

2025, el año cuántico, ¡únete a la revolución!

Araceli Venegas-Gomez

Es ahora, o nunca. Si existe un punto de inflexión para concienciar sobre las nuevas tecnologías emergentes que van a cambiar nuestra sociedad, es ahora, aprovechando la celebración del Año Internacional de la Ciencia y la Tecnología Cuánticas

Es ahora, o nunca. Si existe un punto de inflexión para traer concienciación sobre las nuevas tecnologías emergentes que van a cambiar nuestra sociedad, es ahora. Las Naciones Unidas han designado 2025 como el Año Internacional de la Ciencia y la Tecnología Cuánticas [1], reconociendo que la ciencia cuántica ha llegado al punto en que se está saliendo de la fase experimental y entrando en el ámbito de las aplicaciones prácticas.

Por supuesto, podemos argumentar que las aplicaciones prácticas de la física cuántica tampoco es cosa nueva. ¿Por qué entonces tanto trajín y novedad? Vayamos por partes.

Primero: ¿por qué el 2025?

En este año se celebra un siglo de descubrimientos cuánticos. Hace justo 100 años, después de décadas de observaciones desconcertantes y experimentos innovadores, los científicos habían descubierto algo profundo: las reglas que gobiernan las partes más pequeñas de nuestro universo son fundamentalmente diferentes de las reglas que vemos a nuestro alrededor. Esa comprensión transformó nuestro mundo de maneras que hoy damos por sentado.

Y es que, en 1925, por un lado, la mecánica matricial como formulación de la mecánica cuántica fue creada por Werner Heisenberg, Max Born y Pascual Jordan. Por otro, Erwin Schrödinger desarrolló su interpretación en base a la mecánica de ondas dando origen a su famosa ecuación.

Hasta hoy, hablar de “poder estar en dos estados a la vez”, como en la famosa paradoja del gato de Schrödinger, donde en este experimento ficticio el gato estaba a la vez vivo o muerto, a menos que se abriera la caja, en el caso de la superposición, o que haya una propiedad que permite que dos partículas separadas, incluso a kilómetros de distancia, estén conectadas de una forma que la física clásica no puede explicar, hacen que la cuántica siga teniendo una connotación de inalcanzable, incomprensible, o incluso esotérica.

Estamos hablando de las bases teóricas que en las décadas siguientes traerían avances experimentales dando lugar a una primera revolución tecnológica.

Tecnologías cuánticas 1.0

Muchas de las tecnologías que usamos diariamente y que nos son más que familiares se basan en fenómenos cuánticos.

Los láseres se encuentran en una amplia variedad de aplicaciones y lugares en nuestra vida cotidiana, por ejemplo, en impresoras, procedimientos quirúrgicos, fibra óptica, espectroscopía y microscopía, sistemas de seguridad, manufactura, y astronomía. Incluso los lectores de códigos de barras cuando vamos a pagar la compra en los supermercados. Un láser utiliza la mecánica cuántica porque su funcionamiento se basa en el principio de emisión estimulada de radiación, que es un fenómeno cuántico. En un láser, los átomos o moléculas se excitan a un estado de energía más alto y, cuando regresan a su estado fundamental, emiten fotones. La mecánica cuántica describe cómo estos fotones pueden ser emitidos de manera coherente y en una sola dirección, lo que resulta en la luz intensa y enfocada que caracteriza a los láseres.

El GPS, Sistema de Posicionamiento Global, se basa en la mecánica cuántica principalmente a través de la precisión de los relojes atómicos que se utilizan en los satélites. Estos relojes son extremadamente precisos y funcionan gracias a principios cuánticos, como la transición de electrones entre niveles de energía en los átomos.

La resonancia magnética utiliza principios cuánticos para obtener imágenes detalladas del interior del cuerpo, aprovechando las propiedades de los núcleos atómicos, especialmente el hidrógeno, que es abundante en el agua y los tejidos del cuerpo. La mecánica cuántica es fundamental en la resonancia magnética al describir cómo los núcleos atómicos interactúan con los campos magnéticos y cómo se comportan a nivel subatómico.

