular ha sido analizado aplicando diferentes métodos de cálculo, las cuales se presentan a continuación.

- Análisis elástico, terreno modelado con muelles elásticos
- Análisis no elástico, método de las curvas p-y
- Análisis con el método del pilote equivalente: GCOC, 2002, y ROM 0.5, 2005

- Ábacos de NAVFAC DM 7.02, 1986, con un terreno homogéneo ponderado
- Modelo numérico, con el programa MIDAS GTS NX

La cimentación de una de las pilas se ha ejecutado con un pilote individual de 1500 mm de diámetro y una longitud de 15 m. El hormigón del pilote tiene una resistencia característica de 25 MPa y un módulo de elasticidad de 23500 MPa. Las cargas fueron aportadas por los ingenieros de estructuras que dimensionaron el viaducto: carga axial igual a 4316 kN y la carga horizontal igual a 692 kN. También determinaron que la resultante de la carga horizontal se aplica a 4 m de altura respecto de la cota de la cabeza del pilote. Como consecuencia, se genera un momento aplicado en la cabeza del pilote igual a 2768 kNm. En la figura 4.1 se puede observar el perfil del terreno, el pilote y las cargas aplicadas.

La caracterización del terreno se realizó a través de 3 sondeos de 10 m de profundidad, 3 sondeos de 25 m de profundidad y 5 ensayos CPT de 10, 11.8, 16.8, 8.4 y 5.4 m de profundidad. El terreno está constituido con una alternancia de arcillas muy sobreconsolidadas, cuya consistencia varía entre rígidas a muy rígidas y arenas con una densidad relativa elevada (arenas muy densas). Debido a la variabilidad estacional del nivel freático, se consideró de manera conservadora que este se encuentra en el nivel de la superficie. A partir de los análisis de los sondeos con un total 42 muestras inalteradas y el análisis de la resistencia

por punta y fuste del ensayo CPT se realizó una caracterización del terreno, definiendo 9 unidades geotécnicas y sus

propiedades físicas. En la tabla 4.1 se presentan las propiedades del terreno.

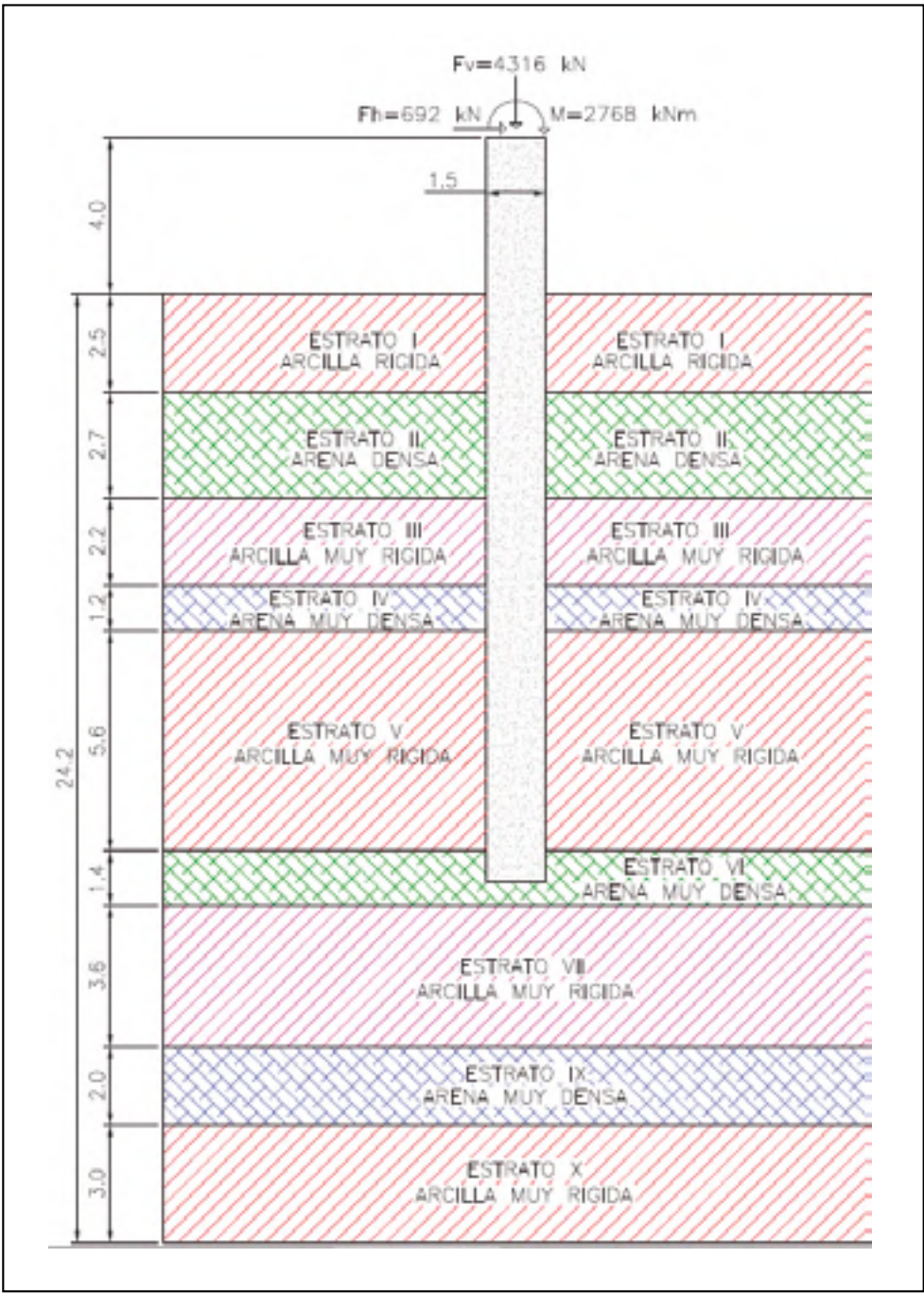


Figura 4.1. Perfil de terreno.

Tabla 4.1. Parámetros del terreno

Parámetros	Símb.	Un.	(I)	(II)	(III)	(IV)	(V)	(VI)	(VII)	(VIII)	(IX)
γ_{aparente}	$\gamma_{\text{ap.}}$	kN/m ³	21	22	22	22	22	22	22	22	22
γ_{seca}	γ_{d}	kN/m ³	18.5	19.6	19.2	19.8	19.9	19.9	20.0	19.8	19.7
Humedad	w	%	11.8	10.9	12.9	10.0	9.8	9.5	9.0	9.8	10.5
Índice de Plasticidad	IP	%	7.9	9.0	10.7	--	9.1	--	9.4	8.3	6.8
Resistencia al Corte No Drenada	cu	kPa	50	--	220	--	250	--	250	--	250
Angulo de Fricción	ϕ'	°	29	38	29	38	29	38	29	38	29
Cohesión Efectiva	c'	kPa	5	--	20	--	20	--	20	--	20
Módulo de Elasticidad Efectivo	E'	MPa	--	54	--	65	--	47	--	50	--
Módulo de Elasticidad No Drenado	Eu	MPa	17.5	--	77	--	87.5	--	87.5	--	87.5
Coefficiente de Poisson	ν'	--	0.2	0.35	0.2	0.35	0.2	0.35	0.2	0.35	0.2

4.1. Análisis elástico, terreno modelado con muelles lineales

El terreno se modeló con muelles separados 1 m. Al considerar un comportamiento elástico del terreno se emplearon muelles lineales. Para el análisis se utilizó el programa LPILE, el cual permite definir diferentes tipologías de terreno, desde un terreno elástico hasta un análisis no lineal a través de las curvas p-y. En la figura 4.1.1 podemos observar al pilote con sus respectivos muelles que modelizan al terreno. También se pueden observar las unidades geotécnicas definidas para caracterizar el perfil del terreno. En este caso unidades I a V, correspondientes a la profundidad del pilote.

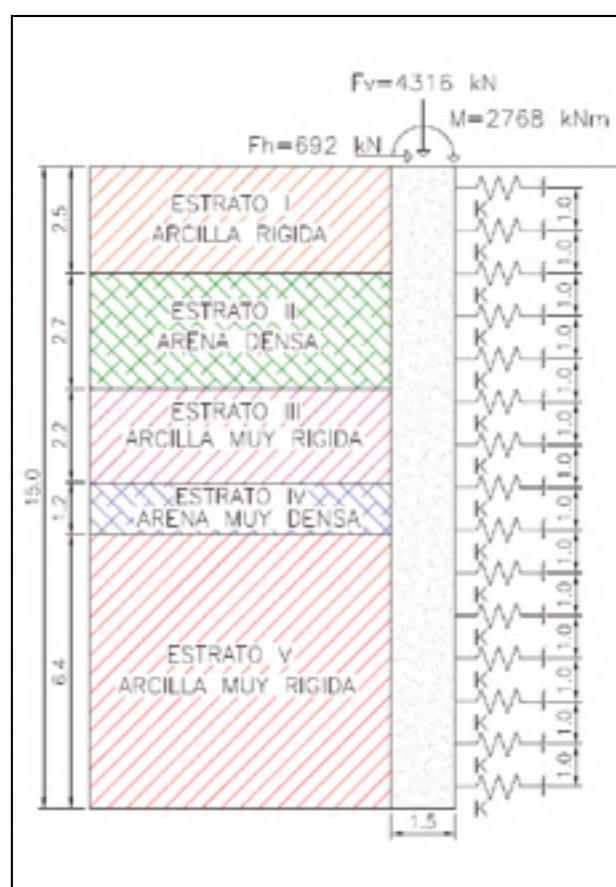
Para determinar los coeficientes de balasto del terreno se procedió a utilizar las recomendaciones de la bibliografía:

- GCOC, 2002
- ROM 0.5, 2005
- NAVFAC DM 7.02, 1986
- FHWA, 2016
- Terzaghi, 1955

Se incluyen las recomendaciones de Terzaghi, 1955, debido a la relevancia que tiene el autor en el tema estudiado. En la tabla 4.1.1 se pueden observar los valores del coeficiente de balasto horizontal utilizados para modelizar el terreno. Los valores propuestos por API, 2000, son similares a los de FHWA, 2016. Por lo tanto, para presentar los resultados solo se hará referencia a FHWA, 2016.

En la figura 4.1.2 se pueden observar las deflexiones obtenidas del análisis realizado y en la figura 4.1.3 los momentos flectores desarrollados a lo largo del pilote.

En la tabla 4.1.2 se resumen los valores máximos de deflexiones y momentos.

**Figura 4.1.1.** Modelo teórico del terreno con muelles elásticos.**Tabla 4.1.1.** Coeficientes de balasto del terreno

Estrato	Terreno	Consistencia / Densidad	Valores de Kh [MPa/m]				
			GCOC	ROM	FHWA	NAVFAC	TERZAGHI
Estrato I	Arcilla	Firme	3.8	5	135	2.5	7.5
Estrato II	Arena	Densa	6	6	34	--	8.3
Estrato III	Arcilla	Muy Firme	16.5	22	540	11	15
Estrato IV	Arena	Muy Densa	6	6	34	--	8.3
Estrato V	Arcilla	Muy Firme	18.8	25	540	12.5	15

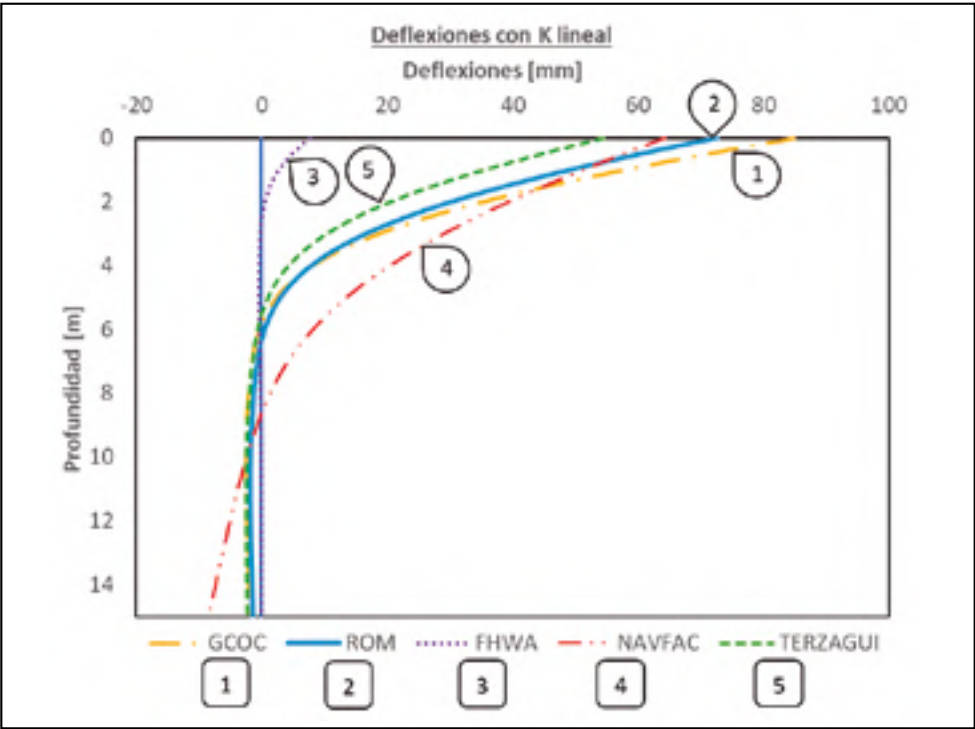


Figura 4.1.2. Deflexiones obtenidas con K lineal.

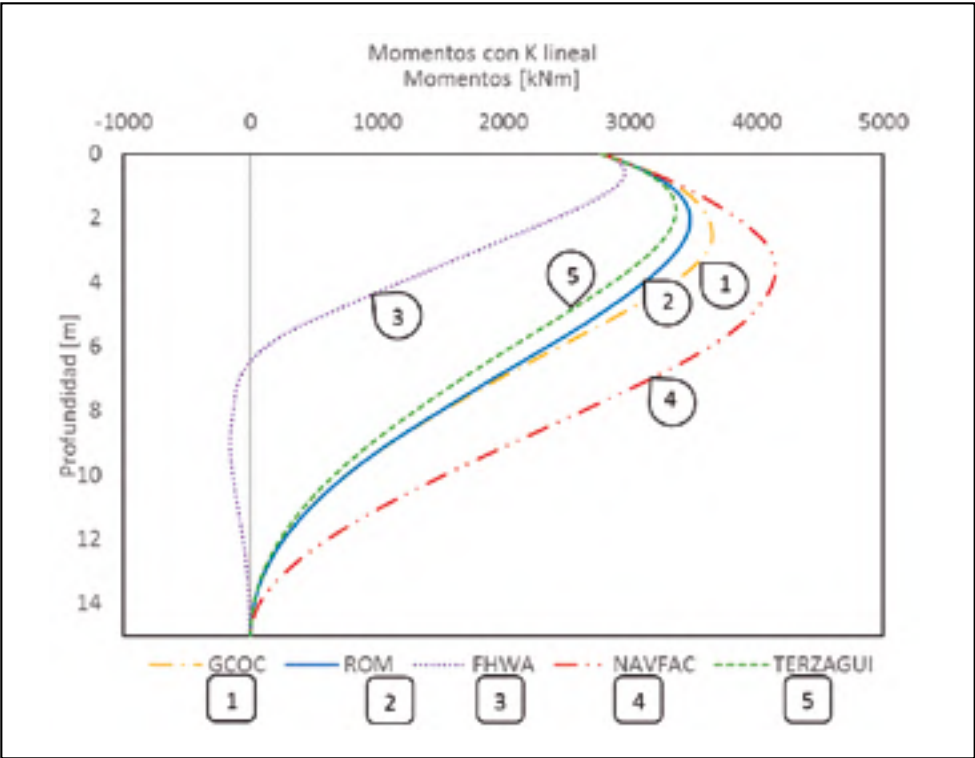


Figura 4.1.3. Momentos obtenidos con K lineal.

Tabla 4.1.2. Resultado del análisis lateral del pilote con K lineal

Resultados	GCOC	ROM	FHWA	NAVFAC	TERZAGHI
Y_{max} [mm]	80	73	8.0	64	54
M_{max} [kNm]	3650	3478	2959	4150	3365

Y_{max} [mm] : máxima deflexión del pilote

M_{max} : momento flector máximo del pilote

4.2. Análisis del pilote con curvas p-y

El método de las curvas p-y es un análisis no lineal, por lo tanto, los muelles tendrán un comportamiento no lineal. Para el cálculo de las curvas p-y se utilizó el programa LPILE, el cual modeliza el terreno con muelles y lo resuelve con el método de las diferencias finitas. Este programa tiene la opción de crear las curvas p-y, permitiendo emplear varios modelos teóricos para calcular diferentes tipos de curvas en función del tipo de terreno. Para la construcción de las curvas p-y se necesitan parámetros que se obtuvieron de la campaña geotécnica. En este caso en particular, se emplearon el modelo de las arenas de Reese y el de las arcillas rígidas sin la presencia de agua libre. El desarrollo de estos modelos se puede estudiar en profundidad en Reese y Van Impe (2011).

En la tabla 4.2.1 se presentan los datos utilizados para la construcción de las curvas p-y de las arcillas, y en la tabla 4.2.2 los datos para las arenas.

Los valores propuestos de ξ_{50} se obtienen del ensayo triaxial: es la deformación específica correspondiente al 50 % de la tensión de rotura. Este valor no se pudo obtener de los

ensayos disponibles. Por lo tanto, se usaron las recomendaciones de Isenhowe *et al.*, 2016.

Para el cálculo de las curvas p-y de las arenas de Reese, se necesita conocer el peso específico efectivo, el ángulo de rozamiento y el coeficiente de balasto horizontal. El coeficiente se obtuvo a partir de las recomendaciones de GCOC, 2002, ROM 0.5, 2005, Terzaghi, 1955, NAVFAC DM 7.02, 1986, y FHWA, 2016. Por lo tanto, obtendremos diferentes resultados de deflexiones en función del coeficiente balasto horizontal utilizado en cada cálculo.

En el programa LPILE también se pueden introducir las curvas p-y por puntos. Las mismas se pueden construir a través de las recomendaciones de la bibliografía o a través de ensayos a escala real de pilotes. API, 2000, propone un método para calcularlas. Sin embargo, el desarrollo de estas curvas no está presente en este artículo debido a su extensión, el mismo puede leerse detalladamente en la tesis desarrollada.

En la figura 4.2.1 se pueden observar las deflexiones obtenidas y en la figura 4.2.2, los momentos flectores del pilote resultantes con el método de las curvas p-y.

Tabla 4.2.1. Datos curvas p-y para arcillas

Parámetros		Profundidad		Espesor "t"	Densidad Efectiva γ'	Resistencia al corte no drenado c_u	ξ_{50}
Symbol		Desde	Hasta				
Unidad Geotécnica		[m]	[m]	[m]	kN/m ³	kPa	--
(I)	Rígida	0	2.5	2.5	11	50	0.007
(II)	Muy Densa	2.5	5.2	2.7	--	--	--
(III)	Muy Rígida	5.2	7.4	2.2	12	220	0.004
(IV)	Muy Densa	7.4	8.6	1.2	--	--	--
(V)	Muy Rígida	8.6	15	6.4	12	250	0.004

Tabla 4.2.2. Datos curvas p-y para arenas

U.G.	Profundidad		Esp. "t"	Densidad Efectiva γ'	Ángulo de Fricción ϕ	Coeficiente de Balasto Horizontal Kh				
	Desde	Hasta				GCOC	ROM	FHWA	NAVFAC	TERZAGHI
	[m]	[m]								
(I)	0	2.5	2.5	--	--	--	--	--	--	--
(II)	2.5	5.2	2.7	12	38	6	6	34	6	8.3
(III)	5.2	7.4	2.2	--	--	--	--	--	--	--
(IV)	7.4	8.6	1.2	12	38	6	6	34	6	8.3
(V)	8.6	15	6.4	--	--	--	--	--	--	--

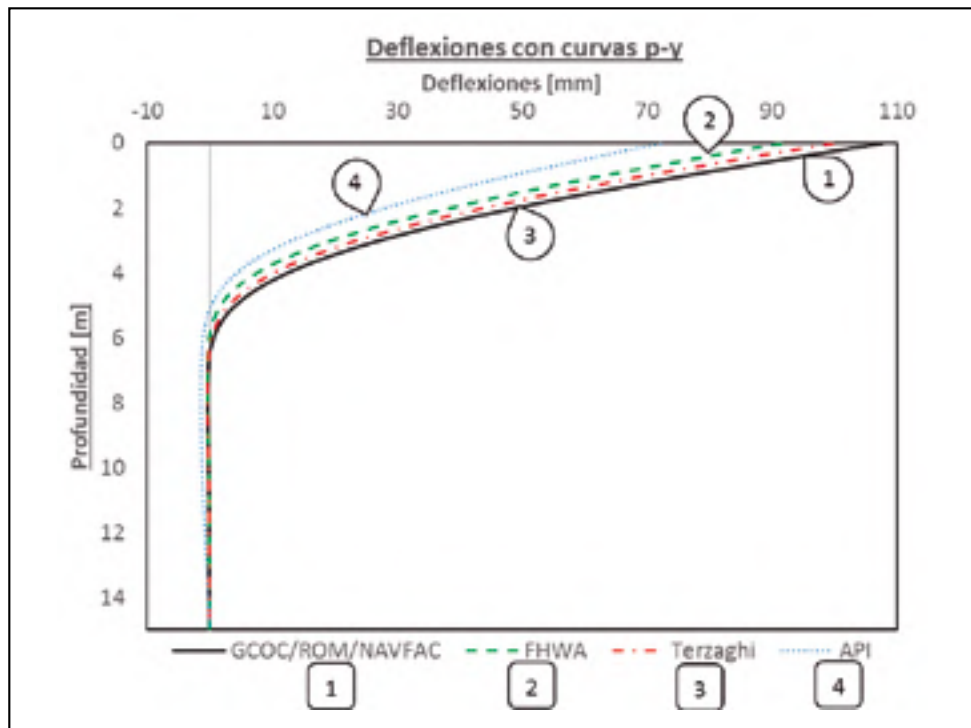


Figura 4.2.1. Deflexiones obtenidas con curvas p-y.

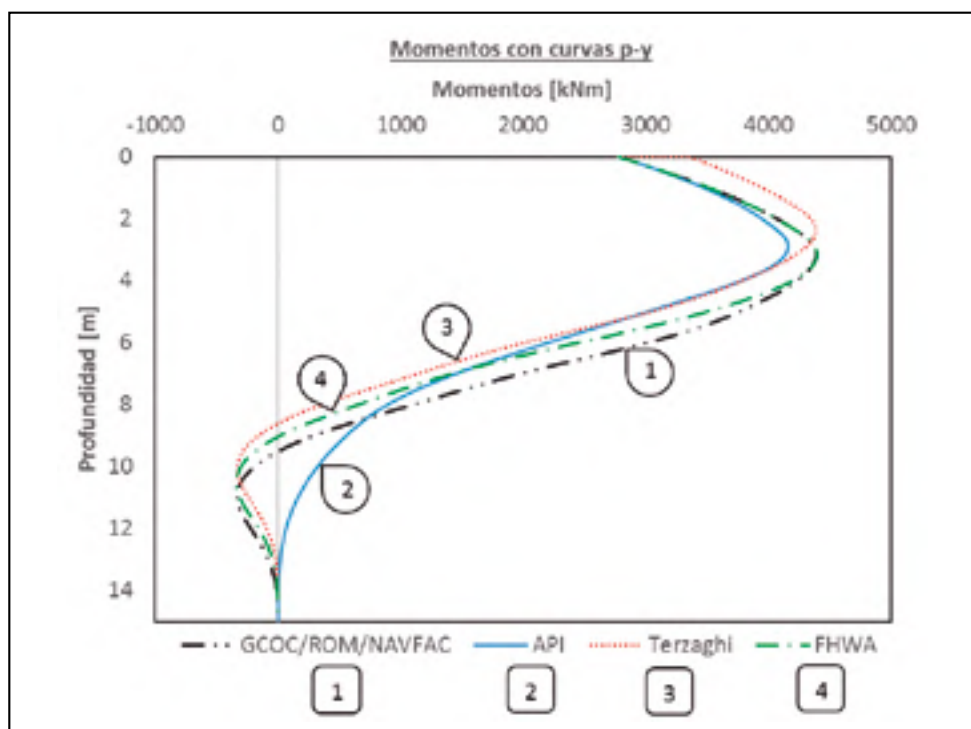


Figura 4.2.2. Momentos obtenidos con curvas p-y.

