

# Earthquake Detection Techniques Using Underwater Fiber Optics: A Systematic Literature Review

Jonathan Joás Zapata Campos<sup>1</sup>; Farfán Cuya Amaury Aldo<sup>2</sup>; Ninaquispe Corales Daniel Alber<sup>3</sup>; Toledo Ruíz Javier Luis<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup> Universidad Tecnológica del Perú, Perú, [c24917r@utp.edu.pe](mailto:c24917r@utp.edu.pe), [e19711@utp.edu.pe](mailto:e19711@utp.edu.pe),  
[c19986@utp.edu.pe](mailto:c19986@utp.edu.pe), [c25685@utp.edu.pe](mailto:c25685@utp.edu.pe)

**Abstract**– *The Earth's surface is 70% covered by water, yet the coverage of seismometers in oceans remains limited. A cost-effective solution to enhance seismic detection is to leverage the existing submarine fiber optic network, originally deployed for telecommunications. This study conducts a systematic review of seismic detection techniques using fiber optics, analyzing research published since the year 2000. The main objective was to identify the most commonly used techniques and assess their applicability. The Scopus database was consulted, and 24 articles were selected from an initial set of 596 through a systematic process. The PICO framework guided the analysis of primary sources. The results indicate that Distributed Acoustic Sensing (DAS) is the most widely employed technique. Additionally, most studies were found to be concentrated in the Northern Hemisphere. The study concludes that DAS is a promising approach for developing seismic event early warning systems and mitigating their impacts.*

**Keywords**– *DAS, fiber optics, seismic detection, submarine cable.*

# Técnicas de Detección de Sismos Usando Fibra Óptica Submarina: Una Revisión Sistemática de Literatura

Jonathan Joás Zapata Campos<sup>1</sup>; Farfán Cuya Amaury Aldo<sup>2</sup>; Ninaquispe Corales Daniel Alber<sup>3</sup>; Toledo Ruíz Javier Luis<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup> Universidad Tecnológica del Perú, Perú, c24917r@utp.edu.pe, e19711@utp.edu.pe  
c19986@utp.edu.pe, c25685@utp.edu.pe

**Resumen—** La superficie terrestre está cubierta en un 70% por agua, pero la cobertura de sismómetros en océanos es limitada. Una solución económica para mejorar la detección sísmica es aprovechar la red de fibra óptica submarina, ya desplegada para telecomunicaciones. Este estudio realiza una revisión sistemática de las técnicas de detección sísmica mediante fibra óptica, analizando investigaciones publicadas desde el año 2000. El objetivo principal fue identificar las técnicas más utilizadas y evaluar su aplicabilidad. Se consultó la base de datos Scopus, seleccionando 24 artículos de 596 iniciales tras un proceso sistemático. Las preguntas PICO guiaron el análisis de las fuentes primarias. Los resultados indican que la técnica más empleada es la Detección Acústica Distribuida (DAS). Además, se observó que la mayoría de las investigaciones se concentran en el hemisferio norte. Se concluye que el DAS es prometedor para desarrollar sistemas de prevención de eventos sísmicos y mitigar sus impactos.

**Palabras clave—**DAS, fibra óptica, detección de sismos, cable submarino.

## I. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, el número de enlaces de comunicaciones han aumentado exponencialmente debido al crecimiento de Internet y los servicios móviles [1] siendo los cables ópticos submarinos construidos por los operadores de telecomunicaciones la columna vertebral de las telecomunicaciones internacionales e intercontinentales. Se calcula la existencia de 552 cables ópticos submarinos en todo el mundo con una longitud total de más de 1,4 millones de kilómetros a principios de 2023 [2], que están diseñados para conectar una instalación en tierra con instrumentos de aguas profundas u hacia otra instalación costera. Los cables a menudo cruzan varias características de las profundidades submarinas desde la costa hasta la llanura profunda en el lecho marino [3]. Los tsunamis, definidos como olas oceánicas generadas principalmente por terremotos submarinos, erupciones volcánicas o deslizamientos de tierra, han ocasionado, históricamente, significativas pérdidas humanas y materiales. Este fenómeno representa una de las principales amenazas para las comunidades e infraestructuras costeras. En este contexto, la detección temprana y la emisión oportuna de alertas precisas son cruciales para proporcionar información vital, facilitar la evacuación de zonas vulnerables, activar

procedimientos de emergencia y reducir el número de víctimas [4]. La capacidad de detectar corrientes de aguas profundas y cambios en la presión podría permitir la detección directa de tsunamis mientras se propagan a través de las profundidades oceánicas, en lugar de inferir su presencia exclusivamente a partir de datos sísmicos [5]. Esto abre nuevas posibilidades para el monitoreo de terremotos submarinos mediante tecnologías de detección basadas en cables ópticos submarinos. Entre los principios fundamentales de las técnicas de detección sísmica empleando sismómetros ópticos basados en cables submarinos se incluyen: interferómetros ópticos, rejillas de fibra de Bragg (FBG), polarímetros ópticos y sistemas de detección acústica distribuida (DAS). Los interferómetros ópticos y las rejillas de fibra de Bragg (FBG) utilizan principalmente los cables submarinos para la transmisión de datos, mientras que los polarímetros ópticos y los sistemas DAS emplean estos cables como sensores para captar información del entorno [2]. En los últimos años, se han explorado enfoques innovadores para mejorar las capacidades de alerta temprana de tsunamis. Una tecnología prometedora que ha despertado creciente interés es la detección acústica distribuida (DAS) en cables submarinos de fibra óptica [4]. Esta técnica convierte los cables de fibra de telecomunicaciones convencionales en redes de sensores de tensión de alta resolución [3], [6 – 7]. Su implementación ha demostrado ser efectiva en diversos entornos, tanto terrestres como submarinos, utilizando la infraestructura de fibra óptica ya existente. Además, se han aplicado algoritmos de aprendizaje desde el enfoque de *deep learning* para detectar y localizar eventos microsísmicos, al tiempo que se estima simultáneamente el modelo de velocidad a partir de datos adquiridos mediante sistemas DAS [8]. Asimismo, se han implementado algoritmos basados en aprendizaje automático y redes neuronales convolucionales para la detección automática de terremotos [9]. En paralelo, el desarrollo de la tecnología DAS ha avanzado con la introducción de nuevos sistemas, como un DAS basado en Reflectómetro Óptico en el Dominio del Tiempo (OTDR) sensible por fase ( $\phi$ ) [10]. Los autores se sienten motivados a investigar este tema debido a la urgente necesidad de abordar el peligro que representan los

terremotos, tsunamis y otros fenómenos sísmicos para la seguridad de las personas y las infraestructuras. El objetivo de este estudio es comparar y evaluar las diversas técnicas existentes, así como analizar la viabilidad de su implementación en entornos sísmicos, considerando también el desarrollo reciente de métodos innovadores. En este contexto, realizar una revisión sistemática de la literatura (RSL) sobre las técnicas de detección de sismos utilizando fibra óptica submarina como herramienta preventiva es fundamental para ampliar nuestra comprensión de este campo crítico. Esto permitirá desarrollar estrategias efectivas para mitigar los riesgos asociados con terremotos y tsunamis, identificar y validar investigaciones existentes, abordar vacíos de conocimiento y sentar una base sólida para futuras investigaciones y políticas de prevención de desastres.