Los transistores están presentes en todos los dispositivos electrónicos actuales, desde teléfonos móviles y ordenadores, ya que son los componentes básicos de los microprocesadores y chips de memoria, a automóviles y electrodomésticos modernos, como dispositivos de control y seguridad. Se basan en principios de mecánica cuántica debido al comportamiento de los electrones a escalas de nanómetros, la escala

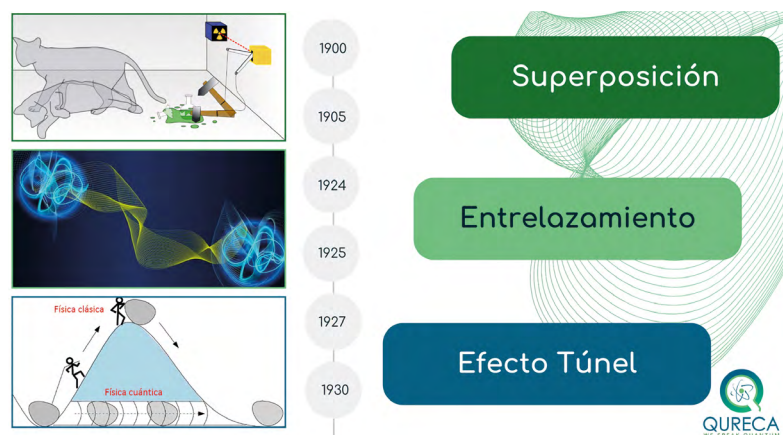


Fig. 1. Fenómenos cuánticos descritos hace alrededor de un siglo.

típica en las estructuras de transistores modernas, y el efecto túnel, un fenómeno cuántico donde las partículas, en este caso los electrones, pueden atravesar barreras de energía que no podrían superar según la física clásica.

Y si ya tenemos tecnologías cuánticas desde hace mucho tiempo, ¿a qué viene tanto alboroto?

Tecnologías cuánticas 2.0: la revolución

Todas las tecnologías anteriormente mencionadas se basan en fenómenos cuánticos de muchas partículas. Por ejemplo, en un láser tenemos un elevado número de fotones (la partícula fundamental de la luz), y hablamos de controlar estos fotones. En un transistor, tenemos un elevado número de electrones; en la resonancia magnética hablamos de las moléculas de agua en el cuerpo humano, un número extremadamente alto. Eso fue solo el comienzo, ya que ahora hemos entrado en una fase aún más extraordinaria.

En las últimas décadas se ha alcanzado una nueva etapa, ya que los científicos han conseguido controlar los fenómenos cuánticos (superposición, entrelazamiento, efecto túnel, etc.) al nivel de una sola partícula, un control preciso sobre el mundo cuántico, dando lugar a nuevas tecnologías que están en diferentes niveles de desarrollo. Desde la computación cuántica y la criptografía, hasta los sensores y sistemas de comunicación avanzados, las tecnologías cuánticas de segunda generación ya están comenzando a impactar nuestro mundo, y su influencia no hará más que crecer.

Lo que comenzó como una revolución científica es ahora una revolución tecnológica, con tecnolo-

Fig. 2. Tecnologías cuánticas de primera generación.



gías cuánticas preparadas para ayudar a resolver algunos de los mayores desafíos de la humanidad, desde acelerar las soluciones climáticas hasta asegurar nuestra infraestructura digital, y revolucionar el diagnóstico y la navegación médica. La verdadera oportunidad radica en lo que las tecnologías cuánticas hacen posible. Al igual que en los primeros días de las computadoras en el siglo pasado, hoy en día solo podemos vislumbrar algunas aplicaciones inmediatas: mejores materiales, redes más seguras, mediciones ultraprecisas. Las aplicaciones cuánticas más transformadoras probablemente ni siquiera se hayan imaginado todavía. Pensemos en la década de 1990, el comienzo de la revolución digital. Cuando internet apenas empezaba a conectar computadoras en todo el mundo, pocos podrían haber predicho cuán profundamente transformaría la sociedad actual.

La segunda revolución cuántica abarca una variedad de tecnologías emergentes con potenciales casos de uso que van a cambiar la sociedad tal y como la conocemos.

- **Computación y simulación cuántica:** A diferencia de los ordenadores clásicos, que procesan la información en forma binaria (0 y 1), los ordenadores cuánticos utilizan el concepto del bit cuántico (qubit, o cúbit en español) donde gracias al fenómeno de superposición de la mecánica cuántica, se consigue lograr una combinación lineal de dos estados, 0 y 1 en una partícula cuántica. Esta superposición que hace posible manejar cálculos complejos “a la vez” significa que los ordenadores cuánticos serán exponencialmente más potentes para ciertos tipos de cálculos, desde problemas de optimización hasta las simulaciones de nuevos fármacos y materiales. Todos los sectores industriales van a obtener una ventaja cuántica, y en estos momentos se intentan buscar casos de uso que podrán ofrecer esa ventaja.

