

EL ESTADO DE LA CIENCIA



Principales Indicadores
de Ciencia y Tecnología
2025

EL ESTADO DE LA CIENCIA

Principales Indicadores de Ciencia y Tecnología 2025

El presente volumen ha sido editado en conjunto por la Organización de Estados Iberoamericanos (OEI), a través de su Observatorio Iberoamericano de la Ciencia, la Tecnología y la Sociedad (OCTS), y la UNESCO.

Los contenidos fueron elaborados por el equipo técnico responsable de las actividades de la Red Iberoamericana de Indicadores de Ciencia y Tecnología (RICYT), coordinada desde el OCTS, con el apoyo de colaboradores especializados en las diferentes temáticas que se presentan.

Si desea obtener información adicional comuníquese a:
Tel.: (+ 54 11) 4813 0033 (internos: 221 / 222 / 224)
Correo electrónico: ricyt@ricyt.org
Sitio web: <http://www.ricyt.org>

Las actualizaciones de la información contenida en este volumen pueden ser consultadas en www.ricyt.org. Quedan autorizadas las citas y la reproducción del contenido, con el expreso requerimiento de la mención de la fuente.

Diseño y diagramación: Julián Fernández Mouján
Obra de tapa y contratapa: FlyD en Unsplash

OEI

Mariano Jabonero
Secretario General

Ana Capilla
Directora de Educación Superior y Ciencia

Luis Scasso
Director de la Oficina en Argentina

Rodolfo Barrere
Coordinador OCTS y RICYT

Equipo Técnico del OCTS

Laura Trama
Secretaría Técnica de RICYT

Manuel Crespo
Difusión de conocimiento

Laura Osorio
Indicadores de educación superior

UNESCO

Audrey Azulay
Directora General

Lidia Brito
Directora General Adjunta de Ciencia

Guillermo Anlló
Especialista Regional del Programa de Política Científica y Tecnológica para América Latina y el Caribe

ORGANISMOS Y PERSONAS DE ENLACE

PAÍS	CONTACTO	ORGANISMO	SIGLA
ARGENTINA	Gustavo Arber	Secretaría de Innovación, Ciencia y Tecnología	SICT
BOLIVIA	Magali Paz García	Viceministerio de Ciencia y Tecnología	VCYT
BRASIL	Verena Hitner	Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação	MCTI
CANADÁ	Greg Maloney	Statistics Canada	STATCAN
CHILE	Jorge Andrés Urrutia Sepúlveda	Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación	MINCIENCIA
COLOMBIA	Efrén Romero Riaño	Observatorio Colombiano de Ciencia y Tecnología	OCYT
COSTA RICA	Antonette Williams Barnett	Ministerio de Ciencia, Innovación, Tecnología y Telecomunicaciones	MICITT
CUBA	Héctor Arias Martín	Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente	CITMA
EL SALVADOR	Luis Ernesto Fajardo Torres	Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología	CONACYT
ESPAÑA	Belén González Olmos	Instituto Nacional de Estadística	INE
ESTADOS UNIDOS	Gary Anderson	The National Center for Science and Engineering	NCSES
GUATEMALA	Roberto Soch	Secretaría Nacional de Ciencia y Tecnología	SENACYT
MÉXICO	Viridiana Gabriela Yañez Rivas	Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación	SECIHTI
PANAMÁ	Doris Quiel	Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación	SENACYT
PARAGUAY	Nathalie Elizabeth Alderete Troche	Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología	CONACYT
PERÚ	Fernando Jaime Ortega San Martín	Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología	CONCYTEC
PORTUGAL	Filomena Oliveira	Direção Geral das Estatísticas da Educação e Ciência	DGEEC
REPÚBLICA DOMINICANA	Rigoberto E. Reyes Hernandez	Ministerio de Educación Superior, Ciencia y Tecnología	MESCyT
TRINIDAD Y TOBAGO	Sharon Parmanan	National Institute of Higher Education, Research, Science and Technology	NIHERST
URUGUAY	Ximena Usher	Agencia Nacional de Investigación e Innovación	ANII
VENEZUELA	Elizabeth Rojas	Observatorio Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación	ONCTI

ÍNDICE



EL ESTADO DE LA CIENCIA



7 PRESENTACIÓN

9 SECCIÓN 1. EL ESTADO DE LA CIENCIA

11 1.1. EL ESTADO DE LA CIENCIA EN IMÁGENES

25 SECCIÓN 2. DOSSIER: COMPUTACIÓN CUÁNTICA

31 2.1. EL IMPACTO DE LA COMPUTACIÓN CUÁNTICA EN LA ACTIVIDAD CIENTÍFICA

45 2.2. COMPUTACIÓN CUÁNTICA. OPORTUNIDADES Y DESAFÍOS EN IBEROAMÉRICA

59 2.3. *BIT* POR *BIT* HACIA EL *QUBIT*: ENTRELAZANDO CAPACIDADES PARA LA COMPUTACIÓN CUÁNTICA EN AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE

69 2.4. COMPUTACIÓN CUÁNTICA: DESBLOQUEANDO UNA NUEVA FRONTERA COMPUTACIONAL

71 2.5. CHILE EN LA ERA CUÁNTICA: AVANCES, DESAFÍOS Y ESTRATEGIA NACIONAL

75 2.6. COMPUTACIÓN CUÁNTICA EN EL BARCELONA SUPERCOMPUTING CENTER

79 2.7. EL AMANECER DE LA VENTAJA CUÁNTICA

81 SECCIÓN 3. LA POLÍTICA CTI EN FOCO MARCOS INSTITUCIONALES E INSTRUMENTOS DE POLÍTICA DE LOS PAÍSES IBEROAMERICANOS

103 ANEXO. DEFINICIONES BÁSICAS UTILIZADAS

Desde su primera publicación, *El Estado de la Ciencia* propicia la combinación de la información estadística producida por la Red Iberoamericana de Indicadores de Ciencia y Tecnología (RICYT) y la perspectiva de expertos sobre los temas más actuales que tienen lugar en el ámbito de la ciencia y la tecnología. Editada por la Organización de Estados Iberoamericanos (OEI) -a través de su Observatorio Iberoamericano de la Ciencia, la Tecnología y la Sociedad (OCTS)- y la UNESCO, esta edición es el fruto del esfuerzo colaborativo de los organismos de ciencia y tecnología de los países participantes de la red, que proveen la información estadística incluida en el volumen, así como de una extensa comunidad de especialistas y organismos internacionales.

Como en anteriores oportunidades, *El Estado de la Ciencia 2025* incluye la mirada anual de RICYT a sus principales indicadores de ciencia y tecnología. “El Estado de la Ciencia en imágenes” entrega una representación gráfica de estos indicadores para sintetizar las tendencias de la ciencia y la tecnología en la región y su incidencia en el contexto global. Los indicadores comparativos presentan una visión del contexto económico, la inversión en I+D, los recursos humanos disponibles para la investigación y la producción científica de los países de la región, entre otras importantes cuestiones.

En 2025, además, ofrecemos un dossier que explora un ámbito crucial para el futuro global y el desarrollo de los países iberoamericanos: la computación cuántica. Los artículos reunidos en este volumen reflexionan sobre el aporte

que esta disciplina naciente podrá realizar para igualar las condiciones de vida en nuestras sociedades, las capacidades ya existentes en ellas y los desafíos que enfrentará la región al integrarse a una tendencia innovadora cada vez más evidente. La computación cuántica constituye simultáneamente una oportunidad estratégica y un riesgo: una oportunidad para los países que logren integrarse tempranamente al nuevo paradigma, y un riesgo de exclusión para aquellos que permanezcan al margen del desarrollo científico y tecnológico global.

El dossier comienza con “El impacto de la computación cuántica en la actividad científica”, artículo firmado por Guillermo Anlló, quien desentraña los modos en que la computación cuántica se está transformando en una herramienta imposible de soslayar a la hora de llevar adelante una investigación en cualquier área del conocimiento. Con el acento puesto en la producción científica y la colaboración internacional entre investigadores, “Computación cuántica. Oportunidades y desafíos en Iberoamérica” -trabajo de Rodolfo Barrere, Claudio Righetti, Juan Pablo Sokil y Laura Trama- sustenta con datos concretos el avance vertiginoso de la computación cuántica en el contexto de nuestra región. Este esfuerzo se replica en “*Bit por bit* hacia el *qubit*: entrelazando capacidades para la computación cuántica en América Latina y el Caribe” -texto a cargo de Eduardo Hernández-Rodríguez, Federico Moscatelli, Sergio Palomeque y Julio Raffo-, aunque el énfasis en este caso está puesto en la generación de patentes de invención relacionadas con desarrollos en computación cuántica.

Estos tres principales artículos del dossier se plantean como objetivo describir algunas de las características de las capacidades vinculadas con este nuevo paradigma tecnológico, así como también estudiar los instrumentos disponibles en América Latina y el Caribe que pueden servir de amparo para el desarrollo de capacidades en computación cuántica en la región. A esta propuesta se agregan textos breves que desarrollan conceptualizaciones de corte transversal y recorridos de casos testigos que muestran cómo el paradigma se está desplegando a escala planetaria y a nivel nacional en algunos países de Iberoamérica: “Computación cuántica: desbloqueando una nueva frontera computacional”, de Alejandro Zunino; “Chile en la era cuántica: avances, desafíos y estrategia nacional”, elaborado por la División de Tecnologías Emergentes del Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación del país trasandino; “Computación cuántica en el Barcelona Supercomputing Center”, de Alba Cervera Lierta; y “El amanecer de la ventaja cuántica”, de Zaira Nazario.

Para esta edición, se preparó además una sección especial, titulada “La política CTI en foco. Marcos institucionales e instrumentos de política de los países iberoamericanos”, que extiende una visión comparativa y detallada de los sistemas de ciencia, tecnología e innovación (CTI) de los países de la región a partir de la información alojada en la plataforma Políticas CTI (www.politicasciti.net). La sección se estructura alrededor de tres ejes principales para cada sistema nacional: i) su estructura institucional; ii) su marco normativo; y iii) un recuento de los instrumentos de promoción a nivel nacional, activos a 2025 (o último año disponible), a partir de las categorías que clasifican y ordenan estas iniciativas: I+D, innovación, recursos humanos y cultura científica, entre otras.

El Estado de la Ciencia 2025 se cierra con una selección de indicadores de la base de datos de la RICYT. El conjunto total de datos, que abarca 135 series estadísticas, puede ser visitado en www.ricyt.org. A ellos también se suman indicadores de educación superior provenientes del relevamiento de datos de la Red Iberoamericana de Indicadores de Educación Superior (INDICES) -disponibles en www.redindices.org-, que resultan un complemento muy importante para los indicadores de ciencia y tecnología en una región donde las universidades son actores protagónicos de la producción de conocimiento. En el sitio web, junto con los indicadores actualizados, se ponen a disposición documentos metodológicos y diferentes contenidos surgidos de las actividades de la RICYT, cuya lectura recomendamos a toda persona interesada en conocer el estado del arte de la ciencia y la tecnología en nuestros países.

Rodolfo Barrere

1. EL ESTADO DE LA CIENCIA



1.1. EL ESTADO DE LA CIENCIA EN IMÁGENES

El presente informe contiene un resumen gráfico de las tendencias en los indicadores de ciencia y tecnología de América Latina y el Caribe (ALC) e Iberoamérica. La información para su elaboración fue tomada de la base de datos de la Red Iberoamericana de Indicadores de Ciencia y Tecnología (RICYT), cuyos indicadores principales se encuentran en la última sección de este volumen y en www.ricyt.org. Los datos provienen de la información brindada por los organismos nacionales de ciencia y tecnología de cada país en el relevamiento anual sobre actividades científicas y tecnológicas que realiza la red.

Es importante hacer algunas aclaraciones respecto a su construcción. Los totales de América Latina y el Caribe e Iberoamérica son estimaciones realizadas por el equipo técnico de la RICYT. En el caso de los datos de países y estimaciones de otras regiones se utilizan las bases de datos del Instituto de Estadísticas de la Unesco (UIS) (<http://www.uis.unesco.org>) y de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) (<http://www.oecd.org>).

En parte de los gráficos incluidos en este informe se toma como período de referencia los diez años comprendidos entre 2014 y 2023, siendo éste el último año para el cual se dispone de información en la mayoría de los países.

Los valores relativos a inversión en I+D y PBI se encuentran expresados en paridad de poder de compra (PPC), con el objetivo de evitar las distorsiones generadas por las diferencias del tipo de cambio en relación con el dólar. Se han tomado los índices de conversión publicados por el Banco Mundial.

Para la medición de los resultados de la I+D, se presentan datos de publicaciones científicas y de patentes principalmente elaborados desde la coordinación de la red. Los indicadores bibliométricos provienen de la base de datos Scopus, tomando como fuente la publicación de SCIMAGO. En el caso de las patentes, se presenta información obtenida de la Organización Mundial de Propiedad Intelectual (OMPI).

Por último, en el anexo de este volumen se encuentran las definiciones de cada uno de los indicadores que se utilizan tanto en este resumen gráfico como en las tablas que se presentan en la última sección del libro.

PRINCIPALES EVIDENCIAS

Recursos económicos dedicados a I+D

La evolución del PBI de ALC e Iberoamérica en el decenio comprendido entre 2014 y 2023 (medido en millones de dólares corrientes PPC) evidencia una expansión sostenida del producto regional, con un dinamismo relativamente mayor en el agregado iberoamericano a partir de 2021.

La evolución de la inversión destinada a actividades de investigación y desarrollo (I+D) en ambas regiones evidencia una dinámica diferente a la de la actividad económica en general. A partir de 2015, el nivel de inversión en actividades de investigación y desarrollo (I+D) de los países de ALC decreció y se recuperó recién a partir de 2020. Iberoamérica mostró un periodo de contracción más corto entre 2016 y 2017 y su crecimiento en los últimos cuatro años fue más acelerado comparado al de ALC. Con posterioridad a la pandemia, se incrementaron los niveles de inversión en I+D en ambas regiones, pero su velocidad de crecimiento fue menor a la de la actividad económica.

Una de las características de la inversión en I+D en ALC es su fuerte concentración en pocos países. En 2023 la inversión realizada por Brasil representó el 62,5% regional; México y Argentina rondaron el 10%, mientras que Chile y Colombia alcanzaron el 3%. El resto de los países de la región representa el 12% del total del bloque.

Si bien los volúmenes de recursos económicos dedicados a actividades de investigación son muy dispares entre países, es interesante mencionar que en casi todos los casos la inversión en 2023 fue mucho mayor a la realizada diez años atrás.

La inversión en I+D de los países de ALC representó el 4,4% del total mundial. Si bien esta participación es levemente superior a la registrada en 2014, su peso relativo continúa siendo reducido dentro del agregado global.

12

En 2023, la inversión en I+D del conjunto de países de ALC representó el 0,60% de su PBI. Solo Brasil y Uruguay superaron el valor regional, con 1,19% y 0,71% respectivamente, mientras que Argentina se ubica justo en el promedio. El resto de los países muestra intensidades de inversión inferiores a 0,40%, con varios casos por debajo del 0,20%.

El análisis del origen de los recursos económicos destinados a actividades de I+D, más allá del sector donde se realizan dichas actividades, muestra que el sector gobierno es la principal fuente de financiación a nivel regional y representa prácticamente la mitad de la inversión en la mayoría de los países.

Recursos humanos dedicados a I+D

En Iberoamérica la cantidad de investigadores medidos en equivalencia a jornada completa (EJC) pasó de 457.000 en 2014 a 667.000 en 2023, mientras que la cantidad de investigadores EJC de ALC pasó de 297.000 a 429.000 en 2023. Con un crecimiento sostenido año a año, la evolución del total de investigadores de ALC representó +45% de punta a punta.

El **Gráfico 2.2** presenta la cantidad de investigadores EJC por cada mil integrantes de la población económicamente activa (PEA), lo que permite dimensionar la intensidad relativa de los recursos humanos en I+D según la fuerza de trabajo disponible en cada país. Los datos de la cantidad de investigadores EJC por cada mil integrantes de la PEA por país muestran una marcada heterogeneidad dentro de Iberoamérica y una brecha significativa respecto de economías más desarrolladas. El valor promedio para Iberoamérica en 2023 fue 2,05 y el de América Latina y el Caribe 1,32.

Al concentrar el 74,2% de sus investigadores, la distribución de investigadores medidos en personas físicas (PF) según sector de empleo evidencia el rol central que tiene el ámbito de la educación superior en ALC.

El análisis de la proporción de mujeres respecto al total de investigadores en la región muestra que en Argentina, Venezuela, Paraguay y Uruguay las mujeres representan más de la mitad de las personas dedicadas a la investigación, situándose por encima del promedio de ALC (46%). En contraste, su participación es claramente minoritaria en los casos de Perú y Chile.

Indicadores de producto

La cantidad de publicaciones indexadas en Scopus en 2023 y su comparación con 2014 muestran que en casi todos los países iberoamericanos se registró un crecimiento de su producción científica. Aunque aún presentan volúmenes de producción comparativamente reducidos, Perú y Ecuador registran los incrementos relativos más significativos.

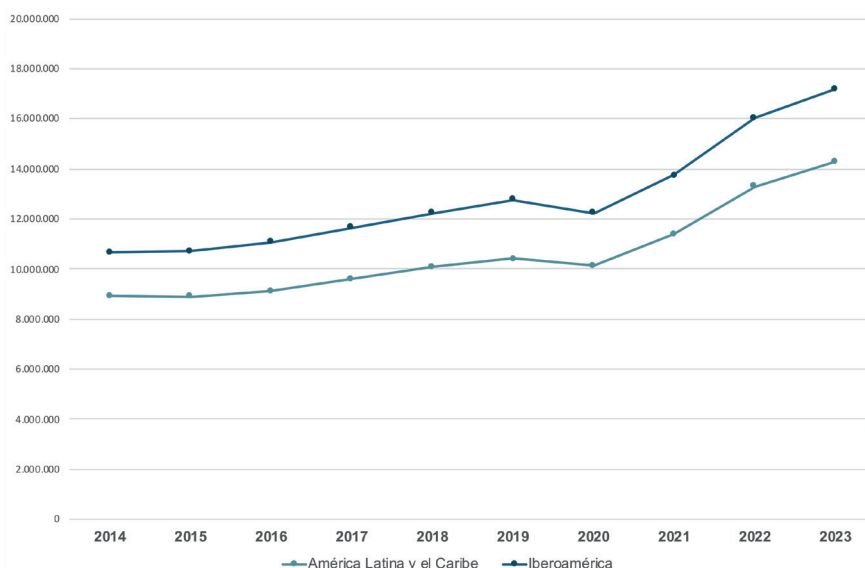
La cantidad de solicitudes de patentes PCT por país de origen en 2014 y 2023 refleja una alta concentración de la capacidad de patentamiento en pocos países y un bajo desarrollo regional en materia de solicitudes. Iberoamérica registró 3.152 en 2014 y 2.908 solicitudes en 2023, mientras que ALC pasó de 1.435 a 1.162 solicitudes.

España se ubica claramente en primer lugar, con un aumento de 1.552 a 1.771 solicitudes, seguida por Brasil, que pasa de 554 a 665. Portugal, Chile, México y Colombia consolidan un grupo intermedio con volúmenes que en 2023 oscilaron entre 132 y 260 solicitudes. El resto de los países mostró niveles significativamente menores, por debajo de 50 solicitudes anuales en la mayoría de los casos.

1. RECURSOS ECONÓMICOS DEDICADOS A I+D

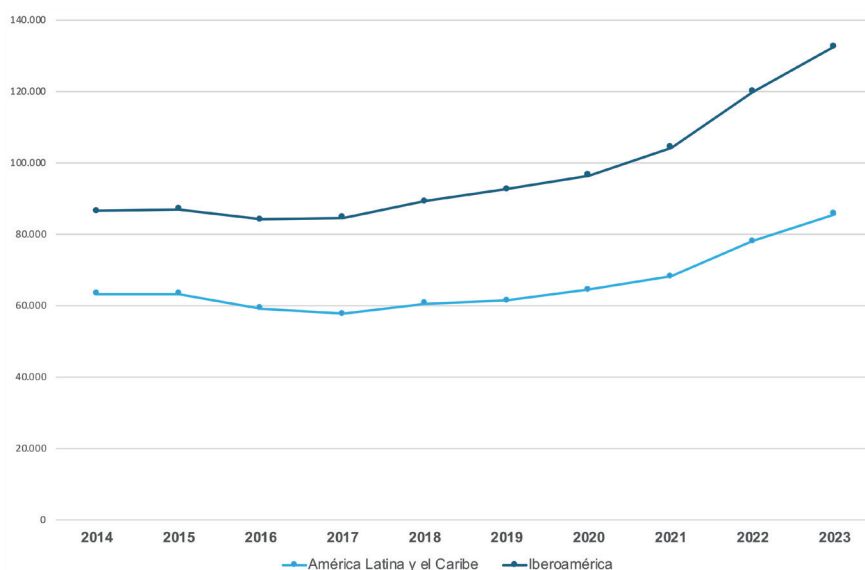
1.1. El contexto económico: evolución del PBI en ALC e Iberoamérica (millones de dólares corrientes PPC)

La evolución del PBI de ALC e Iberoamérica en el decenio comprendido entre 2014 y 2023 muestra una evolución positiva de punta a punta (cercana al 60%). Ambas series exhiben una trayectoria ascendente en el período, aunque con un punto de inflexión en 2020 asociado a la contracción económica global a raíz del impacto de la pandemia de COVID-19. A partir de 2021, las dos regiones retoman una senda de crecimiento acelerado, pero de manera más marcada en Iberoamérica. Los datos evidencian una expansión sostenida del producto regional en la última década, con un dinamismo relativamente mayor en el agregado iberoamericano.



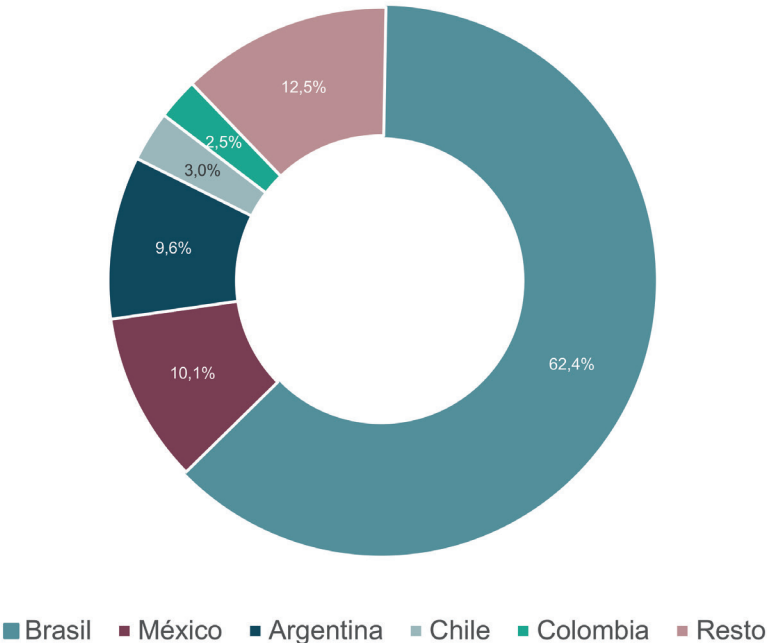
1.2. Evolución de la inversión en I+D de ALC e Iberoamérica (millones de dólares PPC)

Si analizamos la evolución de la inversión destinada a actividades de investigación y desarrollo (I+D) en ambas regiones, su dinámica a lo largo del periodo es diferente a la de la actividad económica en general. A partir de 2015, el nivel de inversión de los países de ALC decreció y se recuperó recién a partir de 2020. Iberoamérica, que también contempla la inversión que realizan España y Portugal, muestra un periodo de contracción más corto entre 2016 y 2017; sobre todo, su crecimiento en los últimos cuatro años fue más acelerado comparado con el de ALC. Con posterioridad a la pandemia, se incrementaron los niveles de inversión en I+D en ambas regiones, pero su velocidad de crecimiento fue menor a la de la actividad económica.



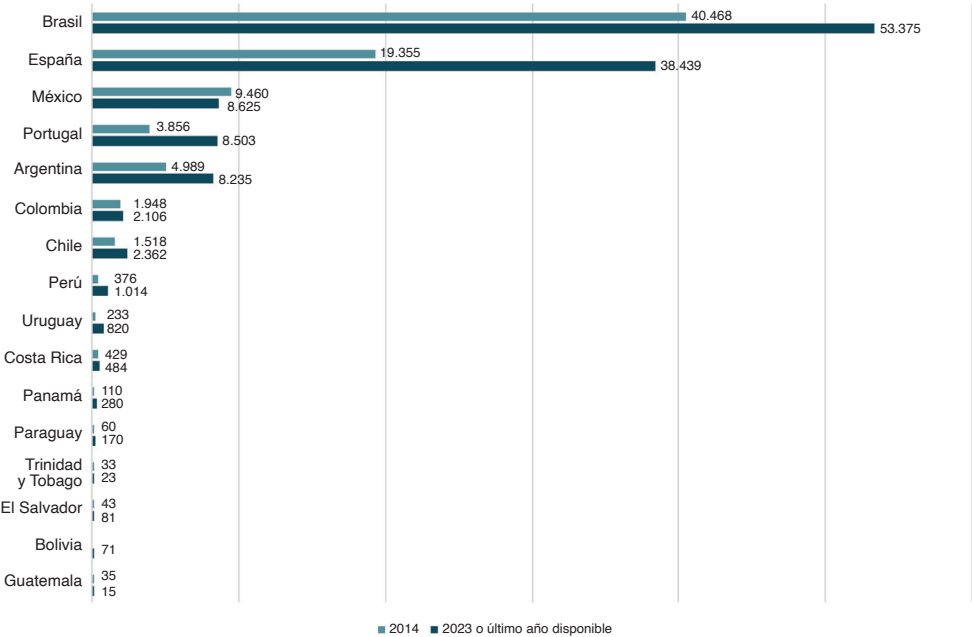
1.3. Distribución de la inversión en I+D en ALC (2023)

Una de las características de la inversión en I+D en ALC es su fuerte concentración en pocos países. En 2023 la inversión realizada por Brasil representó el 62,5% regional, México y Argentina rondaron el 10%, mientras que Chile y Colombia alcanzaron el 3%. El resto de los países de la región representó el 12% regional.