## II. METODOLOGÍA

La referencia [11] señala que una revisión sistemática de literatura (SLR) es un procedimiento para identificar, evaluar e interpretar toda la investigación disponible relevante para un área temática o una pregunta de investigación determinada. Esta exploración se realiza siguiendo las pautas PRISMA [12] y se aplica las recomendaciones de la referencia [11].

### A. Preguntas de investigación

Para alcanzar el propósito de este trabajo de investigación, fueron formuladas un total de 9 preguntas de indagación (RQ: *Research Question*) siguiendo el marco PICO por sus siglas en inglés, implementado una revisión exhaustiva del asunto abordado [13]. La pregunta de investigación general propuesta fue la siguiente: **¿Cuáles son las técnicas de detección de sismos mediante el uso de cable de fibra óptica submarino?** De la cual se desprende el acrónimo PICO de la siguiente manera: el problema (P) planteado son los terremotos y los posibles tsunamis que pueden desencadenarse; la Intervención (I) está relacionada con los métodos/técnicas para predecir dichos terremotos mediante sensores instalados en cables submarino; la Comparación (C) no es aplicable ya que nuestro estudio se enfoca en el uso de sensores para la detección de terremotos mediante cables submarinos; finalmente, los Resultados (O) se refiere a la capacidad de detectar un evento sísmico como un modo de alerta temprana. Las preguntas planteadas (RQ's) fueron:

- 1) RQ1: ¿Qué tipo de evento sísmico se aborda en estos estudios?
- 2) RQ2: ¿Cuál es la descripción del problema específico en cada estudio?
- 3) RQ3: ¿Cuáles son las técnicas y objetivos usados en los estudios?
- 4) RQ4: ¿Cuáles fueron las variables físicas más utilizadas en los estudios?
- 5) RQ5: ¿Cuáles fueron los equipos de medición que se utilizaron en cada artículo?
- 6) RQ6: ¿Cuál fue la ubicación geográfica de los cables de fibra óptica en cada estudio?

7) RQ7: ¿Cuáles fueron los resultados del uso de cada técnica?

8) RQ8: ¿Qué beneficios a futuro tuvo cada técnica aplicada?

9) RQ9: ¿Qué limitaciones presenta cada técnica aplicada?

Considerando que por evento sísmico se refiere a un fenómeno natural que se produce debido a la liberación de energía en la corteza terrestre, generando ondas sísmicas y como, una posible consecuencia, el desencadenamiento de un tsunami [1 – 2]. Además, el método de detección se refiere a las técnicas y tecnologías utilizadas para identificar, registrar y analizar la ocurrencia del evento sísmico. Finalmente, el nivel de eficacia del método se refiere a la capacidad del método para cumplir con sus objetivos de manera precisa, confiable y oportuna en la identificación y registro de la actividad sísmica.

### B. Estrategia de búsqueda

Se realizó una búsqueda de literatura publicada en revistas revisadas por pares en febrero de 2024 para encontrar artículos relacionados con la detección de eventos sísmicos mediante sensores en cables submarinos. El proceso de indagación se llevó a cabo utilizando palabras clave afines al tema planteado y combinadas mediante los operadores booleanos. La ecuación de búsqueda planteada fue: (seism\* OR earthquake OR tsunami tsunami ) AND (das OR "undersea internet cable" OR "distributed acoustic sensing" OR "optical fibre" ) AND (detect\* OR "Early alert" ). Luego, los siguientes criterios de inclusión/exclusión fueron aplicados:

- (CE 1) Estudios publicados después del 2000.
- (CE 2) Estudios publicados en idioma inglés y chino.
- (CI 1) Estudios que abordan la detección de terremotos y/o tsunamis.
- (CI 2) Estudios que aplican la detección de terremotos mediante el uso de cables submarinos.
- (CI 3) Estudios que detectan terremotos en el mar.

Para llevar a cabo la búsqueda, se seleccionó una base de datos en línea vinculados a los campos científicos relevantes tanto para eventos sísmicos como la detección de estos con el fin de obtener estudios primarios para esta revisión. La base de datos empleada fue SCOPUS y el flujo de información a lo largo de las diferentes etapas del proceso de revisión y selección de los artículos se representa en el diagrama PRISMA (por sus siglas en inglés) de la Fig. 1. El artículo explora el uso innovador de la fibra óptica submarina como detector de sismos. Para esta investigación, se seleccionó la base de datos **Scopus** debido a su amplia cobertura en ingeniería, tecnología y ciencias aplicadas, áreas clave para el estudio. Scopus también ofrece acceso a literatura gris, como actas de congresos, donde suelen presentarse avances en tecnología sísmica marina. Además, sus herramientas analíticas avanzadas, como el análisis de citaciones, permiten identificar publicaciones influyentes, enriqueciendo la revisión sistemática.

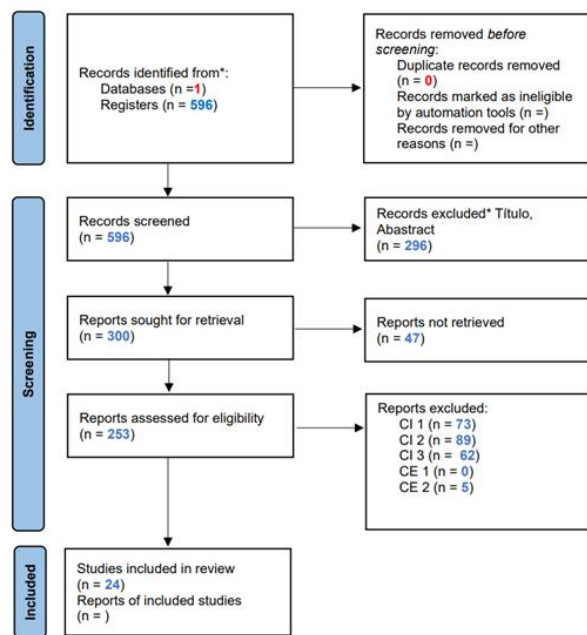


Fig. 1 Proceso de selección (diagrama de flujo PRISMA).

### C. Evaluación de calidad

El criterio descrito en la ref. [14], fue adoptado debido a la claridad en el uso de parámetros para establecer valores que cuantifican cada artículo durante el cribado de las fuentes primarias. Para llevar a cabo una revisión exhaustiva del tema, se formularon siete (07) preguntas de investigación (PI) siguiendo el marco PICO, tal como se detalla en la referencia [14]. En este contexto, la Población (P) incluye estudios relacionados con sismos; la Intervención (I) abarca el uso del método DAS (Distributed Acoustic Sensing) para la alerta temprana de sismos; la Comparación (C) evalúa el método DAS en contraste con los métodos clásicos basados en geófonos; y los Resultados (O) se centran en los principales hallazgos obtenidos. Estas preguntas de investigación (RQ) constituyen la base del objetivo del estudio, como se muestra en la Tabla I.