¿Cómo podría ser un mundo en el que compaginando la inteligencia artificial y la computación cuántica el desarrollo de nuevas vacunas o medicamentos individualizados pudiera hacerse en un periodo récord?

Las diferentes etapas históricas en el desarrollo de la humanidad se han basado principalmente en revoluciones tecnológicas que han tenido que ver con materiales (la edad de piedra, edad de los metales, edad antigua con la aparición de la escritura, la revolución industrial, la era digital, etc.). Imaginemos poder diseñar materiales “a la carta”, donde las propiedades eléctricas y magnéticas sean exactamente las requeridas para una aplicación específica (hablemos de superconductores o un material aún más exótico que el grafeno, o nuevas baterías con un almacenamiento energético más eficiente). La era cuántica será la nueva etapa en nuestra historia.

- **Comunicaciones y criptografía cuántica:** Una nueva era de comunicación ultrasegura, en par-

ticular para intercambios de datos sensibles, como transacciones financieras, comunicaciones gubernamentales y defensa, está emergiendo, utilizando los principios de la mecánica cuántica para crear sistemas de comunicación seguros. Una de las aplicaciones más conocidas es la distribución de claves cuánticas (o QKD, Quantum Key Distribution, por sus siglas en inglés), que garantiza que cualquier espionaje en un canal de comunicación alterará la información transmitida, haciéndola detectable, lo que significa que es invulnerable a cualquier ataque. Varias naciones, incluidas China, Estados Unidos y varios países europeos, ya han probado y desplegado sistemas QKD a través de redes de fibra óptica e incluso a través de comunicaciones satelitales. Estos avances podrían allanar el camino para canales de comunicación seguros que sean prácticamente inquebrantables.

Los métodos de cifrado tradicionales se basan en algoritmos matemáticos que no pueden ser descifrados por potentes ordenadores clásicos, pero que, gracias al algoritmo de Shor, podrían ser vulnerables a un ordenador cuántico, ¡por lo que toda la criptografía actual está en riesgo una vez los ordenadores cuánticos sean suficientemente potentes! Aunque el riesgo sea las nuevas tecnologías cuánticas, en este caso la computación cuántica, la solución también son las tecnologías cuánticas. Una combinación de cifrado cuántico con QKD y nuevos algoritmos cuánticos hará de la criptografía cuántica la clave para la transmisión segura de datos en el futuro.

- **Metrología cuántica:** Los sensores cuánticos aprovechan los fenómenos cuánticos para lograr mediciones de precisión que van mucho más allá de las capacidades de los instrumentos clásicos. Estos sensores se pueden utilizar en campos como la navegación, la vigilancia medioambiental y el diagnóstico médico. Por ejemplo, los sensores mejorados por la tecnología cuántica ya se utilizan para medir ondas gravitacionales, detectar cambios sutiles en los campos magnéticos para aplicaciones en los sectores de la construcción, la minería, y la salud, y crear relojes atómicos ultrasensibles.

Aunque en los medios de comunicación se suele leer más sobre los ordenadores y la criptografía cuántica, son los sensores cuánticos los grandes desconocidos. Es una tecnología que ya está en el mercado y a disposición de la industria y los gobiernos para poderse usar. Los nuevos desarrollos se enfocan en una miniaturización de los productos para ser más portables y seguros.

Inversión en tecnologías cuánticas: un esfuerzo global

La revolución cuántica no es solo un esfuerzo científico, sino un fenómeno global. En la última década, las naciones de todo el mundo han reco-



nocido el potencial transformador de las tecnologías cuánticas y está invirtiendo fuertemente en su desarrollo. Desde Estados Unidos y Europa hasta Asia y América Latina, los países compiten por convertirse en líderes en este campo emergente.

El Reino Unido fue el primer país en establecer un programa cuántico nacional. En 2014, el Reino Unido lanzó su “Programa Nacional de Tecnologías Cuánticas”, cuyo objetivo era acelerar la comercialización de tecnologías cuánticas y apoyar la investigación cuántica en universidades y centros de investigación de todo el país. A esta iniciativa le han seguido programas similares en otros países, incluidos en el 2018 la “Iniciativa Cuántica Nacional” de los Estados Unidos y el “Quantum Flagship” de la Unión Europea, establecido para coordinar la investigación y el desarrollo de las tecnologías cuánticas bajo la Comisión Europea.