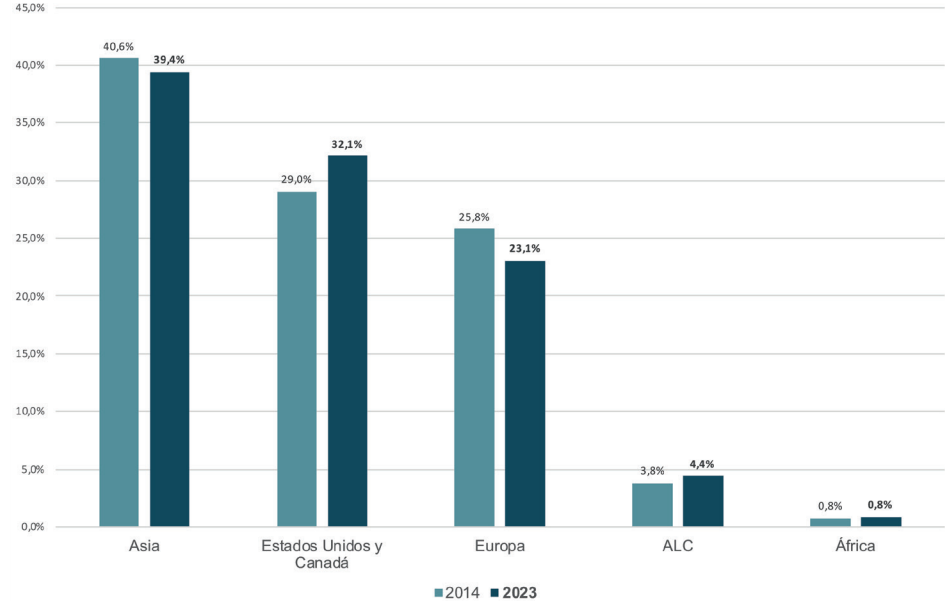
1.4. Inversión en I+D en países seleccionados (millones de dólares PPC)

Este gráfico muestra los niveles de inversión de la mayoría de los países iberoamericanos para 2014 y 2023. Si bien los volúmenes de recursos económicos dedicados a actividades de investigación son muy dispares entre países, es interesante mencionar que en casi todos los casos la inversión en 2023 fue mucho mayor a la realizada diez años atrás. Entre los países de mayor incremento relativo se ubican Uruguay, Paraguay, Perú y Cuba.



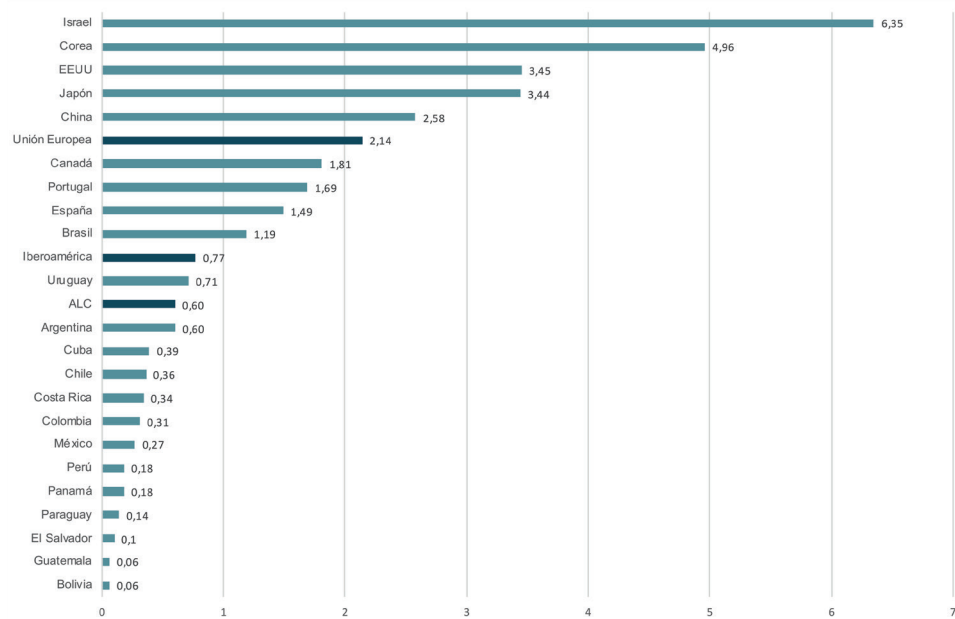
1.5. Distribución de la inversión mundial en I+D por bloques geográficos seleccionados (2014 y 2023)

La inversión en I+D de los países de ALC representó el 4,4% del total mundial. Si bien esta participación es levemente superior a la registrada en 2014, su peso relativo continúa siendo reducido dentro del agregado global. En 2023, la mayor contribución correspondió a los países asiáticos, con una participación del 39%, seguida por el bloque conformado por Estados Unidos y Canadá, que alcanzó el 34%. Por su parte, los países europeos concentraron el 23% de la inversión mundial en I+D.

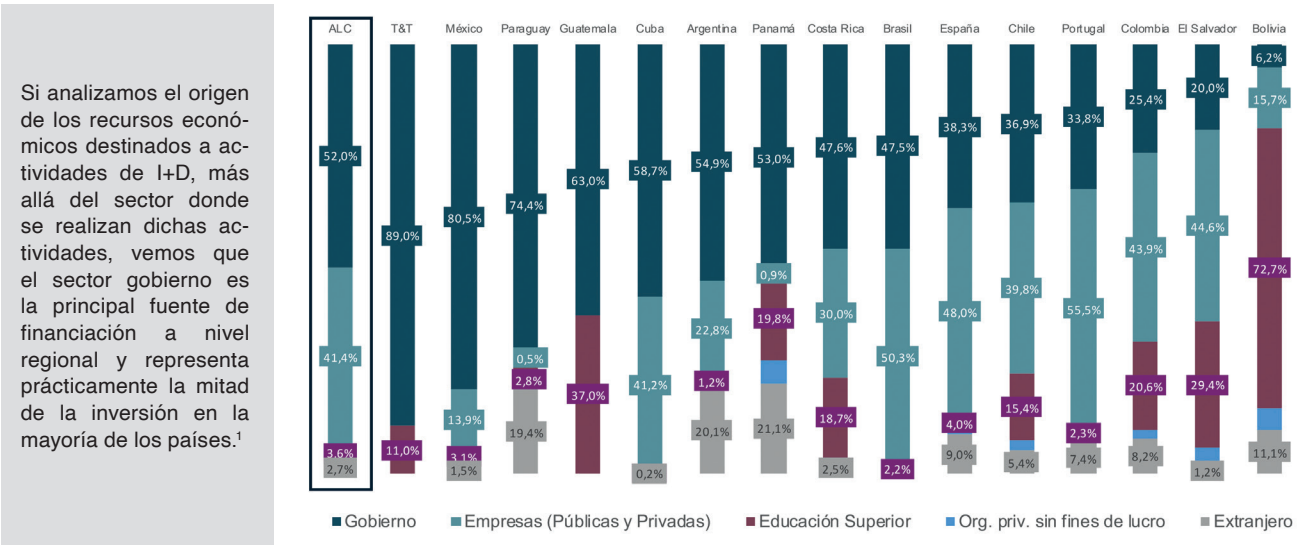


1.6. Inversión en I+D en relación con el PBI en países seleccionados (2023 o último disponible)

Los datos de este gráfico muestran el peso que tienen los recursos destinados a actividades de I+D en relación con el total de la producción económica en diferentes países y regiones para el 2023 (o último año disponible). Israel (6,35%) y Corea (4,96%) presentan los niveles más elevados, seguidos por Estados Unidos (3,45%), Japón (3,44%) y China (2,58%). ALC registra un esfuerzo relativo sustancialmente menor con un promedio regional del 0,60%. Solo Brasil y Uruguay superan el valor regional con 1,19% y 0,71%, respectivamente, mientras que Argentina presenta un valor igual al promedio. El resto de los países muestra intensidades de inversión inferiores a 0,40%, con varios casos por debajo del 0,20%.



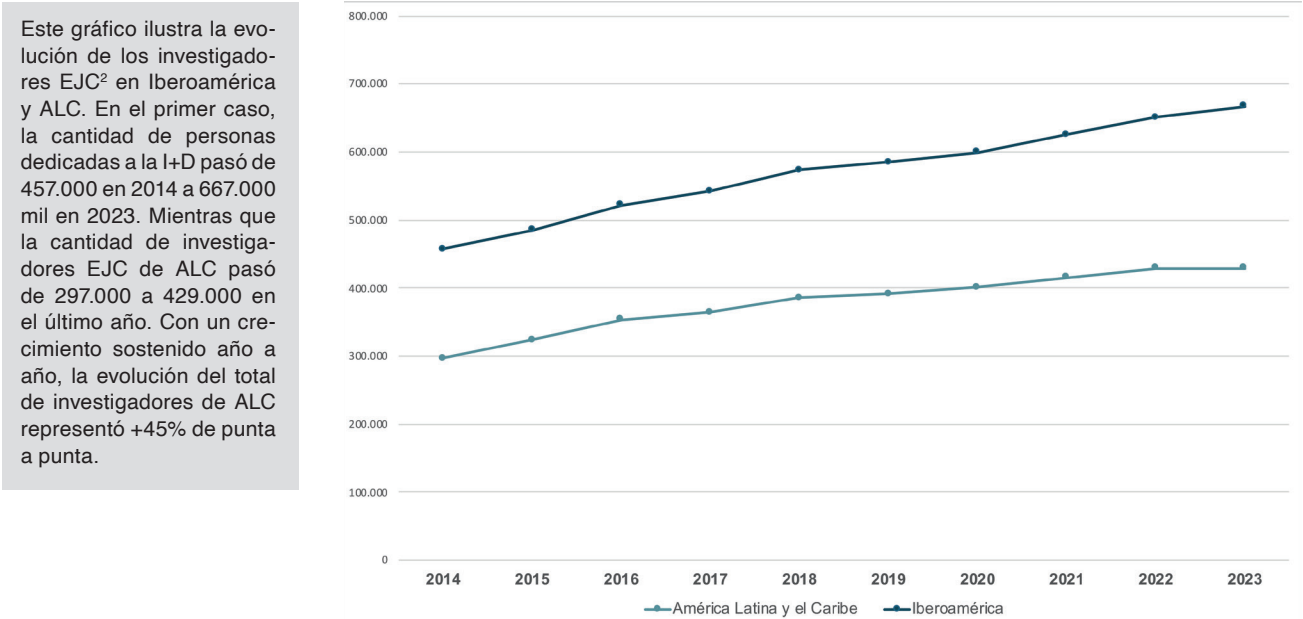
1.7. Inversión en I+D por sector de financiamiento por país (2023 o último disponible)



1. Es importante aclarar que no todos los países cuentan con la posibilidad de medir la totalidad de los sectores que realizan I+D, como son los casos de Trinidad y Tobago y Guatemala.

2. RECURSOS HUMANOS DEDICADOS A I+D

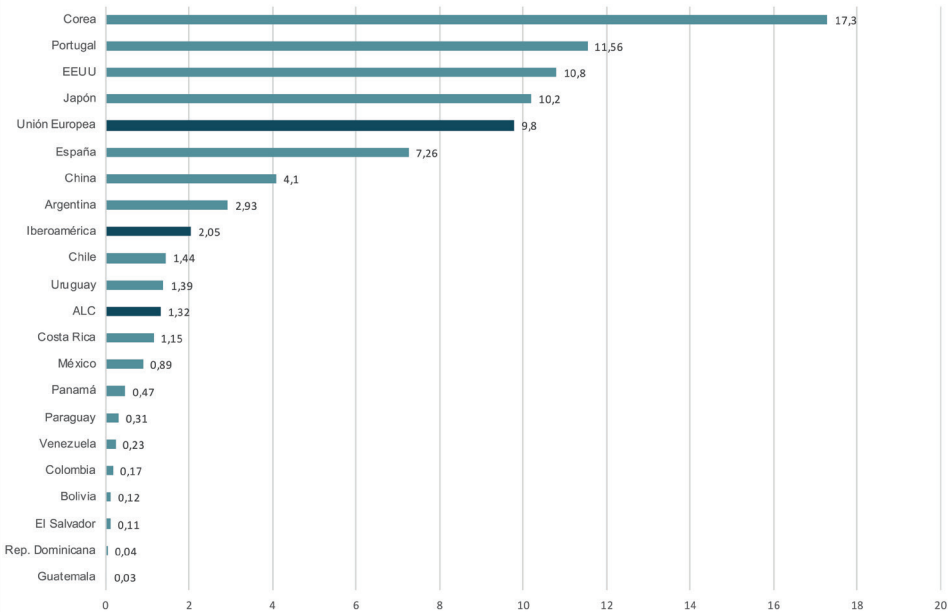
2.1. Evolución de la cantidad de investigadores EJC en ALC e Iberoamérica



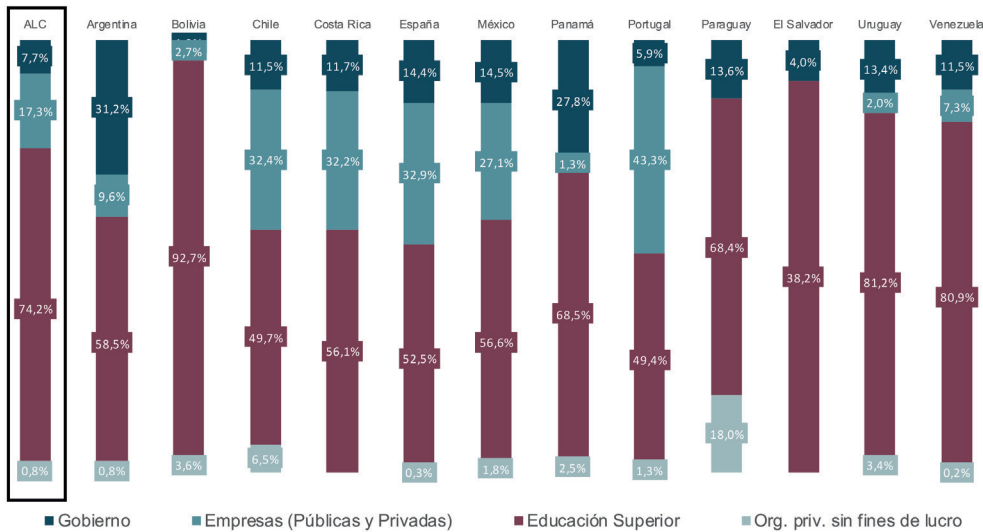
2. La información sobre la cantidad de investigadores se encuentra expresada en EJC, una medida que facilita la comparación internacional, ya que se trata la suma de las dedicaciones parciales a la I+D que llevan a cabo los investigadores durante el año. Refiere así con mayor precisión al tiempo dedicado a la investigación y resulta de particular importancia en sistemas de ciencia y tecnología en los que el sector universitario tiene una presencia preponderante, como es el caso de los países de ALC donde los investigadores distribuyen su tiempo con otras actividades como la docencia.

2.2. Investigadores EJC cada mil integrantes de la PEA en países seleccionados (2023 o último disponible)

Este gráfico presenta la cantidad de investigadores EJC por cada mil integrantes de la población económicamente activa (PEA), lo que permite dimensionar la intensidad relativa de los recursos humanos en I+D según la fuerza de trabajo disponible en cada país. Los datos muestran una marcada heterogeneidad dentro de Iberoamérica y una brecha significativa respecto de economías más desarrolladas. Portugal registra el valor más elevado de la región iberoamericana (11,56), seguido por España (7,26) y por Argentina (2,93). Argentina, Chile y Uruguay se ubican por encima del promedio de América Latina y el Caribe (1,32). En comparación, la intensidad de investigadores es sustancialmente mayor en la Unión Europea (9,8), Estados Unidos (10,8) o Corea (17,3).

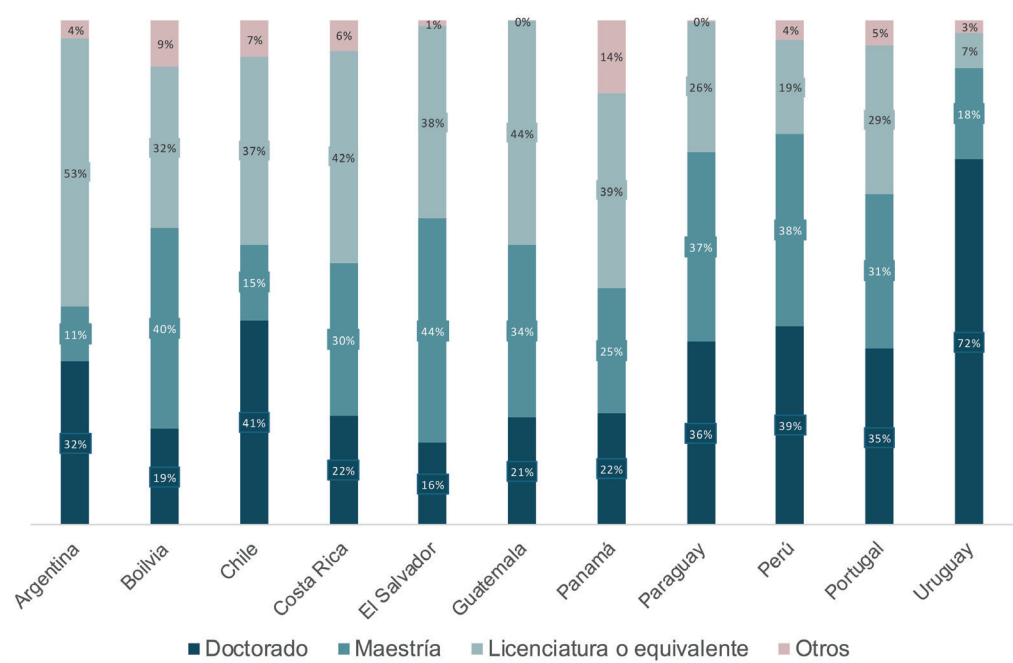


2.3. Investigadores (personas físicas) por sector de empleo (2023 o último disponible)



El rol central del sector de educación superior en la región se evidencia al concentrar el 74,2% de sus investigadores. Este gráfico muestra la distribución de las personas dedicadas a actividades de investigación en ALC y en una selección de países, según sector de empleo. En la mayoría de los casos, el sector de educación superior constituye el principal ámbito de inserción, mientras que el sector empresarial (público y privado) ocupa el segundo lugar en Portugal, España, Chile, Costa Rica y México. En los demás países, el sector gobierno aparece como el segundo ámbito de empleo más relevante, particularmente en Argentina y Panamá.

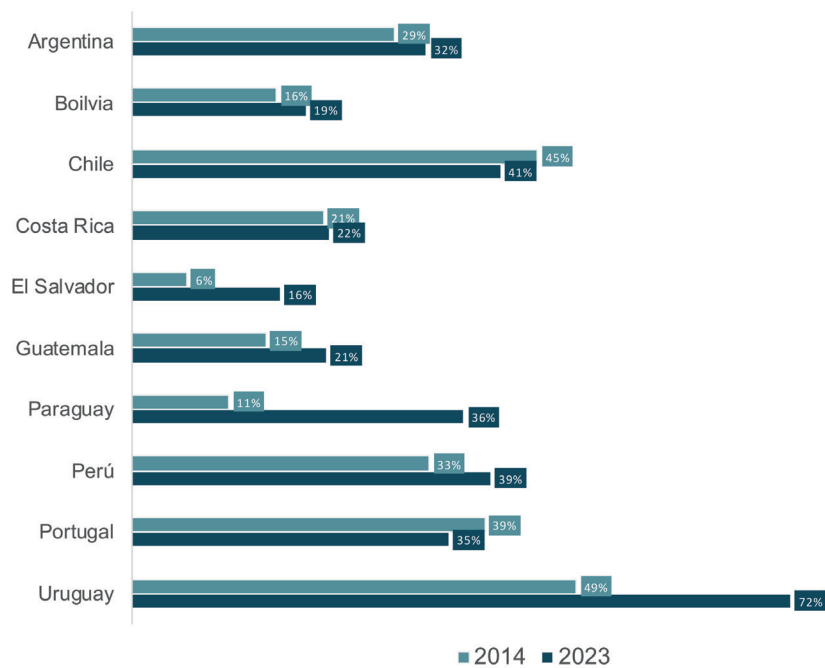
2.4. Investigadores (personas físicas) por nivel de graduación (2023 o último disponible)



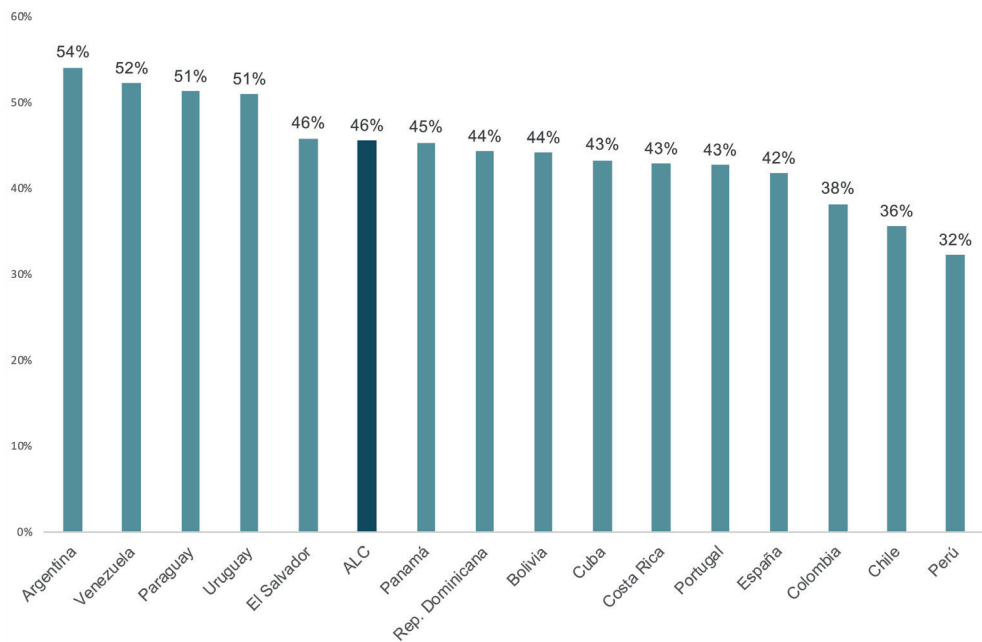
Este gráfico muestra la distribución de los investigadores y las investigadoras de diferentes países, de acuerdo con el máximo nivel de formación alcanzado. Destaca ampliamente la proporción de investigadores con doctorados en Uruguay, mientras que entre 30% y 40% de los investigadores en Argentina, Portugal, Paraguay, Perú y Chile alcanzó ese nivel de formación. En El Salvador y Bolivia se destacan las maestrías como la titulación más alta de sus investigadores.

2.5. Investigadores (personas físicas) con doctorado (2014 y 2023 o último disponible)

Este gráfico evidencia que, en la mayoría de los países de la región, la proporción de investigadores con doctorado aumentó a lo largo de la década analizada. Los incrementos más significativos se registraron en Uruguay y Paraguay.



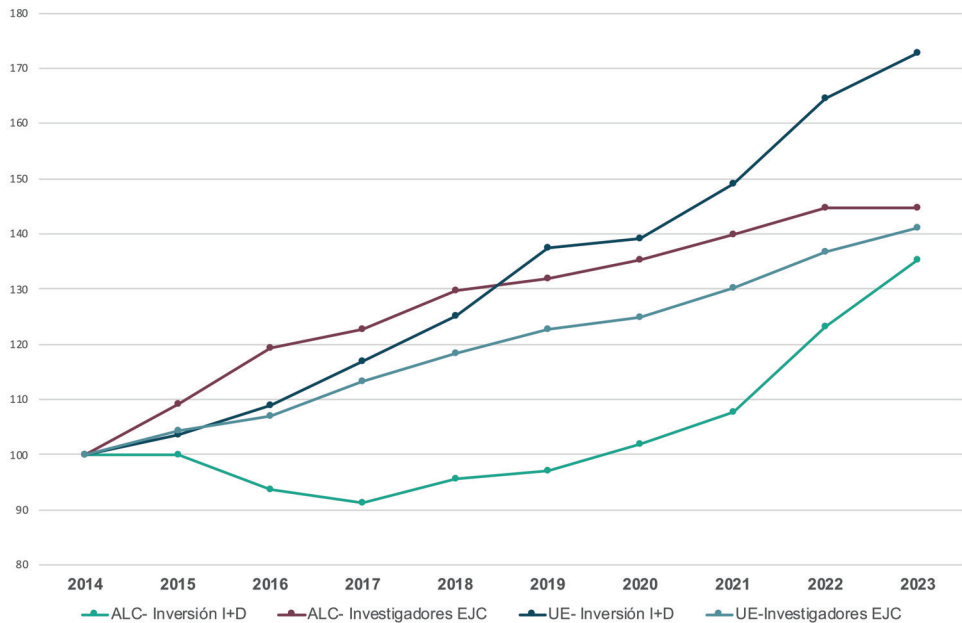
2.6. Porcentaje de investigadoras sobre el total de investigadores (personas físicas) (2023 o último año disponible)



Este gráfico presenta la proporción de mujeres respecto del total de investigadores en cada país. En Argentina, Venezuela, Paraguay y Uruguay las mujeres representan más de la mitad de las personas dedicadas a la investigación, situándose por encima del promedio de ALC (46%). En contraste, su participación es claramente minoritaria en los casos de Perú y Chile.

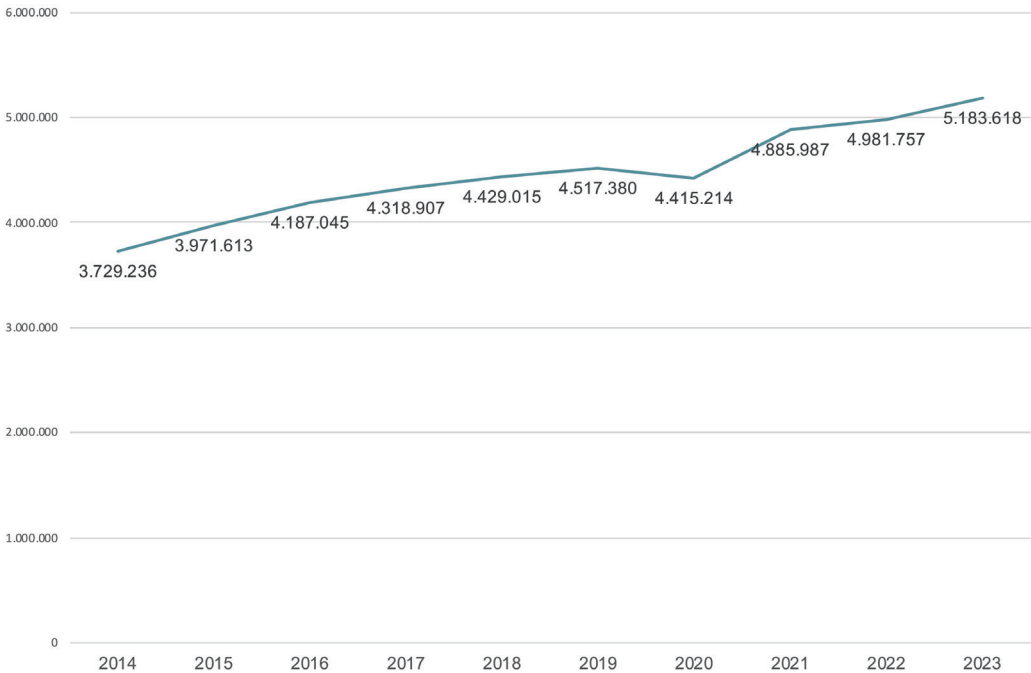
2.7. Evolución comparativa de los recursos financieros y humanos destinados a I+D en la región

Este gráfico presenta la evolución porcentual de la inversión en I+D y de la cantidad de investigadores EJC en ALC y en la Unión Europea (UE) durante el periodo 2014-2023, tomando 2014 como base 100. El análisis comparativo muestra que los recursos humanos dedicados a I+D crecieron de manera sostenida en ambas regiones, con tasas incluso mayores en ALC. En contraste, la dinámica de los recursos financieros exhibe diferencias marcadas: mientras que la inversión en I+D de la UE aumentó de forma continua a lo largo de la década, la trayectoria de ALC evidencia períodos de contracción y fases de crecimiento más moderado.