4.3. Método del pilote equivalente

En este apartado se presenta el método de cálculo del pilote equivalente, el cual fue mencionado en el capítulo 3 de este artículo. Este método está propuesto en ROM 0.5, 2005, y GCOC, 2002. Solo es aplicable si se cumple la siguiente relación, $L/T > 2.5$. Es decir, si el pilote se comporta como flexible. Otro condicionante del método es el terreno, el cual debe ser homogéneo. Debido a que en este caso real no se cumple la condición de terreno homogéneo,

vamos a realizar una ponderación para obtener un terreno homogéneo equivalente. El procedimiento consiste en calcular la rigidez relativa de cada estrato y luego ponderar en función de su espesor. En la tabla 4.3.1 se pueden observar los resultados obtenidos.

En este método se deben determinar la longitud equivalente y la rigidez de los muelles horizontal y rotacional, ubicados en la punta del pilote. Este último, limitará las rotaciones simulando un empotramiento parcial en la punta del pilote. Los pilotes equivalentes se pueden

observar en la figura 4.3.1. Finalmente, el pilote se modela con una restricción de movimientos verticales, muelles horizontales y rotacionales. Para el cálculo se utilizó el programa educacional FTOOLS, en la figura 4.3.1 se presentan los pilotes modelados con las cargas obtenidas, su longitud equivalente, los muelles horizontales y rotacionales.

La figura 4.3.2 presenta las deformaciones obtenidas con el programa FTOOLS. Se observa la diferencia de comportamiento entre los pilotes con relación $L/T < 2.5$ y el

pilote con $L/T > 2.5$. Los pilotes que se comportan como rígidos, presentan deflexiones, pero también una traslación horizontal. En los pilotes con relación $L/T > 2.5$, el cual se comporta como flexible evidenciando un empotramiento en su parte inferior. En la figura 4.3.3 se pueden observar las deformaciones obtenidas.

El método del pilote equivalente también permite calcular el momento flector máximo. En la figura 4.3.4 podemos observar los momentos flectores obtenidos con el método del pilote equivalente.

Tabla 4.3.1. Rigidez relativa ponderada

Terreno	Espesor "t"		Valores de Kh [MPa/m]			
	[m]	GCOC	ROM	FHWA	NAVFAC	TERZAGHI
Estrato I	2.5	3.8	5.0	135.0	2.5	7.5
Estrato II	2.7	6.0	6.0	34.0	6.0	8.3
Estrato III	2.2	16.5	22.0	540.0	11.0	15.0
Estrato IV	1.2	6.0	6.0	34.0	6.0	8.3
Estrato V	5.6	18.8	25.0	540.0	12.5	15.0

Terreno	Espesor "t"		Valores de T [m]			
	[m]	GCOC	ROM	FHWA	NAVFAC	TERZAGHI
Estrato I	2.5	7.6	7.2	3.7	8.2	6.6
Estrato II	2.7	6.9	6.9	4.9	6.9	6.5
Estrato III	2.2	5.6	5.3	2.8	6.1	5.7
Estrato IV	1.2	6.9	6.9	4.9	6.9	6.5
Estrato V	5.6	5.5	5.2	2.8	6.0	5.7
Tpond. [m]		6.3	6.0	3.5	6.6	6.1
L/T		2.4	2.5	4.3	2.3	2.5
Leq [m]		6.1	5.8	3.1	6.5	5.9
Kh [MN/m]		361	417	3070	290	400
Kθ [MNm]		7412	7900	18419	6739	7756

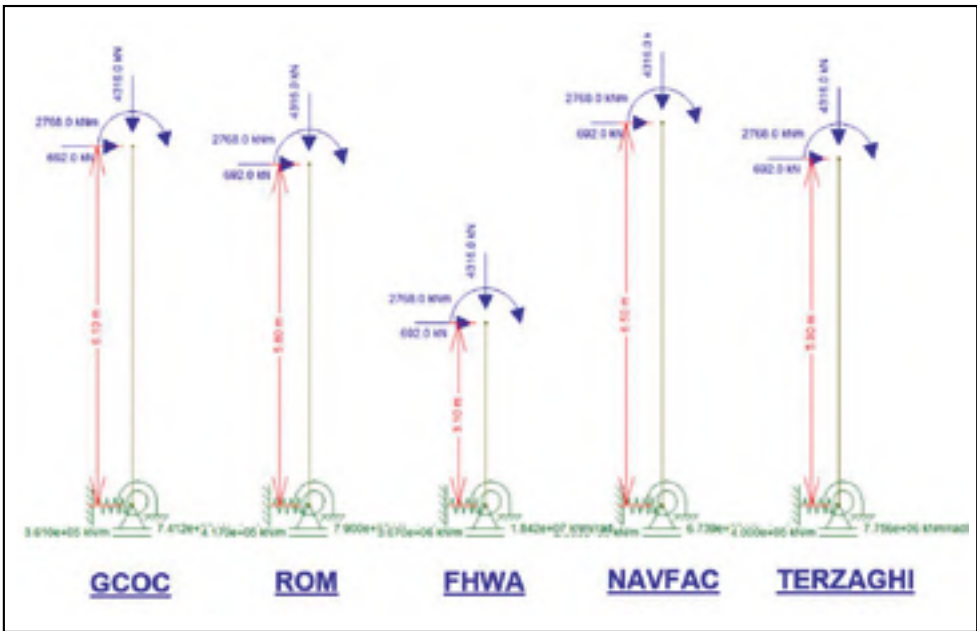


Figura 4.3.1. Modelo de cálculo del pilote equivalente en el FTOOLS.

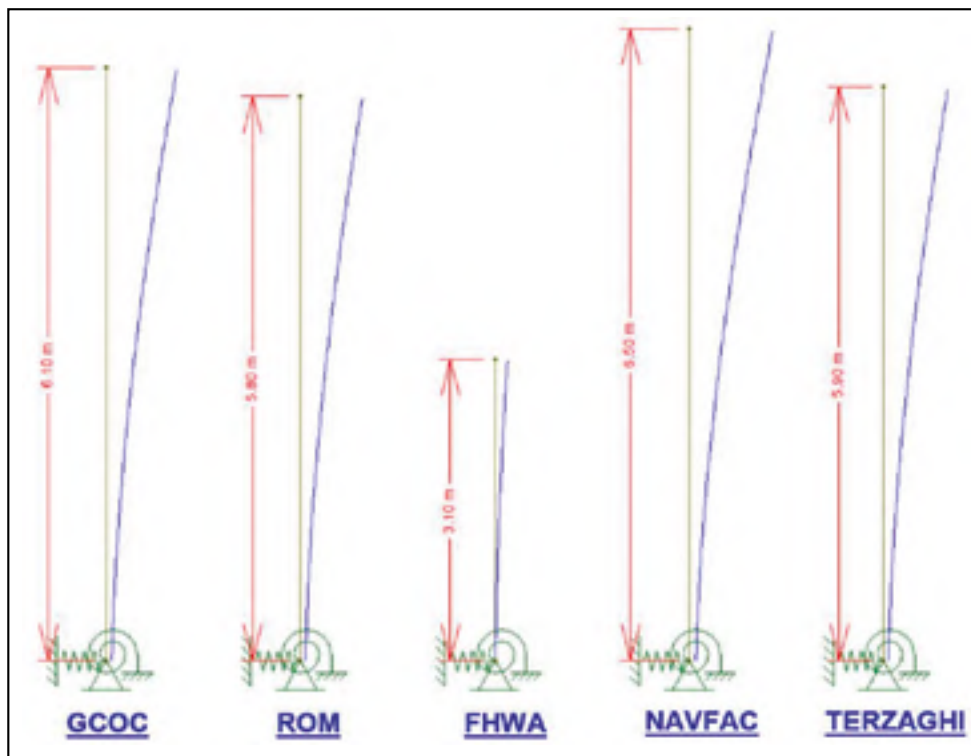


Figura 4.3.2. Deformaciones obtenidas en el FTOOLS.

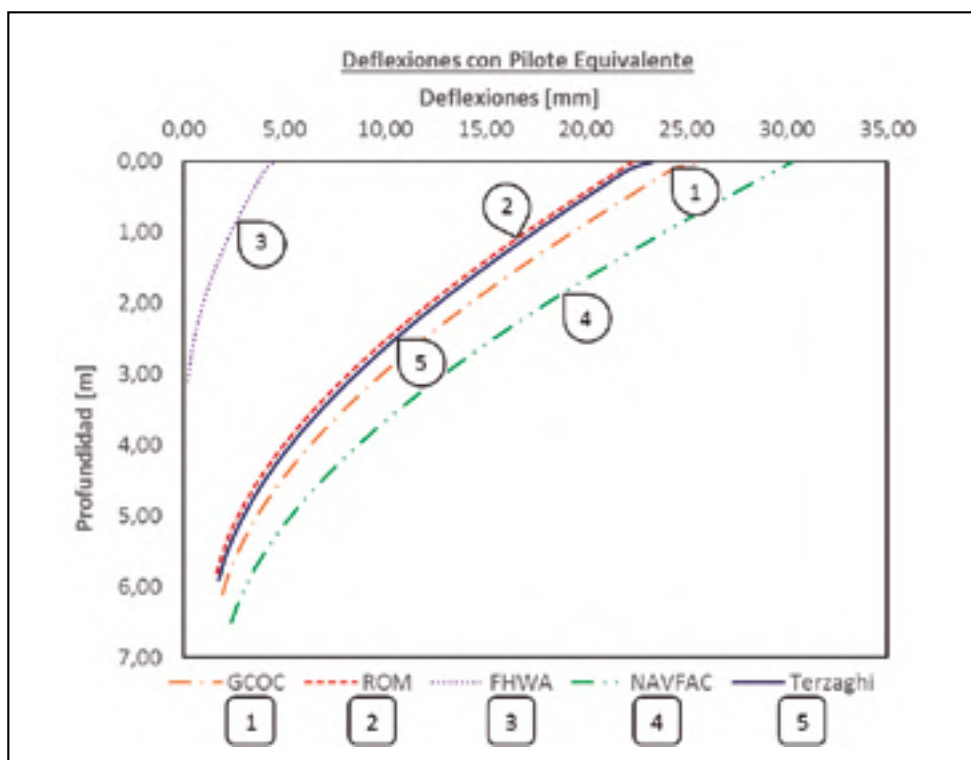


Figura 4.3.3. Deflexiones – método de los pilotes equivalentes.

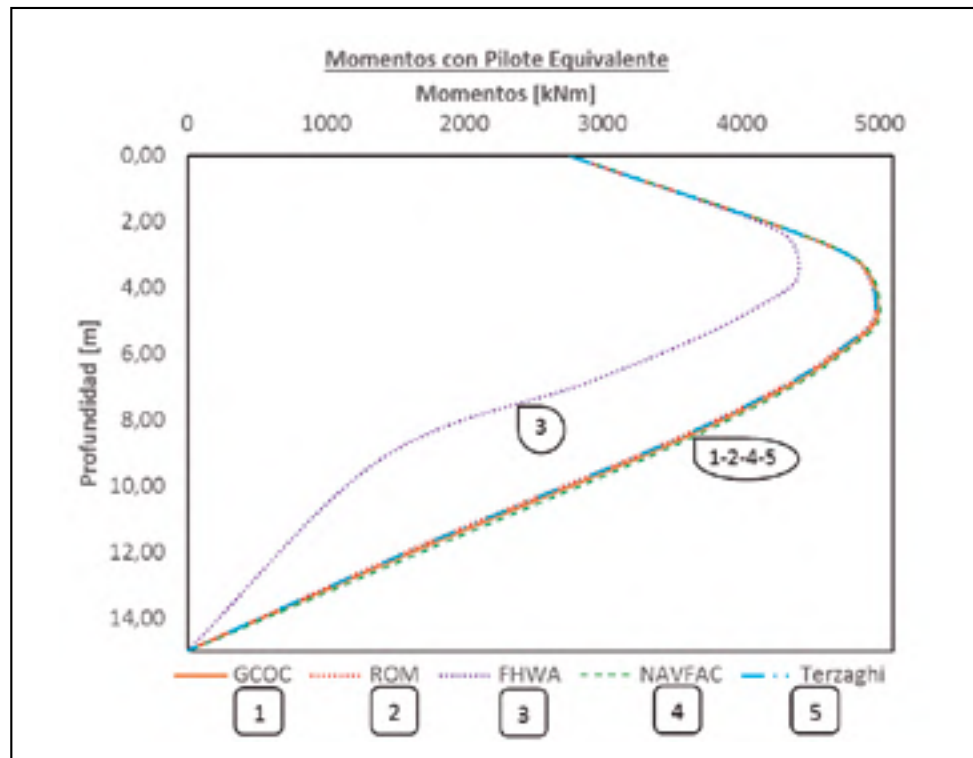


Figura 4.3.4. Momentos – método de los pilotes equivalentes.

4.4. Método de la NAVFAC DM 7.02

En este apartado vamos a desarrollar el método propuesto por NAVFAC DM 7.02, 1986. El método solo es aplicable si el terreno es homogéneo. Se procederá a realizar una ponderación del terreno, con la misma metodología que se aplicó en el método del pilote equivalente. En la tabla 4.3.1 se presentan los resultados obtenidos de rigidez relativa ponderada.

Para resolver este cálculo vamos a utilizar los ábacos de NAVFAC DM 7.02, 1986, de la figura 4.4.1. Se puede observar que las curvas fueron propuestas para relaciones de L/T igual a 2, 3 y de 4 hasta 10. Si observamos la tabla

4.3.1., los valores de la relación L/T varían entre 2.3, 2.4, 2.5 y un solo valor igual 4.3. Por lo tanto, el cálculo con este método para este caso en concreto con las curvas con la relación L/T igual a 2, 3 y 4.

Las planillas de cálculo de deflexiones y momentos flectores son muy extensas para ser presentadas en este artículo. Por tanto, se adjuntan directamente los resultados obtenidos. En caso de que sea de interés la planilla de cálculo se puede consultar a la tesina realizada. En la figura 4.4.2 podemos observar las deflexiones obtenidas con el método propuesto por NAVFAC DM 7.02, 1986, y en la figura 4.4.3 los momentos flectores.

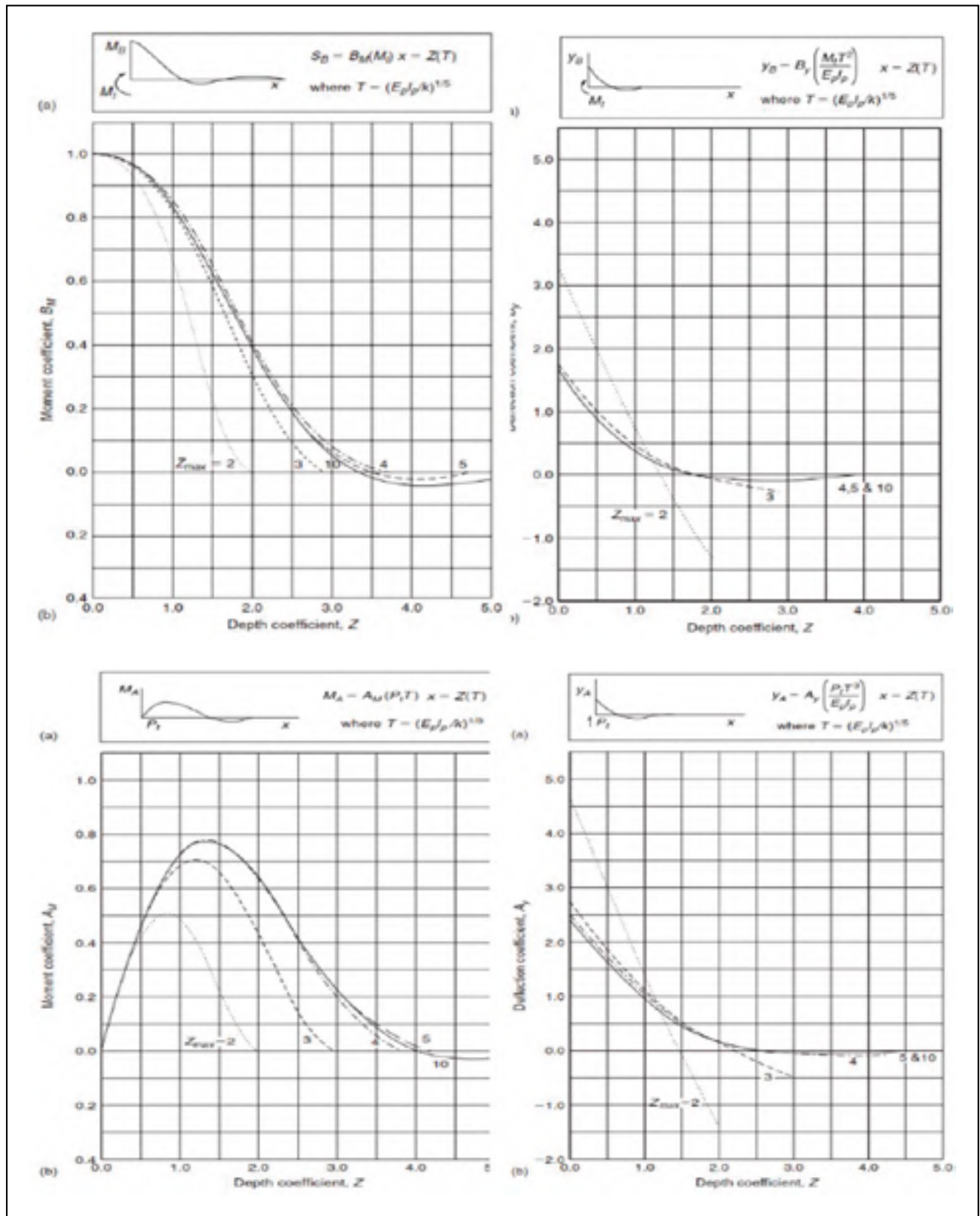


Figura 4.4.1. Ábacos de NAVFAC DM 7.02, 1986.

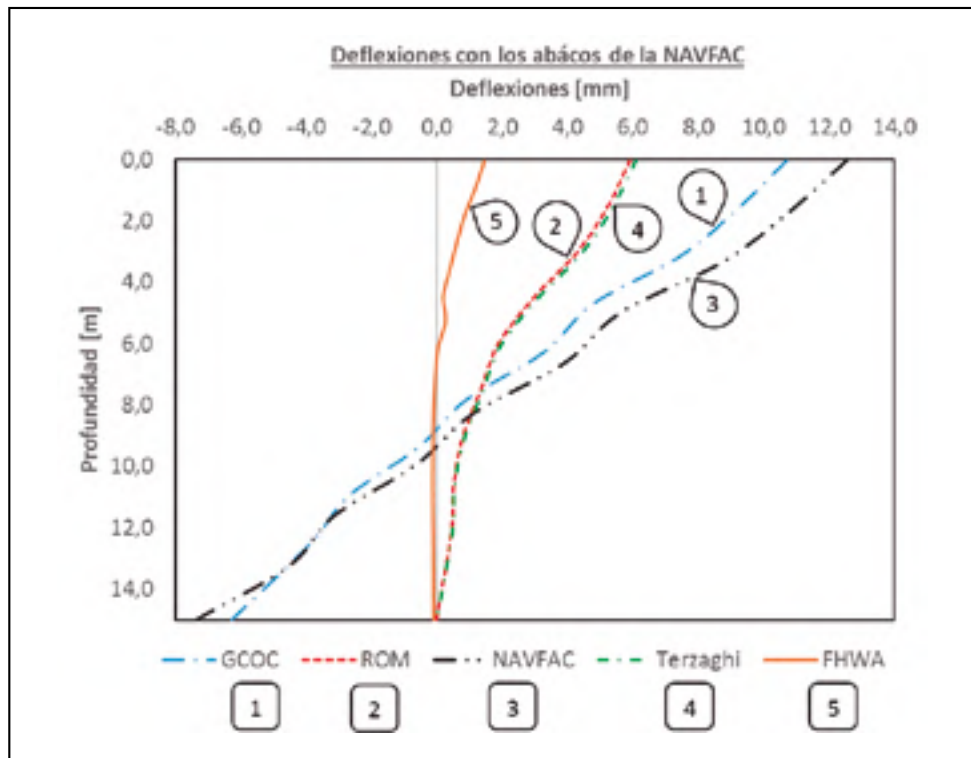


Figura 4.4.2. Deflexiones según el método de NAVFAC DM 7.02, 1986.

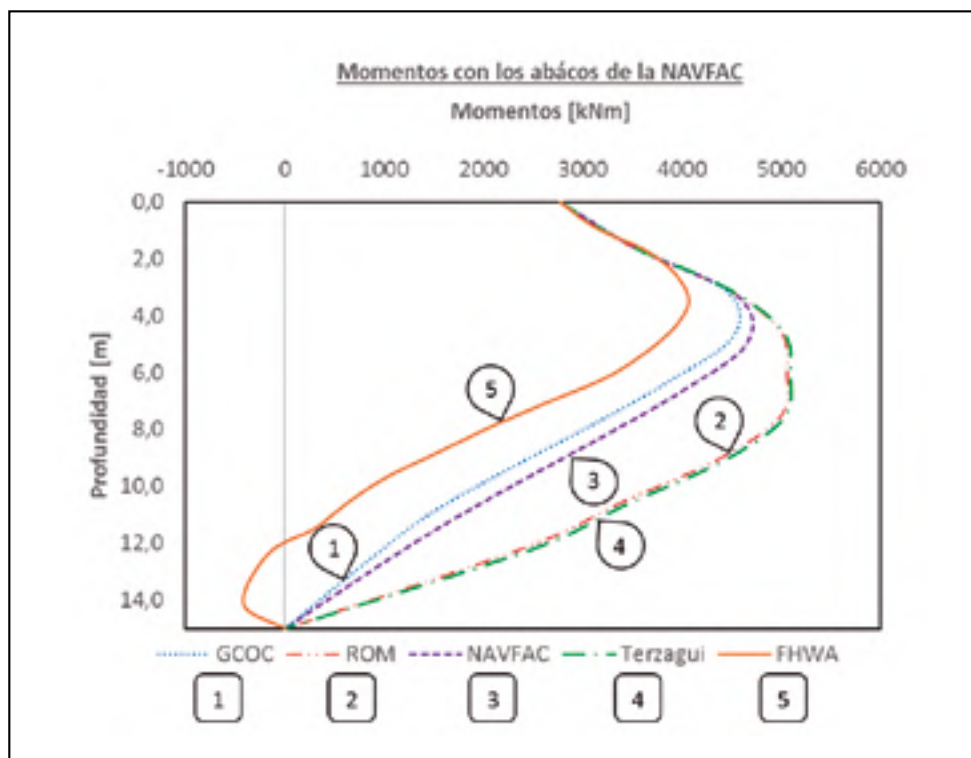


Figura 4.4.3. Momentos flectores según el método de NAVFAC DM 7.02, 1986.

4.5. Modelo numérico

En este apartado se describe el análisis desarrollado con un modelo numérico. Se utilizó el programa de elementos finitos MIDAS GTS NX. El objetivo es analizar los resultados obtenidos y compararlos con los métodos anteriormente desarrollados.