TABLA I  
CRITERIOS DE EVALUACIÓN DE CALIDAD

| Nº | Evaluación de Calidad de pregunta                                     | Peso (binario) según métrica Si (+1), No(+0) y Valor según nivel Q1, Q2, Q3 y Q4. |
|----|-----------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| 1  | Se presenta un evento sísmico                                         | Si (+1) , No(+0)                                                                  |
| 2  | ¿Está el artículo publicado en una fuente reconocida? Q1, Q2, Q3 y Q4 | Clasificación Q1(+2), Clasificación Q2(+1.5), Clasificación Q3 o Q4 (+1)          |
| 3  | Se utiliza técnica DAS para la descripción del evento sísmico         | Si (+1) , No(+0)                                                                  |
| 4  | Se menciona el equipo de medición usado                               | Si (+1) , No(+0)                                                                  |
| 5  | Se describe la ubicación del cable de fibra óptica                    | Si (+1) , No(+0)                                                                  |
| 6  | Se describe el beneficio a futuro de cada técnica aplicada            | Si (+1) , No(+0)                                                                  |
| 7  | Presenta limitaciones el estudio de                                   | Si (+1) , No(+0)                                                                  |

| la técnica usada |
|------------------|
|------------------|

### D. Extracción de datos

El proceso de extracción de datos tuvo como objetivo identificar información relevante de los estudios primarios en profundidad y responder a las preguntas planteadas en la revisión sistemática de la literatura (RSL). Este proceso estuvo respaldado por las preguntas de investigación (RQ) y el esquema de extracción de datos definidos en la Tabla II, donde también se presentan los resultados. De las publicaciones filtradas, el puntaje máximo obtenido fue de 8 puntos, alcanzado por 5 artículos. Otros 8 artículos lograron una puntuación de 7 puntos, 1 artículo obtuvo 7.5 puntos, 6 artículos alcanzaron 6 puntos, mientras que 1 artículo obtuvo 5.5 puntos y otros 5 puntos. En total, el 75% de las publicaciones seleccionadas se ubicó en el primer cuartil, con una puntuación promedio de 6 puntos (75%), lo que refleja un desempeño sólido en la calidad y relevancia de las publicaciones seleccionadas para esta revisión sistemática.

TABLA II  
EVENTO SÍSMICO Y MÉTODOS DE LOS ESTUDIOS SELECCIONADOS

| Autores                   | Evento Sísmico                                                      | Técnica                                                                                                          | Sitio web                                                               | QAS |
|---------------------------|---------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|-----|
| Xiao et al.(2024)         | Detectar infragravedad y ondas de tsunami asociadas con terremotos. | Detección acústica distribuida bajo el agua (DAS)                                                                | Geophysical Research Letters                                            | 7   |
| Mata Flores et al. (2023) | Ondas sísmicas debido a terremotos                                  | Detección acústica distribuida (DAS)                                                                             | Geophysical Journal International                                       | 6   |
| Yu et al. (2023)          | Monitoreo sísmico                                                   | Interferómetros ópticos, Red de fibra de Bragg (FBG), Polarímetro óptico y Detección acústica distribuida (DAS). | Sensors                                                                 | 7   |
| Landrø et al. (2022)      | Terremotos                                                          | Detección acústica distribuida (DAS)                                                                             | Scientific Reports                                                      | 7   |
| Nakano et al.(2024)       | Terremotos                                                          | Detección acústica distribuida (DAS)                                                                             | Earth, Planets and Space                                                | 8   |
| Ugalde et al. (2022)      | Terremotos                                                          | Detección acústica distribuida (DAS)                                                                             | Seismological Research Letters                                          | 7   |
| Ip et al. (2022)          | Terremotos                                                          | DFOS basado en la medición en el dominio del tiempo de la retrodispersión de Rayleigh                            | Proceedings of the IEEE                                                 | 7   |
| Marra et al.(2022)        | Terremotos y Tsunamis                                               | Interferometría óptica                                                                                           | Science                                                                 | 8   |
| Zhang et al.(2022)        | Estudio sísmico activo (matriz DAS vertical)                        | Detección acústica distribuida (DAS)                                                                             | Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering | 6   |
| Bao et al.(2022)          | Terremoto devastador 6.9                                            | Detección acústica distribuida (DAS) y uso de redes neuronales                                                   | Kexue Tongbao/Chinese Science Bulletin                                  | 7.5 |

|                              |                                                                                                 |                                                                   |                                                                                                                                            |     |
|------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Lindsey & Martin (2022)      |                                                                                                 | OTDR (Interferometría óptica)                                     | Annual Review of Earth and Planetary Sciences                                                                                              | 6   |
| Wamriew et al.(2022)         | Monitoreo microsismico de fondo de pozo                                                         | Redes neuronales para el proceso de la data                       | Sensors                                                                                                                                    | 6   |
| Bernard P et al.(2019)       | Microsismos, sismos de mediana intensidad y grandes terremotos                                  | Interferometría óptica de Fabry-Pérot (interferometría FP)        | Seismological Research Letters                                                                                                             | 7   |
| Zhan (2019)                  | Ondas sísmicas                                                                                  | Detección acústica distribuida (DAS)                              | Seismological Research Letters                                                                                                             | 8   |
| Marra et al.(2019)           | Microsismos, sismos de mediana intensidad y grandes terremotos                                  | Interferometría láser ultra estable con cables ópticos            | Science                                                                                                                                    | 8   |
| Fernández-Ruiz et al. (2019) | Microsismos, sismos de mediana intensidad y grandes terremotos                                  | Detección acústica distribuida (DAS) de pulso chirriado (CP-OTDR) | Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering                                                                    | 7   |
| Jousset et al. (2018)        | Microsismos, sismos de mediana intensidad y grandes terremotos                                  | Detección acústica distribuida (DAS)                              | Nature Communications                                                                                                                      | 8   |
| Clivati et al. (2019)        | Microsismos, sismos de mediana intensidad y grandes terremotos                                  | Interferometría láser ultra estable con cables ópticos            | IFCS/EFTF 2019 - Joint Conference of the IEEE International Frequency Control Symposium and European Frequency and Time Forum, Proceedings | 7   |
| Jiang et al. (2013)          | Vibraciones                                                                                     | Rejilla de fibra de Bragg (FBG)                                   | Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering                                                                    | 5   |
| Duckworth et al.(2013)       | (1) Perturbaciones sísmicas. (2) Perturbaciones acústicas. (3) Movimientos sísmicos y acústicos | Detección acústica distribuida (DAS)                              | Proceedings - 2013 European Intelligence and Security Informatics Conference, EISIC 2013                                                   | 6   |
| Wang et al.(2015)            | Fuentes acústicas                                                                               | Interferometría $\phi$ -OTDR                                      | Optics Communications                                                                                                                      | 5.5 |
| Nakstad & Kringlebotn (2008) | (1) Señales Sísmicas Generadas por Airguns (2) Presión de la Onda Directa (3)                   | Método OBC (Ocean Bottom Cable)                                   | Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering                                                                    | 6   |

|                                 |                                                      |                                 |                                                                                                                                                        |   |
|---------------------------------|------------------------------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|
|                                 | Reflexiones de la Onda (4) Vibraciones y Movimientos |                                 |                                                                                                                                                        |   |
| Fujihashi et al. (2007)         | Actividad sísmica                                    | Rejilla de fibra de Bragg (FBG) | International Symposium on Underwater Technology, UT 2007 - International Workshop on Scientific Use of Submarine Cables and Related Technologies 2007 | 7 |
| Espinosa-Ramos & Vázquez (2012) | Actividad sísmica                                    | A de evolución diferencial (ED) | 2012 IEEE Congress on Evolutionary Computation, CEC 2012                                                                                               | 6 |

### III. RESULTADOS

Los 24 artículos seleccionados en la sección de metodología pasaron por todos los filtros de selección y calidad, lo que nos confirma que son aptos para la investigación desarrollada en este estudio. A continuación, presentamos información obtenida de los artículos seleccionados de forma clara y ordenada en tablas y gráficos.