3. FLUJO DE GRADUADOS EN IBEROAMÉRICA

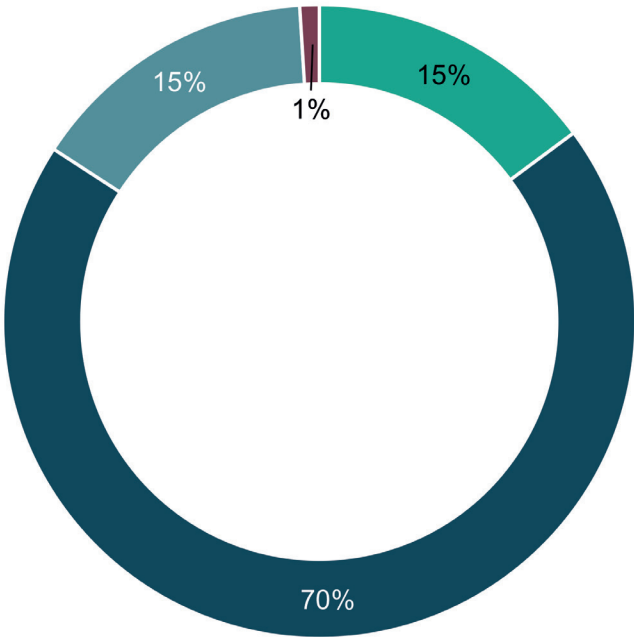
3.1. Evolución de la cantidad de graduados en Iberoamérica



La cantidad de graduados de la educación superior por año en Iberoamérica pasó de 3,7 millones en 2014 a casi alcanzar los 5,2 millones de personas en 2023.

3.2. Graduación en Iberoamérica por nivel CINE (2023)

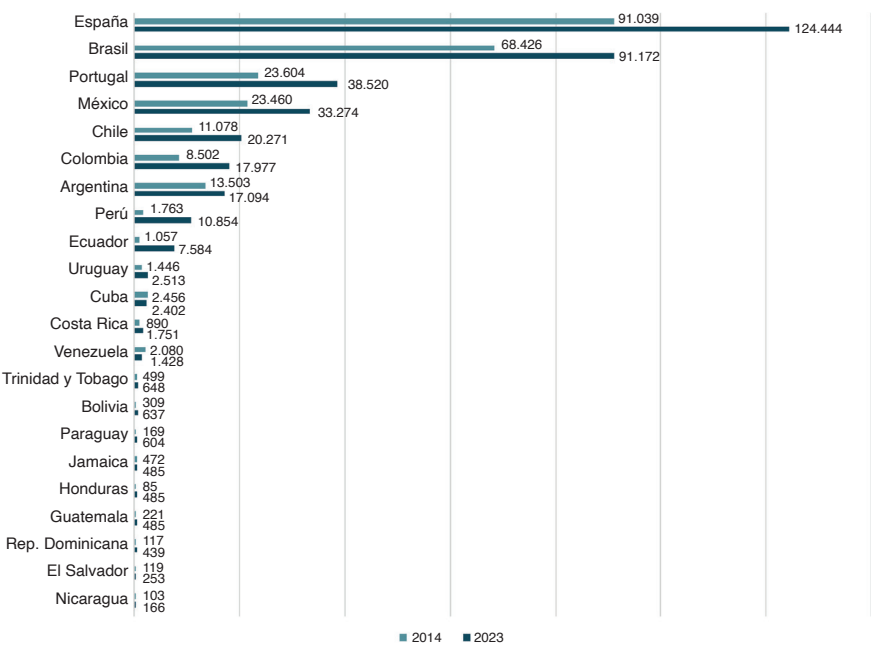
La amplia mayoría de las titulaciones (70%) corresponde al nivel CINE 6 (licenciaturas o equivalentes). Las maestrías, ubicadas en el nivel CINE 7, representaron el 15% de las titulaciones y el 1% a estudiantes que completaron sus estudios de doctorado.



4. INDICADORES DE PRODUCTO

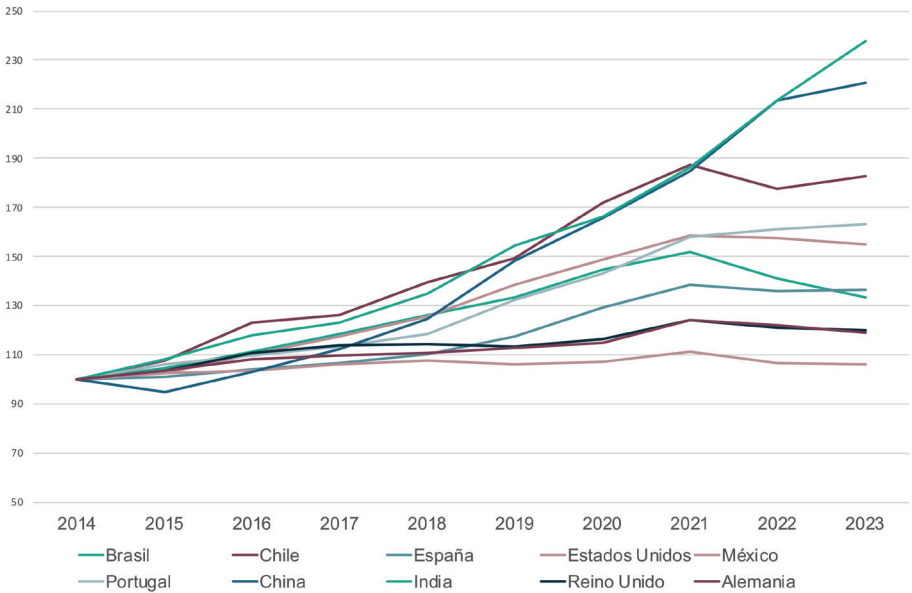
4.1. Cantidad de publicaciones en Scopus en países seleccionados (2014 y 2023)

Este gráfico muestra la cantidad de publicaciones indexadas en Scopus para países seleccionados en 2023 y su comparación con 2014. España encabeza ampliamente el listado con 124.444 publicaciones, seguida por Brasil con 91.172. Portugal (38.520), México (33.274), Chile (20.271), Colombia (17.977) y Argentina (17.094) conforman el grupo siguiente de mayor producción. Luego siguen Perú y Ecuador, con alrededor de 10.800 y 7.600 artículos respectivamente, y un conjunto de países -Venezuela, Costa Rica, Cuba y Uruguay- cuyo volumen se sitúa entre 1.000 y 2.500 publicaciones. El resto de los países muestra niveles sensiblemente menores, entre 200 y 700 artículos anuales. En casi todos los casos se registra un crecimiento significativo respecto de 2014, lo que evidencia una expansión sostenida de la producción científica en la región. Aunque aún presentan volúmenes de producción comparativamente reducidos, Perú y Ecuador registran los incrementos relativos más significativos.



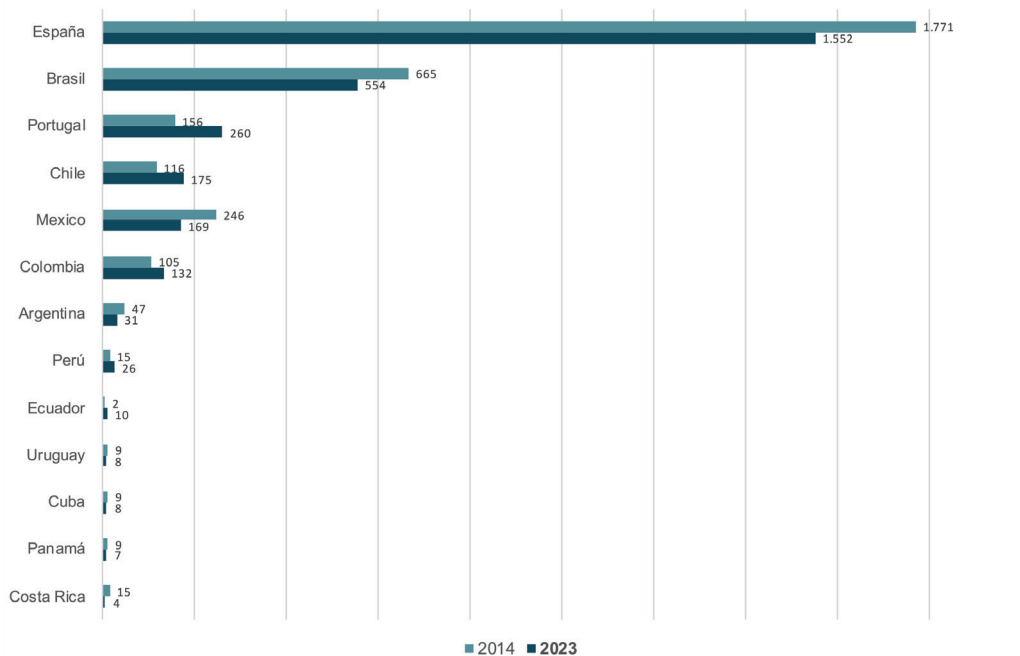
4.2. Evolución de la cantidad de publicaciones en Scopus (2014= base 100) en países seleccionados

Este gráfico muestra la evolución porcentual de la producción científica entre 2014 y 2023 -tomando 2014 como base 100- para los cinco principales productores a nivel mundial y los cinco países líderes de Iberoamérica.³ India registra el crecimiento más acelerado a lo largo de la década. Portugal y China también exhiben trayectorias ascendentes sostenidas, con incrementos cercanos o superiores al 200% en el período. España, Brasil y Chile presentan crecimientos moderados pero constantes, mientras que Estados Unidos, Reino Unido, Alemania y México muestran incrementos más acotados y una tendencia a la estabilización en los últimos años.



3. Las diferencias en términos de volumen de producción son muy significativas: China registró 1.076.300 artículos en Scopus en 2023, Estados Unidos 734.258, India 318.271, y Reino Unido y Alemania entre 200.000 y 250.000 publicaciones. Iberoamérica en su conjunto representa el 8% de la producción mundial.

4.3. Cantidad de patentes PCT según país del solicitante

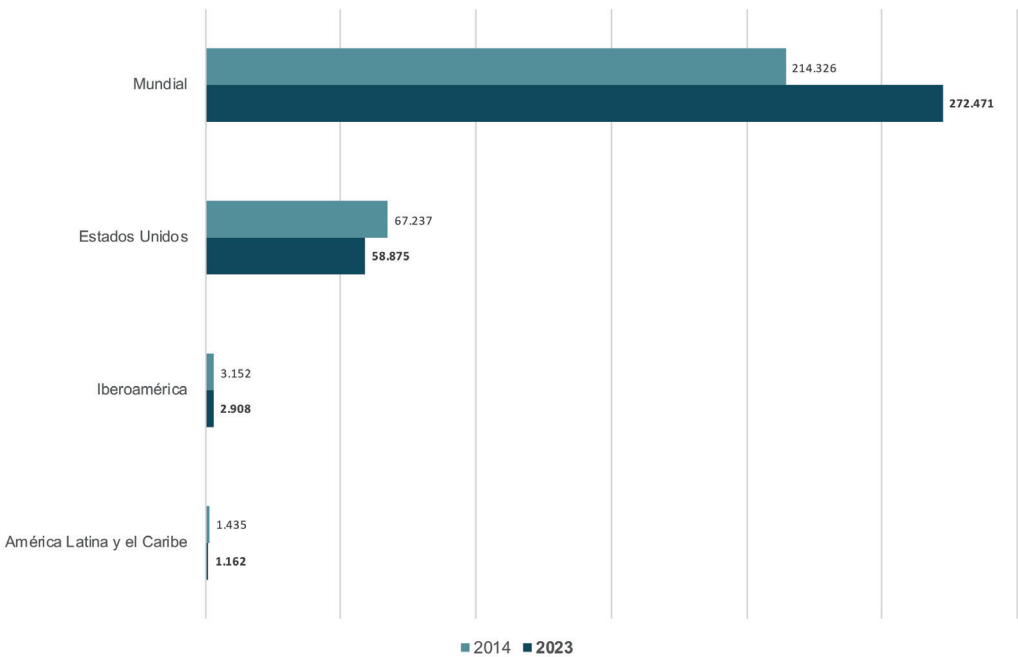


Aquí se presenta la cantidad de solicitudes de patentes PCT por país de origen en 2014 y 2023. España se ubica claramente en primer lugar, con un aumento de 1.552 a 1.771 solicitudes, seguida por Brasil, que pasa de 554 a 665. Portugal, Chile, México y Colombia consolidan un grupo intermedio con volúmenes que en 2023 oscila-

ron entre 132 y 260 solicitudes. El resto de los países mostró niveles significativamente menores, por debajo de 50 solicitudes anuales en la mayoría de los casos. En conjunto, los datos reflejan una alta concentración de la capacidad de patentamiento en pocos países y un bajo desarrollo regional en materia de solicitudes PCT.

4.4. Cantidad de patentes PCT según país del solicitante en regiones seleccionadas

Este gráfico muestra los niveles de patentamiento de Iberoamérica y ALC en comparación con la tendencia mundial. Los volúmenes regionales son significativamente menores y ambas regiones presentaron caídas entre 2014 y 2023, pasando de 3.152 a 2.908 solicitudes en Iberoamérica, y de 1.435 a 1.162 en ALC.



2. DOSSIER: COMPUTACIÓN CUÁNTICA



Cada vez existen más evidencias de que el futuro de la humanidad se verá impactado por una nueva revolución: el desarrollo de las tecnologías cuánticas. En los últimos años estas innovaciones han abierto un horizonte fascinante que podría alterar de raíz la manera en que pensamos la informática, la comunicación y la salud, entre muchos otros campos. El ejemplo más prometedor es el de la computación cuántica, ámbito donde los dispositivos podrán resolver, en cuestión de segundos, problemas que hoy en día demandan siglos de cálculos y correcciones, lo que acelerará todo tipo de hallazgos científicos y tecnológicos.

Al igual que en otras disrupciones tecnológicas, estos avances obligan a reflexionar sobre cómo se distribuirán sus beneficios, quiénes disfrutarán de ellos y qué iniciativas deberán impulsarse para que las herramientas cuánticas sirvan al bien común. En una región como la nuestra, donde se comprueban hondas desigualdades en materia social, la obligación es todavía más acuciante. Es imprescindible que Iberoamérica se sume a una revolución que podría diversificar nuestras economías, apuntalar los ámbitos de salud y educación, y sobre todo ayudar a resolver problemas estructurales de larga data. Por otro lado, se deben tomar recaudos para que la brecha tecnológica con los países más desarrollados no se amplíe. También es importante que nuestra región tenga sus propias capacidades en relación con esta tecnología para poder desarrollar soluciones adaptadas a las características propias de nuestros países y no depender así de las que nos ofrezcan terceros. Para lograrlo, es necesario promover una integración de estrategias de desarrollo inclusivo que apuesten por la formación de talentos, la cooperación entre naciones y la transferencia de conocimiento como llave definitiva para la equidad y el progreso compartido por todos.

Por su trayectoria histórica, alcance y capacidad de articulación con distintos gobiernos locales, provinciales y nacionales, así como también con otros organismos internacionales, la Organización de Estados Iberoamericanos (OEI) para la Educación, la Ciencia y la Cultura puede desempeñar un rol fundamental en la asistencia al diseño de instrumentos que permitan diagramar programas de formación y capacitación que promuevan el acceso de los ciudadanos a conocimientos en cuántica, especialmente en el caso de los jóvenes que ocuparán puestos laborales en los próximos años. Esto, en concreto, implica fomentar el diálogo y las colaboraciones entre sectores -universidades, centros científicos, empresas, comunidades- y favorecer la puesta a punto de políticas que estimulen buenas prácticas y tengan como norte la mejora de las condiciones de vida de todas las personas que conviven al interior de las naciones de la región.

Como se hizo en anteriores ediciones de *El Estado de la Ciencia* con otros temas de gran relevancia, el dossier de 2025 propone observar la computación cuántica en términos de su relación con el quehacer académico y la producción científica en Iberoamérica. En el marco de este gigantesco cambio de paradigma tecnológico, que tendrá fuertes consecuencias a mediano y largo plazo, esta publicación es un paso importante para orientar el trabajo de la OEI hacia el abordaje de este fenómeno. Para lograr que la revolución tecnológica derive en frutos compartidos, tenemos la certeza de que la OEI debe convertirse en un puente estable entre la ciencia, la tecnología, la política y la sociedad de nuestros países. Hacia allí vamos.

* Secretario General de la Organización de Estados Iberoamericanos (OEI) para la Educación, la Ciencia y la Cultura.

Como destacará esta nueva edición de *El Estado de la Ciencia*, América Latina y el Caribe siguen avanzando en producción científica y capacidad institucional, al tiempo que se enfrentan al imperativo de alinear mejor los sistemas de investigación con las transformaciones globales orientadas al futuro. La proclamación de 2025 como Año Internacional de la Ciencia y la Tecnología Cuánticas (IYQ), liderada por la UNESCO, ofrece una oportuna lente a través de la cual reflexionar sobre el papel de la región en el desarrollo de las ciencias emergentes.

La ciencia cuántica es emblemática de un cambio más amplio hacia tecnologías de vanguardia que reconfigurarán la comunicación, la informática, la salud y la sostenibilidad. Mientras los países del Norte Global aumentan rápidamente sus inversiones y capacidades, muchos otros corren el riesgo de quedarse atrás. La creciente “brecha cuántica” es un recordatorio de desigualdades estructurales más profundas en el acceso al conocimiento, las infraestructuras y la cooperación internacional. Para América Latina, ésta no es una razón para retroceder, sino para actuar.

Esta región alberga un vibrante talento científico, universidades de talla mundial y una sólida tradición de excelencia en ciencias básicas. En todos los países existe un creciente interés por la investigación cuántica y sus campos afines. Así pues, el AIC2025 llega no solo como una celebración mundial, sino como una oportunidad estratégica para reforzar las capacidades nacionales, mejorar la educación y la formación -especialmente entre los jóvenes y las mujeres- y fomentar el compromiso de los sectores público y privado con las tecnologías de vanguardia.

La celebración también se alinea estrechamente con la misión de la Red Iberoamericana de Indicadores de Ciencia y Tecnología (RICYT) y los objetivos de este informe sobre el estado de la ciencia. Nos invita a mirar hacia delante: ¿cómo podemos posicionar a la región para los próximos veinte años de desarrollo científico y tecnológico? ¿Cómo podemos traducir los esfuerzos nacionales en cooperación regional? ¿Y cómo podemos garantizar que nuestras agendas científicas reflejen no sólo la excelencia, sino también la equidad y la inclusión?

Ha llegado el momento de imaginar una “Red Cuántica del Sur”, basada en la colaboración Sur-Sur y la solidaridad regional. Trabajando juntos -a través de plataformas compartidas, coordinación de políticas y esfuerzos de capacitación-, América Latina y el Caribe pueden ayudar a dar forma a un futuro en el que las tecnologías cuánticas, y las ciencias emergentes en general, sirvan al bien común.

* Directora General Adjunta de Ciencias Naturales de la UNESCO.

2.1. EL IMPACTO DE LA COMPUTACIÓN CUÁNTICA EN LA ACTIVIDAD CIENTÍFICA

GUILLERMO ANLLÓ *

INTRODUCCIÓN

Inicié mi carrera profesional en un instituto de estudios sociales de la ciencia en la Universidad de Quilmes, donde realizaba múltiples tareas: de gestión, administrativas, docencia e investigación. Frente a una actualización del Word que permitía dictar por voz la escritura, uno de nuestros mentores le jugó una broma a una joven pasante diciendo que él escribía sus *papers* simplemente diciéndole un par de ideas y que la computadora se lo devolvía escrito. En aquel momento, hace un par de décadas, la reacción crédula de la chica dio lugar a las risas, por el absurdo de lo imposible. Claramente los equivocados éramos nosotros, ya que hoy esto no solo es posible, sino que sería deseable que todos lo utilizáramos para potenciar la tecnología y así perfeccionarla.

Dado que hace varios años que la vida me alejó de la academia, al menos de la actividad de investigación, decidí explorar un poco el uso de las nuevas herramientas de inteligencia artificial (IA) para la redacción de este documento y, de paso, plasmar pragmáticamente el impacto en la actividad de investigación del uso de la IA. Es decir, este texto es el resultado de mi experiencia piloto en iterar reiteradas veces con algunos programas (como Chat GPT y Gemini), probando diferentes instrucciones *-prompts-* para buscar generar este resultado, como si fuera un asistente de investigación.

Es muy difícil comprender el impacto de la computación cuántica en la actividad científica sin dimensionar primero los aportes y desafíos que la IA están generando en este sentido. Es decir, todos los impactos, las oportunidades y las amenazas que la IA ya están dejando en evidencia, se verán potenciados por la irrupción de la computación cuántica y la I+D, en este artículo nos vemos obligados a dedicar una extensa parte a analizar la relación entre la IA y la actividad de investigación científica. Ciertamente la IA y la cuántica son dos disciplinas diferentes, pero es muy difícil analizar el impacto de una sin la otra.

No deja de ser increíble darle a la computadora un par de instrucciones y ver aparecer un texto que en varios pasajes refleja lo que uno quería expresar. También es asombroso ver cómo, ante otra instrucción, suma referencias bibliográficas y citas. También es cierto que en el proceso aparecen errores -como citas mal asignadas, o difíciles de verificar- y aseveraciones que exigen ser al menos revisadas, por no decir corregidas (dejo al lector detectar las que se me pasaron, así como identificar si son propias de mi autoría o si puedo hacer el descargo en la tecnología).¹

Indudablemente, en poco tiempo estas cuestiones serán solucionadas y pasarán a ser imperceptibles, aunque no creo que logren independizarse de la supervisión y ojo en-

* Especialista regional a cargo del Programa de Política de Ciencia y Tecnología de la UNESCO para América Latina y el Caribe.

1. No quedaron muchas muy evidentes, gracias a la labor de los editores, pero seguramente persistan algunas barbaridades que superen las propias de mi autoría.

trenado del experto. En cualquier caso, se están transformando en una herramienta imposible de soslayar a la hora de llevar adelante una investigación en cualquier área del saber, adaptada a las circunstancias de cada proceso en particular. La computación cuántica promete dar un fuerte impulso a este proceso. En el texto a continuación busco explorar en qué sentido podemos esperar que se vaya encaminando este proceso.

1. LOS DATOS Y LA CIENCIA

La ciencia nace de la curiosidad por comprender lo que nos rodea, y su motor son las preguntas. Para buscar respuestas o al menos pistas que sacian la curiosidad, la ciencia, en gran parte, se basa en observar, recoger datos, modelizar el fenómeno observado, realizar experimentos que permitan verificar lo anotado, recopilar más datos y compartir la información.

En un ejercicio de “eficiencia científica”, si tal cosa existiera, se podría determinar un factor de capacidad científica, entendida en este caso como la posibilidad de reunir datos y procesarlos. Dicha capacidad depende, por lo tanto, de la cantidad de información que se pueda abarcar y procesar, y de la velocidad con la que se lleve a cabo. Es fácil verificar en la actualidad cómo la humanidad ha avanzado vertiginosamente en la generación de capacidades para registrar y almacenar datos a partir de las tecnologías de la información y la comunicación (TIC). Y, a su vez, gracias al incremento de la capacidad de procesamiento que el desarrollo tecnológico de las computadoras habilitó, no solo se registran ingentes cantidades de datos, sino que también se incrementó la posibilidad de analizarlos, principalmente a través del desarrollo de la IA. La computación cuántica abre una nueva puerta a la capacidad de procesamiento de datos y análisis de información, estableciendo un nuevo umbral para la actividad científica.

Sin embargo, como advertía días pasados un artículo de prensa, “a diferencia de revoluciones tecnológicas previas como la computadora personal o internet [...] la evolución cuántica avanza discretamente. No veremos ordenadores cuánticos en tiendas comerciales, sino una transformación gradual y profunda de los sistemas fundamentales en ciencia, medicina, finanzas y seguridad global” (Morales, 2025).

Una computadora clásica, como la que usas en tu hogar o trabajo, usa *bits* para guardar información. Estos bits pueden ser 0 o 1, y todos los programas y datos se basan en combinaciones de estos números. Una computadora cuántica, en cambio, usa *qubits*. Los *qubits* tienen algo muy especial: pueden estar en un estado de 0 o de 1, o en ambos a la vez, gracias a una propiedad llamada “superposición”. Esto significa que las computadoras cuánticas pueden hacer muchas operaciones a la vez al explorar todos los caminos al mismo tiempo hallando soluciones exponencialmente más rápidas, lo que las hace muy eficientes para resolver

ciertos problemas muy difíciles que las computadoras normales tardan mucho en resolver.

La emergencia de la computación cuántica representa no solo un avance tecnológico monumental, sino también un catalizador para transformaciones profundas en la actividad de investigación y desarrollo (I+D) a nivel global, potenciando las capacidades existentes y reconfigurando las estructuras, éticas y dinámicas de la innovación. Como bien señala otro artículo de prensa, “en el corazón de todo, está la mecánica cuántica, una rama de la física que estudia el comportamiento de la materia y la energía a escalas subatómicas. A diferencia de la física clásica, la cuántica se rige por principios que desafían nuestra intuición: una partícula puede estar en varios estados a la vez (superposición), dos partículas pueden estar conectadas incluso a distancia (entrelazamiento), y el acto de observar puede cambiar el resultado de un experimento (colapso de la función de onda). Estos fenómenos, lejos de ser simples curiosidades teóricas, han demostrado tener un enorme potencial práctico”. El artículo también nos advierte que “el impacto social y económico de estas tecnologías podría ser similar o incluso mayor al que tuvo Internet en su momento. Si las computadoras cuánticas logran escalar y estabilizarse, permitirán resolver problemas hoy intratables: desde diseñar nuevas vacunas hasta optimizar sistemas de transporte a gran escala o predecir crisis financieras y climáticas con mayor exactitud” (Barón, 2025).

La computación cuántica es un cambio de paradigma que promete redefinir lo que es posible en I+D, porque puede procesar información de maneras que las computadoras clásicas no pueden y acelerar descubrimientos, mejorar experimentos y abrir nuevas áreas de investigación en muchas disciplinas científicas, llevando el conocimiento humano a niveles que ahora solo podemos imaginar.² Desde la perspectiva de los estudios sociales de la ciencia y la tecnología, su impacto será multifacético, afectando no solo la velocidad y el alcance de los descubrimientos, sino también la distribución del poder, la equidad, la ética y la gobernanza de la innovación a escala global. La clave para aprovechar su potencial de manera beneficiosa residirá en la capacidad de la sociedad para anticipar y abordar proactivamente estos desafíos sociotécnicos, asegurando un desarrollo inclusivo y responsable.

2. LA COMPUTACIÓN CUÁNTICA TIENE EL POTENCIAL DE REVOLUCIONAR LA CIENCIA

Algunos impactos importantes en la actividad científica derivarán de ciertas aplicaciones que todavía están en fases iniciales, pero que ya muestran cómo la computación cuántica puede transformar diferentes áreas científicas y tecnológicas en el futuro cercano. Como ser:

1. *Simulación de materiales y moléculas.* La computación cuántica puede simular con precisión moléculas com-

2. Esto se debe a varias propiedades de los *qubits*, como la superposición y el entrelazamiento, que permiten realizar cálculos en paralelo de una forma muy eficiente.

plejas, lo que ayuda en el desarrollo de nuevos medicamentos, materiales avanzados y energía más eficiente. Esto sería muy difícil o imposible para las computadoras tradicionales. Empresas como Google³ y del rubro farmacéutico están explorando el uso de ordenadores cuánticos para simular estructuras moleculares, acelerando el proceso de descubrimiento de nuevos medicamentos, y grupos de investigación están usando computación cuántica para diseñar nuevos materiales con propiedades específicas, como superconductores que pueden reducir el consumo de energía en dispositivos electrónicos (Arute *et al.*, 2020).