Se debe definir correctamente las dimensiones del modelo. La profundidad está definida por la profundidad del reconocimiento geotécnico, 25 m. El ancho del modelo debe estar apropiadamente definido para que las condiciones de borde no afecten el comportamiento del pilote ante cargas horizontales. Yegian y Wright (1973) proponen que un ancho razonable para modelar es igual a 8 veces el diámetro (medido desde el eje del pilote), por lo tanto, deberían ser 12 m. Se adoptó un ancho total igual a 30 m. Con estas dimensiones no se producen efectos de borde.

¿Con qué criterio se debe realizar la densificación de mallado? El ingeniero proyectista podría tomar el siguiente criterio. Debería ir probando diferentes tamaños de elemento e ir observando cómo van modificándose las deflexiones. Si esa variación es inferior 10 % podríamos decir que estamos ante una densificación razonable y el aumento del mallado no implicaría grandes cambios en los resultados.

Una vez definida la malla es necesario definir correctamente las condiciones de contorno del modelo. En los bordes laterales, el terreno debe tener restringido su desplazamiento horizontal, permitiendo sólo las traslaciones verticales. Se introduce un apoyo móvil que restringe los desplazamientos horizontales y libera los desplazamientos verticales. Para el borde inferior, el terreno no debería influir en las deformaciones del pilote y tampoco se deberían producir asentamientos. Por lo tanto, se introducen apoyos fijos, los cuales restringen los desplazamientos horizontales y verticales.

El análisis de las deflexiones se realizará cambiando tres variables en el modelo:

- Modelizando dos formas distintas el pilote: como elemento viga (elemento barra) y con elementos finitos.

- Variando el tamaño de los elementos finitos. Es interesante observar de qué manera afectan los resultados una mayor o menor densificación de los elementos.

- Variando el tipo de elemento. MIDAS GTS NX permite modelar con tres tipos de elementos; triangulares, cuadrangulares y mixtos. El objetivo es analizar de qué manera afecta el tipo de elemento a los resultados.

Primero, se procedió a definir las propiedades del terreno, para ello se utilizaron los datos del proyecto que se encuentran en la tabla 4.1. Es importante definir correctamente los parámetros de los materiales. En el modelo se introduce el índice de poros, peso específico aparente, ángulo de rozamiento, su cohesión, módulo de elasticidad y el coeficiente de Poisson. Se debe definir si el análisis será drenado o no drenado. Debido a que las cargas aplicadas son rápidas, se puede considerar que no hay disipación de la presión intersticial en los suelos impermeables. Por lo tanto, se definió a las arcillas un comportamiento no drenado y a las arenas un comportamiento drenado.

A continuación, se presentan los diferentes modelos numéricos realizados:

1. Modelado el pilote como elemento viga
 - 1.1. Modelado del terreno con elemento triangular
 - 1.1.1. Dimensiones de todos los elementos aproximadamente igual a 1.5 m.
 - 1.1.2. Dimensiones variables de los elementos, desde 1.5 m a 0.5 m.
 - 1.1.3. Dimensiones de todos los elementos, aproximadamente igual a 0.5 m.
 - 1.2. Modelado del terreno con elemento rectangular
 - 1.2.1. Dimensiones de todos los elementos aproximadamente igual a 1.5 m.
 - 1.2.2. Dimensiones variables de los elementos, desde 1.5 m a 0.5 m.
 - 1.2.3. Dimensiones de todos los elementos, aproximadamente igual a 0.5 m.
 - 1.3. Modelado del terreno con elemento híbrido (rectangular y triangular)
 - 1.3.1. Dimensiones de todos los elementos aproximadamente igual a 1.5 m.
 - 1.3.2. Dimensiones variables de los elementos, desde 1.5 m a 0.5 m.
 - 1.3.3. Dimensiones de todos los elementos, aproximadamente igual a 0.5 m.
2. Modelado el pilote modelado como elemento finito
 - 2.1. Modelado del terreno con elemento triangular
 - 2.1.1. Dimensiones de todos los elementos aproximadamente igual a 1.5 m.
 - 2.1.2. Dimensiones variables de los elementos, desde 1.5 m a 0.5 m.
 - 2.1.3. Dimensiones de todos los elementos, aproximadamente igual a 0.5 m.
 - 2.2. Modelado del terreno con elemento rectangular
 - 2.2.1. Dimensiones de todos los elementos aproximadamente igual a 1.5 m.
 - 2.2.2. Dimensiones variables de los elementos, desde 1.5 m a 0.5 m.
 - 2.2.3. Dimensiones de todos los elementos, aproximadamente igual a 0.5 m.
 - 2.3. Modelado del terreno con elemento híbrido (rectangular y triangular)
 - 2.3.1. Dimensiones de todos los elementos aproximadamente igual a 1.5 m.
 - 2.3.2. Dimensiones variables de los elementos, desde 1.5 m a 0.5 m.
 - 2.3.3. Dimensiones de todos los elementos, aproximadamente igual a 0.5 m.

En total se realizaron 18 modelos de elementos finitos. A continuación, se comparan los resultados de las deflexiones en función del tipo de malla, del tamaño del elemento y de la forma de modelizar el pilote (elemento viga o elementos finitos). En la figura 4.5.1 se pueden observar dos modelos numéricos de los 18 desarrollados: en el "A" el pilote está modelado como elemento viga y en el "B" el pilote está modelado con elementos finitos. La figura 4.5.2 se presenta la deformación obtenida con el programa de elementos finitos para un caso concreto.

En las figuras 4.5.3, 4.5.4 y 4.5.5 podemos observar las deflexiones obtenidas con los 18 casos realizados.

En la tabla 4.5.1 se presentan las deflexiones máximas obtenidas con los 18 modelos numéricos diferenciando si

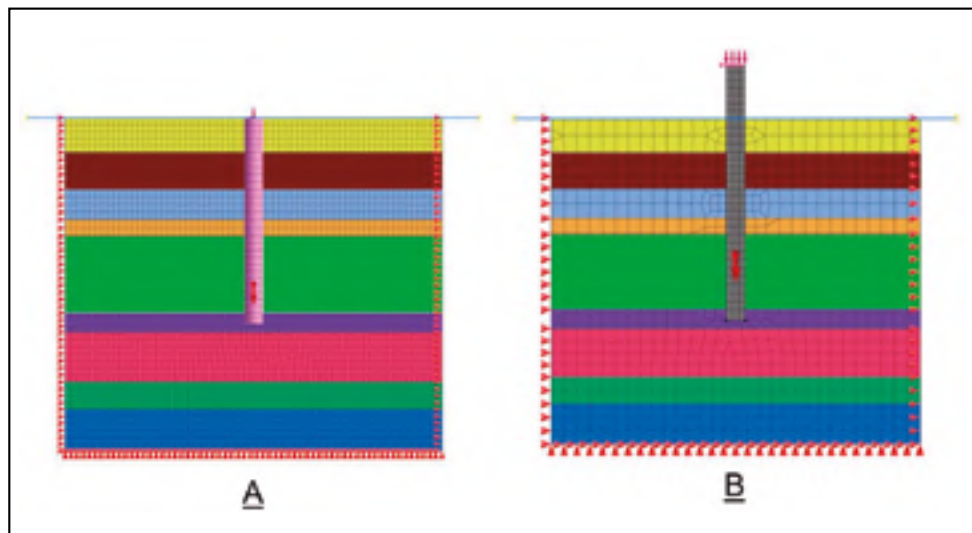


Figura 4.5.1. A) Modelo: pilote elemento viga – elemento híbrido – tamaño 0.5 m, B) Modelo: pilote elemento finito – elemento híbrido – tamaño 0.75 m.

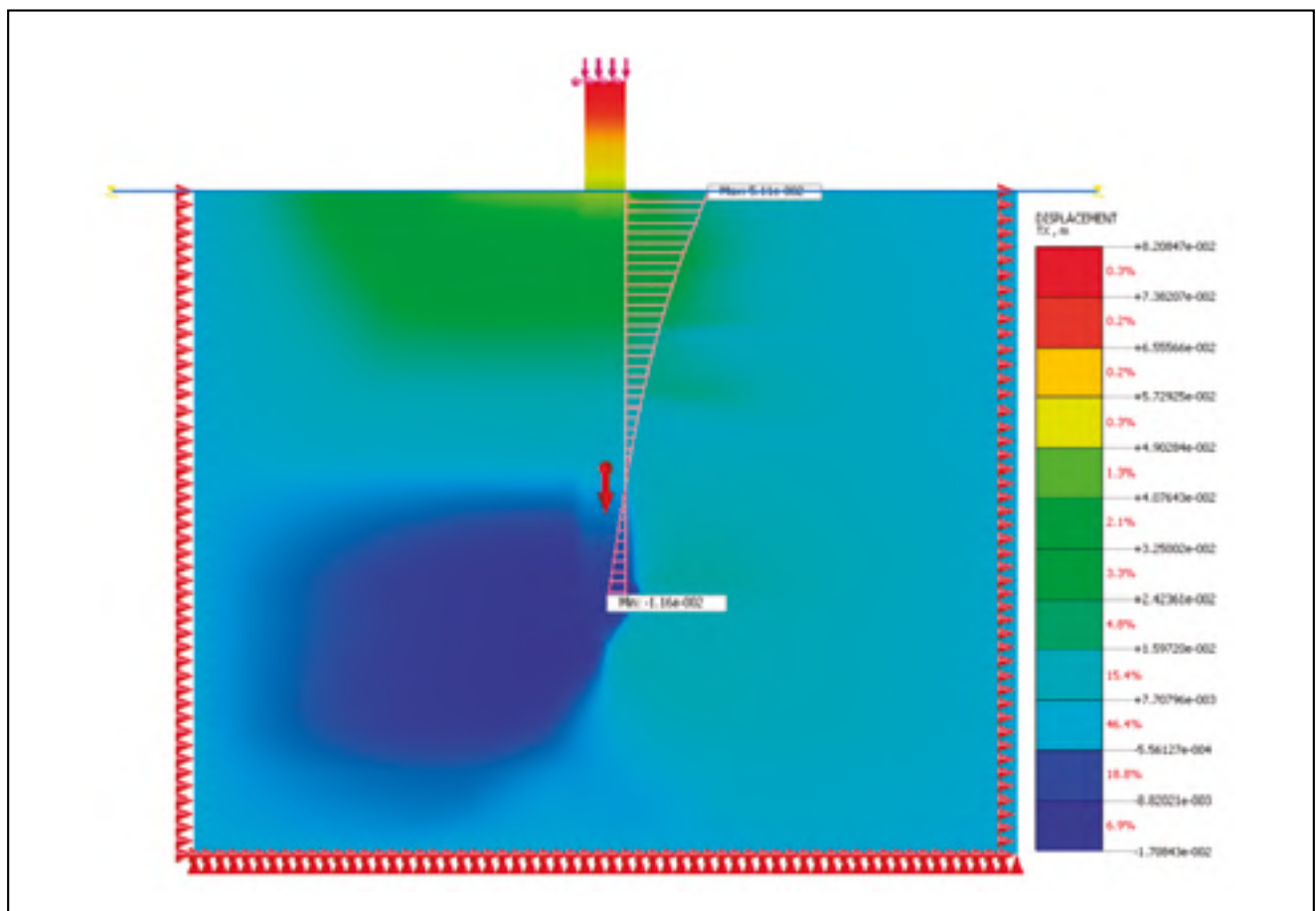


Figura 4.5.2. Deflexiones horizontales: pilote elemento finito – elemento triangular – tamaño 0.75 m.

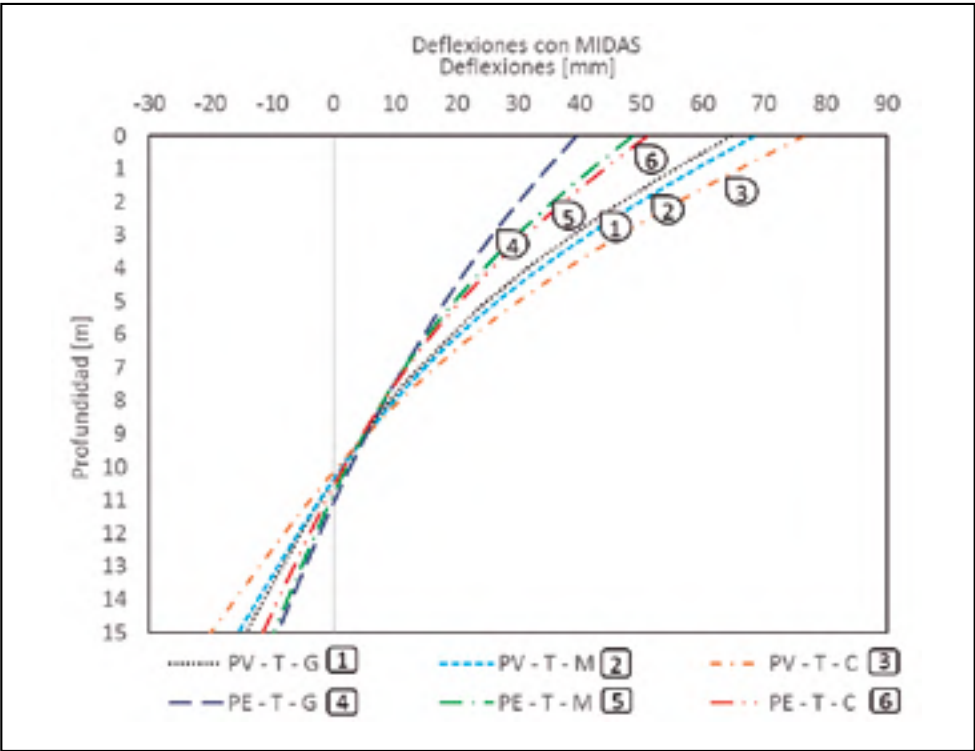


Figura 4.5.3. Deflexiones del pilote obtenidas con MIDAS - elementos triangulares.

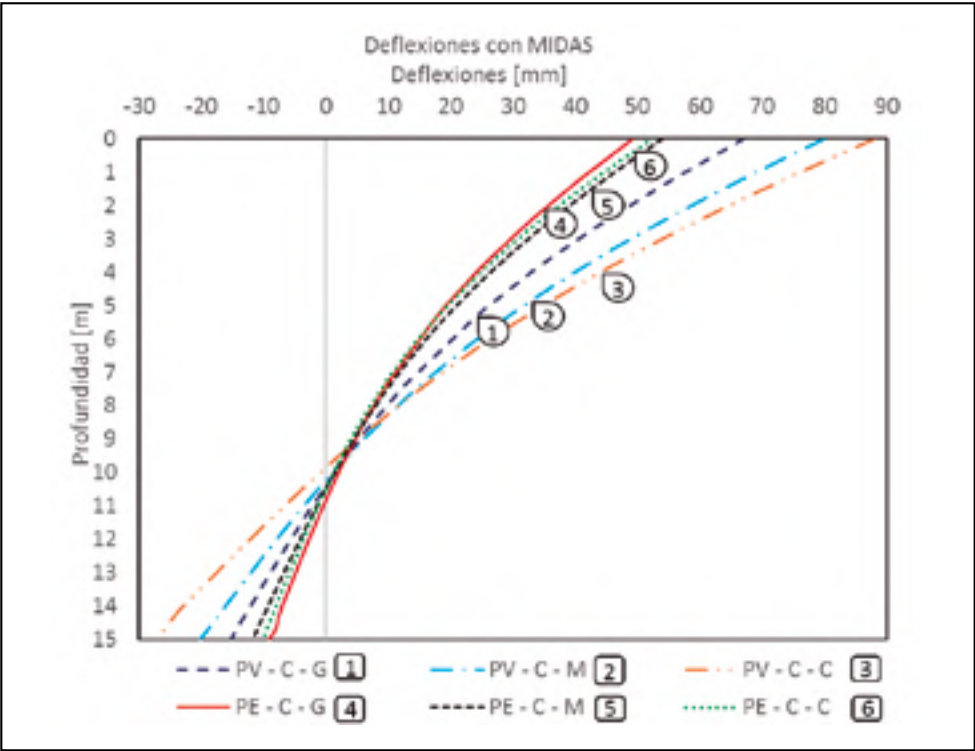


Figura 4.5.4. Deflexiones del pilote obtenidas con MIDAS – elementos cuadrados.

el pilote ha sido modelizado como elemento viga o como elemento finito. También se indica la diferencia entre ambas hipótesis de cálculo.

A continuación, se realiza un análisis de los resultados obtenidos con los modelos numéricos. Posteriormente, se procederá a realizar un análisis en conjunto de todos los métodos.

Si observamos las figuras de las deflexiones, el pilote modelado como elemento viga y modelado con

elementos finitos tienen el mismo comportamiento. Ambos se comportan como rígidos, en su parte inferior el pilote tiene una traslación. Su punto de rotación se encuentra entre los 10 y 11 m de profundidad. La deformación media obtenida con el modelo numérico es igual a 62 mm. En la tabla 4.5.1 se presentan las deflexiones obtenidas. Los pilotes modelados como elementos viga presentan deformaciones superiores a los pilotes modelados

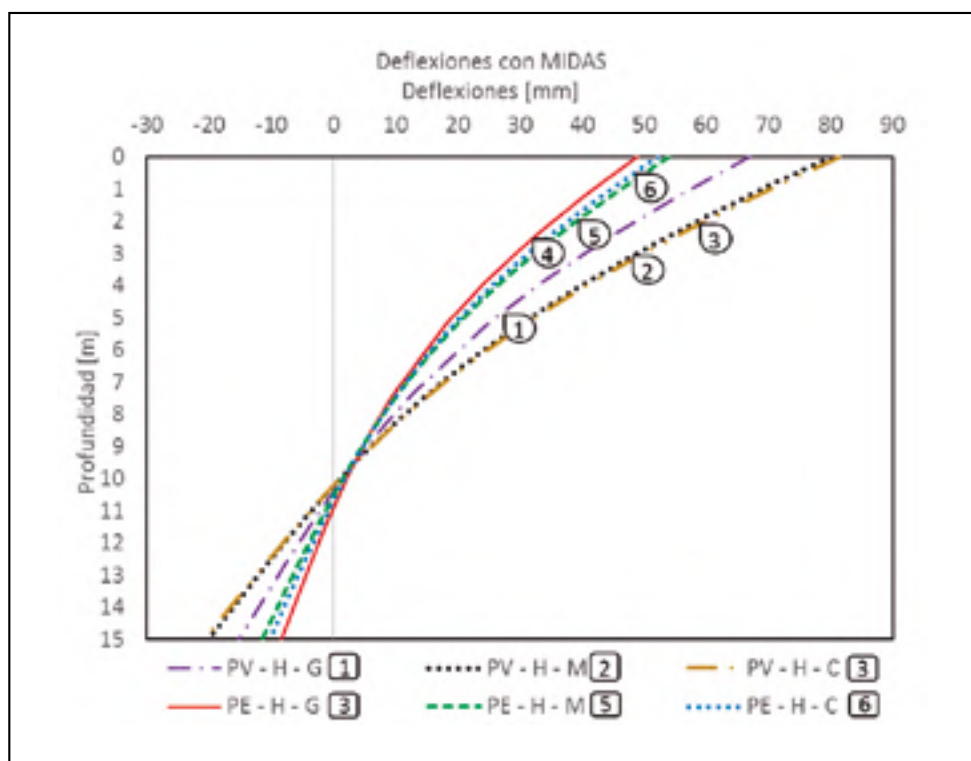


Figura 4.5.5. Deflexiones del pilote obtenidas con MIDAS – elementos híbridos.

Tabla 4.5.1. Deflexiones máximas obtenidas con MIDAS GTS NX

		Deflexiones								
Tipo Elemento		Triangular			Cuadrado			Híbrido		
Tamaño Elemento		1.5m	1.0 m	0.5m	1.5m	1.0 m	0.5m	1.5m	1.0 m	0.5m
Pilote Elemento Viga	$y_{\max}$ [mm]	65	69	77	67	80	88	67	80	81
Pilote Elemento Finito		40	49	51	49	54	53	49	54	52
DIFERENCIA [mm]		25	20	25	18	26	36	18	26	29

Tabla 4.5.2. Aumento de la deflexión debido al mallado en porcentaje

		Porcentaje de aumento debido a la densificación					
Tipo Elemento		Triangular		Cuadrado		Híbrido	
Tamaño Elemento [m]		1.5	0.5	1.5	0.5	1.5	0.5
P. E. V.	Aumento [%]	6	10	16	9	16	2
P. E. F.		19	5	9	-3	9	-3

P. E. V.: Pilote Elemento Viga

P. E. F.: Pilote Elemento Finito

T. Elemento: Tamaño elemento

Nota: el valor negativo implica una reducción de la deflexión debido al mallado

con elementos finitos. Esta diferencia varía entre 18 mm y 36 mm. Se puede deducir que el efecto escala del pilote tiene mucha influencia en los resultados obtenidos. Los resultados indican que modelar los pilotes como elemento viga nos deja del lado de la seguridad respecto a las deformaciones.

Un aspecto crítico también en el modelado es elegir apropiadamente la densificación de los elementos. Esto se debe a que generar elementos muy grandes implica mucha energía en plastificación. En las tablas 4.5.1 y 4.5.2 se observa el aumento de las deformaciones a mayor densificación

de los elementos. En los pilotes modelados como elementos viga, para un tamaño de elemento igual a “0.5 m”, las deflexiones no aumentan más de un 10 %. A partir de ahí un aumento de la densificación no generaría un incremento significativo de las deflexiones. Conclusión: se ha llegado a un tamaño óptimo de los elementos. Para pilotes modelados con elementos finitos cuadrados e híbridos y para un tamaño de elemento igual a 1 m, no se produce a un aumento de las deflexiones. Estas disminuyen. Por lo tanto, no siempre es correcto aplicar grandes densificaciones al mallado.

4.6. Comparación de resultados

En este apartado vamos a hacer una comparación de resultados obtenidos a través de los diferentes métodos de cálculo analizados. En la tabla 4.6.1 se pueden observar todos los valores de las deflexiones calculadas con los distintos métodos de cálculo.

Debido a que en el modelo numérico existen 18 deflexiones diferentes, se ha decidido comparar la máxima correspondiente a cada forma de modelar al pilote: como elemento viga y elementos finitos. En la tabla 4.6.1 se pueden identificar dos grupos de valores. El primero corresponde a los valores obtenidos a través del método del K elástico, las curvas p-y y el método de elementos finitos. El segundo grupo está formado por los valores obtenidos a través del método del pilote elástico y el método de NAVFAC DM 7.02, 1986.

Entre estos dos grupos, la magnitud de las deflexiones difiere de forma importante. Para el Grupo 1, la deflexión media es igual a 83 mm y para el Grupo 2 la deflexión media es igual a 17 mm. Una posible razón de esta diferencia es que los métodos englobados por el Grupo 2 son sólo aplicables para suelos homogéneos.

En función de los resultados obtenidos, la hipótesis adoptada para la homogenización del terreno no ha sido correcta debido a que el aporte de resistencia de los estratos superiores es mayor que la de los estratos inferiores.

En el Grupo 1, los valores máximos obtenidos con el método de K elástico y curvas p-y son similares en el orden de magnitud, pero las formas de las curvas varían considerablemente de un método a otro.

Se observa una deflexión que no coincide en el orden de magnitud. Es la correspondiente al método del K

elástico con la recomendación de FHWA, 2016. Esto podría ser debido al elevado coeficiente de balasto, el cual varía entre 100 y 500 MPa/m para las arcillas. Valores que superan ampliamente a los 15 MPa/m que propone Terzaghi (1955). Si se aplica la recomendación de FHWA, 2016, con el método de las curvas p-y, se obtienen resultados que están en el mismo orden de magnitud que los otros métodos. Esto podría deberse a que el método de las curvas p-y realiza un análisis no lineal del terreno. Por lo tanto, el coeficiente de balasto de 500 MPa/m tiene poca influencia, ya que este es aplicable sólo para el rango de pequeñas deformaciones. En conclusión, el coeficiente de balasto horizontal recomendado por FHWA, 2016, debería solo aplicarse en el método de las curvas p-y, debido a que este método considera el comportamiento lineal y no lineal del terreno. Si se llegase a aplicar métodos que contemplen solo un análisis lineal, el coeficiente de balasto debería ser más conservador y estar en el orden de lo propuesto por Terzaghi (1955).