*A. ¿Qué tipo de evento sísmico se aborda en estos estudios? (RQ1)*

Los artículos analizados abordan la detección de diversos fenómenos, incluyendo microsismos, sismos de mediana intensidad, grandes terremotos y tsunamis [1], [6], [15 – 17], así como también la detección en general de vibraciones [18], [19], fuentes acústicas [20] y ondas sísmicas [21]. Para un análisis más detallado, consulte la Tabla II. Como se observa en dicha tabla, el método predominante utilizado para los eventos sísmicos mencionados es el DAS (Distributed Acoustic Sensing), gracias a su capacidad de aprovechar la infraestructura existente de fibras ópticas.

*B. ¿Cuál es la descripción del problema específico en cada estudio? (RQ2)*

El monitoreo sísmico es fundamental para la prevención de desastres naturales, incluidos eventos como erupciones volcánicas, grandes terremotos y tsunamis, además de proporcionar información clave sobre la dinámica interna de la Tierra [22]. Para maximizar la detección de sismos, se suelen emplear redes de sismómetros tanto en tierra como en el océano, como la reconocida Red Sísmica de California [7]. Sin embargo, la implementación de una red sísmica global enfrenta limitaciones significativas debido a los elevados costos de instalación y mantenimiento, lo que la hace inviable a gran escala [7], [22]. Una alternativa surge del uso de tecnologías espaciales, las cuales, aunque menos precisas, se complementan con sistemas terrestres como el GPS. Este enfoque, no obstante, está limitado a la monitorización de

regiones locales de pocos kilómetros cuadrados [23]. Para abordar estos desafíos con soluciones más económicas y lograr una mayor densidad de red, se propone el uso de "nodos" de calidad moderada, como geófonos independientes o dispositivos cotidianos equipados con acelerómetros MEMS, como los smartphones [7].

**C. ¿Cuáles son las técnicas y objetivos usados en los estudios? (RQ3)**

La Detección Acústica Distribuida (DAS) es una técnica de monitoreo sísmico basada en fibra óptica que se originó en la industria del petróleo y el gas. Su principio consiste en utilizar cables de fibra óptica como sensores, lo que permite aprovechar la red global de telecomunicaciones submarinas en lugar de desplegar una gran cantidad de sismómetros, cuya instalación y mantenimiento implican costos elevados [3], [4], [7], [22 – 24]. Además de DAS, existen otras técnicas relacionadas que utilizan la fibra óptica como sensor. Entre ellas se incluyen:

- Interferometría  $\phi$ -OTDR y sus variantes, como la Detección Acústica Distribuida de pulso chirriado (CP- $\phi$  OTDR), que emplea un interferómetro de Michelson basado en  $\phi$ -OTDR para medir fuentes acústicas con diferentes intensidades [22].
- Interferometría láser ultraestable, que usa cables ópticos de telecomunicaciones para registrar eventos sísmicos a lo largo de la red [1].
- Interferometría óptica de Fabry-Pérot (FP), aplicada en el diseño de sismómetros ópticos de alta resolución y bajo costo [15].
- Rejillas de fibra de Bragg, que actúan como detectores o reflectores de longitudes de onda específicas [19], [25].

Estas tecnologías buscan aprovechar la infraestructura submarina de fibra óptica para crear una red sísmica global homogénea y de bajo costo. En la Tabla II se presenta un resumen completo de las técnicas discutidas en los artículos revisados. La Tabla III muestra que el 42% de los artículos emplean DAS como técnica principal para la detección sísmica, superando significativamente a métodos como la interferometría  $\phi$ -OTDR (13%) y las rejillas de fibra de Bragg (13%). Cabe aclarar que el 100% se refiere a la proporción de artículos que mencionan al menos una técnica, y no a la totalidad de artículos analizados.

**TABLA III**  
**TÉCNICA DE DETECCIÓN USADA EN CADA ESTUDIO (N=24)**

| Técnica                                | Cantidad de estudios |
|----------------------------------------|----------------------|
| DAS                                    | 10                   |
| Interferometría $\phi$ -OTDR           | 3                    |
| Red de fibra de Bragg                  | 3                    |
| Interferometría con láser ultraestable | 2                    |
| Interferometría FP                     | 1                    |
| DAS y redes neuronales                 | 2                    |
| Otras técnicas                         | 3                    |

|       |    |
|-------|----|
| Total | 24 |
|-------|----|

**D. ¿Cuáles fueron las variables físicas más utilizadas en los estudios? (RQ4)**

De un total de 24 estudios analizados (n = 24, equivalente al 100%), la Frecuencia es la variable más reportada, presente en el 60% de los artículos. Le siguen la Longitud del cable (36%), el Período (24%), la Magnitud Momento (24%) y la Longitud de onda (16%). Variables menos representadas incluyen la Velocidad de onda P ( $V_p$ ) (8%), la Velocidad de onda S ( $V_s$ ) (8%), la Relación  $V_p/V_s$  (8%), el Tiempo (4%) y un grupo clasificado como Otras variables (4%).

**E. ¿Cuáles fueron los equipos de medición que se utilizaron en cada estudio? (RQ5)**

Las investigaciones revisadas emplearon equipos de bajo costo, alto rendimiento y frecuencias tanto bajas como altas. El objetivo principal fue analizar la perturbación de las frecuencias al emitir luz mediante láser. En este contexto, se destaca el uso de una amplia variedad de equipos que integran láseres convencionales y ultraestables [1], [16], [20], [22]. Asimismo, las rejillas de fibra de Bragg han sido recurrentemente utilizadas [19], [24], [26]. No obstante, la fibra óptica ha desempeñado un papel central como componente clave en todos los equipos analizados [1], [3], [4], [6], [7], [9], [17], [19], [22], [23], [25], [26].