2. **Optimización.** Muchos problemas científicos y tecnológicos —como encontrar la mejor forma de distribuir recursos o diseñar nuevos productos— pueden resolverse más rápidamente con computadoras cuánticas. Empresas empiezan a usar algoritmos cuánticos para optimizar rutas de transporte, gestión de redes eléctricas y distribución de recursos. La *startup* D-Wave, por ejemplo, ha trabajado en proyectos para optimizar problemas logísticos (Boothby, King & Raymond, 2021).
3. **Criptografía y seguridad.** La computación cuántica puede romper ciertos tipos de cifrado actuales, pero también puede crear sistemas de seguridad súper seguros que protegerían la información científica y tecnológica sensible. La computación cuántica también impulsa avances en criptografía cuántica, que puede crear sistemas de comunicación más seguros (Pirandola *et al.*, 2020).

El impacto de la computación cuántica sobre la IA implica abrir todo un capítulo de reflexión y análisis particular. El aprendizaje automático se verá potenciado gracias al incremento en la capacidad de procesar datos complejos más rápidamente, lo que impactará en las investigaciones científicas. Existen ejemplos del uso de IA de características semejantes a los detallados en los párrafos anteriores, pero que se encontraban limitados por la capacidad de procesamiento de las computadoras tradicionales. Por ello es relevante repasar el impacto del uso de IA en la investigación científica, para esbozar posibles trayectorias a partir de la computación cuántica.

3. USO DE LA IA EN LA INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA

La irrupción de la IA representa una transformación fundamental en numerosos sectores, redefiniendo la manera en que se concibe, desarrolla y difunde el conocimiento. Su

capacidad para procesar volúmenes masivos de datos, identificar patrones complejos y automatizar tareas repetitivas está revolucionando los paradigmas tradicionales en la investigación científica, brindando capacidades sin precedentes para optimizar flujos de trabajo, acelerar el descubrimiento y mejorar la calidad y accesibilidad del conocimiento.

La relación entre la potencia de cómputo que abre la computación cuántica y el avance y aplicación de la IA es evidente. La primera impulsará una explosión mayor aún del avance de la segunda, con consecuencias en nuestra vida cotidiana. La IA emergió como una herramienta revolucionaria en diversas disciplinas científicas, transformando la forma en que se realiza la investigación y se procesan los datos, con implicancias éticas y regulatorias importantes.⁴ Desde el análisis de grandes volúmenes de información hasta la optimización de experimentos, ofrece un potencial sin precedentes para acelerar el descubrimiento científico, así como incrementa la responsabilidad en la interpretación de resultados generados por IA.

El uso de la IA en la ciencia fomenta la colaboración entre diferentes disciplinas. Proyectos que combinan biología, informática y matemáticas han demostrado ser particularmente exitosos en la resolución de problemas complejos. Uno de los mayores beneficios de la IA en el ámbito científico es su capacidad para procesar y analizar grandes volúmenes de datos de manera eficiente. El proyecto de Genoma Humano, llevado adelante durante la última década del siglo XX, y que tras más de diez años logró secuenciar el mapa genético del ser humano, generó datos masivos difíciles de analizar con métodos tradicionales; esas mismas bases, mediante IA a través de algoritmos de aprendizaje profundo, pudieron identificar variantes genéticas asociadas con enfermedades.⁵

La IA no solo ayuda en el análisis de datos, sino que además es capaz de descubrir patrones que pueden no ser evidentes para los investigadores. En estudios de cáncer, por ejemplo, ha sido utilizada para analizar datos de imágenes médicas y encontrar correlaciones entre diferentes biomarcadores y el pronóstico de la enfermedad.⁶ Igualmente es útil para crear simulaciones y modelos; en climatología, los modelos basados en IA ayudan a prever cambios climáticos y sus efectos en el medio ambiente.⁷

La IA también está revolucionando el diseño experimental al optimizar variables y condiciones. En la investigación farmacéutica, por ejemplo, los algoritmos de IA se utilizan para

3. En 2020, Google anunció que lograron una “supremacía cuántica”, demostrando que una computadora cuántica podía realizar una tarea específica mucho más rápido que cualquier supercomputadora clásica (Arute *et al.*, 2019).

4. Un artículo de Binns (2018) destaca que “la ética en el uso de IA en la investigación científica debe ser una prioridad para garantizar que las decisiones basadas en IA sean justas y transparentes”.

5. Según un estudio de Kourou *et al.* (2015), “los métodos de aprendizaje automático han demostrado ser eficaces en el análisis de datos genómicos, permitiendo avances significativos en la investigación de enfermedades complejas”.

6. Un estudio de Esteva *et al.* (2017) destaca que “los algoritmos de IA pueden identificar patrones en imágenes dermatológicas que son predictivos para el diagnóstico del cáncer de piel”.

7. Según un artículo de Rolnick *et al.* (2019), “los modelos de IA pueden mejorar nuestras predicciones climáticas al integrar diferentes fuentes de datos y simular escenarios complejos”.

identificar combinaciones de fármacos que pueden ser más efectivas en el tratamiento de enfermedades.⁸ Y está transformando el proceso de publicación científica. Herramientas que utilizan IA pueden ayudar en la revisión por pares al detectar plagio, sugerir mejoras en la redacción y evaluar la calidad de los manuscritos.⁹

La IA está redefiniendo la actividad científica, ofreciendo nuevas oportunidades para el descubrimiento y la innovación. Sin embargo, también plantea desafíos que deben ser abordados con cuidado. A medida que avanzamos hacia un futuro donde la IA juega un papel central en la ciencia, es crucial que los investigadores, legisladores y la sociedad en general colaboren para maximizar sus beneficios y mitigar sus riesgos.

3.1. Optimización de procesos y aceleración del descubrimiento

La integración de herramientas de IA está agilizando diversas etapas del ciclo de vida de la investigación, desde la revisión de literatura hasta el diseño experimental, lo que se traduce en un aumento significativo de la eficiencia y la productividad.

Las revisiones sistemáticas y los metaanálisis, procesos que tradicionalmente consumen mucho tiempo extendiéndose por meses o incluso años, experimentan una aceleración drástica con la IA. Por ejemplo, una revisión sistemática de más de 60.000 artículos habría sido inviable sin la asistencia de la IA, la cual puede completar estas tareas en una fracción del tiempo que requeriría un ser humano. Estudios han demostrado que las herramientas de IA reducen el tiempo dedicado a las revisiones sistemáticas en un 52% (IC 95%: 48-56%) (O'Mara-Eves, 2015). Esta notable mejora en la velocidad no solo optimiza los recursos temporales, sino que también permite a los investigadores mantenerse al día con la explosión de publicaciones científicas, asegurando que las síntesis de evidencia sean lo más actuales posible.

A su vez, los revisores humanos, a pesar de sus mejores esfuerzos, son propensos a errores de juicio y sesgos cognitivos. La IA ofrece un enfoque objetivo, estandarizando la extracción de datos y la evaluación de la calidad de los estudios, lo que disminuye la variabilidad y mejora la fiabilidad de la síntesis de la evidencia. Herramientas como Scholarcy, por ejemplo, asisten en la paráfrasis de textos manteniendo la neutralidad, un beneficio particular en revisiones sistemáticas para mitigar sesgos lingüísticos. La mejora en

la reproducibilidad es otro beneficio crucial; herramientas de IA como ASReview demuestran un valor Kappa (κ) de 0.79 en comparación con 0.62 para los métodos manuales,¹⁰ lo que es fundamental para la robustez de los hallazgos científicos. Asimismo, la IA puede nivelar el campo de juego para investigadores no nativos al mejorar la calidad de la escritura en inglés, el idioma predominante en las publicaciones científicas.

La generación de hipótesis y el diseño experimental están siendo revolucionados por la IA generativa, que automatiza la creación de hipótesis, el análisis de datos y la validación experimental. Los sistemas impulsados por IA, que emplean modelos avanzados de aprendizaje automático (como arquitecturas basadas en transformadores y aprendizaje por refuerzo profundo), son capaces de identificar patrones complejos en grandes conjuntos de datos, proponer hipótesis novedosas e incluso diseñar experimentos para probarlas. Esta capacidad de la IA para explorar un vasto espacio de posibilidades y sugerir direcciones de investigación que podrían pasar desapercibidas para los humanos acelera significativamente el proceso de descubrimiento.

La simulación y optimización son otras áreas donde la IA demuestra un valor inmenso. Los modelos de IA pueden simular el comportamiento de sistemas complejos (por ejemplo: vías bioquímicas, sistemas climáticos, propiedades de materiales) a gran escala, permitiendo a los investigadores visualizar resultados antes de llevar a cabo experimentos físicos costosos o que requieren mucho tiempo. Esto reduce sustancialmente los costos experimentales en campos como el desarrollo de fármacos y la ingeniería de materiales. La IA también puede optimizar los parámetros experimentales e identificar las variables más relevantes para una prueba de hipótesis eficiente.

Existen casos de éxito notables que ilustran estas capacidades. La IA ha identificado un potencial antibiótico, Halicin, al analizar millones de estructuras moleculares (Stokes *et al.*, 2020). Además, el sistema AI co-scientist, ha demostrado su habilidad para generar hipótesis de investigación y protocolos experimentales novedosos, superando a otros modelos de vanguardia y a expertos humanos sin asistencia en problemas complejos.¹¹ Este sistema ha propuesto nuevos candidatos para el reposicionamiento de fármacos en la leucemia mieloide aguda (LMA) y ha identificado objetivos epigenéticos para la fibrosis hepática, que fueron posteriormente validados mediante experimentos *in vitro* (Gottweis *et al.*, 2025).

8. Un estudio de Chen *et al.* (2018) afirma que "la IA puede acelerar el descubrimiento de fármacos al predecir interacciones entre compuestos y su eficacia en modelos biológicos".

9. Un estudio de Doskaliuk B *et al.* (2025) señala que "la implementación de herramientas de IA en la revisión por pares puede mejorar la eficiencia y la calidad del proceso de publicación".

10. ASReview es una herramienta de IA diseñada para acelerar y mejorar la precisión de las revisiones sistemáticas, que son cruciales para la reproducibilidad en la investigación. Valor Kappa (κ): El valor Kappa es una métrica común utilizada para evaluar la concordancia entre evaluadores. Un valor de 0.79 comparado con 0.62 indica una mejora significativa en la concordancia interevaluador cuando se utiliza ASReview en comparación con los métodos manuales tradicionales. Esto significa que la herramienta ayuda a reducir la subjetividad y aumenta la consistencia en el proceso de selección de estudios. <https://asreview.nl/>

11. Las principales fuentes de información sobre AI co-scientist son un *paper* de investigación aún en revisión (Gottweis *et al.*, 2025), pero disponible públicamente, y una publicación del blog de Google Research.

BOX 1 – EL USO DE IA EN LAS CIENCIAS NATURALES

La IA se ha transformado en una herramienta que potencia la tarea científica. Ejemplos de ellos podemos encontrar en diferentes actividades y ramas de la ciencias naturales y exactas:

- *Predicción de estructura de proteínas.* La IA, específicamente el programa AlphaFold de DeepMind, ha logrado predecir con alta precisión la estructura de proteínas, un avance revolucionario para la biología y la medicina (Jumper *et al.*, 2021).
- *Análisis de datos en astronomía.* La IA se usa para clasificar objetos en el espacio, detectar exoplanetas y analizar grandes volúmenes de datos astronómicos rápidamente. La colaboración entre la Universidad de Harvard y el telescopio Pan-STARRS ha demostrado cómo la IA ayuda en estos procesos (Baron *et al.*, 2015).
- *Descubrimiento de nuevos materiales y medicamentos.* La IA ayuda a simular y diseñar nuevos compuestos para medicamentos y materiales en menos tiempo del que necesitarían los métodos tradicionales. Por ejemplo, la *startup* Atomwise usa IA para diseñar fármacos rápidamente (Vamathevan *et al.*, 2019).
- *Climatología y predicción del clima.* La IA se aplica para modelar el clima, predecir eventos meteorológicos extremos y entender fenómenos como el cambio climático con mayor precisión (Reichstein *et al.*, 2019).

Estas aplicaciones muestran cómo la IA está transformando diferentes campos de la ciencia, acelerando descubrimientos y facilitando análisis que antes eran muy difíciles o imposibles.

La asistencia en redacción, edición y análisis de datos es un área donde los modelos de lenguaje grandes (LLM, por sus siglas en inglés) como GPT-4 y Claude están ganando terreno (van Dis, Bollen, Zuidema, van Rooij & Bockting, 2023). Herramientas como Paperpal y QuillBot ofrecen funciones avanzadas de edición para refinar el lenguaje, la estructura y la claridad, además de ayudar en la paráfrasis para evitar el plagio y resumir textos académicos.

En el análisis de datos complejos, la IA sobresale al identificar patrones y brechas de investigación en grandes y complejos conjuntos de datos que los analistas humanos podrían pasar por alto. Estudios comparativos demuestran consistentemente que BERTopic es superior a los métodos tradicionales (como LDA) en la identificación de subtemas más coherentes, granulares y contextualmente ricos. Esto se debe a su uso de *embeddings* de lenguaje (como los de BERT), que capturan mejor el significado y el contexto de las palabras (Grootendorst, 2022). La capacidad de la IA para procesar millones de artículos de investigación le permite identificar conexiones inexploradas, tendencias emergentes a través de redes de citas, y contradicciones o lagunas en la literatura existente.

BOX 2 – EL USO DE IA EN LAS CIENCIAS SOCIALES Y HUMANIDADES

En ciencias sociales y humanidades, la IA también tiene aplicaciones muy interesantes y útiles:

- *Análisis de textos y discursos.* La IA puede analizar grandes cantidades de textos, como periódicos, redes sociales, entrevistas o documentos históricos, para identificar temas, sentimientos, tendencias y cambios en la opinión pública o en el discurso social. Estudios que usan procesamiento de lenguaje natural para analizar cómo se expresan las ideas sobre la migración en redes sociales (Nguyen *et al.*, 2020).
- *Estudios históricos y análisis de narrativas.* La IA ayuda a explorar textos históricos, obras literarias o archivos para descubrir patrones, temas recurrentes o relaciones entre eventos y personajes. Esto permite entender mejor las narrativas y cambios sociales a lo largo del tiempo (Crawford *et al.*, 2019).
- *Reconstrucción de redes sociales y análisis de relaciones.* La IA se usa para mapear conexiones entre actores sociales, instituciones o movimientos en redes complejas, ayudando a comprender cómo se difunden ideas, cómo se organizan movimientos sociales o cómo interactúan comunidades culturales (Borgatti *et al.*, 2018).
- *Predicción y análisis de tendencias sociales.* La IA se emplea para predecir movimientos sociales, fenómenos económicos o cambios en la opinión pública, mediante el análisis de datos sociales y económicos en tiempo real (Salganik, 2018).

En resumen, la IA en ciencias sociales y humanidades permite analizar grandes volúmenes de información, entender mejor los comportamientos y discursos humanos, y predecir tendencias sociales, aportando una visión más profunda y complementaria a los métodos tradicionales.

Estos desarrollos sugieren una evolución fundamental en el rol de la IA en la investigación. De ser una herramienta para la automatización de tareas repetitivas, la IA está transitando hacia un papel de aumento de las capacidades humanas. Esto significa que la IA no solo ejecuta tareas “para” los investigadores, sino que mejora activamente sus procesos cognitivos y creativos. Esta progresión implica un futuro donde las preguntas de investigación pueden volverse más ambiciosas y complejas, ya que las herramientas para abordarlas son cada vez más sofisticadas. Esta evolución exige una reevaluación de los planes de estudio de investigación, enfocándose en cómo colaborar eficazmente con las herramientas de IA para maximizar su potencial aumentativo, más allá de las habilidades operativas básicas.

Además, la capacidad de la IA para procesar “grandes cantidades de datos” y “millones de artículos de investigación”, identificando “relaciones menores que podrían pasar desapercibidas para los humanos” o “conexiones inex-

ploradas”, revela un valor latente en los datos existentes. Esto sugiere que gran parte de la información científica ya publicada contiene conocimientos no descubiertos debido a las limitaciones cognitivas humanas para procesar volúmenes y complejidades tan vastos. La IA actúa como un potente “extractor de conocimiento” que puede desvelar perspectivas ocultas en la literatura y los conjuntos de datos científicos existentes. Esto implica que el valor de la investigación ya publicada puede amplificarse significativamente mediante la reanálisis con IA, lo que podría conducir a nuevos descubrimientos sin necesidad de recopilar nuevos datos. Esta perspectiva podría generar un cambio de paradigma en cómo se percibe y utiliza la literatura científica, evolucionando hacia bases de conocimiento dinámicas y curadas por IA que extraen y sintetizan continuamente nuevas conexiones, en lugar de publicaciones estáticas. También subraya la importancia de la ciencia abierta y los principios FAIR (por sus siglas en inglés, que traducidas serían: ubicable, accesible, interoperable, reutilizable) para maximizar el potencial de la IA.

A continuación, se presenta una tabla que resume las ventajas y desafíos de la IA en las revisiones sistemáticas.

3.2. Herramientas clave y su integración en el flujo de trabajo

La IA no debe verse como un reemplazo de los investigadores humanos, sino como una herramienta complementaria que puede optimizar y agilizar el proceso de investigación, permitiendo al mismo tiempo el control de calidad crítico, el análisis, la evaluación y la interpretación humana. Esta perspectiva es crucial para fomentar la confianza y la aceptación generalizada de las herramientas de IA en la comunidad científica. Las directrices actuales de organizaciones como PRISMA (Mallett *et al.*, 2023)¹² o Cochrane (2024)¹³ aún no consideran las herramientas de IA como una opción de revisor válida o para actualizar revisiones existentes, lo que resalta la necesidad de mayores esfuerzos de validación para lograr una aceptación y confianza generalizadas. Futuros estudios de validación deberían comparar la precisión y el ahorro de tiempo esperado de diferentes herramientas de IA para determinar cuáles son las preferidas para las revisiones sistemáticas en diversos campos.

Existe una diversidad de herramientas y funciones en rápida expansión diseñadas para apoyar la investigación. Para

Tabla 1. Comparativa de ventajas y desafíos de la IA en revisiones sistemáticas

ASPECTO	VENTAJAS DE LA IA	DESAFÍOS DE LA IA
Velocidad y eficiencia	Procesamiento rápido de miles de estudios y reducción del tiempo de revisión sistemática	Requiere validación y directrices para asegurar la fiabilidad de los resultados acelerados
Reducción de sesgos	Enfoque objetivo: estandariza la extracción de datos, garantiza la calidad del estudio y reduce sesgos lingüísticos (por ejemplo, Scholarcy)	Riesgo de sesgos algorítmicos y de los datos de entrenamiento
Reproducibilidad	Mejora la reproducibilidad ($\kappa = 0.79$ vs 0.62 manual)	Asegurar la reproducibilidad del análisis impulsado por IA es crucial
Asistencia al investigador	Mejora la calidad de escritura para no nativos y asiste en la generación de hipótesis y el diseño experimental	Riesgo de “alucinaciones” y citas falsas en la redacción asistida
Análisis de datos	Identifica patrones complejos y conexiones sutiles en grandes volúmenes de datos	Dependencia de datos de calidad (<i>garbage in, garbage out</i>)
Adopción y confianza	Potencial para complementar o reemplazar métodos tradicionales	Falta de aceptación generalizada y confianza sin más validación y directrices

Fuente: elaboración propia.

12. Este artículo introduce la necesidad y el desarrollo de estas directrices específicas para la IA.
13. Cochrane (2024) subraya que, aunque se permite el uso de IA, los autores deben ser transparentes sobre qué herramientas usaron y con qué propósito. Las herramientas de IA no pueden ser acreditadas como autores. La organización está trabajando en un proceso de validación y respaldo para futuras herramientas, lo que subraya su posición actual de cautela.

las revisiones sistemáticas, herramientas dedicadas como ASReview (de Bruin *et al.*, 2025), Covidence,¹⁴ DistillerSR,¹⁵ EPPI-Reviewer (Thomas *et al.*, 2023), Rayyan (Ouzzani *et al.*, 2016) y RobotReviewer (Marshall *et al.*, 2017) están diseñadas para agilizar los procesos, ayudando con la selección de estudios, la extracción de datos e incluso la evaluación automatizada del riesgo de sesgo. Estas herramientas ofrecen características como una gestión eficiente del flujo de trabajo, escalabilidad integral para proyectos grandes y filtrado colaborativo. La adopción de estas herramientas puede transformar la carga de trabajo asociada a las revisiones sistemáticas, que tradicionalmente consumen más de 15 meses en promedio, con una proporción mínima de artículos realmente relevantes para la extracción de datos (tan baja como el 1%) (Marshall, Kuiper & Wallace, 2017).

BOX 3 – LA IA COMO HERRAMIENTA PARA LA GESTIÓN DE LA CIENCIA

Por otro lado, la propia actividad de gestión de la ciencia se está viendo modificada y potenciada por el uso de la IA, como es el caso de su uso para procesar y analizar publicaciones científicas en diferentes disciplinas, junto con las fuentes correspondientes:

- *Automatización de revisión de literatura y extracción de información.* La IA se emplea para leer, resumir y extraer datos clave de miles de artículos científicos automáticamente, facilitando a los investigadores mantenerse al día con los avances en su campo. Por ejemplo, el sistema Semantic Scholar AI ayuda a identificar patrones y relacionar publicaciones relevantes en distintas áreas (Wang *et al.*, 2017).
- *Análisis de tendencias y cambios en la investigación científica.* La IA puede analizar grandes volúmenes de publicaciones para detectar qué temas están en auge o cuáles están perdiendo interés, ayudando a orientar futuras investigaciones. Por ejemplo, en epidemiología, el análisis de publicaciones con IA puede identificar rápidamente temas emergentes relacionados con pandemias (Chen *et al.*, 2020).
- *Sistemas de asistencia para revisión por pares.* Algunas plataformas usan IA para ayudar a los revisores a evaluar la calidad y relevancia de los artículos, marcando posibles problemas o áreas que requieren revisión más profunda. Esto acelera del proceso de revisión en revistas científicas (Schulz *et al.*, 2022).

• *Detección automática de plagio y fraude científico.* La IA ayuda a identificar similitudes sospechosas en textos, fomentando la integridad en la publicación científica mediante detección de plagio o manipulación de datos (Chen *et al.*, 2024).

Estas aplicaciones demuestran que la IA no solo ayuda en el análisis de datos y descubrimiento científico, sino también en la gestión y el procesamiento de toda la literatura científica, haciendo que la investigación sea más eficiente.

Es importante señalar que existen evidencias que subrayan la necesidad crítica de supervisión humana para garantizar la precisión y la integridad en los flujos de trabajo de investigación, especialmente en tareas complejas y subjetivas como la selección de estudios y la revisión de texto completo, donde el rendimiento de la IA aún es limitado.¹⁶ La integración efectiva de la IA en el proceso de revisión sistemática tiene un potencial considerable para mejorar significativamente la eficiencia y agilizar el flujo de trabajo de investigación, pero aún no puede delegarse en ella sin supervisión esta tarea.

3.3. Desafíos éticos y metodológicos

A pesar de los avances y beneficios que la IA aporta a la investigación científica, su implementación no está exenta de desafíos significativos, particularmente en el ámbito ético y metodológico.

Uno de los principales desafíos nace con los sesgos algorítmicos y de datos. Los algoritmos de IA se entrenan con vastas cantidades de datos, que pueden contener inadvertidamente información sesgada. Si estos sesgos no se abordan adecuadamente, pueden conducir a resultados discriminatorios y perpetuar desigualdades sociales existentes. Por ejemplo, un estudio reveló que el 33% de los modelos médicos mostraron disparidades de más del 15% en precisión para minorías (Yang *et al.*, 2024). Además, el uso de LLM en la redacción científica ha reportado un 18,3% de artículos con “alucinaciones” (información inventada) y un 12,7% con citas falsas (Byrne *et al.*, 2024). Este fenómeno de *garbage in, garbage out* se amplifica con la IA; los errores en los modelos climáticos debido a datos satelitales incompletos son un ejemplo claro (Furtado *et al.*, 2025).

La necesidad de transparencia, explicabilidad y reproducibilidad es imperativa. La opacidad de los algoritmos comple-

14. Este *software* es desarrollado en colaboración con Cochrane y a menudo se menciona en la literatura para revisiones sistemáticas; por ejemplo, en comparaciones de herramientas de revisión. Recuperado de: <https://www.covidence.org/>.

15. DistillerSR es ampliamente reconocido en la comunidad de revisiones sistemáticas por su robusto sistema de automatización. Es comúnmente referenciado en estudios y artículos que comparan *software* para revisiones sistemáticas.: <https://www.distillersr.com/>.

16. Como ejemplo, los LLM como ChatGPT son herramientas versátiles que muestran un gran potencial en diversas tareas de investigación médica, incluyendo la selección de títulos y resúmenes, y la agrupación de datos para metaanálisis. Su interfaz de usuario accesible ha contribuido a su amplia popularidad. Sin embargo, el rendimiento de ChatGPT en las tareas de detección y selección de estudios es de modesto a moderado. En la detección de títulos y resúmenes, alcanzó una precisión del 70,4%, una sensibilidad del 54,9% y una especificidad del 80,1%. En la fase de selección de texto completo, la precisión fue del 68,4%, la sensibilidad del 75,6% y la especificidad del 66,8%. A pesar de estas limitaciones en el cribado, ChatGPT demostró un rendimiento excepcional en la agrupación de datos y los cálculos metaanalíticos, logrando una precisión del 100% en el cálculo de diferencias medias combinadas, intervalos de confianza del 95% y estimaciones de heterogeneidad (puntuación I) para la mayoría de los resultados (Rao, Pang, Saluja & Kazi, 2023).

jos dificulta su adopción en ámbitos donde la transparencia es crucial, como las políticas públicas. Solo el 12,4% de las herramientas de IA proporcionan explicaciones sobre sus decisiones (Vellido, 2020). La falta de transparencia puede generar desconfianza entre los usuarios y obstaculizar la adopción generalizada de esta tecnología. La IA explicable, con avances como los modelos de atención diferenciada y las redes bayesianas profundas, está haciendo posible rastrear la cadena de razonamiento de los algoritmos. Sin embargo, asegurar la reproducibilidad de los análisis impulsados por IA es crucial para mantener la fiabilidad de los resultados generados.

El rol indispensable de la supervisión humana es un tema recurrente. A pesar de la eficiencia de la IA, el juicio crítico y la creatividad de los investigadores son irremplazables. Por ello es importante promover modelos híbridos humano-IA, donde la supervisión humana garantiza la precisión y la integridad en los flujos de trabajo de investigación. Esto es particularmente relevante en tareas subjetivas como la evaluación del riesgo de sesgo.