En 2021, España dio un paso importante al anunciar una inversión de 60 millones de euros para impulsar y financiar una infraestructura competitiva y completa de computación cuántica en España a través del proyecto Quantum Spain. Este proyecto forma parte de un esfuerzo más amplio para fomentar un ecosistema cuántico nacional, contribuyendo a la posición de España en la carrera cuántica global. Se espera que España lance un plan estratégico sobre tecnologías cuánticas muy pronto.

La inversión concreta que se ha hecho en China en tecnologías cuánticas no está del todo confirmada, pero en numerosas referencias se habla de una masiva a gran escala. En total, las inversiones públicas globales en tecnologías cuánticas han alcanzado más de 44000 millones de dólares [2], una cifra que sigue creciendo a medida que los gobiernos reconocen la importancia estratégica de los avances cuánticos.

Si bien América del Norte, Europa y Asia han dominado el desarrollo de las tecnologías cuánticas, hay indicios de que las regiones emergentes, incluidas América Latina y África, están comenzando a dar pasos adelante en este campo. Por ejemplo, en 2021 se lanzó la iniciativa Quantum Latino [3] para promover la tecnología cuántica en América Latina. Este evento reúne a investigadores, emprendedores y líderes de la industria para construir una infraestructura cuántica sólida en la región, y hacia afuera, generando conciencia sobre las tecnologías



Fig. 3. Tecnologías cuánticas de segunda generación.

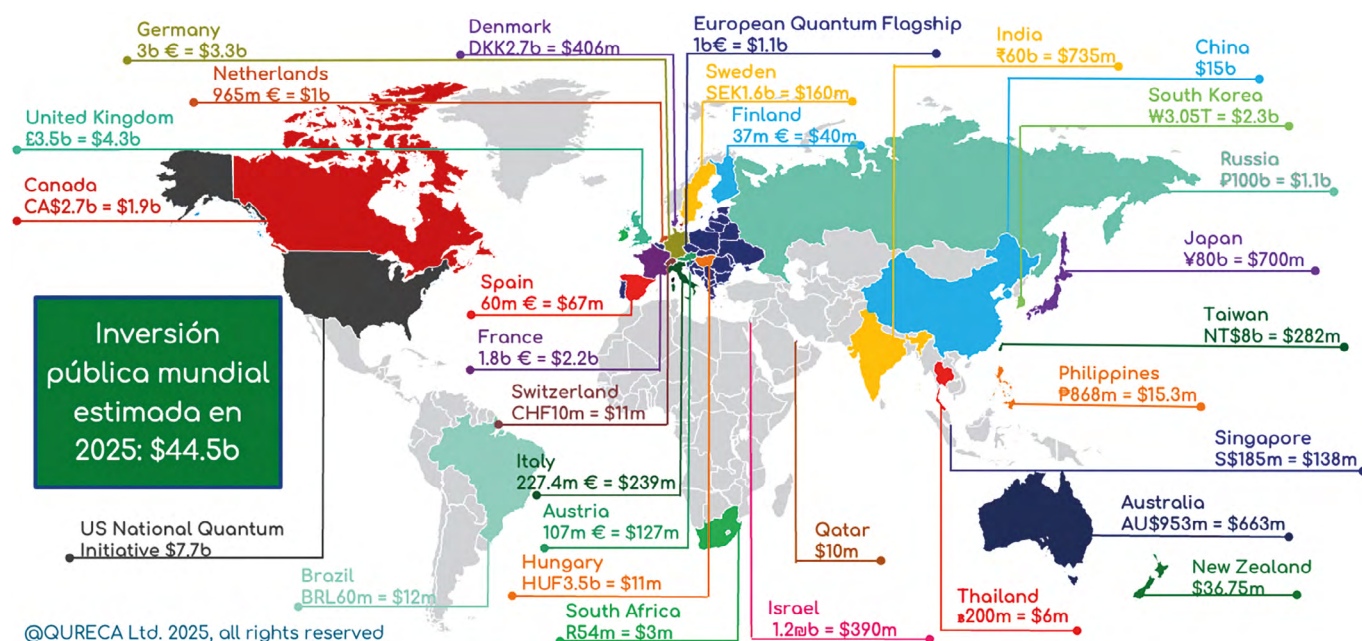


Fig. 4. Inversión mundial en tecnologías cuánticas.

cuánticas y fomentando la colaboración entre la academia, la industria y las empresas emergentes.