Analizando los valores presentados en la tabla 4.6.2., los momentos flectores obtenidos están dentro del mismo orden de magnitud, con un mínimo de 2959 kNm y 5091 kNm. El momento flector de 2959 kNm se podría eliminar debido a que corresponde al momento calculado con el método del K elástico y la recomendación de FHWA, 2016. Como el coeficiente de balasto es muy elevado, el terreno es muy rígido. Al ser muy rígido el terreno, el empostramiento se desarrolla a poca profundidad y las flexiones en el pilote son menores. Al igual que las deformaciones, el momento flector obtenido no sería representativos de la realidad. Si eliminamos este valor, el momento mínimo calculado es de 3365 kNm, el máximo 5091 kNm y la media es de 4436 kNm.

Tabla 4.6.1. Deflexiones según el método de cálculo analizado

METODOS	DEFLEXIONES [mm]							
	GCOC	ROM	FHWA	NAVFAC	API	TERZAGHI	Modelo M-C	Modelo M-C
K elástico	80	73	8	64	-	54	-	-
Curvas p-y	108	108	92	108	72	100	-	-
Pilote. Eq.	25	22	5	30	-	23	-	-
M. NAVFAC	11	6	2	13	-	6	-	-
M.E.F.	-	-	-	-	-	-	88 ^a	54 ^b

Modelo M-C: modelo Mohr-Coulomb

M.E.F: método de los elementos finitos

Pilote Eq.: Pilote Equivalente

^a: Deflexión promedio obtenida con el método de elementos finitos modelando al pilote como un elemento viga

^b: Deflexión promedio obtenida con el método de elementos finitos modelando al pilote elementos finitos

Tabla 4.6.2. Momentos flectores según el método de cálculo analizado

METODOS	MOMENTOS FLECTORES [kNm]						
	GCOC	ROM	FHWA	NAVFAC	API	TERZAGHI	Modelo M-C
K elástico	3650	3478	2959	4150	-	3365	-
Curvas p-y	4388	4388	4392	4388	-	4383	-
Pilote. Eq.	4985	4968	4404	5005	-	4973	-
M. NAVFAC	4519	5060	4062	4648	-	5091	-
M.E.F.	-	-	-	-	-	-	4480 ^a

Modelo M-C: modelo Mohr-Coulomb

M.E.F: método de los elementos finitos

Pilote Eq.: Pilote Equivalente

^a: Resultado obtenido con el método de elementos finitos modelando al pilote como un elemento viga

5. CONCLUSIONES

El objetivo de este artículo ha consistido en presentar el estado del arte del comportamiento de pilotes sometidos a acciones horizontales. Además, se ha resuelto un caso real a través de diferentes métodos, se compararon los resultados obtenidos y se formularon conclusiones.

Los métodos utilizados han sido los siguientes:

1. Análisis elástico, terreno modelado con muelles de comportamiento lineal
2. Análisis no elástico, método de las curvas p-y
3. Análisis con el método del pilote equivalente GCOC, 2002, y ROM 0.5, 2005
4. Abaco de NAVFAC DM 7.02, 1986, con un terreno homogéneo ponderado
5. Modelo numérico, con el programa MIDAS GTS NX

A continuación, se exponen las conclusiones principales del trabajo realizado.

1. Análisis elástico, terreno modelado con muelles de comportamiento lineal

El análisis elástico del comportamiento lateral de pilotes es uno de los métodos más difundidos por las normativas debido a su simplicidad de aplicación y al amplio estudio de los coeficientes de balasto horizontales. Todos los reglamentos recomiendan esta metodología. Los más conservadores son GCOC, 2002, ROM 0.5, 2005, y NAVFAC DM 7.02, 1986. Estos tres reglamentos siguen las recomendaciones de Terzaghi (1955), pero con pequeñas variaciones. Los reglamentos menos conservadores son API, 2000, y FHWA, 2016, debido a que proponen coeficientes de balasto muy elevados. Los cuales deben ser usados con cuidado debido a que su rango de aplicación se limitara a pequeñas deformaciones.

2. Análisis no elástico, método de las curvas p-y

El método de las curvas p-y es uno de los métodos más interesantes para el análisis lateral de pilotes, contempla el comportamiento no lineal del terreno. Además, tiene la ventaja que estas curvas son empíricas, se determinan a través de ensayos a escala real, lo cual

reduce su incertidumbre. Conceptualmente es un método sencillo y la determinación de las curvas no es complicada si es que se tiene toda la información geotécnica necesaria para su aplicación. Las deflexiones obtenidas con este método son coherentes, y coinciden con los valores obtenidos con el método del K elástico, excepto los propuestos por FHWA, 2016. Los cuales son apropiados para las curvas p-y, ya que la influencia del tramo lineal de la curva tiene poca influencia en la deformación total.

3. Análisis con el método del pilote equivalente GCOC, 2002, y ROM 0.5, 2005

El método del pilote equivalente es muy interesante, principalmente por su sencillez. Tiene la limitación de que solo se aplica en suelo homogéneo y para una relación $L/T < 2.5$, es decir, pilotes rígidos. Es un buen método para realizar pre-dimensionamientos y para tener un orden de magnitud de las deformaciones esperadas. Como depende de la rigidez relativa del terreno-pilote, depende de los coeficientes de balasto. Por esta razón sería interesante que los reglamentos realicen más recomendaciones sobre el coeficiente de balasto y sus valores límites.

Para el caso real, los resultados obtenidos no fueron adecuados en comparación a otras metodologías. Esto se puede deber a la hipótesis realizada para homogeneizar el terreno no fue correcta. Sería interesante que los reglamentos realicen recomendaciones respecto a cómo obtener un terreno homogéneo equivalente.

4. Ábaco de NAVFAC DM 7.02, 1986, con un terreno homogéneo ponderado

El método de NAVFAC DM 7.02, 1986, es un método muy sencillo y práctico para calcular las deflexiones de un pilote sometido a cargas laterales. A diferencia del método del pilote equivalente que solo permite determinar la deflexión máxima, el método de NAVFAC DM 7.02, 1986, te permite determinar las deflexiones en toda la profundidad del pilote. Al igual que el método del pilote equivalente, solo es aplicable para suelos homogéneos. Otras de las ventajas que tiene el método es que sus curvas están muy acotadas a ciertas relaciones de L/T , las cuales tienen mucha influencia en los resultados.

5. Modelo numérico, con el programa MIDAS GTS NX

Para el empleo de modelos numéricos es necesario conocer bien el programa y la naturaleza del problema a resolver. Se debe realizar una calibración previa de los programas antes de usarlos.

El análisis real que se estudió nos permitió comparar los resultados obtenidos a través de los métodos más tradicionales. Permitted observar la influencia que tiene las distintas variables que influyen. El tamaño del modelo para evitar los fenómenos de borde. La importancia de la correcta densificación del modelo y el tipo de elemento a utilizar (cuadrado, triangular o híbrido). Otro factor que influye es el modo de modelar el pilote, como elemento viga o con elementos finitos. Las deformaciones obtenidas son mayores si el pilote se modela como elemento viga y estaban en el orden de magnitud con las obtenidas por el método del k elástico y las curvas p - y .

En conclusión, los métodos utilizados son satisfactorios para el caso real estudiado, aunque deben ser empleados con criterio según la naturaleza de cada problema.

6. REFERENCIAS

- American Association of State Highway and Transportation Officials (2017). *Bridge Design Specifications* (8th ed.). Washington, D.C.: AASHTO.
- American Petroleum Institute (2000). *Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms-Working Stress Design*. Washington, D.C.: API.
- Broms, B.B. (1964a). Lateral resistance of Piles in Cohesive Soils. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, 90(2): pp. 27-63.
- Broms, B.B. (1964b). Lateral resistance of Piles in Cohesionless Soils. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, 90(2): pp. 123-157.
- Chen, W.W. (1978). Discussion: Laterally Loaded Piles: Program Documentation. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 104(1): pp. 161-162.
- Davisson, M.T. (1970). Lateral Load Capacity of Piles. *Highway Research Record*, n° 333, pp. 104-112.
- European Committee for Standardization (1997). *Eurocode 7: Geotechnical Design*, Part 1: General Rules.
- Hansen, J.B. (1961a). A general formula for bearing capacity. Copenhagen: Danish Geotechnical Institute, *Bulletin*, n° 11, pp. 38-46.
- Hansen, J.B. (1961b). The ultimate resistance of rigid piles against transversal forces. Copenhagen: Danish Geotechnical Institute, *Bulletin*, n° 12, pp. 5-9.
- Hetényi, M. (1946). *Beams on Elastic Foundation: Theory with Applications in the Fields of Civil and Mechanical Engineering*. Ann Arbor (MI/USA): University of Michigan Press.
- Isenhower et al. (2016). *Technical Manual for LPILE 2016 (Using Data Format Version 9) A Program for the Analysis of Deep Foundations Under Lateral Loading*. Austin (TX/USA): Ensoft, Inc.
- McClelland, B., y Focht, J.A. (1958). Soil modulus for laterally loaded piles. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 123(1): pp. 1049-1086.
- Ministerio de Fomento (2002). *Guía de Cimentaciones en Obras de Carretera*. Madrid: Dirección General de Carreteras (Ministerio de Fomento).
- Ministerio de Fomento (2005). *Recomendaciones Geotécnicas para Obras Marítimas y Portuarias*. ROM 0.5-05. Madrid: Puertos del Estado (Ministerio de Fomento).
- Ministerio de Vivienda (2007). *Código Técnico de la Edificación*. RD 1371/2007. Madrid: Ministerio de Vivienda.
- National Highway Institute (2016). *Design and Construction of Driven Pile Foundations*. Vol. 1, n° FHWA-NHI-16-009.
- Naval Facilities Engineering Command (1986). *Foundation and Earth Structures*. Design Manual 7.02. Washington, D.C.: NAVFAC.
- Reese, L.C., y Matlock, H. (1956). Non-Dimensional Solutions for Laterally Loaded Piles with Soil Modulus Assumed Proportional to Depth. *Proceedings of the 8th Texas Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Austin, Texas.
- Reese, L.C., y Van Impe, W.F. (2011). *Single Piles and Pile Groups under Lateral Loading* (2nd ed.). Boca Raton (FL/USA): Taylor & Francis Group, LLC.
- Skempton, A.W. (1951). The Bearing Capacity of Clays. *Proceedings of Building Research Congress*, Vol. 1, pp. 180-189.
- Skempton, A.W. (1953). Discussion: Piles and Pile Foundations, Settlement of Pile Foundations. *Proceedings of the 3rd International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Zurich, Vol. 3, p. 171.
- Terzaghi, K. (1955). Evaluation of coefficients of subgrade reaction. *Géotechnique*, 5(4): pp. 297-326.
- Thompson, G.R. (1977). Application of finite element method to the development of p - y curves for saturated clays. Tesis Doctoral. Austin (TX/USA): Universidad de Texas.
- Timoshenko, S.P. (1930). *Strength of Materials*, Part II: Advanced Theory and Problems. New York: D. Van Nostrand Company, Inc.
- Yegian, M., y Wright, S.G. (1973). Lateral Soil Resistance-Displacement Relationship for Pile Foundations in Soft Clays. *Proceedings of the Offshore Technology Conference*, Houston, Texas, pp. 663-676.

Gabinete geológico de Francisco Hernández-Pacheco.

Colección histórica de materiales pétreos para la obra pública

Geological Office of Francisco Hernández-Pacheco.

Historical Collection of Stone Materials for Public Works

Isabel Rodríguez Martín^{1*}, Mauro Muñiz Menéndez², José Luis Salinas Rodríguez³

Resumen

Entre 1952 y 1970, el ilustre naturalista, geólogo y geógrafo, Francisco Hernández-Pacheco de la Cuesta, dirigió el estudio petrológico de los materiales rocosos que eran analizados en el Laboratorio del Transporte y Mecánica del Suelo. Un trabajo que comenzó años antes de la fundación del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas en la Escuela Especial de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, ubicada también entonces en el madrileño Cerro de San Blas. En su gabinete, Hernández-Pacheco recopiló una gran cantidad de material pétreo que meticulosamente describió, catalogó y conservó hasta crear una destacable colección de gran interés técnico e histórico. La colección incluye, aparte de variado instrumental en el que destaca un microscopio de polarización con cámara fotográfica incorporada, cientos de muestras de roca, microfotografías en placas de vidrio, láminas delgadas, fichas descriptivas y negativos fotográficos. El objetivo principal del artículo es poner en valor la figura de Hernández-Pacheco y, en particular, su labor al frente del Servicio Geológico del Laboratorio del Transporte y Mecánica del Suelo, prácticamente desconocida, así como describir y dar a conocer la colección de áridos generada a raíz de su trabajo de más de dos décadas en este laboratorio. Paralelamente a la redacción de este artículo se está trabajando en la catalogación y restauración tanto del espacio físico del gabinete como de la colección, con el propósito de que cuando estas labores concluyan se pueda visitar el Gabinete Geológico Francisco Hernández-Pacheco en el Laboratorio de Geotecnia del CEDEX con fines de estudio y divulgación. De este modo, una pequeña pieza más se añadirá al legado de la obra pública española moderna.

Palabras clave: áridos, canteras, CEDEX, materiales pétreos, obra pública, historia, geología, Hernández-Pacheco.

Abstract

Between 1952 and 1970, the illustrious naturalist, geologist, and geographer, Francisco Hernández-Pacheco de la Cuesta led the petrological study of the rocky materials that were analyzed in the Laboratorio del Transporte y Mecánica del Suelo. This work began, years before the foundation of the Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, in the Escuela Especial de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, also located at the Cerro de San Blas. In his office, Hernández-Pacheco compiled a large amount of stone material that he meticulously described, catalogued, and conserved to assemble a remarkable collection of great technical and historical interest. The collection includes, apart from an array of instruments among which a polarization microscope with a built-in camera stands out, hundreds of rock samples, microphotographs on glass plates, thin sections, descriptive cards, and photographic negatives. The main objective of the article is to highlight the figure of Hernández-Pacheco and, in particular, his work as head of the Geological Service of the Laboratorio del Transporte y Mecánica del Suelo, which is hardly known, as well as describing and publicising the collection of aggregates resulting from his work of more than two decades in this laboratory. In addition to it, we are working on the cataloguing and restoration of the physical space of the office, the cabinets and the collection so that the Francisco Hernández-Pacheco Geological Cabinet at the Geotechnical Laboratory of CEDEX can be visited for study and dissemination purposes. In this way, another token will be added to the legacy of modern Spanish public works.

Keywords: Aggregates, quarries, CEDEX, rock materials, public works, history, geology, Hernández-Pacheco.

1. FRANCISCO HERNÁNDEZ-PACHECO, UNA VIDA DEDICADA A LA INVESTIGACIÓN Y DOCENCIA DE LA GEOLOGÍA

Francisco Hernández-Pacheco y de la Cuesta (figura 1) nació en Valladolid el 16 de febrero de 1899. Hijo del eminente geólogo Eduardo Hernández-Pacheco y Estevan y de María de la Cuesta y Catalán. Al cumplir los ocho años nombraron a su padre Adjunto al Museo Nacional de Ciencias Naturales (figura 2), lo que obligó a la familia a instalarse en Madrid y dejar la ciudad de Córdoba, donde hasta ese momento Eduardo había impartido clases como catedrático en el Instituto Luis de

* Autora de contacto: isabel.rodriguez@cedex.es

¹ Doctora arquitecta. Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid (UPM). Centro de Estudios Históricos de Obras Públicas y Urbanismo (CEHOPU), del CEDEX.

² Doctor en Geología e Ingeniería Geológica. Facultad de Ciencias Geológicas (UCM). Laboratorio de Geotecnia (LG), del CEDEX.

³ Geólogo. Laboratorio de Geotecnia (LG), del CEDEX.



Figura 1. Francisco Hernández-Pacheco y de la Cuesta en 1949. ©Biblioteca virtual de la Real Academia Nacional de Farmacia.



Figura 2. Eduardo Hernández-Pacheco y Estevan en el Museo Nacional de Ciencias Naturales (MNCN) a principios del siglo XX. © CSIC.



Figura 3. Primera sala del Gabinete de Historia Natural del Instituto Cardenal Cisneros, donde cursó el bachillerato Francisco Hernández-Pacheco. Los armarios fueron trasladados de la Universidad de Alcalá de Henares en 1850.

Góngora¹. Ya en la capital, Francisco cursó los estudios de bachillerato en el histórico Instituto Cardenal Cisneros

(figura 3) y en 1920 se licenció en Ciencias Naturales en la Facultad de Ciencias de la Universidad Central. Continuó su formación en la misma Facultad cursando el doctorado y a los 24 años ocupó un puesto de Ayudante de clases prácticas de Geología Geognóstica y Estratigrafía. Antes de leer la tesis doctoral comenzó a colaborar con el Instituto Geológico y Minero de España (IGME) en la primera edición de la cartografía MAGNA a escala 1:50.000. Su actividad como cartógrafo, prolongada a lo largo de prácticamente toda su carrera, se tradujo en 36 hojas geológicas: siete en Ciudad Real (1928-1935), una en Toledo (1944), dos en Córdoba (1965-1970) y veintiséis en Extremadura (1941-1972)².

En 1926, participó junto a su padre en el XIV Congreso Geológico Internacional (CGI) celebrado en Madrid, encargándose de la organización de excursiones y de la elaboración de algunas de las magníficas guías que se editaron (Ayala-Carcedo et al, 2005). Tres años más tarde, en 1929, se doctoró con la tesis titulada *Fisiografía, geología y paleontología del territorio de Valladolid* que le dirigió su propio padre y maestro³. Ese mismo año obtuvo por concurso

oposición la plaza de Profesor Auxiliar de Geografía Física, y tan sólo un año después fue nombrado jefe de la Sección de Geología del Museo Nacional de Ciencias Naturales que dirigía entonces Ignacio Bolívar, siguiendo así la estela de su padre.

Quienes le conocieron y trabajaron con él de forma cercana, le recuerdan por su entusiasmo y vocación pedagógica. Esta actitud comprometida con la transmisión del saber explica su gran dedicación no sólo a la docencia en la universidad sino también a la divulgación del conocimiento geológico a un público menos especializado, lo que le llevó a colaborar asiduamente en publicaciones de carácter generalista. De su actividad divulgativa, cabe mencionar la redacción del tomo de geología de la *Enciclopedia de Historia Natural* publicada por el Instituto Gallach en 1925 y su participación en el primer volumen dedicado a la Prehistoria de la monumental *Historia de España* dirigida por Ramón Menéndez Pidal. Asimismo,

¹ En el mismo año que nació su hijo Francisco, Eduardo Hernández-Pacheco ganó por oposición la cátedra de Historia Natural del Instituto de Enseñanza Secundaria de Córdoba, cargo en el que permaneció hasta 1907. Anteriormente había ocupado distintas plazas docentes en un instituto de enseñanza secundaria de Cáceres y en la Universidad de Valladolid.

² En veinte hojas del bloque extremeño es coautor su cuñado Ismael Rosso de Luna, conocido y prestigioso ingeniero de minas y catedrático de yacimientos en la Escuela Superior de Minas de Madrid.

³ La tesis doctoral fue publicada un año más tarde, en 1930, por el Museo Nacional de Ciencias Naturales. Se puede consultar una copia digitalizada en la Biblioteca Digital de Castilla y León.

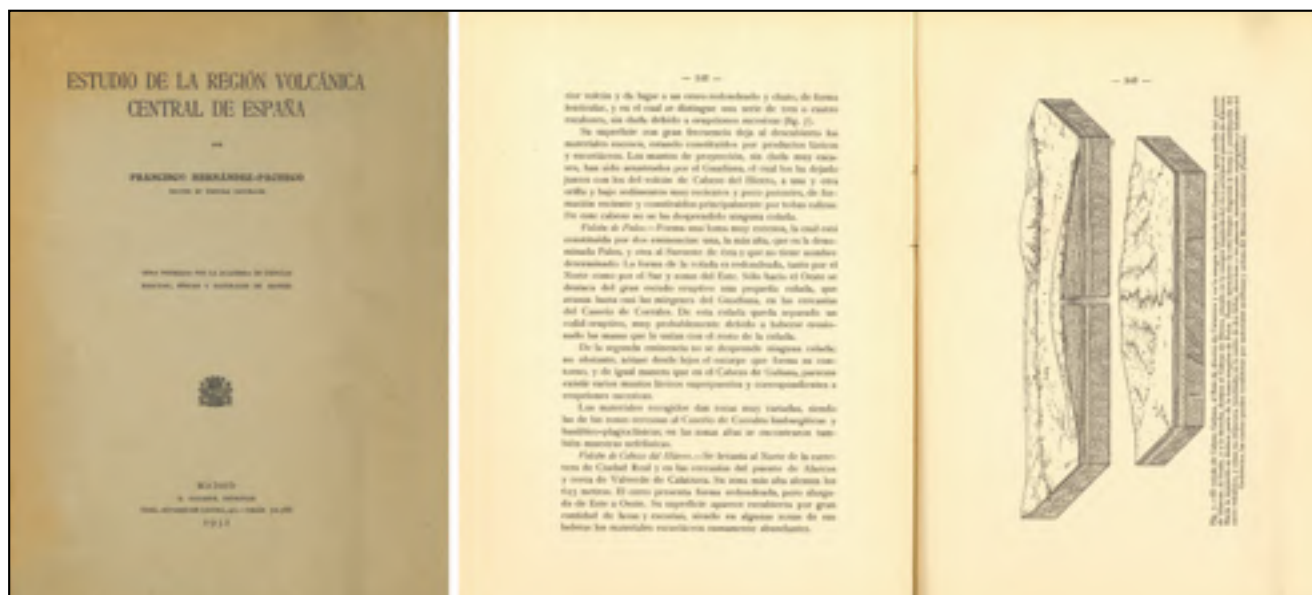


Figura 4. Portada y dos hojas del interior de libro de Francisco Hernández-Pacheco, *Estudio de la región volcánica central de España*, por el que obtuvo el Premio de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de 1931.

incorporó su experiencia a números monográficos del *Boletín del Servicio Geológico de Obras Públicas*, en los que se describen itinerarios geográfico-geológicos con un gran atractivo visual.

Con tan sólo 32 años obtuvo el Premio de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de 1931 por su trabajo de investigación *Estudio de la región volcánica central de España*, publicado al año siguiente (Hernández-Pacheco, 1932), y reconocido como uno de los estudios científicos con mayor repercusión de su carrera⁴ (figura 4). En estos años colaboró también en la redacción de las dos primeras Guías de los Sitios Naturales de Interés Nacional –*Sierra de Guadarrama* y *Parque Nacional de la Montaña de Covadonga*– editadas por la Junta de Parques Nacionales y dirigidas por su padre, impulsor pionero de esta institución de carácter conservacionista⁵.

El 7 de abril de 1933 ganó la Cátedra de Geografía Física y Geología Aplicada de la Facultad de Ciencias en oposición a Joaquín Gómez de Llarena. El ejercicio de campo consistió en la realización de un mapa geológico de cincuenta kilómetros cuadrados y en el levantamiento de un corte geológico de cuarenta kilómetros entre los municipios de Hellín en Albacete y Cieza en Murcia⁶. El trabajo desarrollado en esos cuatro días de expedición por ambos profesores supuso el descubrimiento geológico del Pitón volcánico de Cancarix en la Sierra de las Cabras y su

primera cartografía. Además, en esos años, su actividad docente aumentó y se enriqueció con su nombramiento como Profesor Adjunto de Geología en la Escuela Especial de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.