Para abordar estos desafíos, se están desarrollando estrategias de mitigación de sesgos. Esto incluye el uso de datos de entrenamiento diversos, asegurando que los conjuntos de datos incluyan una amplia gama de características demográficas para reducir los sesgos derivados de la subre-

presentación o sobrerepresentación. Por ejemplo, se ha mejorado la precisión de los sistemas de reconocimiento de voz para dialectos subrepresentados al incluir voces más diversas durante el entrenamiento del modelo (Tatman, 2017). Las adaptaciones algorítmicas también son cruciales, implicando la modificación de los algoritmos para reducir el sesgo en los procesos de toma de decisiones. Esto puede incluir técnicas de preprocesamiento, *in-processing* y post-procesamiento, así como el aprendizaje automático consciente de la equidad (FAML) y el *debiasing adversarial* (Mehrabi *et al.*, 2021). Herramientas de interpretabilidad del modelo como LIME (Ribeiro, Singh & Guestrin, 2016) y SHAP (Lundberg & Lee, 2017) proporcionan transparencia al explicar cómo los algoritmos llegan a las decisiones, ayudando a identificar patrones discriminatorios.

La implementación efectiva de la evaluación de impacto algorítmico enfrenta desafíos como la resistencia cultural dentro de las organizaciones, la falta de claridad en los estándares universales y la dificultad técnica para identificar y mitigar eficazmente los sesgos. Es imperativo establecer protocolos de validación estandarizados que exijan transparencia algorítmica y evaluación de sesgos en las herramientas de IA para la investigación.

A continuación, se presenta una tabla que detalla los principios y estrategias para una IA responsable.

Tabla 2. Principios y estrategias para una IA responsable

CATEGORÍA	PRINCIPIOS CLAVE	ESTRATEGIAS DE IMPLEMENTACIÓN
Éticas	<i>Justicia/equidad:</i> garantizar que el algoritmo no genere sesgos perjudiciales <i>Privacidad:</i> asegurar el manejo adecuado y seguro de los datos personales <i>Rendición de cuentas:</i> establecer responsabilidades claras para desarrolladores y operadores	Adhesión a directrices éticas Supervisión ética y compromiso proactivo Consentimiento informado y anonimización de datos sensibles Desarrollo inclusivo de IA con equipos diversos
Técnicas	<i>Mitigación de sesgos:</i> reducir la perpetuación de desigualdades sociales <i>Transparencia/explicabilidad (XAI):</i> claridad sobre cómo opera y decide el algoritmo <i>Reproducibilidad:</i> fiabilidad de los resultados generados por IA	Diversificación de conjuntos de datos de entrenamiento Auditorías algorítmicas rigurosas (pre, in y posprocesamiento) Técnicas de <i>debiasing</i> (FAML, <i>adversarial debiasing</i>) Herramientas de interpretabilidad (LIME, SHAP) Monitoreo continuo y mejora
Legales/ regulatorias	<i>Cumplimiento normativo:</i> alineación con leyes antidiscriminación <i>Auditoría obligatoria:</i> escrutinio de datos y resultados para sesgos <i>Divulgación:</i> requisitos para explicar criterios y procesos de decisión de IA	Medidas regulatorias más estrictas, especialmente en áreas sensibles Estándares de validación para herramientas algorítmicas Regulación del uso de datos Mecanismos de rendición de cuentas Legislación para la adquisición de tecnologías de IA

Fuente: elaboración propia.

3.4. La dinámica interdisciplinaria y la brecha semántica

La integración de la IA en la investigación científica no solo implica desafíos técnicos y éticos, sino también complejidades en la colaboración interdisciplinaria, a menudo marcada por una “tensión semántica” entre los diversos campos del saber.

Un estudio reciente observa una “tensión semántica” entre la investigación impulsada por IA y la investigación disciplinaria más tradicional, describiéndola como un “fenómeno de aceite y agua” donde el trabajo con IA se extiende por los campos, pero no se mezcla bien con el trabajo no relacionado con IA (Rojas-Gualdrón *et al.*, 2022). Esto significa que, aunque la IA está ganando ubicuidad en diversas disciplinas, la integración profunda y la comprensión mutua entre los expertos en IA y los especialistas de dominio no son automáticas. Esta falta de cohesión puede limitar el impacto real de la IA en la resolución de problemas complejos.

A su vez, existen obstáculos significativos para la colaboración interdisciplinaria. Los científicos a menudo limitan sus esfuerzos colaborativos dentro de sus propios campos en lugar de buscar conexiones con otras disciplinas. Esto se debe, en parte, al tiempo y el esfuerzo adicionales necesarios para establecer un terreno común y marcos de trabajo para proyectos interdisciplinarios, así como a las percepciones de alto riesgo asociadas con las propuestas interdisciplinarias, que a menudo tienen tasas de éxito de financiación más bajas. La falta de habilidades o investigadores capacitados, la escasez de recursos de capacitación y la accesibilidad limitada a la capacidad informática y los datos son obstáculos comunes. Además, las diferencias inherentes en las perspectivas profesionales y los indicadores clave de rendimiento entre científicos de IA y profesionales de otros campos pueden generar desafíos de comunicación y prioridades desalineadas.

A pesar de estos desafíos, la IA y la ciencia de redes pueden caracterizar y fomentar la integración interdisciplinaria. Los enfoques impulsados por la IA, combinados con la ciencia de redes, son fundamentales para analizar los datos de producción científica y desentrañar las redes de colaboración académica dentro de un campo. Esto permite un examen holístico de su naturaleza multifacética y la identificación de patrones de evolución de la investigación. El análisis de texto y el modelado de temas semánticos, utilizando técnicas de procesamiento del lenguaje natural (NLP) y aprendizaje profundo, pueden explorar la evolución de los intereses de investigación a lo largo del tiempo, identificando conexiones inexploradas y tendencias emergentes.

La importancia de la composición de equipos diversos para una investigación con impacto es cada vez más fundamental. Una investigación sugiere que el impacto de la investigación depende menos de la interdisciplinariedad general de los equipos de autores y más de la diversidad de conocimientos que realmente aprovechan en su investigación (Uzzi *et al.*, 2013). La falta de habilidades por parte de los científicos de

otros dominios a menudo se compensa con la participación en investigación interdisciplinaria con científicos de la computación, y tales esfuerzos interdisciplinarios suelen ser exitosos en términos de citas recibidas (Leydesdorff & Rafols, 2012).

Para cerrar la brecha semántica y fomentar la colaboración, se proponen varias estrategias. La creación de centros de investigación interdisciplinarios y comunidades de práctica, como *Text Analysis in a World of AI* (TAWAI) en Dartmouth,¹⁷ puede facilitar la comunicación y la colaboración al reunir a académicos con diversas experiencias para resolver problemas y avanzar en el conocimiento. Estas iniciativas buscan aplicar y adaptar métodos y herramientas de análisis de texto (integrados con modelos de lenguaje) para responder a preguntas de investigación específicas de cada dominio, en lugar de centrarse únicamente en el desarrollo de las herramientas en sí. Fomentar la experimentación y el juego con herramientas de IA, así como conectar los conceptos de IA con desafíos del mundo real, puede estimular el pensamiento crítico y la colaboración, impulsando la generación de nuevas ideas. Es esencial promover modelos híbridos humano-IA, donde la creatividad y el juicio crítico de los investigadores guíen el uso de algoritmos, evitando la automatización acrítica.

3.5. Recomendaciones estratégicas

La IA ha emergido como una fuerza transformadora con el potencial de redefinir la investigación y producción científica. Los beneficios son innegables, como ser: la aceleración sin precedentes en la síntesis de conocimiento o la capacidad de generar hipótesis y diseñar experimentos. Sin embargo, este progreso viene acompañado de desafíos críticos que exigen una atención cuidadosa.

Los desafíos transversales giran en torno a la ética, la transparencia y la equidad. Los sesgos algorítmicos, inherentes a los datos de entrenamiento y a la propia arquitectura de los modelos, pueden perpetuar y amplificar desigualdades existentes, generando resultados discriminatorios en áreas tan sensibles como la salud. La opacidad de muchos sistemas de IA, la dificultad para explicar sus decisiones y la posibilidad de “alucinaciones” o datos fabricados comprometen la fiabilidad y la confianza en los resultados generados. Además, la integración de la IA en disciplinas tradicionales se enfrenta a una “tensión semántica”, donde la falta de comprensión mutua y la resistencia al cambio pueden obstaculizar la colaboración interdisciplinaria efectiva. Los costos de implementación y el impacto ambiental de la IA son también consideraciones importantes a tener en cuenta.

Para una implementación responsable, ética y efectiva de la IA se proponen las siguientes recomendaciones estratégicas:

1. *Desarrollo de directrices y marcos normativos globales.* Es urgente formular directrices globalmente reconocidas para el uso de herramientas de IA, especialmente en revisiones sistemáticas y aplicaciones críticas como la salud. Estos marcos deben abordar la privacidad de los

17. Más información en: <https://provost.dartmouth.edu/strategic-resources/text-analysis-world-ai>.

datos, la seguridad, la transparencia, la imparcialidad y la rendición de cuentas algorítmica. La auditoría algorítmica obligatoria y los requisitos de divulgación son esenciales para garantizar el cumplimiento y la confianza.

2. *Priorización de la transparencia y mitigación activa de sesgos.* Se deben implementar estrategias robustas para identificar y mitigar los sesgos en los algoritmos y los datos de entrenamiento, como la diversificación de conjuntos de datos y los ajustes algorítmicos. El desarrollo y la adopción de la IA explicable (XAI) son fundamentales para que los usuarios comprendan cómo se toman las decisiones y para construir la confianza. Los protocolos de validación estandarizados deben exigir la evaluación de sesgos y la transparencia algorítmica.
3. *Inversión en capital humano y alfabetización en IA.* La falta de habilidades y recursos de capacitación es un obstáculo significativo para la adopción de la IA. Es necesario invertir en la formación de nuevas generaciones de profesionales capaces de interactuar y colaborar eficazmente con sistemas de IA. Esto incluye no solo el desarrollo de habilidades técnicas, sino también una comprensión profunda de las implicaciones éticas y sociales de la IA. Reducir la brecha tecnológica mediante colaboraciones Norte-Sur puede asegurar el acceso equitativo a herramientas de IA en países en desarrollo.
4. *Promoción de modelos híbridos humano-IA.* Es crucial promover modelos híbridos humano-IA, donde la creatividad y el juicio crítico de los investigadores guíen el uso de algoritmos, evitando la automatización acrítica. La evidencia sugiere que la IA es más efectiva cuando complementa las capacidades humanas, en lugar de intentar reemplazarlas por completo. En el diagnóstico médico, por ejemplo, la combinación de predicciones de IA con el juicio clínico humano mejora drásticamente la precisión. Este enfoque colaborativo maximiza los beneficios de la IA mientras se mitigan sus limitaciones, asegurando que la creatividad, la empatía y el juicio crítico humanos sigan siendo centrales en la investigación y la toma de decisiones.
5. *Fomento de la colaboración intersectorial y multidisciplinaria.* Se debe invertir en la creación de centros de investigación interdisciplinarios y comunidades de práctica que faciliten la comunicación y el intercambio de conocimientos entre expertos en IA y especialistas de dominio. La composición diversa de los equipos de investigación es fundamental para el éxito y el impacto de la investigación con IA.

En síntesis, la IA no es meramente una herramienta para la automatización, sino un catalizador para aumentar las capacidades humanas y la liberación de valor latente en los datos existentes. Al abordar proactivamente los desafíos éticos, metodológicos e interdisciplinarios, y al fomentar un ecosistema de colaboración y responsabilidad, la IA puede impulsar una era de descubrimientos científicos sin precedentes, mejorar la salud global y transformar la industria en beneficio de toda la sociedad.

REFLEXIONES DE CIERRE

Está visto que la computación cuántica habilita un nuevo nivel en las posibilidades de procesamiento de datos y, con

eso, la oportunidad de acceder a una realidad solo habilitada anteriormente para los escritores de ciencia ficción. A la vez, es un claro ejemplo de cómo el conocimiento en la frontera de la actividad científica tiene consecuencias en la elaboración de una tecnología que impactará en la realidad cotidiana de la humanidad. Cada vez más el desarrollo y cambio tecnológico dependen del conocimiento de base científica, lo que tiene consecuencias en varios planos, principalmente en el del diseño de estrategias y políticas públicas. Sus cualidades elevan exponencialmente las posibilidades de la IA y, con ello, los beneficios y riesgos que repasamos que esta última trae a la actividad de I+D.

Más allá de las capacidades técnicas, la computación cuántica alterará el panorama social y económico de la I+D y el equilibrio geopolítico. Esto deriva en varias cuestiones que pueden ser vistas como oportunidades o amenazas, y que deben ser incorporadas en sus agendas por los tomadores de decisión. Algunas de ellas serían:

- *Concentración de recursos y brecha de innovación.* El desarrollo y mantenimiento de la infraestructura cuántica es extremadamente costoso. Esto podría llevar a una mayor concentración de la capacidad de I+D en grandes corporaciones, naciones ricas o consorcios de élite, exacerbando la brecha de innovación entre países y regiones.
- *Nuevas formas de colaboración y competencia.* La complejidad de la computación cuántica exigirá equipos de I+D altamente interdisciplinarios: físicos cuánticos, informáticos, matemáticos, ingenieros y expertos en dominios específicos, entre otros. Al mismo tiempo, se intensificará la competencia geopolítica por la “supremacía cuántica”, impulsando carreras armamentísticas tecnológicas y la protección de la propiedad intelectual.
- *Transformación de habilidades y fuerza laboral.* Habrá una demanda creciente de profesionales con conocimientos en ciencia de la información cuántica, lo que requerirá una reestructuración de los programas educativos y una inversión significativa en la formación de talento. Ciertas tareas de I+D más rutinarias podrían ser automatizadas, redefiniendo los roles de los investigadores.
- *Modelos de financiación y propiedad intelectual.* Los gobiernos y el capital de riesgo invertirán masivamente en investigación cuántica. Surgirán nuevos desafíos en la protección de la propiedad intelectual de algoritmos cuánticos y descubrimientos facilitados por estas máquinas.
- *Ética y gobernanza.* La capacidad de la computación cuántica para procesar grandes volúmenes de datos sensibles o para desarrollar capacidades militares (tecnología de doble uso) planteará serios dilemas éticos y requerirá el desarrollo urgente de marcos de gobernanza y regulación. La privacidad de los datos, la equidad en el acceso a la tecnología y el potencial de uso indebido serán preocupaciones centrales.
- *Percepción pública y expectativas.* La naturaleza compleja y a menudo “misteriosa” de la mecánica cuántica puede generar tanto entusiasmo desmedido como temor. Será crucial una comunicación clara y una educación pública para gestionar las expectativas y fomentar la confianza en el desarrollo responsable de esta tecnología.

BIBLIOGRAFÍA

- Arute, F. *et al.* (2020). Hartree-Fock on a superconducting qubit quantum computer. *Science*, 369 (6507), 1084–1089. Recuperado de: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.abb9811>.
- Arute, F., Arya, K., Babbush, R. *et al.* (2019). Quantum supremacy using a programmable superconducting processor. *Nature*, 574, 505–510. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1666-5>.
- Barón, D. (2025). Revolución cuántica: qué es, para qué sirve y cómo cambiará nuestro día a día. Infobae, 19 de julio. Recuperado de: <https://www.infobae.com/def/2025/07/19/revolucion-cuantica-que-es-para-que-sirve-y-como-cambiar-nuestro-dia-a-dia/>.
- Baron, D., Poznanski, D., Watson, D., Yao, Y., Cox, N. L., & Prochaska, J. X. (2015). Using Machine Learning to classify the diffuse interstellar bands. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 451(1), 332–352. Recuperado de: <https://academic.oup.com/mnras/article/451/1/332/1375414?login=false>.
- Binns, R. (2018). Fairness in Machine Learning: Lessons from Political Philosophy. En *Proceedings of the 2018 Conference on Fairness, Accountability, and Transparency (FAT '18)* (149–159). Nueva York: ACM. Recuperado de: <https://proceedings.mlr.press/v81/binns18a.html>.
- Byrne, F., Hofstee, L., Teijema, J., De Bruin, J. & van de Schoot, R. (2024). Impact of Active learning model and prior knowledge on discovery time of elusive relevant papers: a simulation study. *Systematic Reviews*, 13(1), 175. Recuperado de: <https://link.springer.com/article/10.1186/s13643-024-02587-0>.
- de Bruin, J. *et al.* (2025). ASReview LAB v.2: Open-source text screening with multiple agents and a crowd of experts. *Patterns*, 6(7), 101318. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.patter.2025.101318>.
- Boothby, T., King, J. & Raymond, J. (2021). Next-generation topology of D-Wave quantum processors. *arXiv preprint arXiv:2003.00133*. Recuperado de: <https://arxiv.org/abs/2003.00133>.
- Borgatti, S. P., Everett, M. G. & Johnson, J. C. (2018). *Analyzing Social Networks* (2nd ed.). Thousand Oaks: SAGE Publications. Recuperado de: https://books.google.co.cr/books?id=gPEDwAAQBAJ&hl=es&lr=&source=gbs_book_other_versions_r&cad=1.
- Chen, C. *et al.* (2020). Knowledge mapping and visualization of COVID-19 in the scientific literature. *Journal of Informetrics*, 14(3), 101046. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.joi.2020.101046>.
- Chen, Z., Chen, C., Yang, G., He, X., Chi, X., Zeng, Z. & Chen, X. (2024). Research integrity in the era of artificial intelligence: Challenges and responses. *Medicine*, 103(27), e38811. Recuperado de: https://journals.lww.com/md-journal/fulltext/2024/07050/research_integrity_in_the_era_of_artificial.41.aspx.
- Chen, X., Yan, H., Wu, D., Ye, X. & Wang, J. (2018). Machine Learning for Drug-Target Interaction Prediction. *Molecules*, 23(9), 2208. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules23092208>.
- Cochrane (2024). Cochrane Database of Systematic Reviews: Editorial Policies. The Cochrane Collaboration. Recuperado de: <https://www.cochranelibrary.com/cdsr/editorial-policies>.
- Crawford, R. & Bailey, M. (2019). Cousins Once Removed? Revisiting the Relationship between Oral History and Business History. *Enterprise & Society*, 20(1), 4–18. Recuperado de: <https://www.cambridge.org/core/journals/enterprise-and-society/article/abs/cousins-once-removed-revisiting-the-relationship-between-oral-history-and-business-history/74D14626F2CA7FEA07973F985F621976>.
- Doskaliuk, B., Zimba, O., Yessirkepov, M., Klishch, I. & Yatsyshyn, R. (2025). Artificial Intelligence in Peer Review: Enhancing Efficiency While Preserving Integrity. *J Korean Med Sci*, 40(7), e92. DOI: <https://doi.org/10.3346/jkms.2025.40.e92>.
- Esteva, A., Kuprel, B., Novoa, R. A., Ko, J., Swetter, S. M., Blau, H. M. & Thrun, S. (2017). Dermatologist-level classification of skin cancer with deep neural networks. *Nature*, 542(7639), 115–118. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature21056>.
- Furtado, J. *et al.* (2025). Taking the Garbage Out of Data-Driven Prediction Across Climate Timescales. *arXiv*, arXiv:2508.07062. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2508.07062>.
- Gottweis, J. *et al.* (2025). Towards an AI co-scientist. *arXiv preprint*, arXiv:2502.18864. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2502.18864>.
- Grootendorst, M. (2022). BERTopic: Neural topic modeling with a class-based TF-IDF procedure. *arXiv preprint*, arXiv:2203.05794. Recuperado de: <https://arxiv.org/pdf/2203.05794>.
- Jumper, J. *et al.* (2021). Highly accurate protein structure prediction with AlphaFold. *Nature*, 596, 583–589. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03819-2>.
- Kourou, K., Exarchos, T. P., Exarchos, K. P., Karamouzis, M. V. & Fotiadis, D. I. (2015). Machine learning applications in cancer prognosis and prediction. *Computational and Structural Biotechnology Journal*, 13, 8–17. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.csbj.2014.11.005>.
- Leydesdorff, L. & Rafols, I. (2012). The structure of interdisciplinary scientific knowledge. *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, 63(10), 2097–2110.

- Lundberg, S. M. & Lee, S. I. (2017). A unified approach to interpreting model predictions. *Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS)*.
- Mallett, K. *et al.* (2023). PRISMA AI: Reporting Guidelines for Systematic Reviews and Meta-Analyses on AI in Healthcare. *Nature*, 29, 14-15. DOI: <http://www.doi.org/10.1038/s41591-022-02139-w>.
- Marshall, I. J. *et al.* (2017). RobotReviewer: A machine learning approach to automated risk of bias assessment in systematic reviews. *Journal of the American Medical Informatics Association*, 24(6), 1145–1152.
- Marshall, I. J., Kuiper, J. & Wallace, B. C. (2017). The state of the art in systematic review automation. *Research Synthesis Methods*, 8(1), 11-20.
- Mehrabi, N. *et al.* (2021). A survey on fairness in machine learning. *ACM Computing Surveys*, 54(3), 1-35, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1145/3457607>.
- Monteleoni, C., Schmidt, G. A. & Saroha, S. (2011). Climate informatics: accelerating discovery in climate science with machine learning. *Computing in Science & Engineering*, 13(5), 50-57. Recuperado de: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6531616>.
- Morales, O. (2025). Computación cuántica en acción, ¿cómo está impactando nuestras vidas? Infobae, 6 de mayo. Recuperado de: <https://www.infobae.com/tecnologia/2025/05/06/computacion-cuantica-en-accion-como-esta-impactando-nuestras-vidas/>.
- Nguyen, L. & Bryant, C. (2020). CanVEC – the Canberra Vietnamese-English Code-switching Natural Speech Corpus. In *Proceedings of the Twelfth Language Resources and Evaluation Conference* (4121–4129). Marseille: European Language Resources Association. Recuperado de: <https://aclanthology.org/2020.lrec-1.507/>.
- O'Mara-Eves, A., Thomas, J., McNaught, J., Miwa, M. & Ananiadou, S. (2015). How much time does machine learning save in systematic review? A simulation study. *Research Synthesis Methods*, 6(1), 31-42. DOI: <https://doi.org/10.1002/jrsm.1123>.
- Ouzzani, M. *et al.* (2016). Rayyan—a web and mobile app for systematic reviews. *Systematic Reviews*, 5(1), 210. Recuperado de: <https://systematicreviewsjournal.biomedcentral.com/articles/10.1186/s13643-016-0384-4>.
- Pirandola, S. *et al.* (2020). Advances in Quantum Cryptography. *Advances in Optics and Photonics*, 12(4), 1012–1236. Recuperado de: <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/129608.2>.
- Rao, A., Pang, M., Saluja, J. & Kazi, H. (2023). A large language model-based tool for systematic reviews: Is ChatGPT an able co-pilot for evidence synthesis? *Systematic Reviews*, 12(1), 164.
- Reichstein, M. *et al.* (2019). Deep learning and process understanding for data-driven Earth system science. *Nature*, 569, 361-367. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1127-1>.
- Ribeiro, M. T., Singh, S. & Guestrin, C. (2016). Why should I trust you? Explaining the predictions of any classifier. In *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD)*.
- Rojas-Gualdrón, D. *et al.* (2022). The AI-research nexus: a semantic tension in the scientific ecosystem. *Journal of Informetrics*, 16(2), 101254.
- Rolnick, D. *et al.* (2019). Tackling Climate Change with Machine Learning. *arXiv*, preprint, arXiv:1906.05433. Recuperado de: <https://arxiv.org/abs/1906.05433>.
- Salganik, M. J. (2018). *Bit by Bit: Social Research in the Digital Age*. Princeton: Princeton University Press. Recuperado de: https://books.google.co.cr/books/about/Bit_by_Bit.html?id=58iXDwAAQBAJ&redir_esc=y.
- Schulz, R. *et al.* (2022). Is the future of peer review automated?. *BMC research notes*, 15(1), 203. Recuperado de: <https://link.springer.com/article/10.1186/s13104-022-06080-6>.
- Stokes, J. M. *et al.* (2020). A deep learning approach to antibiotic discovery. *Cell*, 180(4), 688-702.e13.
- Tatman, R. (2017). Voice recognition accuracy varies by race and gender. *Proceedings of the International Conference on Language Resources and Evaluation (LREC)*.
- Thomas, J. *et al.* (2023). EPPI-Reviewer 4.0: software for research synthesis. Londres: University College London. Recuperado de: <https://eppi.ioe.ac.uk/cms/Default.aspx?tabid=1913>.
- Uzzi, B. *et al.* (2013). Interdisciplinary research has a diversity problem. *Science*, 342(6165), 1431-1434.
- Vamathevan, J. *et al.* (2019). Applications of machine learning in drug discovery and development. *Nature Reviews Drug Discovery*, 18, 463-477. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41573-019-0024-5>.
- van Dis, E. A. M., Bollen, J., Zuidema, W., van Rooij, R. & Bockting, C. L. (2023). ChatGPT: five priorities for research. *Nature*, 614(7947), 224-226. DOI: <https://doi.org/10.1038/d41586-023-00288-7>.
- Vellido, A. (2020). The importance of interpretability and visualization in machine learning for applications in medicine and health care. *Neural Computing and Applications*, 32, 18069–18083. Recuperado de: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00521-019-04051-w>.
- Wang, L. *et al.* (2017). Semantic Scholar: a project for automatic scientific literature analysis. *Proceedings of the 2017 ACM Conference on Research in Information Science*.

Yang, J. *et al.* (2024). Mitigating machine learning bias between high income and low–middle income countries for enhanced model fairness and generalizability. *Scientific Reports*, 14(1), 13318. Recuperado de: <https://www.nature.com/articles/s41598-024-64210-5>.

2.2. COMPUTACIÓN CUÁNTICA. OPORTUNIDADES Y DESAFÍOS EN IBEROAMÉRICA

RODOLFO BARRERE, CLAUDIO RIGHETTI,
JUAN PABLO SOKIL Y LAURA TRAMA *

PRINCIPALES AFIRMACIONES

- La computación cuántica está transitando desde la experimentación académica hacia una etapa de consolidación tecnológica, con implicancias profundas en seguridad digital, inteligencia artificial, comunicaciones y modelado de sistemas complejos.

- A nivel mundial, la producción científica en computación cuántica creció más de cuatro veces entre 2015 y 2024, alcanzando su punto más alto en el último año con más de 8000 publicaciones registradas en OpenAlex.

- El liderazgo global se concentra en un pequeño grupo de países -Estados Unidos, China, Alemania y Reino Unido- que dominan tanto la investigación científica como el desarrollo tecnológico y el patentamiento.

- En Iberoamérica, la producción científica se multiplicó 3,7 veces en el mismo período, manteniendo una participación estable cercana al 6% del total mundial. Aunque modesta, esta participación es significativa para un campo de frontera altamente especializado.

- España se consolida como el principal nodo iberoamericano y articulador regional, con vínculos intensos con centros científicos de Estados Unidos y Europa. Le siguen Brasil, México, Chile, Portugal y Argentina, que conforman un segundo núcleo relevante de producción.

- La colaboración internacional de los países iberoamericanos es alta (alrededor del 60% de sus publicaciones), pero la cooperación intrarregional sigue siendo baja, lo que evidencia una red científica asimétrica y poco integrada dentro de la región.