**F. ¿Cuál fue la ubicación geográfica de los cables de fibra óptica en cada estudio? (RQ6)**

En cuanto a la posición geográfica de los cables de fibra óptica desplegados, los experimentos incluyen cables submarinos ubicados en diversas regiones. En las costas del Pacífico Norte se reportaron 4 proyectos [2], [4], [5], [22], mientras que en el Atlántico Norte se identificó 1 [5], [17]. En el Mar del Norte de Europa se llevaron a cabo 6 experimentos [1], [5], [15], [18], [22], [23], y en la región del Mediterráneo se registraron 2 [3], [16]. Por otra parte, también se han utilizado cables de fibra óptica en disposición horizontal, como se observa en [1], [20], [27], y vertical, con ejemplos reportados en [9], [27]. La Figura 2 muestra los porcentajes de proyectos por región en relación con el total de experimentos que emplearon cables desplegados en el mar, considerando exclusivamente los estudios seleccionados.



Fig. 2 Porcentaje de proyectos por región respecto del total de proyectos ejecutados usando fibra óptica.

#### G. ¿Cuáles fueron los resultados del uso de cada técnica? (RQ7)

En la mayoría de los casos, la detección sísmica mediante fibra óptica se verificó comparando los resultados con los registros de otros sismómetros ubicados tanto en tierra como en el mar [1], [5], [16], [23]. La Figura 2 ilustra el progreso de los proyectos a nivel mundial en el contexto de los estudios seleccionados. Un avance significativo en esta área es la implementación de sistemas de alerta temprana para complementar la detección de sismos. Un ejemplo destacado es el sistema de alerta temprana instalada en el condado de Menyuan, China [9]. Sin embargo, es importante señalar que este cable sensor se encuentra en una instalación continental y no en un entorno submarino.

#### H. ¿Qué beneficios a futuro tuvo cada técnica aplicada? (RQ8)

Los resultados positivos obtenidos en la detección de sismos mediante fibra óptica abren la posibilidad de crear una red global homogénea para la detección de eventos sísmicos, así como para el monitoreo de zonas de subducción y desplazamientos de grandes mamíferos [1], [5], [7], [16], [23]. Además, esta tecnología podría extenderse para incorporar sistemas de alerta temprana, lo que permitiría la prevención de potenciales terremotos y la salvaguarda de vidas humanas, como se señala en [9], [26]. La Tabla IV presenta los beneficios de cada uno de los proyectos analizados, los cuales se pueden categorizar en tres grupos principales: (1) autores que consideran viable la implementación de una red de telecomunicaciones submarinas como una red mundial homogénea de bajo costo; (2) aquellos que destacan las ventajas de la fibra óptica como sistema de detección sísmica en comparación con otros métodos; y (3) los que utilizan la fibra óptica para el monitoreo volcánico. Se observa que nueve estudios (37.5%) destacan el gran potencial de una red global de fibra óptica como una solución homogénea y de bajo costo para la detección sísmica [1], [2], [4], [5], [7], [16], [17], [22], [25]. Un segundo grupo de estudios, también compuesto por nueve investigaciones (37.5%), enfatiza las ventajas de la fibra óptica frente a otras técnicas de detección sísmica, sin referirse a la creación de una red global homogénea [3], [8], [9], [17], [18], [20], [24], [26 – 28]. En dos estudios (8%) se exploran las aplicaciones de la fibra óptica para el monitoreo volcánico [6], [17]. Los estudios restantes, un total de cuatro (17%), consisten en revisiones sistemáticas o en el uso de técnicas complementarias a la fibra óptica, principalmente relacionadas con el procesamiento y manejo de los datos obtenidos a través de esta tecnología.

TABLA IV  
BENEFICIOS Y LIMITACIONES DE CADA PROYECTO (N = 24)

| Autor (año)       | Beneficio de cada técnica                                | Limitación de cada técnica                           |
|-------------------|----------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| Xiao et al (2024) | DAS, que utiliza fibra óptica de telecomunicaciones como | En el caso del tsunami de Guerrero, las limitaciones |

|                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|---------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                           | sensor continuo, ofrece datos de alta resolución a grandes distancias, lo que la convierte en una tecnología prometedora para el monitoreo en tiempo real de las olas de tsunamis, frente al sistema DART (tradicional)                                                                                               | de los datos disponibles impiden observar ondas de infragravedad directas                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| Mata Flores et al. (2023) | Identificar los segmentos de cable más apropiados para fines sismológicos, y esto puede proporcionar un método no invasivo para monitorear secciones de cable que probablemente sufran daños debido a sobrecarga o fatiga.                                                                                            | –                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| Yu et al. (2023)          | La implementación de sensores de fibra óptica permite la detección de terremotos de alta densidad, a largo plazo y en tiempo real.                                                                                                                                                                                    | (1) Para los interferómetros ópticos, se debe construir un conjunto de observación de alta densidad para ubicar con precisión el lugar de la fuente; (2) para FBG, se debe desarrollar un amplio ancho de banda de detección con respuesta de baja frecuencia para realizar la detección de terremotos submarinos naturales de baja frecuencia; (3) en el caso de los polarímetros ópticos, el ruido ambiental acumulado debería suprimirse para detectar terremotos de pequeña magnitud; (4) para DAS, se debe considerar la tecnología de amplificación del repetidor de los cables submarinos y los Métodos de supresión de efectos no lineales para ampliar su distancia de detección. |
| Landrø et al. (2022)      | El análisis DAS muestra una rica expresión de características naturales, de 0,01 a 20 Hz, y captura no sólo el alcance y la dirección de los hipocentros de los terremotos, sino también el efecto de ondas más profundas que pasan a través de regiones de mayor velocidad y la interacción con los niveles locales. | –                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| Nakano et al. (2024)      | Los resultados demuestran que vale la pena desarrollar equipos DAS que no interfieran con las señales de telecomunicaciones y permitan un seguimiento volcánico regular en tiempo real.                                                                                                                               | El límite de detección era de magnitud inferior a 1                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| Ugalde et al. (2022)      | El experimento reveló señales de ondas T hidroacústicas, que son claramente visibles a profundidades bastante por debajo del SOFAR. Las ondas T son valiosas para detectar vulcanismo y actividad sísmica                                                                                                             | –                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |

|                         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|-------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                         | en regiones oceánicas.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| Ip et al. (2022)        | El uso de DAS de pulso chirriado, con su resolución de medición uniforme y su excelente rendimiento de baja frecuencia, ha llevado a la detección de ondas sísmicas de Scholte, que antes era difícil de estudiar.                                                                                                                                                                                           | –                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| Marra et al. (2022)     | Al mejorar la densidad de monitoreo mediante el uso de cables submarinos existentes, se podría mejorar la señal de tsunami cerca de la costa y se podrían hacer estimaciones más confiables de las áreas con riesgo inminente de tsunami.                                                                                                                                                                    | La combinación de rutas de retorno con pérdidas (HLLB) y la acumulación de ruido de emisión estimulada amplificada (ASE) generada en cada repetidor a lo largo del cable puede generar una señal de bucle invertido con una relación señal-ruido (SNR) marginal. En nuestra configuración actual, esto puede limitar el rango de repetidores desde los cuales se puede obtener una señal de loop-back utilizable. |
| Zhang et al. (2022)     | Si bien es difícil cuantificar con precisión la diferencia entre ellos, estimamos que el catálogo del DAS es entre 0,5 y 1,0 unidades de magnitud más completo. Esto lo corrobora el hecho de que de los 82 eventos detectados por el conjunto DAS, solo uno estaba en el catálogo de superficie. Soporta altas temperaturas así como su alta sensibilidad a la detección de los sismos.                     | –                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| Bao et al. (2022)       | Mapa de predicción sísmica en base a los datos y la red Ade Mini.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | –                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| Lindsey & Martin (2021) | Mejor estudio del mapa sísmico debido a mayor data del evento acontecido.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | Baja disponibilidad del sistema así como la data generada por DAS ya que requiere entrenamiento y capacidad de almacenamiento de los datos para ser usados de forma eficiente.                                                                                                                                                                                                                                    |
| Wamriew et al. (2021)   | Los resultados de este estudio muestran que los modelos de redes neuronales profundas son capaces de aprender la relación entre los datos de formas de onda microsísmicas y la ubicación de los eventos, así como el modelo de velocidad con un alto grado de precisión. Además, las tareas de actualización del modelo de velocidad y localización de eventos se realizan simultáneamente en una única red. | Debido a sus grandes arquitecturas, los modelos de aprendizaje profundo requieren grandes volúmenes de datos para su entrenamiento. Si bien la disponibilidad de datos no es un desafío en el monitoreo microsísmico/sísmico pasivo utilizando DAS, los grandes volúmenes de datos hacen que el entrenamiento de los modelos sea extremadamente costoso desde el punto de vista computacional. Además,            |

|                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                                                              |
|------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | un modelo entrenado en una situación requerirá un reentrenamiento para aplicarlo en una situación diferente. Sin embargo, una vez entrenados, los modelos son computacionalmente eficientes. |
| Bernard P et al. (2019)      | Estos métodos son usados debido a su alta resolución, calibración calificada, capacidades de largo alcance y baja necesidad de energía.                                                                                                                                                                                  | –                                                                                                                                                                                            |
| Zhan (2019)                  | Este método podría aplicarse para convertir la red de telecomunicaciones de fibra óptica en un sistema homogéneo de sensores de detección de terremotos                                                                                                                                                                  | Aún no se ha probado el método en las redes de telecomunicaciones a nivel mundial                                                                                                            |
| Marra et al. (2018)          | Conseguir usar las redes de telecomunicaciones como sensores para detectar terremotos, se reducirían los costos y se tendría un alcance global para la detección de eventos sísmicos.                                                                                                                                    | Aún no se ha probado el método en las redes de telecomunicaciones a nivel mundial                                                                                                            |
| Fernández-Ruiz et al. (2019) | Haber demostrado la viabilidad de utilizar la red de fibra óptica de telecomunicaciones ya implementada para el seguimiento de la actividad sísmica en todo el mundo                                                                                                                                                     | Aún no se ha probado el método en las redes de telecomunicaciones a nivel mundial                                                                                                            |
| Jousset et al. (2018)        | En este estudio se encontró nuevas características estructurales y dinámicas de zonas de fallas normales dentro del rift oblicuo de la dorsal medio oceánica de Reykjanes. Se empleó el método DAS. Se sugiere usar las redes de líneas de fibra óptica de todo el mundo para detectar la tensión dinámica de los sismos | Aún no se ha probado el método en las redes de telecomunicaciones a nivel mundial                                                                                                            |
| Clivati et al. (2019)        | Conseguir usar las redes de telecomunicaciones como sensores para detectar terremotos, se reducirían los costos y se tendría un alcance global para la detección de eventos sísmicos.                                                                                                                                    | Aún no se ha probado el método en las redes de telecomunicaciones a nivel mundial                                                                                                            |
| Jiang et al. (2013)          | Sensor con respuesta rápida y bajo costo. Potencial para convertirse en sensores prácticos de buena rentabilidad                                                                                                                                                                                                         | –                                                                                                                                                                                            |
| Duckworth et al. (2013)      | Los beneficios del método DAS incluyen su capacidad para proporcionar una vigilancia de fronteras extremadamente rentable, siendo un complemento sólido para otras tecnologías de vigilancia de fronteras                                                                                                                | –                                                                                                                                                                                            |
| Wang et al. (2015)           | Este método permite obtener la información de la fase, amplitud, respuesta de frecuencia directamente al mismo tiempo, a diferencia de                                                                                                                                                                                   | –                                                                                                                                                                                            |

|                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                          |
|---------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                 | las técnicas anteriores de interferometría óptica o de retrodispersión óptica                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                                          |
| Nakstad & Kringlebotn (2008)    | (1) Alta Fiabilidad (2) Gran Capacidad de Multiplexación (3) Largo Alcance y Amplio Ancho de Banda (4) Monitoreo 4D/Time-Lapse (5) Menor Costo y Mayor Respetabilidad (6) Mejora en las Tasas de Recuperación de Petróleo y Gas.                                                                                                                | –                                                                                                                                        |
| Fujihashi et al. (2007)         | (1) Detección Temprana (2) Monitorización del Lecho Marino (3) Uso de Tecnología Óptica (4) Desarrollo de Sistemas Complementarios (5) Preparación para Operación a Gran Escala.                                                                                                                                                                | (1) Costo (2) Complejidad Técnica (3) Resistencia Ambiental (4) Dependencia de la Infraestructura (5) Requiere Infraestructura Adicional |
| Espinosa-Ramos & Vázquez (2012) | El estudio indica que el algoritmo de evolución diferencial (ED) propuesto es competitivo y eficiente para la ubicación de estaciones sísmicas. Además, se destaca que la cantidad de datos utilizados no es un factor determinante para obtener buenos resultados, y el método puede ser útil incluso con poca información sísmica disponible. | –                                                                                                                                        |

#### I. ¿Qué limitaciones presenta cada técnica aplicada? (RQ9)

Entre las limitaciones de las técnicas de detección sísmica basadas en fibra óptica, se destaca que muchas de ellas han sido aplicadas únicamente a secciones de cables dentro de la red global de telecomunicaciones, en lugar de a la red en su totalidad [16]. Además, la disponibilidad del sistema y la gestión de los datos generados representan un desafío, ya que se requiere capacitación especializada y capacidad de almacenamiento para procesar la información de manera eficiente [27]. Por último, los modelos de aprendizaje profundo, debido a su complejidad estructural, requieren grandes volúmenes de datos para su entrenamiento, lo que implica altos costos. No obstante, una vez entrenados, estos modelos resultan ser computacionalmente eficientes [8]. La Tabla IV presenta las limitaciones de cada uno de los proyectos analizados.