Durante la Guerra Civil se refugió con sus hijos y su mujer Sara (figura 5) en los municipios de Alcuéscar y Miajadas de la provincia de Cáceres, lugar de procedencia de su familia paterna (figura 6), donde continuó su labor docente e investigadora centrándose en el estudio geológico y geográfico del territorio extremeño. Como resultado de las investigaciones de este periodo, publicó en la revista *Las Ciencias* el artículo *El segmento medio de las Sierras Centrales de Extremadura* (Hernández-Pacheco, 1939). Al terminar la guerra, regresó a Madrid y se reincorporó a su Cátedra de la Universidad hasta su jubilación. A lo largo de tantos años de docencia, Hernández-Pacheco fue un maestro admirado y querido por estudiosos y profesionales que se formaron en sus aulas y en sus continuas excursiones al



Figura 5. Sara Rosso de Luna, mujer de Francisco Hernández-Pacheco, con sus hijos Ofelia y Alfredo en la Pedriza de Manzanares el día en que se abrió al tráfico la carretera de acceso a Canto Cochino (junio de 1933). Fotografía tomada por Francisco Hernández-Pacheco.

⁴ En el preámbulo del libro escribe que terminó el trabajo en septiembre de 1930 coincidiendo con el nacimiento de su hijo pequeño Alfredo, quien siguió los pasos familiares especializándose en Geoquímica de rocas endógenas, y fue catedrático de Petrología y Geoquímica en la Universidad Complutense de Madrid.

⁵ También describió los *Rasgos geográficos y geológicos de los Picos de Europa* para las Guías de los Sitios Naturales junto a Delgado Úbeda.

⁶ La oposición comenzó el 17 de marzo de 1932 por la mañana y terminó al anochecer del día 20. El 24 de ese mes entregaron en Madrid la cartografía del área acompañado de la memoria y los documentos elaborados durante los cuatro días de recorrido.



Figura 6. Francisco Hernández-Pacheco (a la izquierda) con su padre Eduardo (en el centro) y su cuñado Ismael Rosso de Luna (a la derecha) en 1949 en Alcuéscar, Cáceres.

campo, donde les inculcó la importancia del estudio directo de la naturaleza. Por todo ello, se le considera uno de los pioneros del alpinismo en España.

Siguiendo, una vez más, los pasos de su padre, Francisco participó activamente en las campañas de investigación científica de las colonias africanas (Barrera Morate, 1999). Con este fin, realizó numerosos viajes y expediciones que dieron como resultado importantes artículos y textos monográficos. Quizá el más representativo de esta época sea el volumen publicado en 1949 con el título *El Sahara español. Estudio geológico, geográfico y botánico*⁷.

Su gran capacidad de trabajo junto a su pasión por la geología, a la que se dedicó ininterrumpidamente desde su juventud, le llevaron a ocupar diversos cargos en instituciones destacadas de su profesión. De esta forma, fue secretario primero, y director después, del Museo Nacional de Ciencias Naturales, director del Instituto de Investigaciones Geológicas Lucas Mallada del CSIC, presidente de la Real Sociedad Española de Alpinismo Peñalara, y presidente y secretario General de la Real Sociedad de Historia Natural, así como presidente de honor. Además, entre las décadas cincuenta y setenta del siglo pasado, compaginó su labor directiva en estas prestigiosas instituciones con su trabajo al frente del Servicio Geológico del Laboratorio del Transporte y Mecánica del Suelo.

En definitiva, su carrera investigadora fue muy prolífica y de temática variada. Una muestra de la diversidad de temas e intereses a los que se enfrentó y de la calidad de su trabajo fue su ingreso en dos Reales Academias Nacionales. Por un lado, su estudio sobre la tectónica peninsular y su relación con las aguas mineromedicinales, en especial el análisis de las aguas termales, le hicieron merecedor en 1949 de la medalla 37 de la Real Academia

Nacional de Farmacia⁸. Posteriormente, el 26 de marzo de 1958, leyó el discurso *Evolución del relieve peninsular en relación con las obras hidráulicas* en la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, sucediendo esta vez en la medalla 30 a Luis Fernández de Córdoba, Duque de Medinaceli⁹.

Como reconocimiento a su extensa y relevante carrera profesional fue condecorado con numerosos premios y distinciones, entre los que cabe mencionar: Comendador de Número de la Orden de la Mehdauia de Marruecos, Comendador de las Órdenes de Instrucción Pública de Portugal, Miembro correspondiente de la Academia de Ciencias, Bellas Letras y Nobles Artes de Córdoba, y del Instituto Nacional de Investigaciones Geográficas de la República de Uruguay, Miembro honorario de la Sociedad Panameña de Ingenieros y Arquitectos y Socio del *Council of the American Geophysical Society*. Asimismo, la ciudad de Valladolid, donde nació, le rindió homenaje poniendo su nombre a una calle. También en Zafra, Badajoz, existe la calle Francisco Hernández-Pacheco. Su vinculación con Extremadura fue siempre muy estrecha, no sólo por los lazos familiares sino también por su implicación con distintas instituciones y medios regionales. Fue frecuente su colaboración con el periódico *El Radical: periódico republicano* antes de la Guerra Civil o con las revistas literarias *Mérida* y *Alcántara*¹⁰. Precisamente en esta última, el conocido caricaturista y pintor cacereño Lucas Burgos Capdevielle le dedicó una caricatura (figura 7). El siete de diciembre de 1976 falleció en Madrid a los 77 años.



Figura 7. Caricatura de Francisco Hernández-Pacheco dibujada por Lucas Burgos Capdevielle.

⁷ Publicado por el Instituto de Estudios Africanos, Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Digitalizado y en acceso libre en la biblioteca del Real Jardín Botánico: <https://bibdigital.rjb.csic.es/medias/99/9b/86/2b/999b862b-7431-4da3-9aed-b6adfc4063c2/files/4130.pdf>

⁸ El 18 de enero de 1949 leyó el discurso de ingreso con el título *La tectónica peninsular y su relación con las aguas medicinales* que fue contestado por el Excmo. Román Casares López. En la actualidad la medalla 37 está vacante.

⁹ En este caso, su discurso fue contestado por Alfonso Peña Boeuf.

¹⁰ *El Radical: periódico republicano* se editó desde 1931 hasta 1936, la revista *Alcántara* desde 1945 hasta 1979 en su primera etapa, y la revista *Mérida* desde 1952 hasta 1955.

2. VALOR HISTÓRICO DEL GABINETE

El Laboratorio del Transporte se creó en noviembre de 1944 gracias a un donativo del extinguido Consejo Directivo de Transportes por Carretera (Laboratorio del Transporte, 1951). En un inicio, el Laboratorio se alojó en dos salas del semisótano del edificio central de la Escuela Especial de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, en las que se montaron los aparatos de la Sección de Mecánica del Suelo bajo la dirección de José Antonio Jiménez Salas (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, 1958). Así comenzó su actividad que fue creciendo rápidamente por el encargo de diversos estudios y ensayos tanto del Ministerio de Obras Públicas como de otros organismos oficiales y particulares, lo que obligó a ampliar el espacio del laboratorio con cuatro salas más del semisótano de la Escuela hasta llegar a una superficie de 350 metros cuadrados (figura 8).

Aun así, esta superficie pronto fue también insuficiente para poder realizar el volumen de trabajo que se le encomendó con la iniciación del Plan de Modernización de Carreteras y el comienzo de las obras de las bases americanas en España. Como consecuencia, el Ministro de Obras Públicas, el Sr. Conde de Vallellano, a propuesta del Director General de Carreteras, D. Manuel Arrillaga, otorgó los fondos necesarios para la construcción del edificio que en la actualidad acoge el Laboratorio de Geotecnia.

Finalmente, fue el 4 de mayo de 1954, diez años después de haber iniciado sus tareas, cuando empezó a funcionar el Laboratorio bajo el nombre de *Laboratorio del Transporte y Mecánica del Suelo* en el edificio recién construido en

el Cerro de San Blas. Desde ese día hasta 1970, Francisco Hernández-Pacheco dirigió el área de Microscopía y Petrografía ubicada en la planta primera del nuevo edificio. En este pequeño gabinete, identificó y caracterizó petrológicamente los distintos materiales pétreos explotados en todo el territorio peninsular que llegaban al Laboratorio para ser sometidos a ensayos específicos, con el fin de ser utilizados en la obra pública. De cada una de las muestras de roca se realizaba un estudio litológico, en ocasiones microscópico, al que se acompañaba de una descripción de sus características siguiendo un tipo de ficha base.

Fruto de este trabajo de casi dos décadas se conserva en el CEDEX una colección de materiales pétreos, en su mayor parte utilizados como áridos, que en la actualidad representa una importante muestra de los tipos de roca empleados en la obra pública española durante el siglo XX. La colección está guardada en los muebles originales de los años cincuenta diseñados para el almacenamiento específico de cada uno de los distintos elementos que componen la colección, desde armarios con cajones de mayor tamaño para las muestras de mano hasta compartimentos de pequeñas dimensiones para las microfotografías o las delicadas láminas delgadas. A pesar de haber pasado ya 68 años desde su construcción, el gabinete se mantiene prácticamente igual que cuando se inauguró en 1954, como se puede apreciar si se compara el plano del edificio publicado en la memoria del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas de 1958 con el estado actual (figura 9). De este modo, al valor geológico intrínseco de la colección se une el valor histórico del espacio físico del gabinete y de su mobiliario.

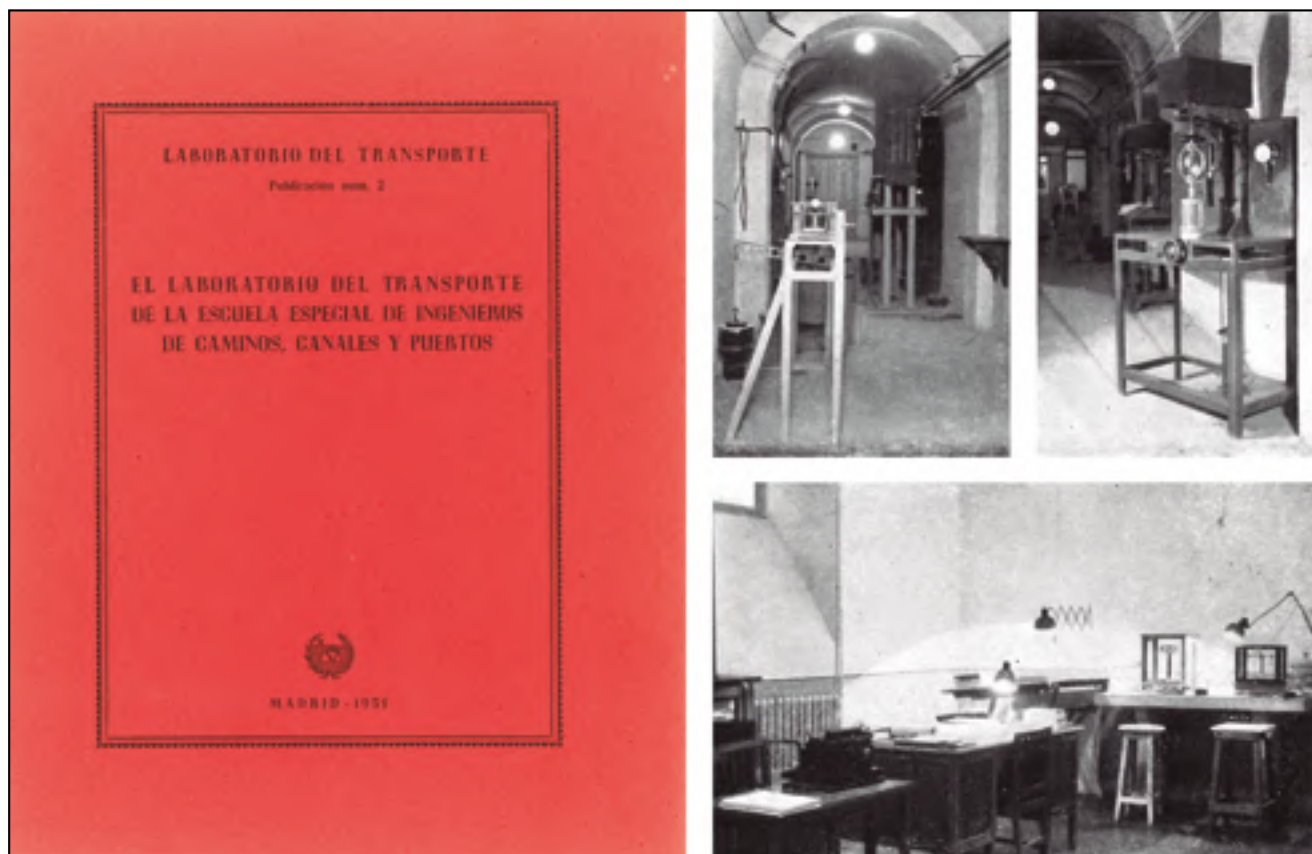


Figura 8. Portada de la memoria de 1951 del Laboratorio del Transporte de la Escuela Especial de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos (izquierda), y fotografías de la primitiva instalación del Laboratorio en los sótanos de la Escuela que muestran cómo se trabajaba en esos primeros años (derecha).

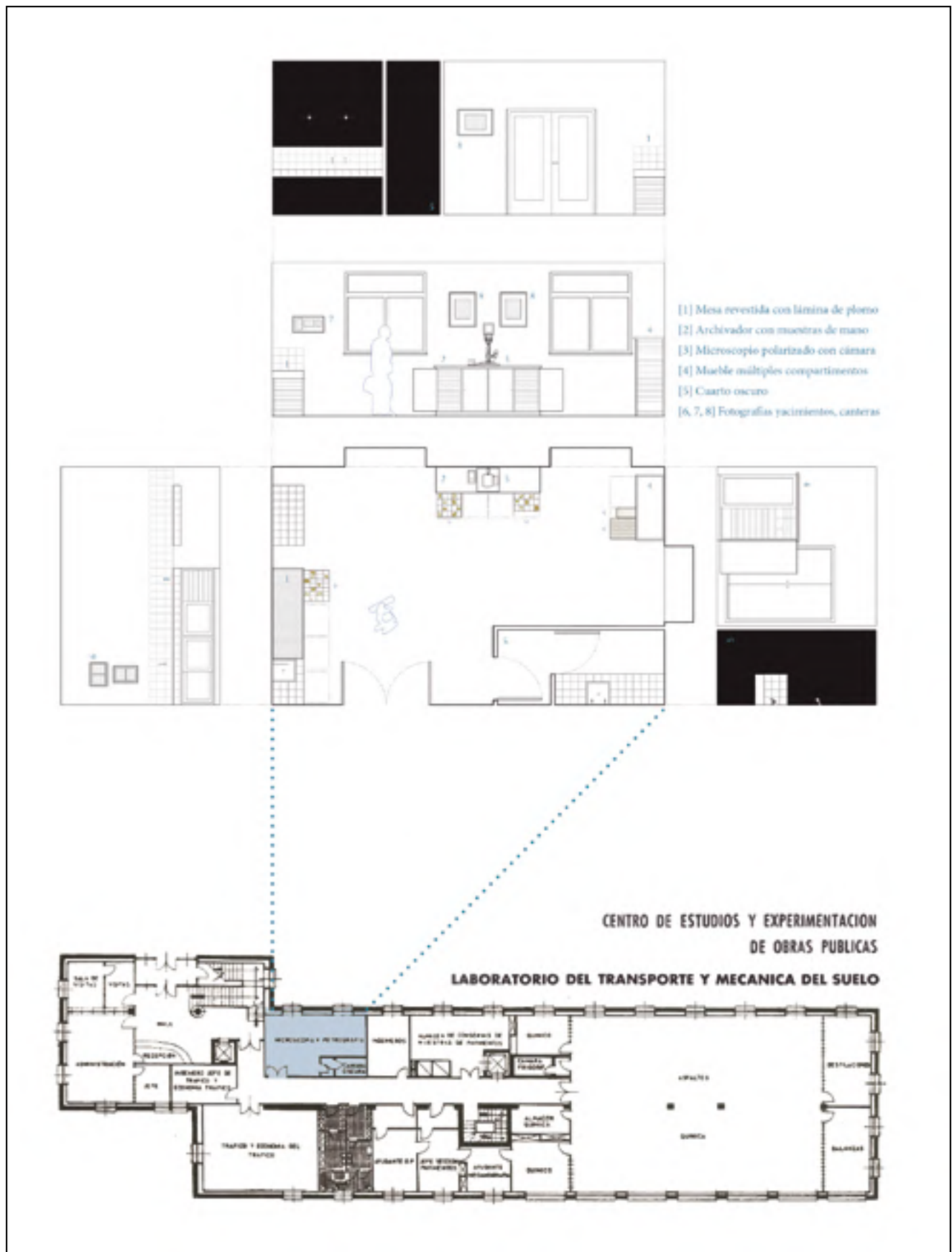


Figura 9. Situación del Gabinete de Microscopía y Petrografía en la planta primera del Laboratorio del Transporte y Mecánica del Suelo en el año 1958 (abajo). Planta y alzados detallados del estado actual del Gabinete en el Laboratorio de Geotecnia en el que se conservan los muebles originales con la colección de materiales pétreos (arriba). Dibujo de los autores.

3. CONTENIDO DE LA COLECCIÓN

La colección histórica de materiales pétreos para la obra pública catalogada por Francisco Hernández-Pacheco está compuesta por cientos de muestras de mano (principalmente muestras rocosas, aunque también hay numerosas muestras de suelos granulares y arcillosos o escorias), adoquines, fichas identificativas y descriptivas, microfotografías en placas de vidrio, láminas delgadas, fotografías y negativos (figura 10). Junto a las muestras, se conservan también diversos útiles y equipos que formaban parte del instrumental diario de Hernández-Pacheco. Entre este equipamiento destaca el microscopio con el que se realizaron gran parte de los estudios petrográficos y las microfotografías de las muestras que componen la colección. Se trata de un microscopio monocular de polarización *Panphot* fabricado por la compañía inglesa W. Watson and Sons Ltd. (circa 1950) con revolver de tres objetivos (10x, 46x y 196x) y una cámara fotográfica de fuelle para

negativos de 9 x 6,5 milímetros integrada en su estructura (figura 11). Aunque en la actualidad ya no se utilizan, sigue existiendo tanto el cuarto oscuro de revelado como la mesa de trabajo revestida con lámina de plomo con una cubeta de lavado que utilizaban en la época para el manipulado de las muestras. Del mismo modo, tres fotografías personales de Hernández-Pacheco o cuatro imágenes de canteras nacionales enmarcadas y firmadas por el propio Francisco siguen colgadas en el mismo lugar en el que se colocaron en los años cincuenta (figura 9).

Hasta el momento actual se han catalogado 756 fichas identificativas que se encuentran ordenadas en un mueble de la época de múltiples compartimentos separadas en tres grupos: “Fichas por provincias”, “Fichas por tipo de roca” y “Fichas con microfotografías”. Cada una de las fichas almacenadas recoge el número de trabajo y muestra, los datos de localización de origen de la muestra y su posible uso en la obra civil, así como la enumeración de los lugares donde ya ha sido empleada (figura 10). Gracias a esta información

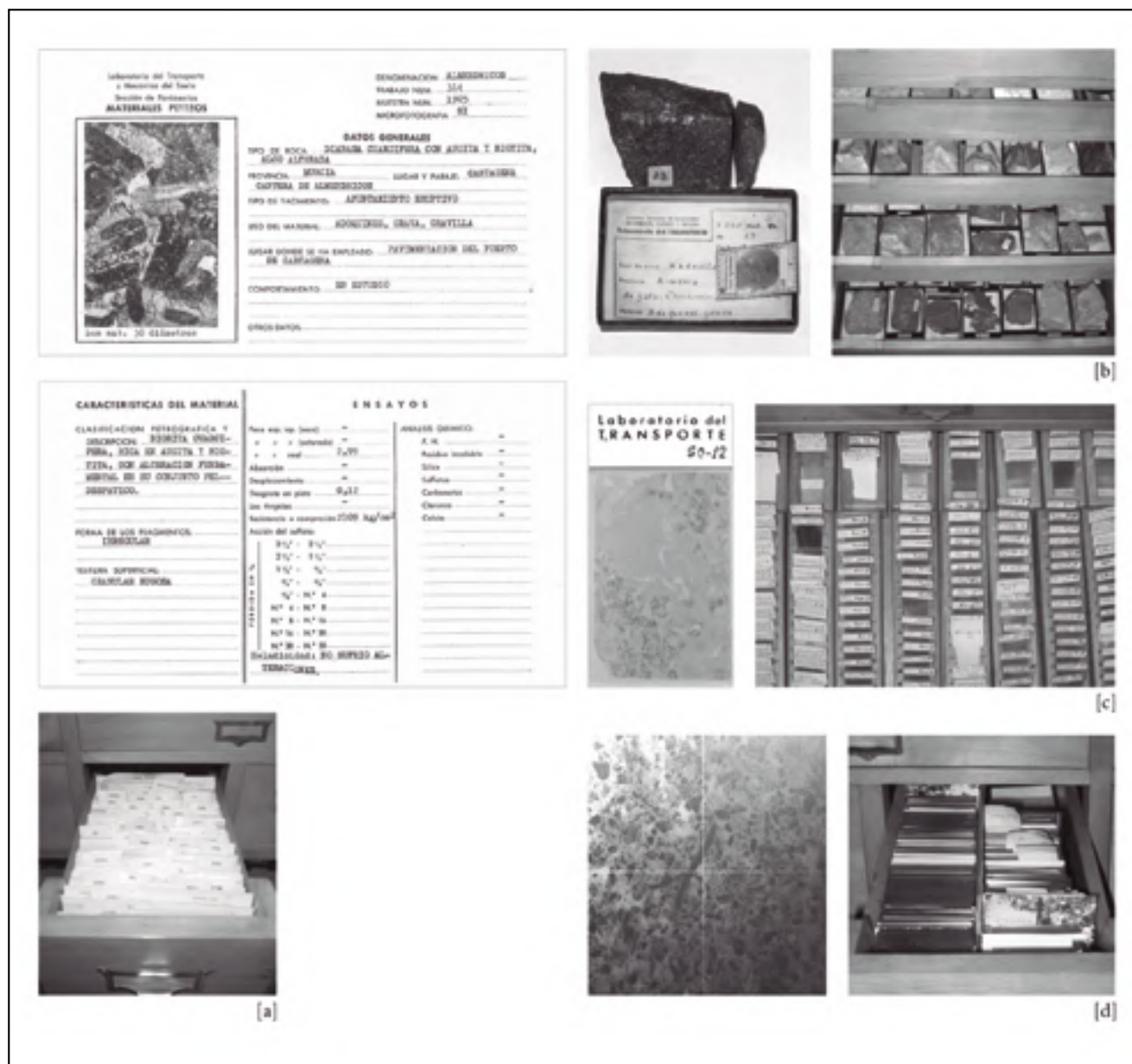


Figura 10. Contenido principal de la colección histórica de materiales pétreos para la obra pública catalogados por Francisco Hernández-Pacheco en el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas: fichas identificativas y descriptivas [a], muestras de mano [b], láminas delgadas [c] y microfotografías [d].