- El análisis temático global muestra una estructura interdisciplinaria con tres grandes núcleos:

- i) Criptografía e información cuántica, centrada en el entrelazamiento y la comunicación segura.
- ii) Fundamentos físicos y *hardware*, orientados al desarrollo experimental de *qubits* y circuitos superconductores.
- iii) Algoritmos y aprendizaje cuántico, que integran física teórica, optimización e inteligencia artificial.

- En el caso iberoamericano, los tópicos se concentran en torno al paradigma de computación basada en compuertas (*gate-based*), con énfasis en circuitos cuánticos, corrección de errores y aplicaciones en *machine learning*.

- Esta orientación hacia la capa algorítmica y de software de la computación cuántica refleja una estrategia adaptativa frente a la escasez de infraestructura experimental propia.

- El patentamiento mundial en computación cuántica se multiplicó por seis entre 2019 y 2024, totalizando 1814 documentos. Más del 90% se origina en solo seis países, encabezados por Estados Unidos, que concentra el 46% del total.

- IBM, Microsoft y Google concentran cerca de una cuarta parte de todas las patentes, configurando un ecosistema tecnológico altamente concentrado y liderado por grandes corporaciones.

- La participación iberoamericana en el patentamiento es prácticamente nula, reflejando la brecha existente entre la producción científica y su transformación en innovación tecnológica en la región.

- El conjunto de evidencias indica que Iberoamérica ha logrado insertarse en cierta medida en la investigación internacional, pero aún enfrenta rezagos en la apropiación tecnológica y en la generación de capacidades propias.

- Para reducir esa brecha, la región requiere políticas sostenidas de inversión en infraestructura científica, formación de recursos humanos especializados y mecanismos de cooperación regional que fortalezcan la integración y la transferencia de conocimiento.

- La computación cuántica constituye simultáneamente una oportunidad estratégica y un riesgo: una oportunidad para los países que logren integrarse tempranamente al nuevo paradigma, y un riesgo de exclusión para aquellos que permanezcan al margen del desarrollo científico y tecnológico global.

45

* Rodolfo Barrere, Laura Trama y Juan Pablo Sokil: Observatorio Iberoamericano de la Ciencia, la Tecnología y la Sociedad de la Organización de Estados Iberoamericanos (OEI). Claudio Righetti: Facultad de Ingeniería de la Universidad Austral, Argentina.

INTRODUCCIÓN

La computación cuántica representa un cambio paradigmático en el procesamiento de información, aprovechando las leyes contraintuitivas de la mecánica cuántica para resolver problemas computacionalmente intratables para las máquinas clásicas. Mientras que una computadora tradicional procesa información mediante *bits* que codifican un cero o uno, una computadora cuántica utiliza *bits* cuánticos o *qubits*, que pueden existir en una superposición de ambos estados simultáneamente. Esta capacidad de superposición, junto con el fenómeno del entrelazamiento cuántico -una correlación extremadamente fuerte entre partículas que persiste independientemente de la distancia que las separe-, permite que las computadoras cuánticas procesen una cantidad exponencial de cálculos en paralelo. Si tenemos N *bits* clásicos, estarán en uno de 2^N estados posibles, mientras que N *qubits* pueden representar todos esos estados al mismo tiempo, proporcionando una ventaja computacional que escala exponencialmente.

El desarrollo tecnológico ha sido vertiginoso en los últimos años. Mientras que en 2018 Intel presentaba un chip de 49 *qubits* y Google proclamaba la supremacía cuántica en 2019 con 53 *qubits*, para 2025 los avances son aún más impresionantes. Investigadores de Harvard han demostrado sistemas con más de 3000 *qubits* funcionando continuamente, y equipos de Caltech han logrado mantener estables más de 6100 *qubits*. IBM proyecta para 2029 su computadora cuántica comercial tolerante a fallos, Starling, capaz de ejecutar 20.000 veces más operaciones que los computadores cuánticos actuales. Microsoft también ha anunciado entregas comerciales para finales de 2025.

Sin embargo, persisten desafíos significativos. La decoherencia (la pérdida del estado cuántico por perturbaciones externas) sigue siendo el principal obstáculo. Los esfuerzos actuales se centran en desarrollar *qubits* lógicos mediante técnicas avanzadas de corrección de errores cuánticos, agrupando múltiples *qubits* físicos para crear sistemas más robustos y confiables. La amenaza que representa la computación cuántica para la seguridad actual es existencial y urgente. Desde 1994, cuando Peter Shor publicó su algoritmo cuántico para factorizar grandes números primos, sabemos que una computadora cuántica suficientemente potente podría quebrar todos los sistemas criptográficos basados en clave pública que protegen nuestras comunicaciones digitales actuales. RSA, criptografía de curva elíptica y Diffie-Hellman (los pilares de la seguridad en Internet) quedarían obsoletos ante una máquina cuántica ejecutando el algoritmo de Shor. El riesgo más inmediato no proviene de la disponibilidad actual de computadoras cuánticas a gran escala, sino del concepto de “cosecha”: *Store now, decrypt later*. Adversarios sofisticados pueden estar interceptando y almacenando comunicaciones cifradas hoy, esperando descifrarlas cuando las computadoras cuánticas estén disponibles. Esto compromete retroactivamente la confidencialidad de información sensible con valor a largo plazo.

Paradójicamente, la mecánica cuántica también ofrece la solución: la distribución cuántica de claves (*quantum key*

distribution, QKD). A diferencia de la criptografía clásica basada en problemas matemáticos difíciles, QKD garantiza la seguridad mediante las leyes fundamentales de la física. Cualquier intento de observar o medir el sistema cuántico lo perturbará, alertando inmediatamente a los comunicantes sobre la intrusión. La criptografía cuántica, especialmente mediante protocolos como BB84, permite el intercambio de claves cuyo secreto está garantizado no por la complejidad computacional, sino por principios físicos inmutables.

La intersección entre computación cuántica e inteligencia artificial promete revolucionar el aprendizaje automático. Los algoritmos cuánticos pueden procesar y analizar conjuntos de datos masivos con una eficiencia sin precedentes, acelerando exponencialmente el entrenamiento de modelos complejos. IBM y Google están desarrollando activamente algoritmos de aprendizaje cuántico que podrían resolver problemas de optimización actualmente intratables, desde el plegamiento de proteínas hasta la simulación de sistemas químicos complejos para el descubrimiento de fármacos.

En el ámbito de las telecomunicaciones, la computación cuántica ya está transformando la planificación de redes. Telecom Italia (TIM) fue el primer operador europeo en implementar algoritmos cuánticos para optimizar sus redes 4.5G y 5G, demostrando mejoras significativas en la eficiencia del espectro y la calidad del servicio. La capacidad de resolver problemas de optimización combinatoria complejos permite diseñar redes más eficientes, reducir la latencia y maximizar el *throughput* -es decir, el rendimiento o la cantidad de materia o datos que se procesan o transfieren exitosamente en un período de tiempo determinado- en escenarios de alta densidad de usuarios.

Las comunicaciones cuánticas representan el siguiente salto evolutivo. Más allá de QKD, se está desarrollando el concepto de “Internet cuántica”, una red que permitirá la transmisión de información cuántica entre nodos distantes. Esto habilitará no solo comunicaciones ultraseguras, sino también computación cuántica distribuida, donde múltiples procesadores cuánticos colaborarán para resolver problemas aún más complejos. Los repetidores cuánticos y las memorias cuánticas están superando gradualmente las limitaciones de distancia actuales de 80 kilómetros en fibra óptica, acercándose a una infraestructura de comunicaciones verdaderamente cuántica. La convergencia de estas tecnologías -computación cuántica, inteligencia artificial (IA) y comunicaciones avanzadas- está creando un nuevo paradigma tecnológico. Las aplicaciones emergentes incluyen: optimización financiera en tiempo real mediante algoritmos cuánticos, redes neuronales cuánticas para reconocimiento de patrones complejos, simulación precisa de materiales para energías renovables, y protocolos de comunicación que garantizan privacidad y autenticidad absolutas.

Como en cada revolución tecnológica, como recientemente el desarrollo masivo de la inteligencia artificial, el desarrollo de la computación cuántica es a la vez un desafío y una amenaza para los países iberoamericanos que cuentan con sistemas científicos, tecnológicos e in-

dustriales de menor desarrollo en el contexto mundial. El desarrollo de este tipo de tecnologías disruptivas, muy intensivas en conocimiento y en capital, pueden ser un factor que acreciente aún más la brecha entre los países de mayor y menor desarrollo relativo. Para que Iberoamérica pueda aprovechar las oportunidades que ofrecen estas tecnologías, requiere de capacidades de investigación y desarrollo que le permitan incorporarse a las redes internacionales de I+D y, de ser posible, traducir ese conocimiento en emprendimientos de base tecnológica.

Este informe presenta un análisis de la investigación en computación cuántica a nivel global, con foco en la región, a partir del análisis de publicaciones científicas. Esa información se complementa con un panorama del patentamiento en este campo a nivel mundial.

1. FUENTES Y MÉTODOS

Aunque el conocimiento es intangible, el proceso de su generación deja rastros que pueden ser medidos y analizados para obtener una visión detallada de sus principales tendencias. La comprensión del estado del arte y de esas tendencias en investigación científica y desarrollo tecnológico se fortalece al integrar información tanto cuantitativa como cualitativa. Con la colaboración de expertos en el área estudiada, es posible elaborar mapas de tendencias y relaciones, constituyendo un insumo valioso para la toma de decisiones y la prospectiva.

Las publicaciones científicas representan una evidencia privilegiada de la producción de conocimiento. Las revistas científicas, junto con las normas que regulan su funcionamiento, constituyen el canal formal mediante el cual los investigadores difunden los resultados de su trabajo. Así, el conjunto de publicaciones científicas refleja el acervo de conocimiento disponible, delimitando el campo de estudio y proporcionando el escenario para los debates académicos. La fuente de información más utilizada para analizar la producción científica y generar indicadores bibliométricos consiste en la extracción de datos de bases bibliográficas. Estas fuentes reúnen información acumulada durante años sobre los documentos publicados en revistas científicas seleccionadas, incluyendo referencias bibliográficas con el título del artículo, autores, filiación institucional, revista de publicación, resumen y otros datos relevantes.

Algo similar ocurre con las patentes industriales. Si bien se trata de documentos legales para garantizar un monopolio temporal de explotación económica de una invención, contienen toda la información necesaria para reproducir el desarrollo tecnológico que se está protegiendo. De la misma manera que ocurre con las publicaciones, analizar patentes ofrece un reflejo fidedigno de los principales patrones de la investigación aplicada a nivel global.

1.1. Fuentes de información

Para el análisis de publicaciones científicas, se recurrió a la base de datos OpenAlex. Se trata de una fuente de datos académica de acceso abierto que reúne información sobre

publicaciones científicas, autores, instituciones, revistas, conceptos y relaciones entre ellos. Fue creada con el objetivo de proporcionar un repositorio amplio, estructurado y actualizado del conocimiento científico global. La plataforma organiza los datos de manera estandarizada, permitiendo la identificación única de artículos, autores e instituciones, lo que facilita el análisis de la producción científica y el seguimiento de colaboraciones a nivel internacional.

OpenAlex se alimenta de múltiples fuentes de información académica. Entre estas se incluyen repositorios de acceso abierto, registros de editoriales científicas, identificadores de autores como ORCID, y metadatos de revistas e instituciones académicas. Además, integra información de CrossRef, que proporciona datos bibliográficos y DOI de artículos, así como de distintas bases bibliográficas de libre acceso. Esta combinación de fuentes permite a OpenAlex consolidar información sobre publicaciones, autores, afiliaciones institucionales, conceptos de investigación y citaciones, asegurando tanto la amplitud como la precisión de los datos que ofrece para estudios bibliométricos. Por estas características, esta fuente se está consolidado como una herramienta difundida para estudios bibliométricos. Asimismo, su cobertura global y su apertura facilitan la comparabilidad internacional, lo que es fundamental para estudios que buscan comprender la evolución de la ciencia en contextos locales, regionales y globales, como en este caso.

Por otra parte, en el dominio de las patentes de invención, existen diversas fuentes de información comúnmente utilizadas para la construcción de indicadores. Según los objetivos de cada estudio, pueden seleccionarse las oficinas de propiedad industrial de uno o varios países de manera simultánea. En el presente caso, el análisis se realizó a partir de la base de datos de la Organización Mundial de la Propiedad Intelectual (WIPO, por sus siglas en inglés), que reúne los documentos registrados a través del Tratado de Cooperación en materia de Patentes (PCT). El tratado PCT permite solicitar la patente de una invención de forma simultánea en varios países miembros, elegidos por el inventor según distintos criterios. Aunque la decisión de otorgar o denegar la patente corresponde a las oficinas de cada país, este mecanismo simplifica considerablemente el proceso de registro en múltiples jurisdicciones, ya que las solicitudes presentadas mediante el PCT no pueden ser rechazadas por motivos formales en los países miembros. Además, antes de remitir la solicitud a cada país, se realiza una “búsqueda internacional” similar a la que efectúan los examinadores nacionales. Este informe sirve tanto al titular de la patente para evaluar la patentabilidad de su invención como a los examinadores, reduciendo su carga de trabajo. Dado que la solicitud y el mantenimiento de patentes internacionales bajo el PCT implica costos significativos, tanto económicos como administrativos, suelen registrarse únicamente aquellos inventos con alto potencial económico o estratégico. La elección de esta fuente se fundamentó en ese criterio de calidad, con el objetivo de captar con precisión los avances tecnológicos de vanguardia a nivel mundial. Asimismo, el uso de una base de estas características facilita la comparabilidad internacional, algo que resultaría mucho más complejo si se emplean fuentes nacionales.

1.2. Definición del campo de estudio

Para avanzar en un análisis de las principales tendencias en este terreno de investigación, es necesario realizar un recorte del campo de estudio para seleccionar un conjunto de documentos representativos. Luego de una revisión bibliográfica y discusión con expertos, se definieron los siguientes conceptos clave:

- *quantum computing*
- *quantum computer*
- *quantum information processing*
- *quantum algorithms*
- *quantum hardware*
- *quantum programming*
- *quantum machine learning*
- *quantum circuits*
- *quantum simulation*
- *quantum annealing*
- *quantum cryptography*
- *quantum technologies*
- *quantum error correction*
- *quantum networks*
- *quantum internet*

Para la recolección de datos se utilizó la API de OpenAlex sobre la colección *works*. La consulta se diseñó para recuperar todos los artículos que contuvieran los conceptos seleccionados en el período 2010–2024.¹

48 Se utilizó el parámetro *search=* de la API, que busca de manera simultánea en títulos, resúmenes y texto completo (cuando está disponible), aplicando además *stemming* (técnica que consiste en reducir las palabras a su raíz o forma base, eliminando sufijos y variaciones, para agrupar términos relacionados) y eliminación de *stopwords* (palabras muy comunes y que aportan poco significado, como los artículos y preposiciones). Esta característica permite alcanzar una cobertura amplia del *corpus*, incorporando un espectro mayor de publicaciones, incluso cuando las expresiones exactas no aparecen en el título, pero sí en otras partes del registro.

La elección de la API, en lugar de la interfaz web de OpenAlex, respondió a la necesidad de asegurar una variabilidad temática más rica e incluir documentos potencialmente relevantes. Este enfoque resulta particularmente adecuado en estudios bibliométricos exploratorios, donde se privilegia la amplitud de cobertura frente a una precisión excesivamente restrictiva.

Por otra parte, en el caso de las patentes, se recurrió a la Clasificación Internacional de Patentes (IPC, por sus siglas en inglés). Esta clasificación consiste en un sistema de códigos asignados por las oficinas de propiedad intelectual a cada documento, según el campo de aplicación de la invención patentada. Se trata de un sistema jerárquico y estructurado que organiza las invenciones en secciones, clases, subclases y grupos, según su campo técnico. Cada patente recibe uno o varios códigos IPC que describen de manera precisa el área de aplicación de la invención, lo que facilita la búsqueda, la comparación y el análisis de tecnologías a nivel nacional e internacional. La clasificación se revisa periódicamente, incorporando nuevas clasificaciones o eliminando aquellas que resultan obsoletas.²

Desde 2019, existe una clasificación específica para la computación cuántica con el código G06N10, dentro de la categoría que agrupa distintas configuraciones de computadoras. En este estudio se analizan todas las patentes registradas bajo la categoría G06N10, desde su inicio en 2019 hasta 2024. La extracción de los documentos y su análisis estadístico y conceptual fue realizado mediante la plataforma Intelligo, desarrollada por la Organización de Estados Iberoamericanos (OEI).³

2. LA INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA SOBRE COMPUTACIÓN CUÁNTICA

La investigación científica relacionada con computación cuántica tuvo un fuerte crecimiento entre 2015 y 2024, como se refleja en la cantidad de artículos científicos publicados. El **Gráfico 1** muestra la evolución anual del total de publicaciones sobre el tema registradas en la base de datos de OpenAlex, evidenciando un crecimiento sostenido y acelerado a lo largo del período. A partir de 2019 se observa una expansión más pronunciada, que se intensifica especialmente desde 2020, alcanzando su punto más alto en 2024 con más de 8000 trabajos registrados.

Si bien incluso en 2024 se trata de un campo de investigación de un volumen pequeño, la evolución a lo largo de diez años muestra que la producción se ha multiplicado 4,25 veces en ese periodo, señalando una rápida consolidación del tema en la agenda de investigación.

El **Gráfico 2** muestra la evolución anual del número de publicaciones científicas de los principales países productores de artículos sobre computación cuántica. Se observa un crecimiento sostenido en todos los casos, con una marcada diferencia a favor de Estados Unidos, que mantiene

1. Esquema de recuperación de publicaciones científicas:

BASE_URL = "https://api.openalex.org/works"

SEARCH_QUERY = ("quantum computing" OR "quantum computer*" OR "quantum information processing" OR "quantum algorithms" OR "quantum hardware" OR "quantum programming" OR "quantum machine learning" OR "quantum circuits" OR "quantum simulation" OR "quantum annealing" OR "quantum cryptography" OR "quantum technologies" OR "quantum error correction" OR "quantum networks" OR "quantum internet")

FILTERS = "publication_year:2010-2024" AND "type:Article"

2. La clasificación IPC puede navegarse en: <https://ipcpub.wipo.int/>.

3. Más información disponible en: <https://www.explora-intelligo.info/>.

el liderazgo global durante todo el periodo. China presenta un aumento también significativo, consolidándose como el segundo país con mayor volumen de publicaciones. En niveles intermedios se ubican Alemania y el Reino Unido, con trayectorias más estables, pero también ascendentes. Por su parte, India y Japón muestran un crecimiento más moderado, aunque constante, reflejando un avance paulatino de su capacidad científica en este tema.

Esta tendencia genera además un creciente fenómeno de concentración, especialmente en las instituciones de investigación radicadas en los Estados Unidos. Ese país participa en un porcentaje creciente de la producción científica en computación cuántica. En 2015, autores de los Estados Unidos participaban del 18% de los artículos científicos registrados, mientras que en 2023 ese valor ascendió al 20%. A nivel institucional, la producción científica de los Estados Unidos está liderada por el Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT) y la Universidad de Maryland, mientras que en China se destacan la Universidad de Ciencia y Tecnología y la Academia China de Ciencias.

2.1. Panorama iberoamericano

A nivel iberoamericano, el **Gráfico 3** muestra la evolución anual de la producción científica firmada por al menos un autor de la región en la misma serie temporal. La tendencia es también fuertemente ascendente, con un crecimiento sostenido con un notable incremento a partir de 2020. Debido al retraso en la indexación de las publicaciones en la base de datos, la información de 2024 -aún no registrada por completo- corresponde a una estimación preliminar.

De forma consistente con el patrón observado a nivel mundial, el volumen de publicaciones sobre el tema en Iberoamérica es bajo, comenzando la serie con 129 documentos y culminando con 480. De esa forma, la producción anual se vio multiplicada 3,7 veces, algo por debajo del crecimiento registrado a nivel mundial. En base a estos datos, la participación de Iberoamérica en la investigación sobre computación cuántica desciende levemente, pasando de un 7% en 2015 a un 6% en 2024. Se trata de un volumen alineado con la participación total de la región en la producción científica mundial, que ronda el 6,4%. Mantener este volumen en un campo tan especializado y en la frontera de la ciencia y la tecnología es una buena base para el desarrollo de la región en este campo.

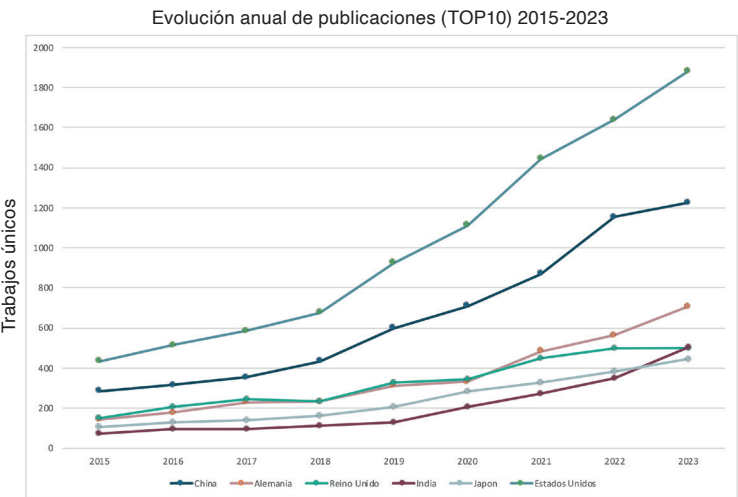
El **Gráfico 4** muestra el crecimiento relativo de la producción científica de Iberoamérica en comparación con el total mundial, tomando como base el año 2015 (índice = 100). Como se mencionó,

Gráfico 1. Publicaciones sobre computación cuántica registradas a nivel mundial



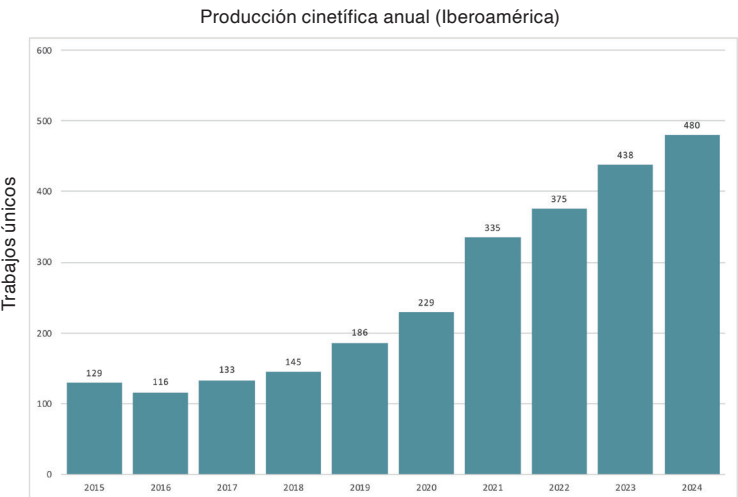
Fuente: elaboración propia.

Gráfico 2. Publicaciones sobre computación cuántica por país



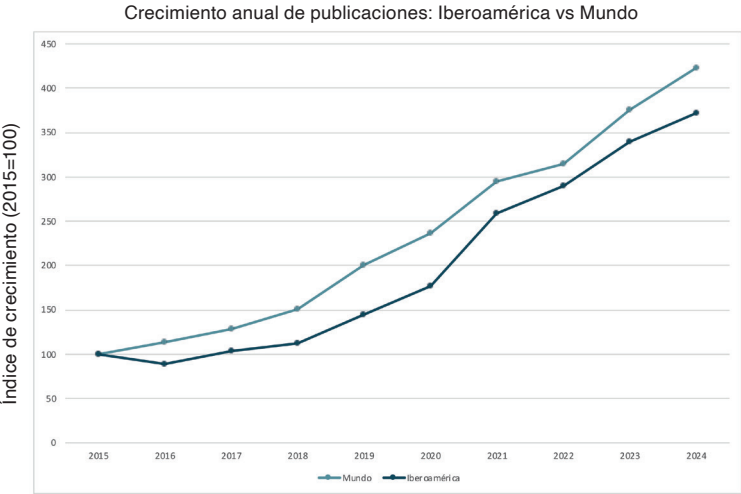
Fuente: elaboración propia.

Gráfico 3. Publicaciones sobre computación cuántica de países iberoamericanos



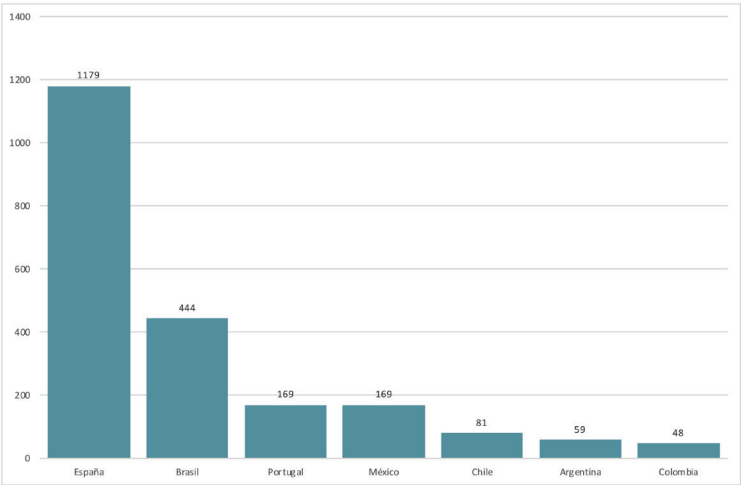
Fuente: elaboración propia. Nota: 2024 es estimado.

Gráfico 4. Crecimiento comparado de las publicaciones científicas en computación cuántica



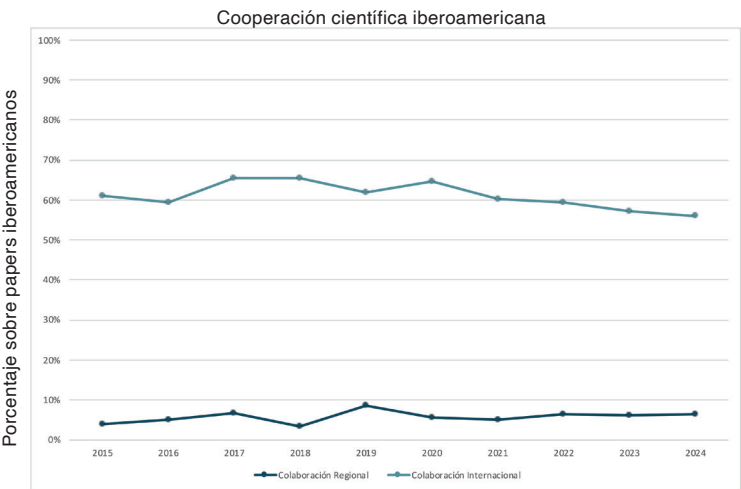
Fuente: elaboración propia. Nota: 2024 es estimado.

Gráfico 5. Publicaciones sobre computación cuántica de los principales países iberoamericanos



Fuente: elaboración propia.

Gráfico 6. Colaboración internacional de los países iberoamericanos



Fuente: elaboración propia.

se observa una tendencia sostenida al alza en ambos casos, aunque el crecimiento mundial ha sido más acelerado. La curva iberoamericana refleja una expansión constante desde 2020, acercándose progresivamente a la tendencia global.