En África también se están realizando esfuerzos para construir centros de investigación cuántica y promover la educación en ciencias cuánticas. Con la inversión y el apoyo adecuados, estas regiones podrían convertirse en actores importantes en el ecosistema cuántico global, contribuyendo a la diversificación de la investigación cuántica y la comercialización en todo el mundo.

Además de los programas nacionales, ha habido un aumento de las inversiones del sector privado, con grandes empresas como IBM y Google liderando la investigación en computación cuántica. Igualmente, está surgiendo una ola masiva de empresas emergentes a nivel mundial [4]. Algunas de estas relativamente nuevas empresas han llegado incluso a cotizar en bolsa, como IonQ, Rigetti Computing, D-Wave y Quantum Computing Inc., lo que indica que el ecosistema cuántico está prosperando y madurando. Asimismo, los diferentes sectores industriales, como las telecomunicaciones, los productos farmacéuticos y la industria aeroespacial, están explorando aplicaciones en criptografía cuántica, detección y ciencia de materiales.

Que haya nuevas empresas no solo está desarrollando estas nuevas tecnologías de vanguardia, sino que también contribuyen al crecimiento de la fuerza laboral cuántica, que es esencial para satisfacer la creciente demanda de profesionales cualificados.

La necesidad de un talento escaso

A medida que el ecosistema cuántico continúa expandiéndose, uno de los desafíos más urgentes es la necesidad de una fuerza laboral altamente cualificada [5, 6]. Las tecnologías cuánticas son complejas y requieren experiencia en física, informática, ingeniería y otras disciplinas. Actualmente, la

mayoría de los profesionales en el campo cuántico tienen calificaciones académicas avanzadas, generalmente a nivel de doctorado. Sin embargo, a medida que el campo madura, existe una creciente necesidad de una gama más amplia de profesionales, incluidos ingenieros, desarrolladores de negocios, comercializadores y gerentes de producto, que puedan cerrar la brecha entre la investigación de vanguardia y las aplicaciones del mundo real.

Ya existe una creciente demanda de talento en el sector cuántico. Más de la mitad de las empresas cuánticas están contratando activamente, pero muchas informan de dificultades para encontrar personas con las habilidades adecuadas. Esta escasez, a menudo denominada el “cuello de botella cuántico”, se ve agravada por el hecho de que el campo aún está en sus inicios, lo que significa que hay aún mucho desconocimiento de las posibles opciones laborales en el campo de las tecnologías cuánticas, tanto actualmente como a largo plazo.

Para abordar esta brecha de talento, es esencial comenzar a formar a la fuerza laboral del futuro. Hay varias iniciativas en marcha para integrar la educación cuántica en los planes de estudio académicos generales, desde la educación primaria y secundaria hasta los programas de educación superior centrados en la ingeniería cuántica y la informática. Universidades de todo el mundo están ofreciendo programas especializados en tecnologías cuánticas [7] y se espera que más instituciones sigan su ejemplo.

Un ejemplo notable es España, donde varias universidades (como la Universidad Politécnica de Madrid, la Universidad del País Vasco, la Universidad de la Rioja, o un consorcio de universidades y centros de investigación en Barcelona) ofrecen programas de máster dedicados a las tecnologías cuánticas. Estos programas están diseñados para dotar a los estudiantes de las habilidades necesarias para

afrontar las demandas de la fuerza laboral cuántica. De manera similar, organizaciones como QURECA [8] ayudan a cerrar la brecha al ofrecer orientación profesional para la academia y servicios de formación para la empresa, entre otros productos.

Preparándonos para un futuro cuántico

La comprensión de las tecnologías cuánticas es fundamental para su aceptación y adopción. A medida que estas tecnologías comienzan a integrarse en aplicaciones cotidianas, es vital que el público general comprenda sus principios básicos y beneficios. La divulgación efectiva puede ayudar a desmitificar conceptos complejos, como la superposición y el entrelazamiento, permitiendo que más personas se sientan cómodas con su uso y potencial.