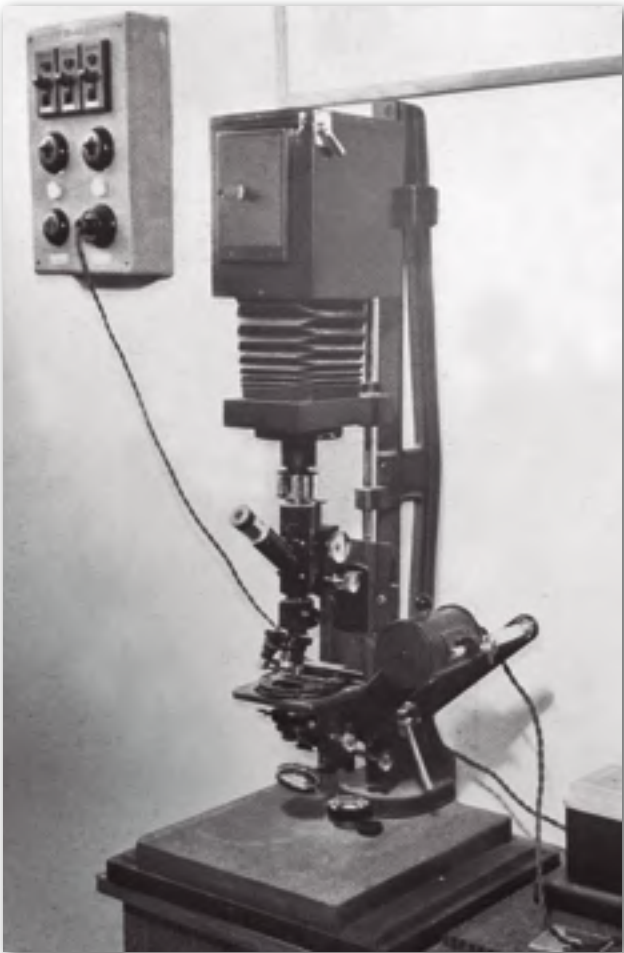


Figura 11. Microscopio monocular de polarización con cámara fotográfica de fuele integrada en su estructura que Hernández-Pacheco utilizaba en su trabajo diario en el Gabinete.

se puede conocer la procedencia de las muestras de la colección que abarca desde numerosas provincias españolas peninsulares hasta Tenerife y las provincias africanas del Sahara Occidental y Guinea Ecuatorial.

Por otro lado, es interesante mencionar que según la propia catalogación de Hernández-Pacheco se pueden diferenciar a su vez cinco colecciones distintas identificadas como: colección general, estudio de canteras, colección especial, provincias africanas y muestras para prototipo del laboratorio. Como se puede apreciar en la tabla 1, las colecciones con mayor número de fichas y que, además, contienen una mayor información geológica y petrográfica de las muestras son la colección general y el estudio de canteras.

Tabla 1. Número de fichas que componen la colección Francisco Hernández-Pacheco

Colección	Número de fichas	Tipo de fichas
Colección General	276	Identificativas
	118	Descriptivas
Estudio de Canteras	242	Descriptivas
Colección Especial, Juntas de Obras de Puertos	102	Identificativas
		Descriptivas
Provincias africanas	8	Identificativas
Muestras para prototipo del laboratorio	10	Identificativas

De las cinco colecciones, seguramente la más interesante sea la denominada “Estudio de Canteras”. Un proyecto de investigación que constituyó un intento de catalogación de los materiales pétreos explotados en todo el territorio peninsular con la ambición de que se convirtiera en una referencia a la hora de plantear las necesidades de cualquier obra pública. El estudio partió en 1958 de una petición de muestras a cada Jefatura de Obras Públicas. Se solicitaron muestras de unos 50 kilogramos, provenientes de las canteras empleadas con mayor continuidad en las obras de carreteras. Además, se pidió que se enviaran junto a cada una de las muestras una ficha con datos básicos: provincia y término municipal donde radica la masa de roca y la cantera; coordenadas geográficas de la cantera, sacadas del mapa del Instituto Geográfico, escala 1/50.000; denominación de la cantera; núcleo de población más cercano y distancia aproximada al mismo; vías de acceso a la cantera; forma de presentarse la masa rocosa; tiempo de explotación de la cantera; obras en las que se ha utilizado el material; comportamiento del material (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, 1959).

Una vez en el laboratorio, con el fin de conocer la calidad y las características de los materiales pétreos recibidos, las muestras eran sometidas a los siguientes ensayos normalizados: estudio petrográfico; ensayo de desgaste “Los Ángeles”; ensayo de acción del sulfato; determinación del peso específico aparente, real y efectivo; determinación de la absorción de agua; índice de forma; ensayo de desplazamiento por agua; ensayo equivalente centrífugo de queroseno (C. K. E.), e inmersión compresión. Aun siendo un trabajo de gran envergadura, con 242 muestras catalogadas de diecisiete provincias españolas, desgraciadamente nunca se llegó a completar (figura 12).



Figura 12. Mapa publicado en la memoria de 1960 del Laboratorio del Transporte y Mecánica del Suelo en el que se señalan las canteras nacionales estudiadas durante 1959 y 1960.

4. TIPOS DE ROCA INCLUIDOS EN LA COLECCIÓN

En uno de los trabajos más completos publicados hasta la fecha sobre esta colección, José Luis Salinas Rodríguez (Salinas Rodríguez, 2007), discípulo de Hernández-Pacheco en el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas y continuador de sus trabajos (figura 13), analiza la composición de las cinco colecciones en base a la naturaleza petrológica de las muestras, obteniendo la distribución porcentual que se presenta en la tabla 2.

Tabla 2. Distribución de los diferentes materiales geológicos en la colección Hernández-Pacheco (tomado de Salinas Rodríguez, 2007)

Litología (según descripción original)	Porcentaje
Arenisca calcárea, arenisca cuarzosa	5,7
Basalto	3,0
Caliza, dolomía, mármol	47,4
Caliza arcillosa, costrón calcáreo, travertino	1,3
Cuarcita	2,5
Cuarzo filoniano	0,4
Diorita, gabro	0,9
Escoria de fundición	0,9
Esquisto, micacita, filadio	1,5
Gneis	1,0

Litología (según descripción original)	Porcentaje
Granito, granodiorita	8,2
Grauvaca	0,9
Grava y gravilla natural, material de escombrera	7,3
Lamproíta	0,5
Molasa, arenisca friable	2,6
Ofita, diabasa, espilita	5,1
Peridotita, piroxenita	0,3
Pizarra	2,0
Pórfido cuarcífero, liparita, riolita	1,7
Pórfido diabásico, pórfido feldespático, pórfido sienítico	2,2
Sílex, pedernal	0,4
Suelo arenoso, suelo arcillo-arenoso, suelo margoso, yeso, jabre	3,8
Traquita, andesita	0,4

Según este estudio la mayoría de las muestras son de naturaleza calcárea (calizas, dolomías y mármoles), seguidas por las de naturaleza granítica (granito, granodiorita). Esta distribución es reflejo de varias circunstancias. Por un lado, responde a la distribución desigual de las diferentes litologías en la península ibérica, con gran predominancia de materiales calcáreos en el centro y este y de materiales graníticos en el oeste. Y, por otro lado, también influye decisivamente la diferente idoneidad de cada tipo rocoso



Figura 13. Fotografía de José Luis Salinas Rodríguez trabajando en el Gabinete en los años 70.

para su uso como material en las obras públicas, punto en el que destacan, por ejemplo, las ofitas y diabasas o los basaltos, rocas con excelentes propiedades resistentes, y que, en consecuencia, aparecen en la colección en un porcentaje superior al que les correspondería por su distribución geográfica. Otro posible factor que puede explicar esta distribución y que habría que sumar a los anteriores es la proximidad a los centros de demanda y su facilidad de explotación (Salinas Rodríguez, 2007).

5. PRESENTE Y FUTURO DEL GABINETE GEOLÓGICO FRANCISCO HERNÁNDEZ-PACHECO

A día de publicación de este trabajo, la colección se encuentra en fase de inventariado, catalogación y restauración. El propósito final es que cuando estas labores concluyan el Gabinete Geológico de Francisco Hernández-Pacheco y la Colección Histórica de Materiales Pétreos para la Obra Pública puedan estar disponibles para su visita y estudio en el Laboratorio de Geotecnia, previa solicitud al Centro de Estudios Históricos de Obras Públicas y Urbanismo del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEHOPU-CEDEX). Toda la información estará disponible en la página web del organismo.

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su gratitud a Rosa Maraver por su ayuda en la búsqueda bibliográfica.

7. DOCUMENTACIÓN RELACIONADA

Archivo fotográfico Eduardo Hernández-Pacheco. Biblioteca Histórica de la Universidad Complutense de Madrid.

Archivo fotográfico Francisco Hernández-Pacheco. Real Sociedad Española de Alpinismo Peñalara.

Salvador Benítez, A., Olivera Zaldúa, M., y Sánchez Vigil, J.M (2016). El fondo fotográfico Hernández-Pacheco de la Biblioteca Histórica Marqués de Valdecilla: metodología para su análisis documental. *Cuadernos de Documentación Multimedia*, 27(2): pp. 151-163.

Salvador Benítez, A. (2018). Fotografía científica y documentación del paisaje. El archivo fotográfico Hernández-Pacheco como modelo. *II Jornadas sobre Investigación en Historia de la Fotografía: 1839-1939, un siglo de fotografía*, Zaragoza, 25-27 de octubre.

8. REFERENCIAS

Alía Medina, M. (1976). Francisco Hernández-Pacheco y de la Cuesta. In *Memoriam. Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, tomo 70, cuaderno 4, pp. 691-694.

Ayala-Carcedo, F.J., et al. (2005). El XIV Congreso Geológico Internacional de 1926 en España. *Boletín Geológico y Minero*, 116 (2): pp. 173-184.

Barrera Morate, J.L. (1999). Centenario del nacimiento de Francisco Hernández-Pacheco 1899-1976. *Tierra y Tecnología*, 19, pp. 45-49.

Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (ed.) (1958). *Memoria 1958, Laboratorio del Transporte y Mecánica del Suelo*, Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, Madrid.

Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (ed.) (1959). *Memoria 1959, Laboratorio del Transporte y Mecánica del Suelo*. Madrid.

Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (ed.) (1960). *Memoria 1960, Laboratorio del Transporte y Mecánica del Suelo*. Madrid.

Hernández-Pacheco, F. (1930). *Fisiografía, geología y paleontología del territorio de Valladolid*. Madrid: Museo Nacional de Ciencias Naturales.

Hernández-Pacheco, F. (1932). *Estudio de la región volcánica central de España*. Madrid: Memorias de la Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Tomo 111.

Hernández-Pacheco, F. (1939). El segmento medio de las Sierras Centrales de Extremadura. *Separata Revista Las Ciencias*, 2.

Laboratorio del Transporte. (ed.) (1951). *El Laboratorio del Transporte de la Escuela Especial de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos*. Madrid.

Parra del Río, M.D. *Biografía Francisco Hernández-Pacheco y de la Cuesta*. Web Real Academia de la Historia.

Salinas Rodríguez, J.L. (2007). El archivo de rocas para la obra pública catalogadas por el prof. Francisco Hernández-Pacheco en el Laboratorio del Transporte del CEDEX. *De Re Metallica*, nº 9, pp. 19-28.

IDENTIFLIGHT: LA AUTOMATIZACIÓN EN LA GESTIÓN AMBIENTAL DE LA ENERGÍA EÓLICA

Jon Domínguez del Valle^{1*}

¹ Biólogo y consultor ambiental. Lacertida. Biodiversidad & Impacto Ambiental y Zefiro Partners S.L.

*Email: jon.dominguez@gmail.com

Una energía en expansión

Que la energía eólica goza de buena salud lo atestigua el hecho de que su capacidad productiva no para de crecer. Se estima que entre 2020 y 2025 se habrán instalado en el mundo 470 nuevos gigawatts (GW), que vendrán a sumarse a los 744 GW ya existentes. Una tendencia que también encontramos en la Unión Europea, donde se prevé un crecimiento sostenido del sector con la instalación de 105 GW durante estos cinco años (WindEurope, 2017 y 2021, Global Wind Energy Council, 2021).

España juega un papel protagonista dentro del marco europeo y global, pues se sitúa en el 4º y 5º puesto respectivamente en potencia instalada -con 27,4 GW producidos por 21.419 aerogeneradores-; y se espera que se instalen otros 6 GW de aquí al año 2025, el 70 % en centrales *onshore* (Asociación Empresarial Eólica, 2021). Ante este contexto de crecimiento acelerado del sector en nuestro territorio, es necesario extremar la eficacia de las estrategias de integración ambiental de las nuevas centrales eólicas, para poder dar respuesta a los objetivos de descarbonización de la economía y preservación del patrimonio natural que se contemplan en el Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático 2021-2030 (ver MITECO, 2020).

La gestión de impactos

Si bien la eólica es una fuente energética renovable con una menor huella ambiental que las energías convencionales, no significa que esté exenta de influencias sobre el medio ambiente (Saidur *et al.*, 2011, Leung y Yang, 2012, Dai *et al.*, 2015). Uno de sus principales y más conocidos impactos es la mortalidad de aves provocada por las propias infraestructuras -principalmente aerogeneradores, pero también tendidos eléctricos, torres meteorológicas, etc.-, cuya influencia puede llegar a ser particularmente perjudicial cuando actúa sobre especies longevas, con bajas tasas de renovación, raras, con problemas de conservación o de poblaciones aisladas (Drewitt y Langston, 2006, Drewitt y Langston, 2008, Marques *et al.*, 2014, Smith y Dwyer, 2018).

Aunque no existen estimaciones globales sobre las cifras de este impacto, estudios realizados en EE UU y Canadá calculan que cada año mueren 250.000-500.000 aves por colisión contra aerogeneradores (Johnson *et al.*, 2016), lo que en términos de potencia se ha traducido en una mediana de 1,3 individuos por MW instalado y año (AWWI, 2021). Y a pesar de que las extrapolaciones directas desde otros contextos hay que tomarlas con cautela, estos datos son útiles para hacernos una idea de la

magnitud de esta influencia en España, que podría estar en torno a varias decenas de miles de aves muertas al año.

Para dar respuesta a esta problemática, en las últimas décadas se han desarrollado estrategias de mitigación de la mortalidad que actúan sobre los diferentes niveles de desarrollo de los proyectos, desde la fase de planificación y diseño, hasta la de operación o desmantelamiento (May, 2017). Una de las estrategias que mejor está funcionando, es la parada selectiva de aerogeneradores en situaciones en las que el ave vuela tan cerca del área del rotor que se considera que hay riesgo inminente de colisión (De Lucas *et al.*, 2012, May, 2017). Esta técnica, diseñada inicialmente para ser ejecutada por operarios humanos, consiste en disponer una red de observadores capaz de cubrir los aerogeneradores durante todas las horas de luz e identificar los vuelos de riesgo de las especies objetivo, y requiere de importantes recursos en personal y tiempo (ver De Lucas *et al.*, 2012).

Siguiendo los fundamentos de este método y al calor del desarrollo de los algoritmos de reconocimiento de imágenes, la inteligencia artificial y las unidades de procesamiento gráfico (GPU), nacen los sistemas ópticos de parada y activación automática de aerogeneradores. Basados en tecnología monoscópica o estereoscópica en los más desarrollados, tienen como objetivo optimizar las paradas de las turbinas, sustituyendo y mejorando el rendimiento de los observadores humanos, al mismo tiempo que reducen las colisiones y minimizan la pérdida de producción (Gradolewski *et al.*, 2021). Su función básica es detectar de forma automática los movimientos de las aves en el entorno de los aerogeneradores y determinar, considerando el tipo de especie y el riesgo de colisión que representa su vuelo, si es conveniente o no su parada. *IdentiFlight* es uno de estos productos.

Tecnología de última generación

IdentiFlight basa su funcionamiento en la información obtenida por una red de ocho sensores ópticos de amplio campo de visión (WFOV) y dos sensores estereoscópicos de alta resolución (HRSC), instaladas sobre torretas metálicas de 7 a 15 m de altura (figura 1). Las cámaras WFOV son fijas, aportan una visión hemisférica alrededor de la posición (+64° a -1° en la horizontal), y son las responsables de detectar y discriminar los objetos en movimiento. Mientras que las cámaras HRSC tienen capacidad de giro de 360° (+83° a -18° en la horizontal), y su función estereoscópica les permite realizar cálculos precisos de distancias, posicionamiento tridimensional y velocidad de objetos en movimiento. Esta configuración faculta al módulo óptico para detectar vuelos al menos a 1000 m de distancia (McClure *et al.*, 2018, Rogers, 2022).

Los datos obtenidos por los sensores se envían a través de fibra óptica a las estaciones base, donde un software tipo SCADA los analiza, determina si se trata de una especie objetivo y decide si debe pararse o activarse un aerogenerador. Este programa utiliza tecnología de reconocimiento de patrones y se estructura a modo de red neuronal convolucional, analizando las imágenes



Figura 1. Detalle del módulo con los sensores ópticos de IdentiFlight (centro) y vista general de una posición móvil (izquierda) y de una fija (derecha).

de las aves en base a un conjunto de reglas predefinidas y dotándolo de capacidad de aprendizaje mediante la incorporación de nuevas bibliotecas de imágenes. De esta forma, el sistema puede actualizarse periódicamente en función de los datos aportados, mejorando su rendimiento y reduciendo los errores de identificación a media que acumula información y tiempo de funcionamiento. Finalmente, los análisis se plasman en reportes que recogen las características y posición del ave en el momento de la parada del aerogenerador, la trayectoria del vuelo, las causas de la parada, el número de paradas totales y las máquinas afectadas, el tiempo total y la franja horaria que el aerogenerador ha estado detenido, etc. (McClure *et al.*, 2018, McClure *et al.*, 2021b, Rogers, 2022).

El número total de unidades de IdentiFlight en un parque eólico está condicionado, principalmente, por el número de aerogeneradores que se desee controlar, pero también por la orografía, los tipos de hábitats, las posibilidades de conexión a red o el diseño de la central. Por tanto, la configuración final es propia de cada proyecto y responderá a los objetivos concretos de gestión exigidos.

Un producto evaluado

IdentiFlight es el sistema comercial que mejores rendimientos ha podido demostrar, como evidencian los resultados de las evaluaciones independientes a las que se ha sometido en distintos países y su participación en investigaciones científicas de primer nivel.

El primer examen se produce en el año 2016, cuando entra dentro de un proceso de certificación para validar su eficacia y permitir su instalación en los parques eólicos de EEUU. Allí, el Departamento de Energía encargó al American Wind Wildlife Institute (el actual Renewable Energy Wildlife Institute) analizar el rendimiento de IdentiFlight en comparación con el de observadores humanos. Los

resultados fueron muy satisfactorios y reflejaron que el sistema automático era sustancialmente más efectivo que las personas en la detección de vuelos y la identificación de especies (McClure *et al.*, 2018) (figura 2).

Entre 2018 y 2020, IdentiFlight participa en una nueva evaluación para autorizar su uso en los parques eólicos de Alemania. Esta vez es la Agencia Federal Alemana de Conservación de la Naturaleza (BfN) la que solicita un análisis basado en los criterios de eficacia prefijados por el Centro de Competencia para la Conservación de la Naturaleza y la Transición Energética (KNE) para este tipo de sistemas (ver KNE 2019). Nuevamente los resultados son notables, y los índices de IdentiFlight superan claramente los mínimos exigidos en todos los parámetros evaluados: detección, identificación, cobertura temporal y espacial, y radio de acción (Aschwanden y Liechti 2020, Reichenbach *et al.*, 2021) (figura 2).

En 2021 llega la validación en Australia, cuando se somete a un análisis de efectividad derivado de la aplicación de la legislación ambiental del país en el contexto operativo del parque eólico Wild Cattle Hill, en Tasmania. IdentiFlight no defrauda y vuelve a obtener resultados sobresalientes con índices de identificación y detección cercanos al 100 % (Rogers, 2022).

Actualmente, se encuentra en proceso de certificación en Francia dentro del proyecto Mape (Réduction de la Mortalité Aviaire dans les Parcs Éoliens en Exploitation), donde se espera que obtenga un aprobado holgado, pues el procedimiento de evaluación sigue los mismos criterios que estableció la KNE alemana (Corbeau *et al.*, 2021).

El otro componente principal en la confiabilidad de IdentiFlight lo constituyen las investigaciones científicas en las que ha participado. En estos estudios, publicados en revistas especializadas de primera línea, analizan la capacidad del sistema para obtener datos útiles en la

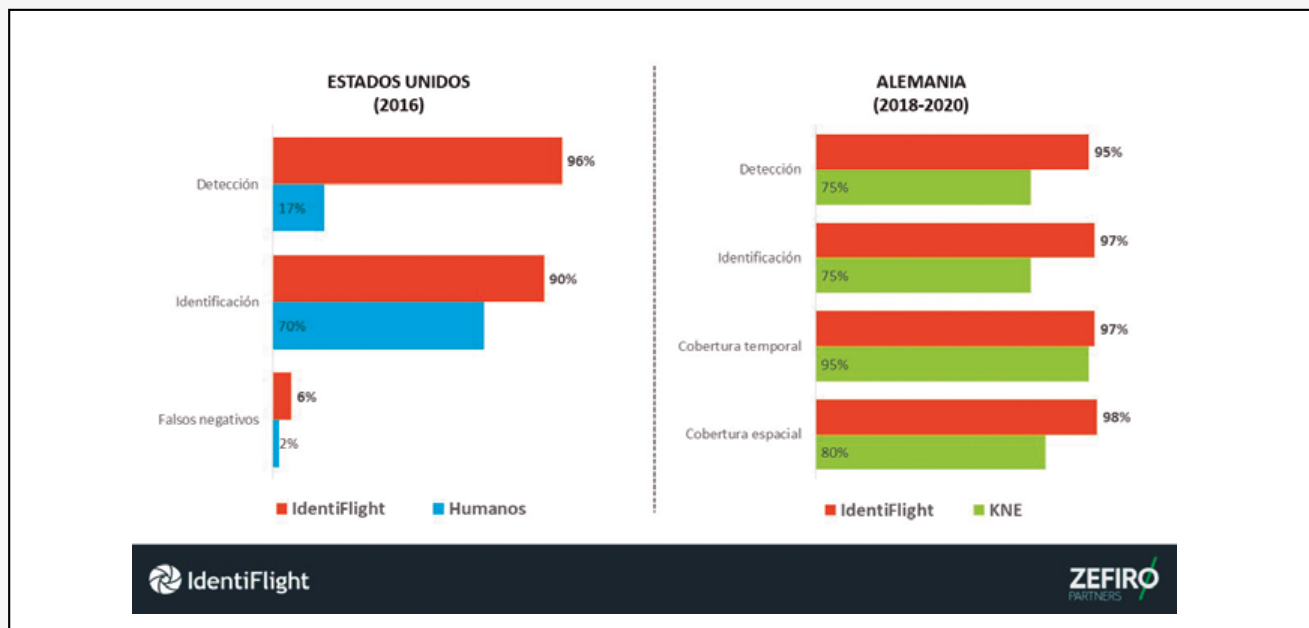


Figura 2. Resultados obtenidos por IdentiFlight en la certificación de EEUU (McClure *et al.*, 2018) y respecto a los mínimos exigidos por la certificación del KNE en Alemania (Reichenbach *et al.*, 2021).

gestión del impacto de los parques eólicos sobre las aves. Así, más allá de la publicación de los resultados de la primera certificación por McClure *et al.* (2018), la información recogida por IdentiFlight ha sido utilizada para caracterizar la reducción en la mortalidad de rapaces, analizar las trayectorias de los vuelos de las aves, definir zonas de riesgo, optimizar las paradas o evaluar futuras posiciones (ver McClure *et al.*, 2021a, McClure *et al.*, 2021b, Linder *et al.*, 2021, Rolek *et al.*, 2022). Estas investigaciones no hacen sino corroborar la fiabilidad del sistema.

Los datos

IdentiFlight ha pasado por un proceso de desarrollo y evaluación riguroso que lo ha posicionado como uno de los sistemas ópticos más fiables. A continuación, se sintetizan los valores de eficacia de sus principales parámetros (tabla 1). Siempre que ha sido posible, los índices se han expresado como la media de los valores reflejados en las distintas publicaciones. No obstante, hay que considerar que la inclusión de resultados de las primeras versiones del sistema (p.ej. McClure *et al.*, 2018), menos efectivas que las actuales; y las particularidades de la ubicación y los objetivos específicos de los estudios (p.ej.