Dentro de Iberoamérica también se observa un fuerte fenómeno de concentración. El **Gráfico 5** muestra el volumen total de publicaciones científicas producidas entre 2015 y 2023 por los principales países de Iberoamérica. España se posiciona como el líder destacado, con una producción muy superior al resto de la región, seguida por Brasil, que también mantiene una participación significativa. En un segundo grupo se ubican Portugal y México, con niveles similares de contribución, mientras que Chile, Argentina y Colombia presentan volúmenes más moderados. En conjunto, el gráfico evidencia la alta concentración de la producción científica regional en pocos países, particularmente en el eje ibérico y sudamericano.

A nivel institucional, en Iberoamérica se destacan por su volumen total de producción el Instituto de Ciencias Fotónicas y la Universidad del País Vasco, mientras que en Portugal la institución con mayor producción acumulada es la Universidad de Lisboa. En América, las instituciones de mayor producción son las brasileñas, encabezas por la Universidad de San Pablo y la Universidad Estadual de Campinas. Por otra parte, en México se destaca la UNAM, en Argentina el CONICET y en Chile la Universidad de Santiago.

2.2. Patrones de colaboración internacional

Especialmente en un campo de investigación emergente y en la frontera tecnológica, con una gran especialización y con la necesidad de inversiones importantes, la cooperación internacional es un factor clave para el desarrollo, más aún en el caso de los países iberoamericanos, con su fuerte heterogeneidad y en su mayoría con un bajo nivel de desarrollo relativo en ciencia y tecnología. El **Gráfico 6** muestra la evolución en escala porcentual de los tipos de colaboración científica a lo largo del tiempo. La colaboración regional corresponde a publicaciones con participación de al menos dos países iberoamericanos, mientras que la internacional incluye colaboraciones de un país de iberoamericano con países de fuera de la región. Dado que un mismo artículo puede involucrar simultáneamente ambos tipos de vínculos -por ejemplo, un trabajo argentino realizado junto a Chile y Estados Unidos-, los valores no representan una distribución cerrada (no suman necesariamente 100%), sino una escala que refleja la intensidad relativa de cada tipo de colaboración en el total de publicaciones.

A lo largo de los años analizados se observa una relativa estabilidad de los patrones de colabora-

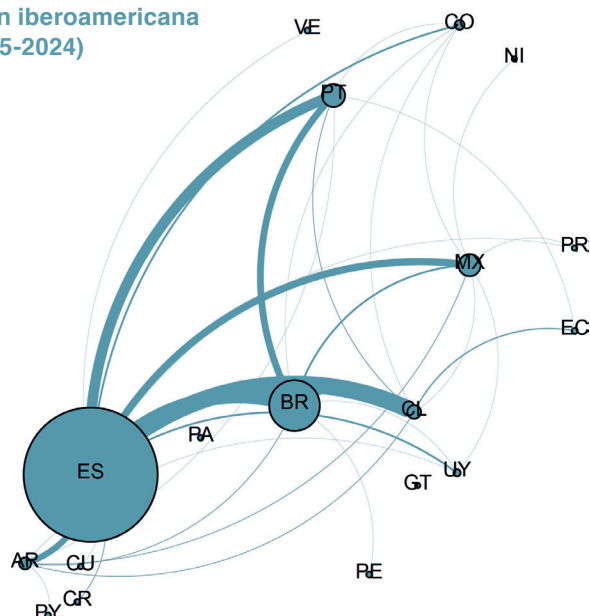
Por otra parte, la colaboración entre países iberoamericanos tiene un volumen relativamente bajo. En su punto más alto, alcanza el 8,6% en 2019 y, en el más bajo, el 3,4% un año antes. Esta variabilidad es propia de un campo de investigación aún no consolidado. En los últimos años de la serie, donde se registró un incremento de la producción científica en este campo, el nivel de colaboración regional se estabiliza algo por encima del 6%. Existe aún mucho terreno para desarrollar la colaboración entre países iberoamericanos en la investigación sobre computación cuántica. Una forma visual de representar el entramado de colaboración entre países es mediante un gráfico de red o grafo (**Gráfico 7**). La figura muestra la red de coocurrencia de autorías por país en la producción científica sobre computación cuántica entre 2015 y 2024. El tamaño de los nodos representa el volumen de publicaciones con participación de autores de cada país, mientras que el grosor de los la-

El grafo revela una estructura de red altamente interconectada y dominada por un conjunto reducido de países con fuerte centralidad -principalmente Estados Unidos, Alemania, Reino Unido y China- que concentran los mayores volúmenes de producción y las conexiones más densas. Estos países actúan como nodos articuladores de la colaboración internacional en computación cuántica, generando vínculos tanto entre sí como con un amplio conjunto de países en todo el mundo.

51

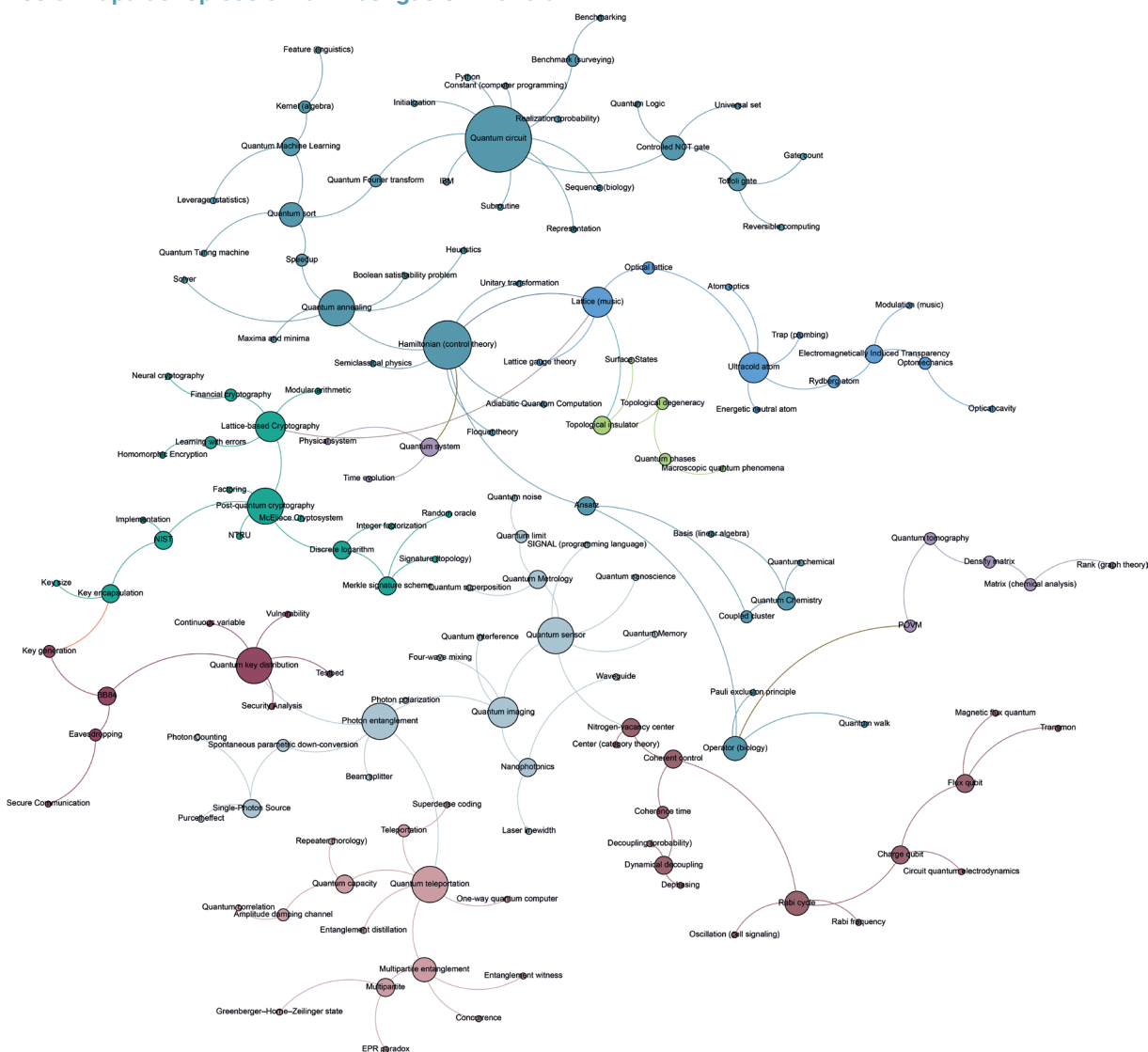
Fuente: elaboración propia.

Gráfico 8. Red de colaboración iberoamericana en computación cuántica (2015-2024)



Fuente: elaboración propia.

Gráfico 9. Mapa de tópicos en la investigación mundial



Fuente: elaboración propia.

ción al interior de la región. No obstante, la presencia de lazos entre varios países de América Latina y la articulación ibérica (España y Portugal) sugiere la existencia de una comunidad incipiente en torno a la computación cuántica en el espacio iberoamericano, potencialmente fortalecida por la colaboración lingüística y cultural compartida.

Profundizando en este análisis, el **Gráfico 8** representa la colaboración entre los países iberoamericanos mediante la misma técnica. Esta aproximación permite detallar los patrones dentro de la región y los diferentes niveles de desarrollo relativo en función del volumen de producción de cada país y los entramados de cooperación que ha entablado en el periodo analizado.

El resultado señala que España ocupa una posición claramente central, actuando como principal articulador regional, con fuertes vínculos con Brasil, México, Chile, Argentina y Portugal. Estos países conforman el núcleo más denso de la red, lo que evidencia su papel clave en la generación y circulación del conocimiento iberoamericano. En cambio, otros países como Guatemala, Nicaragua o Paraguay -con sistemas de ciencia y tecnología de menor desarrollo relativo- aparecen más periféricos, con menor participación en colaboraciones con otros países de la región. En conjunto, la red ilustra una vez más la existencia de un sistema científico regional relativamente interconectado pero asimétrico, donde unas pocas naciones concentran la mayoría de los flujos de cooperación, al igual que la producción científica total.

2.3. Tópicos de la investigación en computación cuántica

Para complementar la descripción cuantitativa de la producción científica en computación cuántica presentada hasta aquí, se muestra a continuación un gráfico de red construido a partir de las *keywords* asignadas a cada publicación por OpenAlex. El objetivo es dar cuenta de los principales temas de investigación y de las relaciones que se establecen entre ellos. En esta red, dos tópicos se vinculan cuando coaparecen como *keywords* en un mismo artículo, de modo que la frecuencia de coocurrencia entre pares refleja la intensidad de su relación temática. Los vínculos más fuertes surgen de aquellos pares de tópicos que comparten un mayor número de publicaciones, mientras que los nodos representan los temas individuales más recurrentes.

Para facilitar la interpretación, la visualización muestra la componente conexa principal de la red y su espina dorsal, obtenida mediante un árbol de máxima cobertura (MST, por sus siglas en inglés) construido a partir de las similitudes entre tópicos. Este enfoque reduce la densidad de enlaces y resalta las conexiones más representativas. Los clústeres de color agrupan tópicos afines, revelando las áreas temáticas más cohesionadas del campo (**Gráfico 9**).

El mapa generado evidencia una estructura compleja y fuertemente interdisciplinaria. Se identifican varios clústeres bien definidos que articulan los principales núcleos de investigación. Uno de los conglomerados más densos se

vincula con la información y comunicación cuántica, integrando tópicos como *entanglement*, *quantum teleportation*, *quantum key distribution*, *BB84*, *secure communication* y *quantum cryptography*. Este grupo representa la base teórica y experimental de las tecnologías cuánticas aplicadas a la transmisión segura de información, un área con fuerte dinamismo y aplicaciones en criptografía poscuántica.

Un segundo clúster relevante se organiza en torno a los fundamentos físicos y experimentales de la computación cuántica, con tópicos como *quantum tomography*, *Rabi frequency*, *coherence time*, *optical lattice*, *qubit*, *Rydberg atom* y *superconducting circuits*. Este conjunto se asocia con el desarrollo de *hardware* y los esfuerzos por mejorar la fidelidad y estabilidad de los sistemas cuánticos, incluyendo líneas relacionadas con *optomechanics*, *photon entanglement* y *nanophotonics*.

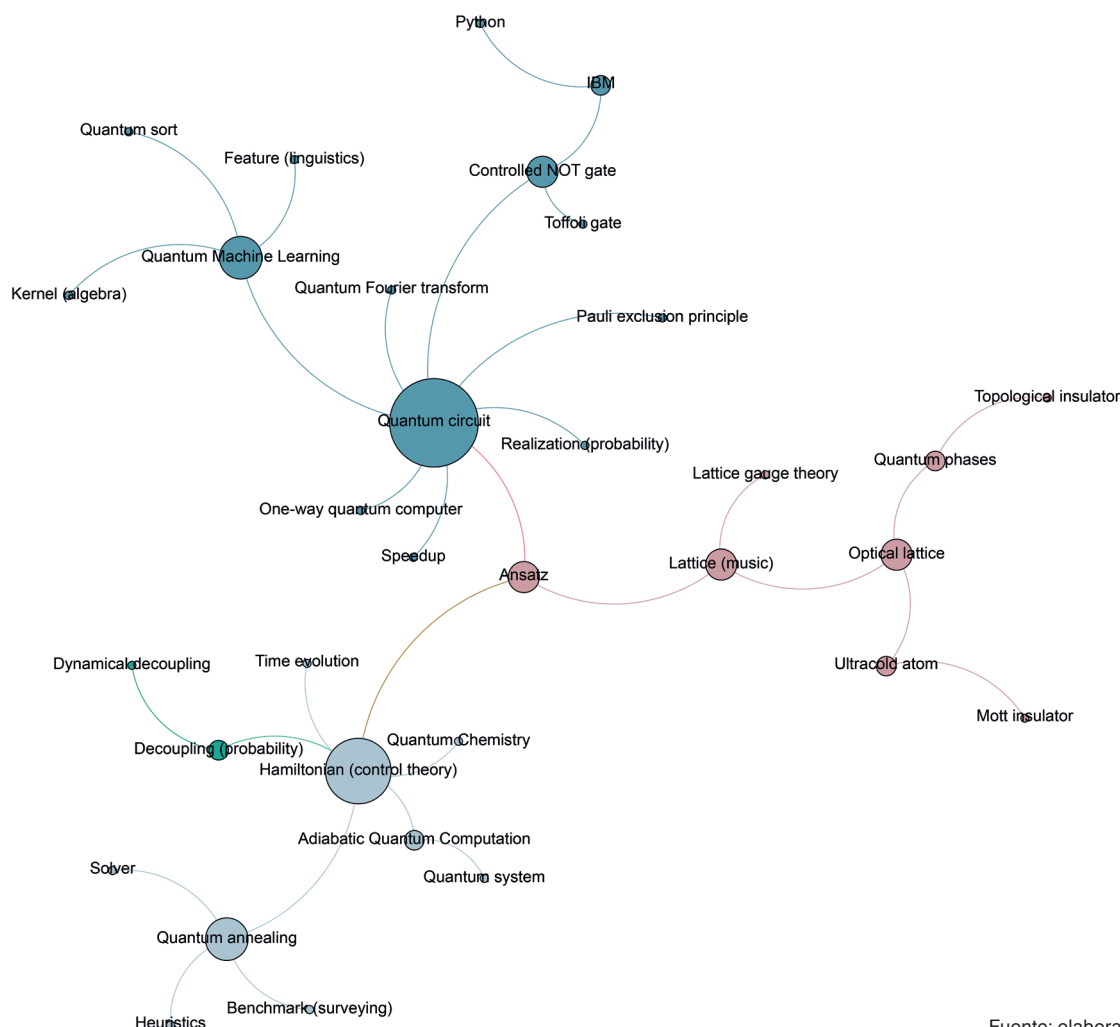
Otro grupo de tópicos se centra en los aspectos teóricos y algorítmicos, articulando conceptos como *quantum algorithm*, *quantum Fourier transform*, *quantum walk*, *quantum Turing machine*, *optimization*, *probability* y *representation learning*. Este clúster refleja la convergencia entre la física cuántica, la teoría de la información y la IA, incluyendo aplicaciones en *machine learning* y *data analysis* basadas en principios cuánticos.

Finalmente, se observan áreas temáticas más específicas o emergentes, como la metrología y óptica cuántica (*quantum metrology*, *amplitude damping channel*, *photon polarization*), los materiales y estados cuánticos exóticos (*topological degeneracy*, *surface states*, *quantum phases*), y tópicos interdisciplinarios relacionados con la biología y la química cuántica (*quantum biology*, *molecular dynamics*, *chemical matrix*).

En conjunto, la red de coocurrencia de tópicos revela una estructura de investigación en expansión y diversificación, en la que coexisten núcleos consolidados -centrados en la criptografía, los algoritmos y los fundamentos experimentales- junto con áreas emergentes vinculadas a nuevas aplicaciones interdisciplinarias. Este patrón confirma el carácter transversal de la computación cuántica, situada en la intersección entre la física fundamental, la informática teórica y las ciencias aplicadas. El mismo análisis, ahora restringido a las publicaciones con participación de autores iberoamericanos, da cuenta de un mapa menos complejo, pero con ramificaciones interesantes (**Gráfico 10**).

En el núcleo del grafo se ubica el *quantum circuit*, eje teórico y tecnológico que articula el paradigma de computación basada en compuertas, un paradigma en el cual la información se procesa mediante la manipulación controlada de *qubits* a través de una secuencia de compuertas cuánticas. Desde este centro emergen temas vinculados con la implementación práctica -como *controlled-NOT gate*, *quantum fourier transform* o *quantum machine learning*- que evidencian la convergencia entre fundamentos algorítmicos, aplicaciones de inteligencia artificial y entornos de desarrollo como IBM Q y Python. Este núcleo refleja el predominio del modelo *gate-based* como marco dominante para la experimentación y la programación

Gráfico 10. Mapa de tópicos en la investigación iberoamericana



Fuente: elaboración propia.

cuántica. Esta centralidad en la capa algorítmica y de *software* es una respuesta adaptativa y racional a la escasez de infraestructura física propia. Las instituciones de la región se enfocan en formar profesionales capaces de interactuar con plataformas cuánticas remotas (acceso a *backends* en la nube) y utilizando herramientas de código abierto como la librería Qiskit. Esta tendencia, aunque pragmática, crea una dependencia tecnológica. La región está formando principalmente programadores cuánticos, pero se queda corta en la generación de ingenieros y físicos especializados en la implementación física y el *hardware* cuántico.

En contrapunto, los clústeres temáticos que dominan la investigación mundial y que representan la base de la soberanía tecnológica en *hardware* -como *superconducting circuits*, *Rydberg atom*, *coherence time* y *nanophotonics*- son significativamente menos prominentes en el mapa iberoamericano. Esta asimetría, propia de un campo de investigación y desarrollo muy concentrada y dependiente de grandes inversiones, lleva a la región a convertirse en un consumidor de infraestructura cuántica desarrollada por proveedores externos. Al igual que en el desarrollo de otras tecnologías disruptivas, se limita la capacidad de la región para dictar la dirección del desarrollo, con impactos muy

concretos como la incapacidad de proteger sus comunicaciones críticas con soluciones propias.

Hacia la región inferior del grafo se agrupan los conceptos relacionados con la dinámica y el control de sistemas cuánticos, incluyendo *Hamiltonian (control theory)*, *time evolution*, *quantum chemistry* y *quantum annealing*. Estos términos se asocian con la simulación cuántica y los enfoques adiabáticos o analógicos, donde la computación se concibe como un proceso de evolución controlada del sistema. La presencia de nociones como *dynamical decoupling* o *solver* señala además la preocupación por la corrección de errores y la optimización heurística, aspectos esenciales para la viabilidad experimental de los algoritmos cuánticos.

Por último, el sector derecho del mapa concentra conceptos de materia cuántica y simulación física, tales como *optical lattice* y *quantum phases of topological insulator*. Estas conexiones muestran cómo la computación cuántica se expande hacia la física de materiales, empleando arquitecturas cuánticas como simuladores naturales de sistemas complejos. En conjunto, el grafo evidencia la estructura interdisciplinaria del campo, donde convergen la lógica cuántica, la teoría de control, la química computacional y la física de la materia condensada bajo un mismo marco de experimentación computacional.

3. EL PATENTAMIENTO DE TECNOLOGÍAS DE LA COMPUTACIÓN CUÁNTICA

El patentamiento de tecnologías relacionadas con la computación cuántica -bajo la clasificación IPC G06N10- tuvo un fuerte crecimiento desde 2019, año de creación de esta clasificación específica, y 2024. En total, se registraron 1814 invenciones. El primer año de esta serie se registraron 78 patentes, para alcanzar 485 en el último, multiplicándose el nivel de patentamiento más de seis veces en ese período (Gráfico 11).

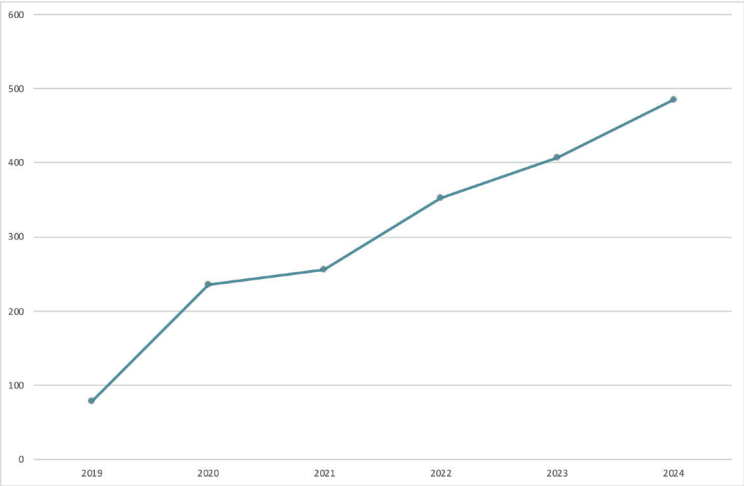
En función de los datos obtenidos, la dinámica del desarrollo tecnológico refleja la maduración progresiva del campo de la computación cuántica. Tras un período inicial de despegue abrupto, el crecimiento continúa en forma sostenida, consolidando un volumen de invenciones cada vez mayor.

Al analizar la procedencia de los titulares de las patentes en computación cuántica, se observa un fuerte proceso de concentración. Se trata de un fenómeno característico de las tecnologías de punta que requieren un fuerte desarrollo de la I+D combinado con grandes inversiones de capital. Estados Unidos lidera el ranking de principales países que patentan en este campo, con 830 patentes acumuladas entre 2019 y 2024. De esta manera, cuenta con el 46% de las patentes en este terreno. El siguiente país en volumen es Alemania, pero con 246 patentes acumuladas aparece muy lejos del país norteamericano que más que triplica ese volumen (Gráfico 12). El liderazgo estadounidense resulta esperable, dada la convergencia de inversión pública (reflejada por ejemplo en iniciativas como el *National Quantum Initiative Act*) y una fuerte iniciativa privada encarnada en empresas como IBM, Google o Microsoft.

Con volúmenes algo menores aparecen China (188 patentes), Reino Unido (168), Japón (159) y Canadá (105) para completar el listado de países que acumulan más de cien patentes en este campo. Así, Europa aparece como un segundo polo relevante, con Alemania y Reino Unido a la cabeza, posiblemente apoyados en programas marco de investigación y en la política cristalizada en el *European Quantum Flagship*.

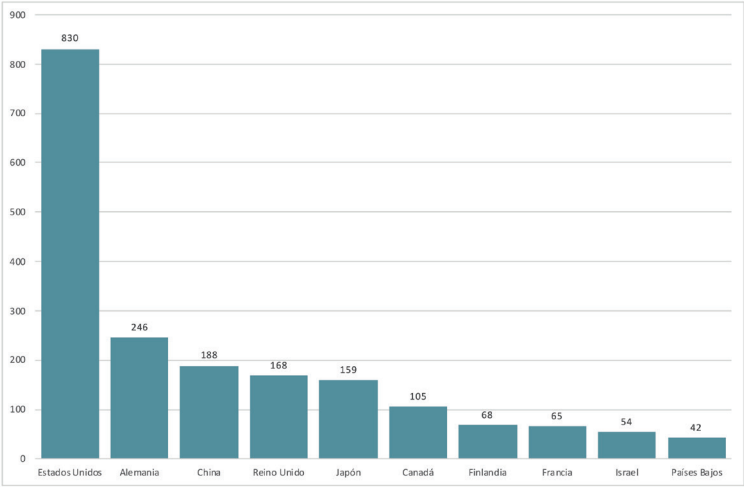
Como se señaló anteriormente, China muestra una participación importante pero no dominante, lo cual contrasta con su perfil en otras tecnologías estratégicas como inteligencia artificial o telecomunicaciones. En cualquier caso, el fenómeno de concentración es muy marcado; entre los seis países mencionados anteriormente se acumula el 93% de las patentes a nivel mundial en computación cuántica. La concentración geo-

Gráfico 11. Patentes mundiales sobre computación cuántica



Fuente: elaboración propia.

Gráfico 12. Patentes sobre computación cuántica por país (acumulado 2019-2024)



Fuente: elaboración propia.

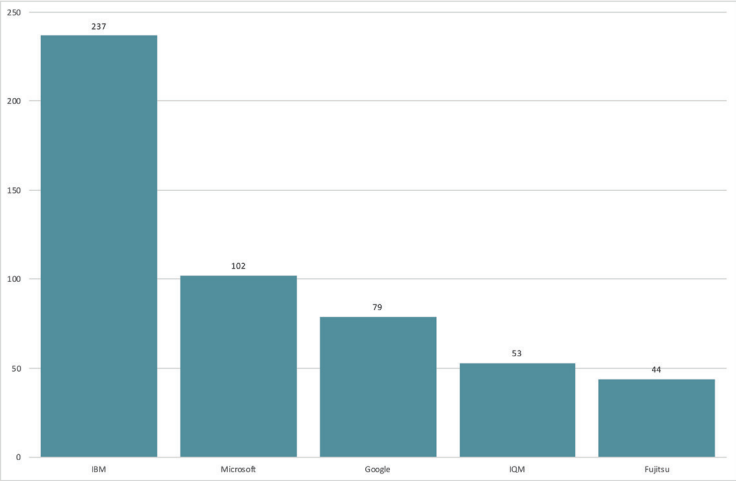
gráfica del patentamiento evidencia que el campo aún se encuentra en manos de un número reducido de países con capacidades científico-tecnológicas avanzadas, reforzando la idea de una alta barrera de entrada para actores emergentes. Esto resulta un factor clave para la integración de los países iberoamericanos en este campo.

En ese contexto, no es extraña la ausencia de países iberoamericanos, que carecen de sistemas de I+D demasiado desarrollados en el contexto mundial, no cuentan con grandes inversiones en el desarrollo tecnológico y adolecen de una histórica desconexión entre la investigación científica y su aplicación industrial. De las 1814 patentes detectadas, solo una cuenta con la participación de un titular de la región. Se trata de una patente registrada inicialmente en Estados Unidos por un grupo liderado por tecnólogos canadienses y de la que participa un científico chileno.⁴

Al analizar a los principales actores del patentamiento en computación cuántica, aparece nuevamente un fuerte fenómeno de con-

4. Más información en: <https://patents.google.com/patent/WO2021195788A1/en>.

Gráfico 13. Patentes sobre computación cuántica por titular (acumulado 2019-2024)



Fuente: elaboración propia.

centración consistente con las afirmaciones previas (Gráfico 13). Según las patentes que registra en este campo, el líder mundial en computación cuántica es IBM, que, con 237 registros acumulados entre 2019 y 2024, es responsable del 13% de las patentes totales. A continuación, aparecen otras dos de las mayores empresas tecnológicas de origen estadounidense: Microsoft, con 102, y Google, con 79. Estas tres empresas son responsables de casi la cuarta parte del patentamiento global en tecnologías de la computación cuántica. La lista de las cinco empresas más relevantes en este terreno se completa con la empresa especializada IQM, originada en Finlandia, y con la japonesa Fujitsu, que son responsables de 53 y 44 patentes, respectivamente.