#### IV. DISCUSIONES

De acuerdo con los beneficios a futuro descritos en la sección de resultados, notamos que la mayor cantidad de los estudios seleccionados priorizan como principal beneficio a futuro de sus investigaciones utilizar la red de fibra óptica mundial de telecomunicaciones como una red de sismómetros global. Podemos decir que este hecho no es sorprendente, pues este beneficio a futuro coincide con lo mencionado en ref. [29], cuyo estudio no forma parte de esta revisión sistemática. Además, podemos observar que DAS es la principal técnica para la detección sísmica preferida por los investigadores, muy por encima de otras técnicas como son Interferometría  $\phi$ -

OTDR o Red de fibra de Bragg. Una posible explicación para este resultado, el cual contrasta con los datos mostrados en ref. [2] (que muestra la misma cantidad de estudios que usan DAS e Interferometría), es que priorizamos en nuestra búsqueda original en la base de datos Scopus la técnica DAS. Adicionalmente, nos muestra que la región del Mar del norte europeo se posiciona en el primer lugar en número de proyectos de uso de cable de fibra óptica como detector sísmico. En su contraste, dentro de esta revisión no fue posible encontrar ningún proyecto en la región oceánica del hemisferio sur. A pesar de este dato, si existen investigaciones en esa región del mar. En la ref. [30] se muestra el uso de detección sísmica por fibra óptica en un cable que une Los Ángeles y Valparaíso. Por tanto, las futuras investigaciones podrían centrarse en esta región del hemisferio, ya que países como Chile, Perú, Nueva Zelanda y la Melanesia están dentro del cinturón de fuego del pacífico y al mismo tiempo tienen cables de telecomunicaciones submarinas que son una potencial red homogénea de detección sísmica, y por consiguiente se podrían salvar innumerables vidas ante un posible terremoto de gran intensidad o un tsunami que se genere de ello. El costo de ubicar un cable de fibra óptica tiene un costo alto, por lo cual es difícil el desarrollo de este tipo de proyectos sin embargo una asociación entre gobiernos y empresa privada produce resultados sostenibles [30]. Con respecto al uso de las tecnologías emergentes en la ref. [9] se hace uso de tecnología de redes neuronales, así como IA para el procesamiento de datos con prometedores resultados. El esfuerzo de los gobiernos públicos y la asociación público privada [9] [30] proporcionan una salida para el financiamiento de los proyectos de fibra óptica.

Finalmente, la variable física más recurrente usada en los artículos es la frecuencia y en segundo lugar tenemos a la longitud del cable. Este hecho podría resultar contradictorio, ya que el estudio trata sobre considerar al cable de fibra óptica como elemento sensor.

#### V. CONCLUSIÓN

El objetivo principal de esta revisión sistemática brinda una comparación exhaustiva y completa de la literatura disponible sobre las técnicas de detección de sismos mediante infraestructura de cable submarino para detectar actividad sísmica en los océanos. Las técnicas usadas en los estudios seleccionados fueron principalmente: Detección Acústica Distribuida (DAS), Interferometría Óptica y la Red de Fibra de Bragg. Los resultados destacan la técnica DAS como la preferida por los investigadores dentro de los estudios seleccionados. Una explicación a este hecho se debe a que DAS es la primera de las técnicas de detección que usan a la fibra óptica como elemento sensor. El uso de DAS sirve como monitoreo sísmico y genera información de alta densidad. A partir de este hecho, se pudo utilizar la enorme red de telecomunicaciones como una red sísmica homogénea mundial. Un limitante en este estudio es la escasez de proyectos de detección sísmica por cable submarino en el

hemisferio sur, por tanto, se sugiere a las autoridades y a las empresas privadas a la inversión en proyectos de investigación de este tipo, así poder prevenir futuros desastres naturales. El siguiente paso, sería desarrollar un sistema de alerta temprana que use los datos obtenidos por las distintas técnicas de detección. Como una alternativa de menor costo en comparación con las técnicas analizadas, investigaciones recientes han explorado el uso de señales satelitales para la detección temprana de sismos, basándose en la correlación entre variables físicas como la temperatura superficial del mar. Como resultados preliminares, se ha encontrado la posibilidad de detección temprana con valores significativamente mayores que los tradicionales [31]. Estos hallazgos abren nuevas posibilidades para el desarrollo de metodologías más precisas y accesibles, lo que plantea interesantes desafíos para futuras investigaciones en la detección temprana y monitoreo de eventos sísmicos. Finalmente, se convoca a estudiantes de Ingeniería Civil, Geología, Geofísica y disciplinas afines a incorporarse en futuras líneas de investigación sobre fenómenos sísmicos. Su participación, basada en un enfoque interdisciplinario, enriquecerá el análisis de riesgos y la propuesta de métodos innovadores. Apreciamos el entusiasmo y la dedicación de quienes deseen contribuir al avance del conocimiento en nuestras comunidades.

#### AGRADECIMIENTO/RECONOCIMIENTO

Los autores expresamos nuestros sinceros agradecimientos a la Universidad Tecnológica del Perú (UTP) por el respaldo institucional brindado durante el desarrollo de este trabajo. De igual manera, extendemos nuestro reconocimiento a los revisores por sus valiosas sugerencias y observaciones, las cuales contribuyen significativamente a mejorar la calidad y el rigor académico de esta RSL.