Aschwanden y Liechti, 2020), han influido a la baja sobre algunos valores. La *especie objetivo* hace referencia al tamaño de las especies de aves para las que existen experiencias prácticas, si bien el sistema es capaz de incorporar nuevos taxones a través de las bibliotecas de imágenes y de su capacidad de aprendizaje *in situ*. Los parámetros están evaluados para un rango de actuación de 750-1000 m.

La certificación como garantía

El rápido despunte de esta tecnología, de la que están apareciendo numerosos productos comerciales, obliga a ser cautos en su aplicación. Muchos de estos sistemas se encuentran en fases incipientes de desarrollo, certificación, o no cuentan con avales independientes que confirmen su efectividad. Esta situación puede conducir a la implantación de modelos que no sean capaces de cumplir con las expectativas de gestión de impactos que se les supone. Por tanto, para poder dar seguridad a los usuarios y garantizar unos mínimos de eficacia, sería necesario implantar un protocolo de certificación común e independiente que evalúe las cualidades de los diferentes productos disponibles. Para ello, tendríamos que aprender de las experiencias iniciadas en otros países y comprometer a

Tabla 1. Datos de eficacia obtenidos por IdentiFlight

EFICACIA DE IDENTIFLIGHT		
Parámetro	Índice	Referencia
Detección de vuelos	>95 %	McClure <i>et al.</i> (2018), Aschwanden y Liechti (2020), Reichenbach <i>et al.</i> (2021), Rogers (2022)
Identificación de especies	>94 %	McClure <i>et al.</i> (2018), Aschwanden y Liechti (2020), Reichenbach <i>et al.</i> (2021), Rogers (2022)
Rango de actuación	1000 m	McClure <i>et al.</i> (2018), McClure <i>et al.</i> (2021a), McClure <i>et al.</i> (2021b), Rogers (2022), Rolek <i>et al.</i> (2022)
Falsos positivos	2,8 %	McClure <i>et al.</i> (2018), Reichenbach <i>et al.</i> (2021), Rogers (2022)
Reducción de mortalidad	84 %	McClure <i>et al.</i> (2021a), Rogers (2022)
Pérdida de producción	0,85 %	Rogers (2022)
Especie objetivo	Tamaño córvido o mayores	McClure <i>et al.</i> (2018), Aschwanden y Liechti (2020), Reichenbach <i>et al.</i> (2021), McClure <i>et al.</i> (2021a), McClure <i>et al.</i> (2021b), Rogers (2022), Rolek <i>et al.</i> (2022)

las administraciones, promotores, gestores y resto de actores implicados, con la necesidad de trabajar de manera coordinada para dar una salida ordenada a este tipo de sistemas anticolidión. Confiamos en que la rápida implantación que se espera para los próximos años en España pueda hacerse con garantías suficientes de calidad.

Referencias

- Aschwanden, J., y Liechti, F. (2020). *Test of the automatic bird detection system Identiflight on the WindForS test field as part of nature conservation research* (Report No. 149707/00111). Report by German Federal Agency for Nature Conservation (BfN).
- Asociación Empresarial Eólica (2021). *Anuario Eólico 2021. La voz del sector*. <https://aeolica.org/wp-content/uploads/2021/06/AF-ANUARIO-AEE-2021-web.pdf>
- AWWI (2021). *Wind turbine interactions with wildlife and their habitats: A summary of research results and priority questions*. American Wind Wildlife Institute. <https://rewi.org/wp-content/uploads/2020/07/AWWI-Wind-Power-Wildlife-Interactions-Summary-2021.pdf>
- Corbeau, A., Sophie Dupont, S., y Besnard, A. (2021). *Detection-reaction systems in onshore windfarms, a mitigation solution to reduce bird fatalities: Principles for a relevant assessment of their performances*. MAPE Guidelines. https://mape.cnrs.fr/wp-content/uploads/2022/02/Guidelines_WP4_Version_Finale.pdf
- Dai, K., Bergot, A., Liang, C., Xiang, W.N., y Huang, Z. (2015). Environmental issues associated with wind energy—A review. *Renewable Energy*, Vol. 75: pp. 911-921. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.10.074>
- De Lucas, M., Ferrer, M., Bechard, M.J., y Muñoz, A.R. (2012). Griffon vulture mortality at wind farms in southern Spain: Distribution of fatalities and active mitigation measures. *Biological Conservation*, 147(1): pp. 184-189. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2011.12.029>
- Drewitt, A.L., y Langston, R.H. (2006). Assessing the impacts of wind farms on birds. *Ibis*, 148(s1): pp. 29-42. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1474-919X.2006.00516.x>
- Drewitt, A.L., y Langston, R.H. (2008). Collision effects of wind-power generators and other obstacles on birds. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1134(1): pp. 233-266. DOI: <https://doi.org/10.1196/annals.1439.015>
- Global Wind Energy Council (2021). *Global Wind Report 2021*. <https://gwec.net/global-wind-report-2021/>
- Gradolewski, D., Dziak, D., Martynow, M., Kaniecki, D., Szurlej-Kielanska, A., Jaworski, A., y Kulesza, W.J. (2021). Comprehensive bird preservation at wind farms. *Sensors*, 21(1), 267. DOI: <https://doi.org/10.3390/s21010267>
- Johnson, D.H., Loss, S.R., Smallwood, K.S., y Erickson, W.P. (2016). Avian fatalities at wind energy facilities in North America: A comparison of recent approaches. *Human-Wildlife Interactions*, 10(1): Article 3. DOI: <https://doi.org/10.26077/a4ec-ed37>
- KNE (2019). *Anforderungen an eine fachlich valide Erprobung von technischen Systemen zur bedarfsgerechten Betriebsregulierung von Windenergieanlagen*. https://www.naturschutz-energiewende.de/wp-content/uploads/KNE-Anforderungsprofil_an_eine_valide_Erprobung_von_technischen_Systemen_2019.pdf
- Leung, D.Y., y Yang, Y. (2012). Wind energy development and its environmental impact: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(1): pp. 1031-1039. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.09.024>
- Linder, A.C., Lyhne, H., Laubek, B., Bruhn, D., y Pertoldi, C. (2021). Quantifying raptors' flight behavior to assess collision risk and avoidance behavior to wind turbines. *Preprints*, 2021020391. DOI: <https://doi.org/10.20944/preprints202102.0391.v1>
- Marques, A.T., Batalha, H., Rodrigues, S., Costa, H., Pereira, M.J.R., Fonseca, C., Mascarenhas, M., y Bernardino, J. (2014). Understanding bird collisions at wind farms: An updated review on the causes and possible mitigation strategies. *Biological Conservation*, Vol. 179: pp. 40-52. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2014.08.017>
- May, R. (2017). Mitigation for Birds. En Perrow, M.R. (ed.). *Wildlife and Wind Farms, Conflicts and Solutions. Volume 2. Onshore: Monitoring and Mitigation* (pp. 124-144). Pelagic Publishing.
- McClure, C.J., Martinson, L., y Allison, T.D. (2018). Automated monitoring for birds in flight: Proof of concept with eagles at a wind power facility. *Biological Conservation*, Vol. 224: pp. 26-33. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2018.04.041>
- McClure, C.J.W., Rolek, B.W., Dunn, L., McCabe, J.D., Martinson, L., y Katzner, T. (2021a). Eagle fatalities are reduced by automated curtailment of wind turbines. *Journal of Applied Ecology*, 58(3): pp. 446-452. DOI: <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13831>
- McClure, C.J., Rolek, B.W., Braham, M.A., Miller, T.A., Duerr, A.E., McCabe, J.D., Dunn, L., y Katzner, T.E. (2021b). Eagles enter rotor-swept zones of wind turbines at rates that vary per turbine. *Ecology and Evolution*, 11(16): pp. 11267-11274. DOI: <https://doi.org/10.1002/ece3.7911>
- MITECO (2020). Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático 2021-2030. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, Madrid. https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/impactos-vulnerabilidad-y-adaptacion/pnacc-2021-2030_tcm30-512163.pdf
- Reichenbach, M., Reersd, H., y Greule, S. (eds.) (2021). How well does Identiflight protect the red kite (*Milvus milvus*)? Studies on the effectiveness of a camera system to protect against collisions wind turbines. ARSU GmbH-Renewable Energies Europe e3 GmbH. https://www.arsu.de/template/images/files/21-10-07_IDF-Endbericht.pdf
- Rogers, D. (2022). *Assessment of effectiveness of the Identiflight® avian detection system*. Document Number: CH-PM-REP-0125. Goldwind Australia Pty Ltd. https://cattlehillwindfarm.com/wp-content/uploads/2022/03/Assessment-of-IDF-Avian-Detection-System-FINAL_updated.pdf
- Rolek, B.W., Braham, M.A., Miller, T.A., Duerr, A.E., Katzner, T.E., McCabe, J.D., Dunn, L., y McClure, C.J.W. (2022). Flight characteristics forecast entry by eagles into rotor-swept zones of wind turbines. *Ibis*, online version. DOI: <https://doi.org/10.1111/ibi.13076>
- Saidur, R., Rahim, N.A., Islam, M.R., y Solangi, K.H. (2011). Environmental impact of wind energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(5): pp. 2423-2430. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.02.024>
- Smith, J.A., y Dwyer, J.F. (2016). Avian interactions with renewable energy infrastructure: An update. *The Condor* 118(2): pp. 411-423. DOI: <https://doi.org/10.1650/CONDOR-15-61.1>
- WindEurope (2017). *Wind Energy in Europe: Scenarios for 2030*. <https://windeurope.org/wp-content/uploads/files/about-wind/reports/Wind-energy-in-Europe-Scenarios-for-2030.pdf>
- WindEurope (2021). *Wind Energy in Europe. 2020 Statistics and the Outlook for 2021-2025*. <https://windeurope.org/intelligence-platform/product/wind-energy-in-europe-2020-statistics-and-the-outlook-for-2021-2025/>

COMPUTACIÓN CUÁNTICA

Antonio Acín^{1*}

¹ Doctor en Física Teórica. ICREA Profesor de investigación. ICFO-Instituto de Ciencias Fotónicas. Castelldefels (Barcelona).

*Email: antonio.acin@icfo.eu

La información es un concepto clave en nuestra sociedad que tiene un impacto inimaginable en nuestro día a día: desde que nos levantamos hasta que nos acostamos, miles de mensajes son intercambiados por internet o las redes de datos móviles, así como miles de operaciones, de mayor o menor complejidad, son ejecutadas en los distintos dispositivos procesadores de información, desde supercomputadores hasta nuestros propios móviles. Todos estos procesos operan con bits, que no es más que la unidad básica de información y que puede tomar dos valores, cero o uno. Nuestra conexión de internet en casa, la capacidad de memoria de nuestro móvil o la velocidad del procesador de nuestro portátil, todo se mide en bits.

Hace ya unas cuantas décadas, diversos investigadores comenzaron a plantearse la siguiente pregunta: ¿qué pasaría si usáramos partículas cuánticas, como los átomos o los fotones de luz, para realizar todas estas operaciones de transmisión y procesamiento de información? Dicho de otro modo: ¿qué pasa si almacenamos los bits en partículas cuánticas? Por aquel entonces, se trataba de una posibilidad muy estimulante desde un punto de vista conceptual y teórico, pero cercana a la ciencia ficción teniendo en cuenta el estado de las tecnologías.

Sin embargo, se comprendió relativamente pronto que usar bits codificados en partículas cuánticas, los conocidos como **bits cuánticos o qubits**, abría nuevas oportunidades radicalmente distintas para procesar y transmitir información: **ordenadores con mayor potencia de cálculo o nuevos esquemas criptográficos** para asegurar la confidencialidad de nuestras comunicaciones son dos de los ejemplos más importantes que ilustran las posibilidades que aparecen cuando se usan los *qubits*.

Paralelo a todo este desarrollo teórico, las tecnologías siguieron avanzando y desde hace varios años se es capaz de preparar y operar con *qubits*, por lo que los distintos resultados teóricos van siendo demostrados primero en el laboratorio, para luego ser transferidos al mundo de la empresa.

En los últimos años, todo este esfuerzo en el desarrollo de las tecnologías cuánticas de la información ha tenido un empuje considerable a través de esfuerzos de financiación de organismos públicos, como por ejemplo el **Quantum Flagship** (iniciativa pan-europea en tecnologías cuánticas) de la Unión Europea, o importantes inversiones de grandes compañías.

El **ordenador cuántico** es una de las aplicaciones en las que hay puestas más esperanzas. ¿Qué es un ordenador cuántico? Para responder a esta pregunta, es útil recordar qué es un ordenador clásico: una máquina que

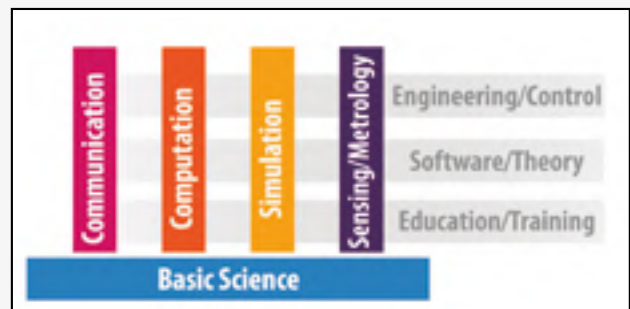


Figura 1. Quantum Flagship: la estructura del Quantum Flagship es a través de cuatro pilares fundamentales, en vertical en la figura. Estos describen las cuatro actividades principales para el desarrollo de las tecnologías cuánticas de la información: (i) comunicación, es decir, cómo enviar bits cuánticos en redes de comunicaciones, (ii) computación, cómo diseñar ordenadores cuánticos, (iii) simulación, cómo simular sistemas cuánticos de interés de manera controlada y (iv) sensado, es decir, cómo usar las tecnologías cuánticas para medidas de gran precisión. La estructura refleja el rol que la ciencia básica sigue jugando como soporte a estas actividades, así como identifica actividades transversales de ingeniería y control, teoría y software, y educación. Este texto se basa sobre todo en la parte de computación cuántica, pero debe entenderse que el campo es mucho más general y rico en actividades y desafíos.

toma información codificada en bits, sobre las que realiza una serie de transformaciones para resolver un problema, cuya solución nos devuelve de nuevo en bits. Aunque pueda parecer obvio, un ordenador cuántico no es más que la traslación de esta idea a un entorno cuántico: una máquina que es capaz de procesar información en bits cuánticos para resolver problemas. La diferencia, sin embargo, radica en que este procesamiento se realiza usando los fenómenos de la física cuántica, los cuales no tienen análogo en nuestro mundo macroscópico clásico y que, por tanto, son inaccesibles a nuestros ordenadores clásicos actuales. Es decir, el ordenador cuántico puede usar más operaciones, tiene a su disposición más herramientas para resolver problemas complejos y, por consiguiente, puede llegar a proporcionar soluciones a estos de manera mucho más eficiente. A esta situación se la conoce también como **ventaja cuántica** (*quantum advantage*). Esto no debe interpretarse como que todo problema se resolverá de manera más eficiente en un ordenador cuántico y, de hecho, existen problemas para los cuales un ordenador cuántico y clásico ofrecen el mismo rendimiento. Pero, por otra parte, ya se conocen distintos problemas para los cuales sí que se obtiene una ventaja computacional cuántica.

Probablemente, la razón principal que explica esta mayor potencia de cálculo radica en que los *qubits*, como cualquier partícula cuántica, pueden estar en estados **superposición**, lo que de algún modo permite realizar operaciones sobre el bit de manera paralela en los dos valores que puede tomar, cero y uno. Mantener estas superposiciones es imprescindible para optar a la ventaja cuántica. Sin ellas, el bit cuántico ya no puede estar en una superposición y se convierte en un bit clásico que solo toma los valores cero o uno. Volvemos por

tanto al paradigma de computación clásico. La necesidad de mantener las superposiciones es la razón por la cual construir un ordenador cuántico es una tarea compleja. El ruido y las interacciones no controladas con el entorno destruyen las superposiciones de manera dramática: si el ruido es alto, la ventaja cuántica se pierde. Es necesario por tanto preparar y procesar los *qubits* en un entorno aislado del exterior, por ejemplo, a muy baja temperatura, y que podamos manipular de manera controlada. Aquí reside el gran desafío tecnológico.

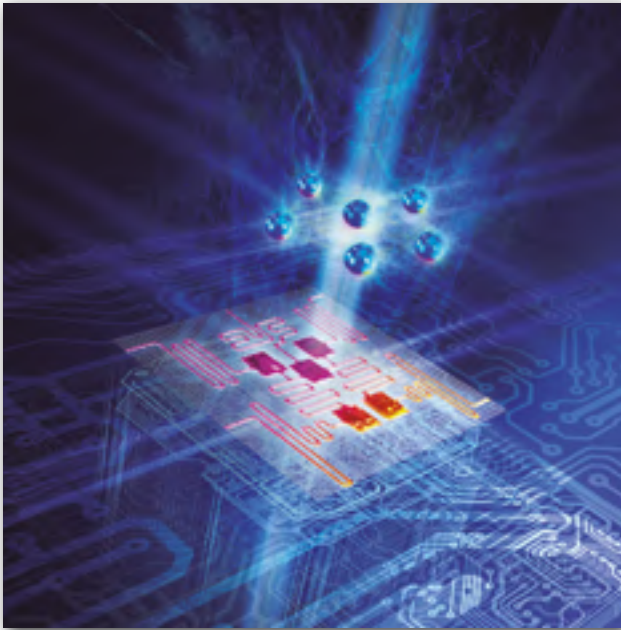


Figura 2. Superposiciones cuánticas: los ordenadores cuánticos realizan operaciones en conjuntos de bit cuánticos. Estos se pueden preparar en estados superposición, lo que abre nuevas posibilidades para la construcción de nuevos algoritmos. Para que un ordenador cuántico proporcione una ventaja cuántica es necesario, si bien no suficiente, mantener estas superposiciones durante todo el proceso de cálculo y que se puedan manipular de manera controlada en ausencia de ruido. Crédito de la imagen: Quantum Flagship.

A pesar de estas dificultades, ¿hemos conseguido construir un ordenador cuántico? Si no, ¿cuándo lo tendremos? Estas son preguntas que suelo recibir cuando doy una charla de divulgación sobre el tema. A mi entender, no son las preguntas que debemos hacernos. De hecho, planteémoslas para los ordenadores que tenemos en la actualidad: ¿hubo un día concreto en el que se tuvo el primer ordenador? Es imposible concretar esta fecha. Podríamos de hecho afirmar que ya tenemos ordenadores cuánticos, ya que en diversos laboratorios se ha conseguido preparar y operar con unos pocos *qubits*, dos, tres, o quizás hasta diez, con unos niveles de ruido muy bajos. Son ejemplos en toda regla de ordenadores cuánticos, porque para la definición del concepto, el tamaño no importa. Pero no son ordenadores cuánticos que den una ventaja, porque su poder computacional es muy limitado. Por tanto, lo que aún no ha sucedido es que, empleando un ordenador cuántico, o de manera más general, con una máquina de cálculo que use los fenómenos cuánticos, se haya conseguido una mejora computacional para un problema de relevancia.

¿Cómo deben ser interpretadas las noticias que de manera sistemática van apareciendo en la prensa sobre nuevos ordenadores cuánticos? Son hitos tecnológicos que nos aproximan más hasta el objetivo de la ventaja cuántica, pero esta aún no se ha conseguido. A menudo, todos estos resultados se presentan como récords en términos de *qubits*, pero este número en sí mismo no quiere decir demasiado, dado que el número de los mismos importa, pero también su calidad. Es sabido que tener muchos *qubits* con altos niveles de ruido no llevará a la ventaja cuántica. Por lo tanto, y aunque a menudo no es sencillo, siempre hay que leer la letra pequeña de estas noticias.

Con el desarrollo tecnológico se van añadiendo certezas, pero sigue habiendo muchas incógnitas. Por ejemplo, no sabemos cuál será la tecnología que triunfará en la carrera hacia la ventaja cuántica y aún hoy en día existen distintas alternativas: sistemas superconductores, semi-conductores, iones o átomos atrapados, o esquemas puramente ópticos son desarrollados por distintos grupos de investigación y empresas. Tampoco sabemos qué enfoque conseguirá antes la ventaja. Por un lado, existe la aproximación más tradicional, que busca ir consiguiendo ordenadores con más *qubits* y menores niveles de ruido que nos permitan realizar todas las posibles operaciones cuánticas con ellos, los que se conocen como **ordenadores cuánticos de propósito general**. Pero también se considera un enfoque más directo, en el cual se intenta entender si, con los dispositivos que se tiene ahora, con centenares o millares de *qubits* imperfectos, ya podemos resolver algunos problemas concretos de manera más eficiente, por ejemplo, para el diseño de mejores materiales o la comprensión de las reacciones químicas. Este enfoque se conoce como **dispositivos NISQ** por, en inglés, *Noisy Intermediate-Scale Quantum*, es decir dispositivos cuánticos ruidosos de escala intermedia. Las opiniones y posturas entre los expertos son diversas y, de hecho, se conoce como “creyentes NISQ” a aquellos que esperan que una ventaja cuántica ya se pueda conseguir con estos ordenadores imperfectos.

¿Cuándo tendremos entonces la ventaja cuántica? Por supuesto, siempre están los más pesimistas que piensan que nunca. Si aceptamos que en algún momento se conseguirá, la respuesta depende en gran parte de si se alcanzará con las primeras generaciones de ordenadores imperfectos tipo NISQ o con los del propósito general. En el primer caso, la ventaja cuántica se podría dar en un plazo de tres a cinco años. En la segunda opción, es probable que se requieran al menos cinco años, siendo probablemente optimistas.

Como también sabemos, en computación no todo es *hardware*. Tan importante como este es el **software cuántico**, es decir, el desarrollo y aplicación de algoritmos que permitan extraer el máximo poder de los ordenadores cuánticos, ya sean tipo NISQ u ordenadores de propósito general. Desde académicos a empresas, se trabaja para responder a esta pregunta en problemas, por ejemplo, de optimización, logística, en el diseño de materiales o simulación de procesos físicos y químicos, o en el contexto de la inteligencia artificial.

Finalmente, un pilar importante en el mundo de la cuántica sigue siendo la **investigación básica y la**



Figura 3. En la imagen, el profesor Antonio Acín (Fuente: ICFO/V. Montero).

educación. Por un lado, y a pesar de todos los hitos tecnológicos de los últimos tiempos, la carrera para el desarrollo de mejores ordenadores cuánticos no es solo una cuestión puramente tecnológica. Existen problemas de ciencia básica que necesitan ser bien entendidos y que limitan de un modo considerable este desarrollo. Y paralelo a todo este crecimiento, la demanda de personal cualificado y con conocimientos cuánticos, no solo en física, sino también en otras disciplinas como la ingeniería e informática, no deja de crecer. Son necesarios más y más perfiles con una educación cuántica. Ninguno de los objetivos del campo saldrá adelante sin la generación de talento, requisito por ejemplo que ha sido comprendido a nivel europeo con la creación de distintas iniciativas en **quantum education**.

¿Cuál es la situación en España? A nivel científico, existen grupos punteros, tanto a nivel teórico como experimental, razonablemente distribuidos por el territorio y que, por ejemplo, participan de manera activa en distintas iniciativas del *Quantum Flagship*. También han nacido varias empresas de cara a desarrollar y explotar el talento y conocimiento que existe, y las perspectivas potenciales de progreso. Y, finalmente, existen distintos programas de másteres que forman a los futuros desarrolladores de las tecnologías cuánticas. Posiblemente, la gran carencia en estos momentos es la

falta de un programa nacional de tecnologías cuánticas, que aglutine, dé coherencia y coordine los esfuerzos en el país entre los distintos actores, desde el mundo académico a las pequeñas y grandes empresas. De hecho, muchos países de nuestro entorno ya tienen programas nacionales de tecnologías cuánticas, por lo que partimos con cierto retraso. Esperemos que en los próximos meses se pueda corregir este déficit y se consiga definir una estrategia nacional, con el nivel adecuado de financiación, lo que permitirá tener una posición de mayor fuerza en un entorno internacional muy competitivo, donde la captación de recursos y talento es cada vez más complicada.