La divulgación no solo informa al público, sino que también inspira a la próxima generación de científicos e ingenieros. Profesionales de la educación a todos los niveles necesitan poder presentar las tecnologías cuánticas de manera accesible, para despertar el interés en campos como la física, la informática y la ingeniería. Esto es crucial para cultivar un ecosistema a largo plazo.

Es importante añadir que las tecnologías cuánticas no están exentas de desafíos éticos y sociales. Por ejemplo, la criptografía cuántica promete una seguridad sin precedentes, pero también plantea preguntas sobre la privacidad y el acceso a la información. La exacerbación de las implicaciones de otros riesgos tecnológicos emergentes (como la inteligencia artificial), las relaciones geopolíticas y el acceso a la tecnología, o el potencial uso dual y militar de las tecnologías cuánticas abre cuestiones sobre cómo prepararnos ante revoluciones disruptivas con consecuencias impredecibles.

Como ejemplos de preparación ante esta nueva disrupción tecnológica podemos encontrar los principios de gobernanza de la computación cuántica desarrollados por el Foro Económico Mundial en el 2022 [9] o el Documento informativo sobre tecnologías cuánticas del Global Forum on Technology (GFTech) de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico [10]. La divulgación permite abrir un diálogo sobre cuestiones que afectan a la humanidad, involucrando a la sociedad en la discusión sobre cómo queremos que se utilicen estas tecnologías y qué regulaciones podrían ser necesarias. La divulgación proactiva puede preparar a las empresas y a los trabajadores para estos cambios, ayudándoles a adaptarse y aprovechar las oportunidades que surgen. Esto es especialmente importante en un mundo donde la transformación digital es constante y rápida.

La segunda revolución cuántica está en marcha y su potencial es ilimitado. Desde la computación cuántica y la criptografía hasta la detección y la ciencia de los materiales, las tecnologías cuánticas prometen abrir nuevas fronteras en la ciencia y la industria. A medida que los gobiernos y los actores del

sector privado destinan recursos a la investigación cuántica [11], se inicia la carrera para desarrollar tecnologías cuánticas que darán forma al futuro.

Sin embargo, esta revolución tecnológica no ocurrirá de la noche a la mañana. Se requieren inversiones significativas en educación, infraestructura y desarrollo de la fuerza laboral para garantizar que la próxima generación esté preparada para las oportunidades y los desafíos que plantean las tecnologías cuánticas. Al fomentar la colaboración global, alentar la diversidad e invertir en educación, podemos garantizar que la revolución cuántica beneficie a todas las naciones y comunidades.

Este año 2025, el Año Internacional de la Ciencia y la Tecnología Cuánticas, es el momento de celebrar el increíble progreso que se ha logrado y mirar hacia el futuro, hacia los cambios transformadores que las tecnologías cuánticas traerán a nuestro mundo. La revolución cuántica no es un sueño lejano: está sucediendo ahora y su impacto se sentirá en las generaciones venideras. Concienciación, estrategia y colaboración serán cruciales para preparar a la sociedad en esta nueva y emocionante era cuántica.

Referencias

- [1] Año Internacional de la Ciencia y la Tecnología Cuánticas, <https://quantum2025.org/es/>
- [2] Quantum Initiatives Worldwide 2025, <https://www.quireca.com/quantum-initiatives-worldwide/>
- [3] Quantum Latino 2023, <https://www.quantum-latino.com>
- [4] Quantum Computing Companies: A Full 2024 List, <https://thequantuminsider.com/2023/12/29/quantum-computing-companies/>
- [5] The Quantum Ecosystem and Its Future Workforce, <https://doi.org/10.1002/phvs.202000044>
- [6] Defining the quantum workforce landscape: a review of global quantum education initiatives, <https://doi.org/10.1117/1.OE.61.8.081806>
- [7] <https://www.quireca.com/learn-quantum/masters-and-phd-opportunities-in-quantum/>
- [8] <https://www.quireca.com>
- [9] https://www3.weforum.org/docs/WEF_Quantum_Computing_2022.pdf
- [10] <https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/networks/global-forum-on-technology/global-forum-on-technology-quantum-technologies-brief-2024.pdf>
- [11] A. PUROHIT, M. KAUR, Z. C. SESKIR, M. T. POSNER, A. VENEGAS-GOMEZ, Building a quantum-ready ecosystem, *IET Quantum Communication* 5, 1 (2024).

Araceli Venegas-Gomez
QURECA (Quantum Resources
and Careers), Glasgow, UK,
y Barcelona, España