#### REFERENCES

- [1] G. Marra, C. Clivati, R. Luckett, A. Tampellini, J. Kronjäger, L. Wright, A. Mura, F. Levi, S. Robinson, A. Xuereb, et al. Ultrastable laser interferometry for earthquake detection with terrestrial and submarine cables. *Science*, 361(6401):486 – 490, 2018. American Association for the Advancement of Science.
- [2] J. Yu, P. Xu, Z. Yu, K. Wen, J. Yang, Y. Wang, Y. Qin. Principles and Applications of Seismic Monitoring Based on Submarine Optical Cable. *Sensors*, 23(12):5600, 2023. MDPI.
- [3] D. Mata Flores, E. D. Mercerat, J. P. Ampuero, D. Rivet, A. Sladen. Identification of two vibration regimes of underwater fibre optic cables by distributed acoustic sensing. *Geophysical Journal International*, 234(2):1389–1400, 2023. Oxford University Press.
- [4] H. Xiao, Z. J. Spica, J. Li, Z. Zhan. Detection of earthquake infragravity and tsunami waves with underwater distributed acoustic sensing. *Geophysical Research Letters*, 51(2):e2023GL106767, 2024. Wiley Online Library.
- [5] G. Marra, D. M. Fairweather, V. Kamalov, P. Gaynor, M. Cantono, S. Mulholland, B. Baptie, J. C. Castellanos, G. Vagenas, J.-O. Gaudron, et al. Optical interferometry-based array of seafloor environmental sensors using a transoceanic submarine cable. *Science*, 376(6595):874–879, 2022. American Association for the Advancement of Science.
- [6] M. Nakano, M. Ichihara, D. Suetsugu, T. Ohminato, S. Ono, R. Vaikomounga, T. Kula, M. Shinohara. Monitoring volcanic activity with distributed acoustic sensing using the Tongan seafloor telecommunications cable. *Earth, Planets and Space*, 76(1):25, 2024. Springer.
- [7] Z. Zhan. Distributed acoustic sensing turns fiber-optic cables into sensitive seismic antennas. *Seismological Research Letters*, 91(1):1–15, 2020. Seismological Society of America.
- [8] D. Wamriew, R. Pevzner, E. Maltsev, D. Pissarenko. Deep neural networks for detection and location of microseismic events and velocity model inversion from microseismic data acquired by distributed acoustic sensing array. *Sensors*, 21(19):6627, 2021. MDPI.
- [9] F. Bao, X. Zeng, R. Lin, B. Chi, H. Lu, C. Sha. Detecting aftershocks of the  $M_s 6.9$  Menyuan earthquake and mapping blind faults by a distributed acoustic sensing array with an existing fiber-optic cable. *Chinese Science Bulletin*, 67(27):3340–3347, 2022. <http://www.sciengine.com/publisher/ScienceChinaPress/journal/ChineseScienceBulletin/67/27/10.1360/TB-2022-0155> DOI: 10.1360/TB-2022-0155.
- [10] M. R. Fernández-Ruiz, L. Costa, H. F. Martins. Distributed acoustic sensing using chirped-pulse phase-sensitive OTDR technology. *Sensors*, 19(20):4368, 2019. MDPI.
- [11] B. Kitchenham. Procedures for performing systematic reviews. *Keele, UK, Keele University*, 33(2004):1–26, 2004. Citeseer.
- [12] A. Liberati, D. G. Altman, J. Tetzlaff, C. Mulrow, P. C. Gøtzsche, J. P. A. Ioannidis, M. Clarke, P. J. Devereaux, J. Kleijnen, D. Moher. The PRISMA statement for reporting systematic reviews and meta-analyses of studies that evaluate health care interventions: explanation and elaboration. *Annals of Internal Medicine*, 151(4):W–65, 2009. American College of Physicians.
- [13] J. P. Higgins. Cochrane handbook for systematic reviews of interventions. *Cochrane Collaboration and John Wiley & Sons Ltd*, 2008.
- [14] F. J. García-Peñalvo. Developing robust state-of-the-art reports: Systematic Literature Reviews. *Education in the Knowledge Society (EKS)*, 2022. Ediciones Universidad de Salamanca. H. Simpson, *Dumb Robots*, 3<sup>rd</sup> ed., Springfield: UOS Press, 2004, pp.6-9.
- [15] P. Bernard, R. Feron, G. Plantier, A. Nercessian, J. Couteau, A. Sourice, M. Feuilloy, M. Cattoen, H.-C. Seat, P. Chawah, et al. Onland and offshore extrinsic Fabry-Pérot optical seismometer at the end of a long fiber. *Seismological Research Letters*, 90(6):2205–2216, 2019. Seismological Society of America.
- [16] [EFTF/IFC 2019 Front matter]. In *2019 Joint Conference of the IEEE International Frequency Control Symposium and European Frequency and Time Forum (EFTF/IFC)*, pages 4–57, 2019. DOI: 10.1109/FCS.2019.8856107.
- [17] A. Ugalde, C. Becerril, A. Villaseñor, C. R. Ranero, M. R. Fernández-Ruiz, S. Martín-López, M. González-Herráez, H. F. Martins. Noise levels and signals observed on submarine fibers in the Canary Islands using DAS. *Seismological Society of America*, 93(1):351–363, 2022.
- [18] M. Landrø, L. Bouffaut, H. J. Kriesell, J. R. Potter, R. A. Rørstadbotnen, K. Taweesintanon, S. E. Johansen, J. K. Brenne, A. Haukanes, O. Schjelderup, et al. Sensing whales, storms, ships and earthquakes using an Arctic fibre optic cable. *Scientific Reports*, 12(1):19226, 2022. Nature Publishing Group UK London.
- [19] Q. Jiang, M. Yu, L. Sun. Design and study of a vibrating string accelerometer based on fiber Bragg grating. In *Sixth International Symposium on Precision Mechanical Measurements*, volume 8916, pages 698–703, 2013. SPIE.
- [20] C. Wang, C. Wang, Y. Shang, X. Liu, G. Peng. Distributed acoustic mapping based on interferometry of phase optical time-domain reflectometry. *Optics Communications*, 346:172–177, 2015. Elsevier.
- [21] J. B. Ajo-Franklin, S. Dou, N. J. Lindsey, I. Monga, C. Tracy, M. Robertson, V. Rodríguez Tribaldos, C. Ulrich, B. Freifeld, T. Daley, et al. Distributed acoustic sensing using dark fiber for near-surface characterization and broadband seismic event detection. *Scientific Reports*, 9(1):1328, 2019. Nature Publishing Group UK London.
- [22] M. R. Fernández-Ruiz, E. L. Williams, R. Magalhães, R. Vanthillo, L. Costa, Z. Zhan, S. Martín-López, M. González-Herráez, H. F. Martins. Teleseisms monitoring using chirped-pulse  $\phi$ OTDR. In *Seventh European Workshop on Optical Fibre Sensors*, volume 11199, pages 315–318, 2019. SPIE.
- [23] P. Jousset, T. Reinsch, T. Ryberg, H. Blanck, A. Clarke, R. Aghayev, G. P. Hersir, J. Henningsen, M. Weber, C. M. Krawczyk. Dynamic strain determination using fibre-optic cables allows imaging of

- seismological and structural features. *Nature Communications*, 9(1):2509, 2018. Nature Publishing Group UK London.
- [24] G. Duckworth, A. Owen, J. Worsley, H. Stephenson. Optasense® distributed acoustic and seismic sensing performance for multi-threat, multi-environment border monitoring. In *2013 European Intelligence and Security Informatics Conference*, pages 273–276, 2013. IEEE.
  - [25] K. Fujihashi, T. Aoki, M. Okutsu, K. Arai, T. Komori, H. Fujita, Y. Kurosawa, Y. Fujinawa, K. Sasaki. Development of seafloor seismic and tsunami observation system. In *2007 Symposium on Underwater Technology and Workshop on Scientific Use of Submarine Cables and Related Technologies*, pages 349–355, 2007. IEEE.
  - [26] H. Nakstad, J. T. Kringlebotn. Realisation of a full-scale fibre optic ocean bottom seismic system. In *19th International Conference on Optical Fibre Sensors*, volume 7004, pages 466–469, 2008. SPIE.
  - [27] N. J. Lindsey, E. R. Martin. Fiber-optic seismology. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 49(1):309–336, 2021. Annual Reviews.
  - [28] J. I. Espinosa-Ramos. A new objective function to build seismic networks using differential evolution. In *2012 IEEE Congress on Evolutionary Computation*, pages 1–7, 2012. IEEE.
  - [29] M.-A. Gutscher, L. Quétel, S. Murphy, G. Riccobene, J.-Y. Royer, G. Barreca, S. Aurnia, F. Klingelhoefer, G. Cappelli, M. Urlaub, et al. Detecting strain with a fiber optic cable on the seafloor offshore Mount Etna, Southern Italy. *Earth and Planetary Science Letters*, 616:118230, 2023. Elsevier.
  - [30] Z. Zhan, M. Cantono, V. Kamalov, A. Mecozzi, R. Müller, S. Yin, J. C. Castellanos. Optical polarization-based seismic and water wave sensing on transoceanic cables. *Science*, 371(6532):931–936, 2021. American Association for the Advancement of Science.
  - [31] L. Zhang, M. Jiang, and F. Jing. Sea temperature variation associated with the 2021 Haiti Mw 7.2 earthquake and possible mechanism. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 13(1):2840–2863, 2022. Taylor & Francis.