En cualquier caso, estamos en un momento muy interesante de gran actividad en la que todos los actores relevantes trabajan de manera conjunta para entender cómo explotar todo el potencial de las tecnologías cuánticas. El alcance de las mismas no está claro y, ahora mismo, parece improbable, de momento, que tengamos, a nivel de usuarios, portátiles cuánticos. Pero estoy convencido de que tendremos en un futuro, a nuestra disposición, ordenadores más potentes gracias a los fenómenos cuánticos. Y no es necesario un gran esfuerzo de abstracción para entender que una mayor capacidad de cálculo permitirá resolver problemas que en la actualidad limitan nuestro progreso y bienestar como sociedad.

CEREMA, LA INSTITUCIÓN HOMÓLOGA DEL CEDEX EN FRANCIA

CEDEX y CEREMA son dos organismos que comparten muchas similitudes, como veremos a continuación. Por eso, en noviembre de 2020 CEDEX y CEREMA firmaron un protocolo de colaboración, en virtud del cual se espera potenciar la colaboración entre ambas instituciones en aquellas áreas de actividad de interés compartido. A través de un mejor conocimiento mutuo, el objetivo es llevar a cabo acciones conjuntas tanto en términos de investigación como de asistencia técnica, e incluso intercambios entre técnicos, actividad que se espera iniciar a partir de 2023.

CEREMA (*Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement* - Centro de Estudios sobre Riesgos, Medio Ambiente, Movilidad y Planificación Urbana) fue creado el 1 de enero de 2014, mediante la fusión de diversas entidades: el Centro de Estudios sobre las Redes, los Transportes, el Urbanismo y las Construcciones Públicas (CERTU), el Centro de Estudios Técnicos Marítimos y Fluviales (CETMEF), el Servicio de Estudios sobre los Transportes, las Carreteras y sus Acondicionamientos (SETRA) y los ocho centros de estudios técnicos del equipamiento, ubicados en regiones (CETE). El 1 de enero de 2020, el Centro Nacional de

Puentes de Emergencia (CNPS) se integró dentro de las actividades de CEREMA.

CEREMA se encuadra dentro del Ministerio de Transición Ecológica y Cohesión Territorial, trabajando para diferentes tipos de clientes: autoridades estatales y locales y empresas.

A 31 de diciembre de 2021, CEREMA contaba con 2.492 empleados, incluidos 1.700 ingenieros técnicos y 180 investigadores. Tiene 26 sedes en la Francia metropolitana y en el extranjero, incluyendo 3 departamentos técnicos que gestionan la actividad (figura 1).

Su presupuesto anual es de 255 millones de euros, aproximadamente, el 80 % de los cuales se financia con una asignación del Parlamento.

Misión

La misión de CEREMA es apoyar las políticas públicas de planificación urbana, movilidad y adaptación al cambio climático. En este sentido, está etiquetado como Instituto Carnot. Esta etiqueta, otorgada por el Ministerio francés a cargo de la investigación, tiene como objetivo fortalecer los vínculos entre los actores públicos y privados, a través de un sistema de incentivos financieros. Reconoce la excelencia científica de CEREMA en sus seis campos de actividad y su capacidad para ponerla al servicio del mundo socioeconómico, compuesto

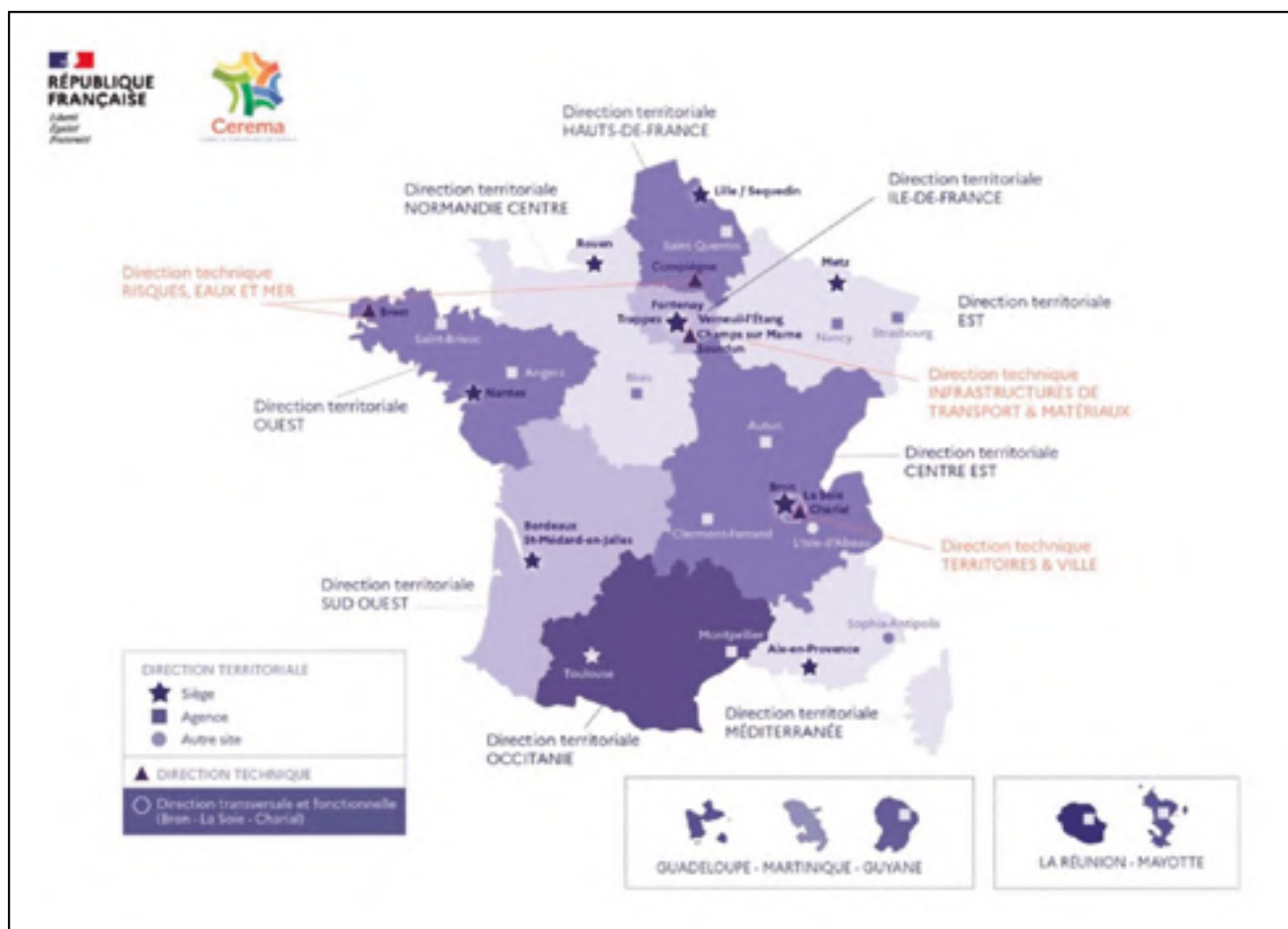


Figura 1. Localización de los centros territoriales de CEREMA.

por empresas (desde startups hasta grandes grupos internacionales) y autoridades locales, de todas las escalas. CEREMA ha bautizado a su Instituto Carnot como Clim'adapt con el fin de posicionarlo para afrontar el reto climático. Sus actividades están orientadas en pos de la excelencia técnica al servicio de la economía francesa y su adaptación a los efectos del cambio climático.

Áreas de actividad

Las principales áreas de actividad de CEREMA son:

- **Experimentación e Ingeniería Territorial:** apoyando las estrategias de transición de ordenación del territorio, desarrollo y cohesión de territorios, ciudades inteligentes, territorios resilientes, la puesta en valor de los espacios rurales y el control de la artificialización del suelo a través de diferentes instrumentos, como la herramienta nacional dedicada a la resiliencia de los territorios.
- **Edificación:** mejorando el impacto de los edificios sobre el clima y su calidad de uso, a través de una optimización del rendimiento de los edificios públicos y terciarios, y la gestión de activos inmobiliarios públicos, como el proyecto ACLIBIO, que ha permitido a los edificios adaptarse al cambio climático con aislamiento de base biológica.
- **Movilidad:** promoviendo la movilidad sostenible y segura, trabajando en el impacto de la movilidad en el clima y la salud, en la movilidad conectada y autónoma y en la seguridad vial. CEREMA ha creado una serie de recomendaciones que facilitan la circulación de ciclistas y ha establecido un sistema nacional de certificados de ahorro energético que promueve el desarrollo de estrategias de logística urbana sostenible (InterLUD).
- **Infraestructuras de Transporte:** asegurando la sostenibilidad de las infraestructuras de transporte, particularmente frente al cambio climático, a través de la gestión de infraestructuras y estructuras de ingeniería, las carreteras del futuro y la resiliencia de las infraestructuras al cambio climático. CEREMA es miembro de comités de normalización europeos e internacionales.
- **Medio Ambiente y Riesgos:** combatiendo los riesgos naturales y los impactos en el medio ambiente, el clima y el consumo de recursos de los proyectos de desarrollo y transporte, a través de la gestión del agua y la naturaleza en la ciudad, la economía circular de los materiales de construcción, el despliegue de energías renovables. CEREMA cuenta con herramientas innovadoras como la elección de árboles y arbustos urbanos (SESAME) o el mapa de ruido (PlaMADE), que permite el almacenamiento y uso de datos ambientales.
- **Mar y Litoral:** garantizando la seguridad y el desarrollo sostenible de las actividades marítimas.

Asimismo, cabe destacar que CEREMA cuenta con un extensísimo fondo documental, de más de 2.600 publicaciones, produciendo cerca de un centenar de nuevas



Figura 2. CEREMA cuenta con la pasarela Epsilon, un dispositivo innovador diseñado para realizar la inspección, mantenimiento y reparación de todo tipo de puentes, reduciendo así el impacto sobre el tráfico rodado. Fotografía Arnaud Bouissou – Terra.

publicaciones al año. Una de sus mayores fortalezas es servir del vínculo entre los actores públicos y privados, la investigación y las políticas públicas.

Actividad internacional

CEREMA participa en proyectos europeos e internacionales. Es socio en 38 proyectos financiados por la Comisión Europea, principalmente dentro del programa de Investigación e Innovación Horizonte Europa y dentro del componente de cooperación territorial Interreg del fondo de desarrollo regional FEDER. Los proyectos se refieren al acondicionamiento sostenible del territorio, en colaboración con las autoridades locales, los socios industriales y académicos de toda Europa. También proporciona misiones de capacitación y asistencia técnica, mediante el despliegue de sus expertos, en Europa e internacionalmente. A nivel internacional, Trabaja en varios países para la implementación de la planificación sostenible de los usos del suelo, como, por ejemplo, para el metro de Surat en la India, en materia de acústica y vibraciones; o en Colombia, para reducir los accidentes de tráfico. A nivel institucional, CEREMA busca desarrollar colaboraciones con otros organismos internacionales, como es el caso del CEDEX.

Igualmente, CEREMA también está muy involucrado a nivel europeo en el ámbito de la normalización, y a nivel internacional en programas de capacitación.

Actividad investigadora

En lo que se refiere a equipos de investigación, CEREMA cuenta en estos momentos con **11 equipos de investigación** involucrados en más de 150 proyectos con altos niveles de preparación tecnológica:

- El equipo de investigación en Psicología Aplicada (PsyCAP)
- El equipo de investigación Soil, Site and Structural Response to Dynamic Stress (REPSODY)
- El proyecto del equipo de geomateriales y geomecánica (GeoCoD)
- El equipo del proyecto de investigación Hidráulica para el Desarrollo (HA)

- El trabajo del equipo de transferencias e interacciones relacionadas con el agua en entornos construidos (TEAM)
- El proyecto del equipo de Disrupciones y Resiliencia de los Sistemas de Movilidad (ESPRIM)
- El equipo de Sistemas Inteligentes de Transporte (ITS)
- El proyecto del equipo de Edificios Eficientes en su Entorno (BPE)
- El trabajo del equipo del proyecto Sostenibilidad, Innovación y Valorización de Materiales Alternativos (DIMA)
- El equipo de CEREMA forma parte de la Unidad Conjunta de Investigación Acústica del Medio Ambiente (UMR AE), creada por CEREMA y UGE (Universidad Gustave Eiffel) en 2018
- El proyecto de Evaluación No Destructiva de Estructuras y Materiales (ENDSUM)

Plataformas tecnológicas

CEREMA cuenta con **11 plataformas tecnológicas** diseñadas para realizar experimentos en el laboratorio o en situaciones reales, en los campos del Medio Ambiente, Infraestructura, Ruido, Vibraciones, Condiciones Climáticas o Materiales.

Las plataformas disponibles son las siguientes:

- Geosynthetics, que ofrece servicios de pruebas y experimentación, en laboratorio o *in situ*, para proporcionar soluciones a los problemas de protección ambiental (aguas subterráneas, erosión del suelo, riesgos naturales, almacenamiento de residuos) y la sostenibilidad de la infraestructura y las obras de ingeniería civil (pavimentos, terraplenes, presas, entre otros). Se ubica en Nancy, Rouen y Lyon.
- La experiencia en química analítica al servicio del medio ambiente y los materiales de ingeniería civil permite responder a los problemas sobre la calidad del aire, el agua, el suelo y los impactos del uso de productos químicos en el medio ambiente y en el estado de la infraestructura de transporte (corrosión, problemas en el hormigón). Esta plataforma se encuentra en Aix, Clermont-Ferrand, Lille, Nancy y Trappes.
- Plataforma especializada en el análisis y caracterización de vibraciones y su impacto en el entorno durante las fases de desarrollo, implementación u operación. Está localizada en Lille, Rouen, París, Nancy, Autun, Clermont-Ferrand, Bron, Toulouse, Blois y St Brieuc.
- Plataforma para el análisis del comportamiento mecánico de suelos y rocas blandas y los fenómenos cíclicos que pueden degradarlos, ubicada en Aix en Provence.
- Plataforma para caracterizar la adherencia de materiales y recubrimientos, abarcando desde la medida de micro textura hasta la mega textura, tanto en el laboratorio como *in situ*, ubicada en Lyon, Lille, Rouen, Angers.
- Plataforma de diseño y prototipado de *hardware*, desde la fase de estudio hasta la fabricación del producto terminado. Se localiza en Rouen y Angers.
- Plataforma de simulación de condiciones climáticas degradadas (Pavin), que cuenta con una instalación singular que permite simular condiciones artificiales y controladas de lluvia y niebla a escala real. Ubicada en Clermont-Ferrand.
- La plataforma de edificación, que permite probar soluciones innovadoras para el rendimiento energético de edificios nuevos o en rehabilitación. Está situada en Angers y Nantes.
- Dos plataformas para la caracterización de las propiedades físicas y el rendimiento ecológico de las cubiertas verdes, que permiten el seguimiento de sus características físicas, su rendimiento y su evolución en el tiempo respecto a la gestión del agua de lluvia, la regulación de las transferencias de calor dentro y fuera del edificio, la fijación y almacenamiento de contaminantes, o la función de apoyo a la biodiversidad. Se ubican en Nancy y Trappes.
- Plataforma de Evaluación del Clima Urbano, que estudia el impacto de la planificación urbana en los fenómenos climáticos locales, en particular el de las islas de calor. Situada en Nancy.
- Plataforma de experimentación a gran escala en el campo de la infraestructura lineal y la geotecnia, que permite llevar a cabo experimentos sobre estructuras geotécnicas e infraestructuras viarias o ferroviarias. Está situada en Rouen.



Figura 3. CEREMA participa en el proyecto PIBE, que tiene como objetivo mejorar los métodos para predecir el impacto acústico de los aerogeneradores y estudiar soluciones de reducción de ruido y su eficacia, tanto en condiciones controladas como reales.



Caracterización del estado ecohidromorfológico y de los servicios ecosistémicos culturales de las masas de agua del tramo del río Duero comprendido entre Toro y Zamora. Contribución del CEDEX al proyecto DRAINAGE. C-55

Characterization of the Ecohydromorphological State and the Cultural Ecosystem Services of the Water Masses of the River Duero Section included between Toro and Zamora. CEDEX contribution to the DRAINAGE project (Research Notebook C-55)

Autoría: Javier Álvarez Rodríguez, Francisco M. Cortés Sánchez y María Díaz Redondo

Edición en papel

ISBN: 978-84-7790-639-1

Año: 2021

PVP: 25 €

Edición en línea

Descargas gratuitas en MITMA. <https://cvp.mitma.gob.es/caracterizaci%C3%B3n-del-estado-ecohidromorfol%C3%B3gico-y-de-los-servicios-ecosist%C3%A9micos-culturales-de-las-masas-de-agua-del-tramo-del-r%C3%ADo-duero-comprendido-entre-toro-y-zamora-contribuci%C3%B3n-del-cedex-al-proyec>

CUADERNO DE INVESTIGACIÓN DEL PROYECTO DRAINAGE

El presente cuaderno de investigación describe la contribución del CETA-CEDEX al proyecto DRAINAGE para la gestión integral del riesgo de inundación (referencia CGL2017-83546-C3-R del Programa Estatal de Investigación, Desarrollo e Innovación Orientada a los Retos de la Sociedad). Este cuaderno se estructura en una serie de capítulos independientes que corresponden a cada una de las tareas de caracterización realizadas: i) el análisis del estado hidromorfológico de las masas de agua, de acuerdo con los estándares europeos y españoles; ii) el análisis del estado físico-químico de las masas de agua a partir de los datos disponibles; iii) el análisis del estado biológico de las masas de agua a partir de la información contenida en las series temporales oficiales de datos biológicos; y iv), caracterización y valoración de los servicios ecosistémicos culturales. Los trabajos que contiene este cuaderno de investigación están orientados al desarrollo de herramientas que permitan profundizar en el conocimiento sobre el estado de las masas de agua y los servicios ecosistémicos que proporcionan. Las tareas desarrolladas constituyen una aproximación metodológica inicial sobre cuestiones relacionadas con el diseño de elementos de infraestructura verde y con las estrategias de gestión que incrementan la resiliencia territorial frente a fenómenos extremos como las inundaciones.

THE DRAINAGE PROJECT RESEARCH NOTEBOOK

This research notebook describes the contribution of CETA-CEDEX to the DRAINAGE project for the integral management of flood risk (reference CGL2017-83546-C3-R of the State Program for Research, Development and Innovation Oriented to the Challenges of Society). This notebook is structured in a series of independent chapters that correspond to each of the characterization tasks carried out: i) analysis of the hydromorphological status of water bodies, in accordance with European and Spanish standards; ii) analysis of the physico-chemical status of water bodies, based on available data; iii) analysis of the biological status of water bodies, based on official time series of biological data; and iv), characterization and assessment of cultural ecosystem services. The works contained in this research notebook are oriented towards the development of tools for deepening the knowledge on the status of water bodies, and on the ecosystem services they provide. The tasks developed constitute an initial methodological approach on issues related to the design of green infrastructure elements, and to management strategies that increase territorial resilience against extreme phenomena such as floods.



Guía metodológica para el análisis coste-beneficio de actuaciones estructurales de defensa frente a inundaciones. R-24

Methodological Guide for the Cost-Benefit Analysis of Structural Defense Actions Against Floods (Manuals and Recommendations R-24)

Autoría: Antonio Jiménez Álvarez, Ana Isabel Fernández Muñoz, Carlos López Monllor, Laura Hernández Sánchez y M^a del Carmen Ángel Martínez

Edición en papel

ISBN: 978-84-7790-640-7

Año: 2021

PVP: 35 €

Edición en línea

ISBN: 978-84-7790-641-4

PVP: 15 €

Esta guía tiene como objeto proporcionar recomendaciones y metodologías para llevar a cabo el análisis coste-beneficio (ACB) de las medidas estructurales de defensa frente a inundaciones, que permita determinar su rentabilidad económica. El trabajo se ha basado principalmente en una recopilación y análisis de las metodologías disponibles en la bibliografía para la estimación de daños por inundación y su adaptación a partir de datos disponibles en España.

La guía aborda los fundamentos del ACB y el procedimiento a seguir para llevarlo a cabo, proporcionando recomendaciones sobre determinados aspectos: información necesaria, periodo de análisis, tasa de descuento, criterios de rentabilidad, priorización de inversiones, etc. Se proporcionan criterios para valorar los daños evitados por las medidas de defensa contra inundaciones en diferentes usos del suelo: urbano (residencial, comercial, daños en vehículos, daños en servicios públicos, etc.), industrial, agrícola (pérdidas de producción, infraestructuras agrarias, edificaciones rurales, etc.), explotaciones ganaderas e infraestructuras. Asimismo, se consideran los costes derivados de la actuación de los servicios de emergencia, y se proporciona una primera aproximación a la estimación de algunos de los posibles costes indirectos. Adicionalmente, se aborda la información cartográfica sobre usos del suelo disponible, así como la sistematización del cálculo de los daños mediante el uso de un sistema de información geográfica.

The purpose of this guide is to provide recommendations and methodologies to carry out the cost-benefit analysis (CBA) of structural defense measures against floods that allow determining their economic profitability. The work has been based mainly on a collection and analysis of the methodologies available in the bibliography for estimating flood damages and its adaptation from data available in Spain.

The guide deals with the fundamentals of the CBA and the procedure to carry it out, providing recommendations on certain aspects: Necessary information, analysis period, discount rate, profitability criteria, investment prioritization, etc. Criteria are provided to assess the damages avoided by defense measures against floods in different land uses: Urban (residential, commercial, damage to vehicles, damage to public services, etc.), industrial, agricultural (loss of production, agricultural infrastructure, rural buildings, etc.), livestock farms and infrastructures. Likewise, the costs derived from the action of the emergency services are considered, and a first approach to the estimation of the possible indirect costs is provided. Additionally, the cartographic information available on land uses is addressed, as well as the calculation of the damages through the use of a geographic information system.



Historia del espíritu y la cultura del agua: Antropología y Etnografía. Tomo III (2 v.)

History of the Spirit and Culture of Water: Anthropology and Ethnography. Volume III (2 v.)

Autoría: José Juan Ojeda Quintana

ISBN: 978-84-7790-638-4 [Obra completa]

Año: 2021

PVP: 30 €

Este tomo recoge las conclusiones del proyecto de investigación sobre el espíritu y la cultura del agua, referentes a dos mundos tan interesantes como variados, y en cierta forma semejantes, al mostrarnos en uno y otro a los portadores del agua.

La primera parte recoge todo lo relacionado con los ríos, las historias, tradiciones, leyendas, músicas, pintura y literatura relacionada con los ríos españoles y los grandes ríos de todo el mundo, así como su impacto en la religión, la cultura y la historia.

La segunda parte se dedica a los aguadores, que, como los ríos, llevan el agua a todos los que sin ella no podrían vivir.

Con este tomo se completa la trilogía sobre las investigaciones llevadas a cabo por el autor, durante más de 30 años, sobre el espíritu y la cultura del agua a través de todo el mundo.

This volume draws on the conclusions of the research project on the spirit and culture of water, regarding two worlds that are as interesting as they are diverse, and to a certain extent similar, by showing us the role played by water carriers in both of them.

The first part covers everything related to rivers, including stories, traditions, legends, music, painting, and literature related to Spanish rivers and the great rivers around the world, as well as their impact on religion, culture, and history.

The second part, on the other hand, is devoted to water bearers, who, like rivers, bring water to all those who could not live without it.

This volume completes the trilogy of the author's 30 years of research into the spirit and culture of water around the world.

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 medio ambiente asociado, 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, Transportes 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 a 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>

CEDEX

ACTIVIDADES TÉCNICAS Y CIENTÍFICAS | 2021





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

Director: **Antonio Sánchez Trujillano**
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