Para obtener un panorama conceptual del contenido temático de las patentes sobre computación cuántica, se presenta a continuación un mapa creado a partir del texto de las patentes PCT analizadas anteriormente. Los conceptos fueron extraídos automáticamente y vinculados con técnicas de semántica latente. El color es establecido por clústeres de proximidad en base a la distancia del coseno y el tamaño de los nodos en función de su frecuencia de cada concepto (Gráfico 14).⁵

El mapa muestra una estructura centralizada en torno al concepto de *quantum computer / quantum computation / quantum bit (qubit)*, que actúa como núcleo articulador del resto de los términos y pueden encontrarse en el centro del gráfico. Desde allí se ramifican distintos clústeres temáticos, que representan áreas tecnológicas y conceptuales dentro del campo de la computación cuántica:

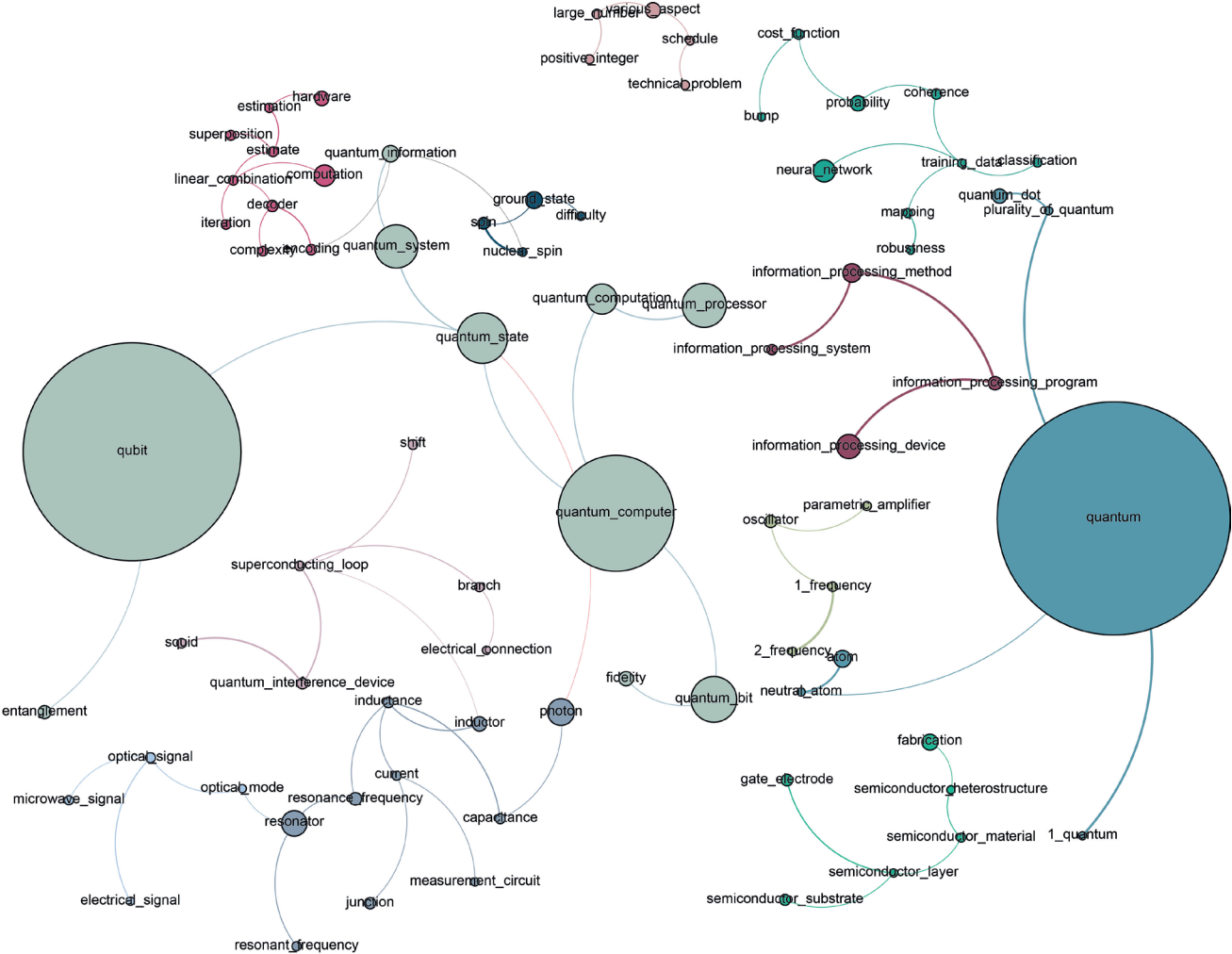
- *Clúster de hardware y arquitectura cuántica (naranja y violeta).* Este grupo reúne términos como *quantum_processor*, *inductor*, *capacitance*, *superconducting_loop*, *oscillator*, *architecture* y *fidelity*. Representa el núcleo de las tecnologías de *hardware* cuántico, con énfasis en los componentes físicos -especialmente los sistemas superconductores- que permiten la implementación de *qubits*. La presencia de *fidelity* y *dopant_atom* sugiere un foco en la calidad de los *qubits* y en materiales o técnicas para reducir errores y aumentar la coherencia.

- *Clúster de redes neuronales y procesamiento híbrido (rosa y celeste).* Conceptos como *artificial_neural_network*, *neural_network*, *coherence*, *probability* y *dataset* vinculan la computación cuántica con el aprendizaje automático y la inteligencia artificial. Este conjunto refleja la tendencia reciente a desarrollar modelos de *machine learning* cuántico o algoritmos híbridos que integran redes neuronales y procesamiento cuántico.
- *Clúster físico-experimental (gris y azul oscuro).* Incluye términos como *electrical_signal*, *resonator*, *ground_state*, *nuclear_spin* y *microwave_signal*. Estos conceptos corresponden a las bases físicas y electromagnéticas de la implementación cuántica: resonadores, señales de microondas y estados de espín nuclear. Indican una línea fuerte de investigación experimental, ligada al control y medición de *qubits*.
- *Clúster matemático-computacional (azul claro y gris).* Términos como *iteration*, *estimation*, *initial_state*, *computation*, *hardware* y *equation* apuntan a las dimensiones algorítmicas y de modelado matemático. Este grupo refleja las técnicas empleadas para describir y optimizar procesos cuánticos desde un punto de vista teórico.
- *Subgrupos periféricos (verde y marrón).* En las zonas más externas aparecen términos como *signal_line*, *plurality* o *aspect*, que parecen actuar como categorías estructurales o descriptores técnicos. Su ubicación periférica y menor tamaño indica menor frecuencia o una función de soporte conceptual dentro de las patentes.

En resumen, el mapa evidencia un ecosistema tecnológico articulado entre el *hardware* cuántico, el modelado algorítmico y las aplicaciones emergentes, principalmente en relación con la inteligencia artificial. La cercanía entre los nodos de *quantum_processor*, *superconducting_loop* y *neural_network* sugiere que muchas patentes integran enfoques híbridos, donde los desarrollos en materiales y circuitos superconductores se combinan con técnicas de aprendizaje automático. En conjunto, el grafo refleja una convergencia entre tres dominios principales: la física cuántica aplicada a la ingeniería de dispositivos, el procesamiento y control de la información cuántica, y la computación híbrida cuántico-clásica.

5. Este mapa puede ser navegado de forma interactiva en https://www.explora-intelligo.info/patentes?search=ci:g06n10*.

Gráfico 14. Mapa conceptual a partir de patentes sobre computación cuántica (acumulado 2019-2024)



Fuente: elaboración propia.

CONCLUSIÓN

El análisis bibliométrico y tecnológico presentado aquí permite trazar un panorama del estado actual y las tendencias de la investigación y el desarrollo en computación cuántica a nivel global y en el contexto iberoamericano. La evidencia muestra un crecimiento sostenido y acelerado del campo, tanto en la producción científica como en el patentamiento, confirmando su transición desde una fase exploratoria y de laboratorio hacia una etapa de consolidación tecnológica.

En la esfera global, la expansión de la investigación en computación cuántica ha estado fuertemente concentrada en un conjunto reducido de países -principalmente Estados Unidos, China, Alemania y el Reino Unido- que lideran simultáneamente la generación de conocimiento y la apropiación tecnológica a través de patentes. Este patrón refleja una dinámica típica de las tecnologías de frontera, donde la combinación de capacidad científica, infraestructura avanzada y capital intensivo genera barreras de entrada difíciles de superar para los países de menor desarrollo relativo.

En el ámbito iberoamericano, aunque la participación relativa de la región en la producción mundial se mantiene estable en torno al 6%, se observa un crecimiento real significativo del volumen de publicaciones y una progresiva diversificación temática. España ocupa una posición claramente central en la red regional y actúa como principal articulador entre América Latina y los polos científicos globales. Brasil, México, Chile, Portugal y Argentina conforman un segundo núcleo relevante, lo que sugiere la existencia de una comunidad científica regional activa, aunque aún asimétrica y con bajo nivel de interconexión intrarregional.

Los mapas temáticos revelan que las investigaciones iberoamericanas se concentran en torno al paradigma de computación basada en compuertas lógicas, con fuerte énfasis en la teoría de circuitos cuánticos, los algoritmos y las aplicaciones de *machine learning*. En cambio, áreas emergentes como la óptica cuántica, la simulación física o la ingeniería de materiales aparecen menos desarrolladas, reflejando el carácter todavía incipiente de la base experimental regional. Se revela así una marcada orientación hacia la capa algorítmica y de software de la

computación cuántica, centrada en los circuitos lógicos, el diseño de algoritmos y las aplicaciones de aprendizaje automático. Esta especialización refleja una estrategia adaptativa frente a la escasez de infraestructura experimental propia: la región ha priorizado la formación de profesionales capaces de trabajar con recursos remotos y entornos de simulación cuántica, lo que le permite participar del ecosistema global sin disponer de laboratorios avanzados. Sin embargo, esta orientación también genera una dependencia tecnológica que limita la capacidad de apropiación y desarrollo de *hardware*.

Mientras los principales polos internacionales concentran sus esfuerzos en la física de los dispositivos cuánticos, Iberoamérica mantiene una presencia marginal en esos dominios. Esta brecha, asociada a la alta intensidad de capital e infraestructura que exige el campo, la coloca en un rol predominantemente consumidor de tecnologías desarrolladas externamente. Las consecuencias son estratégicas: la región tiene escaso control sobre las plataformas que utiliza y una capacidad limitada para garantizar, por ejemplo, la seguridad de sus propias comunicaciones críticas.

El análisis de las patentes confirma y amplifica estas asimetrías: más del 90% de las invenciones en computación cuántica se concentran en apenas seis países, y la presencia iberoamericana es prácticamente nula. Ello evidencia la distancia existente entre la producción científica y su traducción en innovación tecnológica, un desafío estructural para los sistemas de ciencia y tecnología de la región. En conjunto, los resultados sugieren que Iberoamérica ha logrado insertarse en la investigación internacional en computación cuántica, pero todavía enfrenta un rezago importante en la apropiación tecnológica y la articulación regional. La consolidación de capacidades propias requerirá políticas sostenidas de inversión en infraestructura científica, formación de recursos humanos altamente especializados y mecanismos de cooperación que fortalezcan la integración entre los países iberoamericanos.

La computación cuántica ha dejado de ser una curiosidad académica que convertirse en una tecnología estratégica que redefinirá la seguridad, la IA y las comunicaciones en la próxima década. Aunque persisten desafíos tecnológicos significativos, el progreso es inexorable y acelerado. La amenaza a la criptografía actual es real e inmediata, requiriendo una transición urgente hacia sistemas *quantum-safe*. Simultáneamente, las oportunidades que presenta para resolver problemas previamente intratables en IA y optimización de redes son transformadoras. En este contexto de cambio tecnológico acelerado, es imperativo que las organizaciones comiencen inmediatamente a evaluar su exposición al riesgo cuántico, planificar la migración hacia criptografía poscuántica, y explorar las oportunidades que estas tecnologías emergentes presentan. El futuro cuántico no es una posibilidad distante es una certeza inminente que exige preparación y acción decisiva hoy.

La computación cuántica representa, al mismo tiempo, una oportunidad y un riesgo estratégico: oportunidad para quienes logren integrarse tempranamente en las redes globales de conocimiento e innovación, y riesgo para quienes

permanezcan en los márgenes de este cambio tecnológico disruptivo. El futuro del campo dependerá, en buena medida, de la capacidad de los países iberoamericanos para pasar de ser consumidores de conocimiento cuántico a convertirse en coproductores activos de ciencia y tecnología en este dominio.

2.3. BIT POR BIT HACIA EL QUBIT: ENTRELAZANDO CAPACIDADES PARA LA COMPUTACIÓN CUÁNTICA EN AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE

EDUARDO HERNÁNDEZ-RODRÍGUEZ, FEDERICO MOSCATELLI,
SERGIO PALOMEQUE Y JULIO RAFFO *

INTRODUCCIÓN

El rápido avance de las tecnologías digitales, tales como la inteligencia artificial, el internet de las cosas o el aprendizaje de máquinas, entre otras, hace necesario que las economías se adapten, tanto para sortear nuevos retos como para aprovechar futuras oportunidades. El creciente uso de estas tecnologías digitales hace repensar el funcionamiento de procesos de producción, innovación tecnológica y desarrollo científico. En este contexto, la computación cuántica desafía incluso el propio concepto de tecnologías digitales, ya que propone un sistema de procesamiento que escapa del sistema binario. El bit digital deja paso al bit cuántico (*qubit*), los sistemas dejan de ser digitales y pasan a ser cuánticos. Esto tiene, potencialmente, enormes implicancias en áreas como finanzas, medicina, química y física, entre otras (Ladd *et al.*, 2010; Gill *et al.*, 2022; Rietsche *et al.*, 2022).

Este potencial, aún no del todo definido, hace que la computación cuántica sea un tópico central a nivel científico. Como ejemplo de ello, el Premio Nobel de Física 2025 fue otorgado a tres científicos que han realizado importantes avances en el campo (Nobel Prize Outreach, 2025). Pero esto también se refleja a nivel de las políticas públicas, ya que las principales potencias a nivel mundial están invirtiendo grandes

cantidades de recursos en el desarrollo de la ciencia y la tecnología detrás de la computación cuántica.¹ El desarrollo de esta tecnología también presenta grandes desafíos. El elemento clave en los sistemas de información cuánticos es que los *qubit* pueden existir en un estado 0 o 1, al igual que los *bits*, pero también en cualquier combinación de estos estados, hasta que son medidos. Esta característica de los *qubit* se debe a la propiedad de superposición de los sistemas cuánticos. Estos sistemas presentan otra propiedad característica, que es el entrelazamiento, el cual permite vincular *qubits* distantes. La computación cuántica aprovecha estas dos propiedades, pero se enfrenta a la dificultad de mantener el sistema lo suficientemente aislado, como para evitar que el entorno afecte el entrelazamiento y el sistema pierda coherencia (Knill, 2010).

Mediante el uso de la computación cuántica se espera que se puedan abordar problemas que, por su complejidad, resultan imposibles de abordar con computadores clásicos. Esto, a su vez, puede abrir nuevas vías de desarrollo económico. Sin embargo, se trata de un campo complejo, que requiere la existencia de una serie de capacidades que permitan su uso y aplicación en procesos productivos, innovadores y científicos. De este modo, para promover su uso es necesario conocer, fortalecer y favorecer el desarrollo de estas capacidades o competencias. No todas las

59

* Eduardo Hernández-Rodríguez: Departamento de Economía Aplicada II, Universidad de Sevilla, España. Federico Moscatelli: Departamento de Economía y Análisis de Datos, Organización Mundial de la Propiedad Intelectual (OMPI). Sergio Palomeque: Departamento de Ciencias de la Administración, Universidad de la República, Uruguay. Julio Raffo: Departamento de Economía y Análisis de Datos, Organización Mundial de la Propiedad Intelectual (OMPI). Las opiniones expresadas en este artículo son de los autores y no reflejan necesariamente las de la Organización Mundial de la Propiedad Intelectual (OMPI) ni las de sus Estados miembros.

1. Más información en: <https://www.mckinsey.com/capabilities/mckinsey-digital/our-insights/the-year-of-quantum-from-concept-to-reality-in-2025>.

economías parten del mismo punto de salida, por lo que este proceso de construcción de capacidades debe tener en cuenta las realidades y características locales de cada economía (Brooks, 2023).

En particular, para países de América Latina y el Caribe, una región periférica en el sistema de producción de conocimiento global, donde predominan sistemas de innovación frágiles e inmaduros, pero que coexisten junto con megaciudades de importancia global, el desarrollo de la computación cuántica plantea una importante encrucijada (Arocena & Sutz, 2000; Bianchi *et al.*, 2021, 2023; Yoguel & Robert, 2010). Por un lado, se trata de una tecnología compleja, cuyas aplicaciones prácticas aún son poco claras. Esto hace que la apuesta por participar en su desarrollo, desde esta región, muestre un alto riesgo y un beneficio incierto. Pero, por otro lado, la brecha tecnológica con respecto a los países centrales es una preocupación clave para la región. Y los cambios de paradigma tecnológico pueden abrir ventanas de oportunidad para países periféricos (Perez & Soete, 1988; Pérez, 2010). Por ello, resulta pertinente preguntarse sobre las posibilidades de la región dentro de este campo.

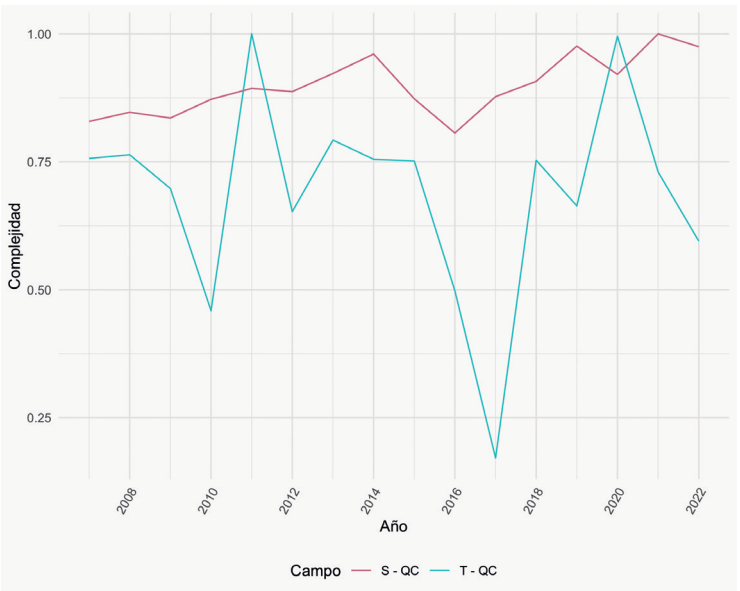
Este trabajo utiliza datos de publicaciones científicas, patentes y exportaciones, entre 2007 y 2022, a los que aplica técnicas de análisis de complejidad y afinidad entre campos. Con este insumo, el capítulo se plantea como objetivo, en primer lugar, describir algunas de las características de las capacidades tecnológicas y científicas, vinculadas a la computación cuántica. Luego se pondrá el foco en las capacidades científicas, tecnológicas y productivas que se relacionan con aquellas vinculadas a la computación cuántica. A partir de ello, se estudiarán las capacidades disponibles en América Latina y el Caribe, que pueden servir de palanca para el desarrollo de capacidades en computación cuántica en la región.

1. LA COMPUTACIÓN CUÁNTICA Y SU COMPLEJIDAD

A pesar de que el potencial del desarrollo de la computación cuántica es significativo, dicha materia resulta compleja. Es decir, se trata de un ámbito en el que es necesario tener capacidades y conocimiento específico que permitan su uso y aplicación, así como también la producción de la ciencia y tecnología que la componen. Esto significa que no todos los países van a ser capaces de desarrollar una especialización en el campo de la computación cuántica. Respecto a esto decimos que la computación cuántica va a tener una baja ubicuidad. Es decir, no va a estar presente en todas las economías. Del mismo modo, como se trata de un campo intrincado, los países que la desarrollen serán posiblemente países con muchas capacidades. En este sentido, será más probable que países altamente diversificados, es decir, capaces de desarrollar multitud de campos científicos, tecnologías y productos, sean los que se especialicen en computación cuántica. De este modo, basándonos en la relación entre la ubicuidad de las capacidades científicas y tecnológicas en computación cuántica, y la diversidad de países especializados en ellas, es posible calcular un índice de complejidad económica de la materia en cuestión (Hidalgo & Hausmann, 2009).

Para ello, se considera que un país está especializado en ciencia o tecnología vinculada a computación cuántica, si las publicaciones científicas o las patentes en esos campos representan una proporción de su portafolio, mayor que la que representan a nivel global. En particular, se usan datos para 164 ecosistemas de innovación entre 2007 y 2022 sobre 172 campos tecnológicos de patentes registradas en PATSTAT y WIPO, 169 campos científicos de publicaciones científicas recogidos en Web of Science y 285 productos y servicios exportados incluidos en la base de datos UN COMTRADE (Moscatelli *et al.*, 2024).

Figura 1. Evolución de la complejidad económica de la ciencia y tecnología en computación cuántica (2007-2022)



Fuente: elaboración propia.

La Figura 1 nos muestra la evolución de la complejidad económica del conocimiento científico y las tecnologías de computación cuántica. Por un lado, la línea roja nos señala cómo el conocimiento en computación cuántica, medido con publicaciones científicas, ha incrementado su complejidad entre 2007 y 2022. En este caso, el eje vertical nos muestra un ranking de complejidad, en el que 1 equivale a los campos con mayor complejidad económica y 0 el más bajo. Por otro lado, la línea azul nos muestra dicha evolución para las tecnologías en computación cuántica, medida con patentes. En este sentido, aunque también se puede observar claramente que se encuentra dentro de los campos con mayor complejidad económica, cabe resaltar la mayor volatilidad en su evolución. Dichas variaciones pueden deberse a diversos motivos como la mayor inestabilidad de patentamiento, el incipiente desarrollo y aplicación de conocimientos de computación cuántica en tecnologías para la

producción de bienes y servicios, o la entrada de nuevos países que modifican la complejidad de estas capacidades.

Sin embargo, aunque la **Figura 1** nos muestra cómo ha evolucionado la complejidad económica de la ciencia y tecnología en computación cuántica, es imprescindible poder comparar dicha complejidad con la de otros campos. De esta manera, la **Figura 2** presenta, para cada año, dónde se encuentran el conocimiento científico y tecnológico en computación cuántica (en rojo) respecto de otras capacidades asociadas a la ciencia, la tecnología y la producción (en gris). Como puede observarse, los campos asociados a la computación cuántica son de mayor complejidad que la mayoría de los campos. Además, esta figura se complementa con la **Figura 1**, ya que la posición de la complejidad para la ciencia y tecnología cuántica (en rojo) se corresponde con los valores presentados en la figura anterior. En este caso también se puede apreciar la volatilidad anteriormente comentada para las tecnologías de computación cuántica para 2010, 2016 y 2017. A pesar de esto, es posible observar claramente la alta complejidad económica de estos campos.

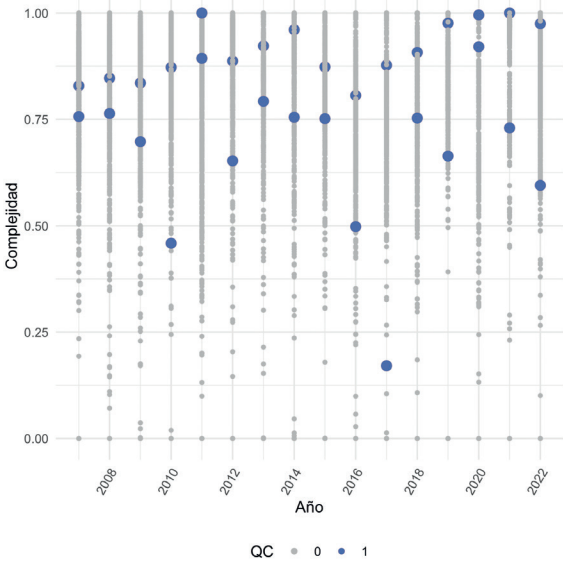
En este sentido, la importancia de medir la complejidad económica no reside solamente en su capacidad de mostrar la dificultad de uso y desarrollo de un campo, sino en el hecho de que la complejidad económica tiende a asociarse con un mayor crecimiento económico, menores niveles de desigualdad y menor contaminación medioambiental (Hartmann *et al.*, 2017; Stojkoski *et al.*, 2023). De este modo, desarrollar conocimientos científicos y tecnológicos en computación cuántica puede traer grandes beneficios económicos, sociales y ambientales para los países de América Latina y el Caribe. De igual modo, existen costes asociados a estos beneficios, los cuales están explicados en siguientes secciones.

Una vez que se ha señalado la alta complejidad económica de la computación cuántica es lógico preguntarse por dónde empezar. Es decir, ¿cómo pueden los países de América Latina y el Caribe desarrollar dicho campo? ¿Tienen dichos países las capacidades necesarias para impulsar una nueva especialización en computación cuántica? La siguiente sección explica dónde reside el potencial de los países de la región para promover el uso y desarrollo de la computación cuántica.

2. ¿DE DÓNDE PARTIMOS?

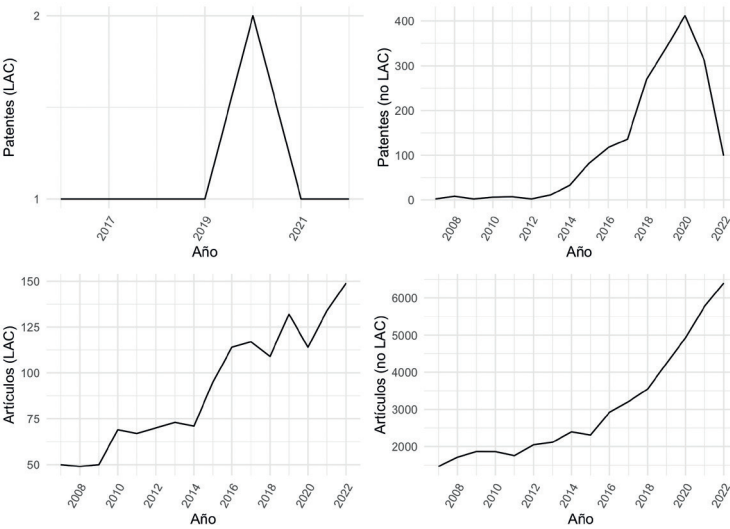
Aunque las capacidades relacionadas con la computación cuántica puedan resultar complejas, esto no significa que los países de América Latina y el Caribe no cuenten ya con capaci-

Figura 2. Comparativa de la evolución de la complejidad económica de la ciencia y tecnología en computación cuántica respecto otros campos (2007-2022)



Fuente: elaboración propia.

Figura 3. Número de publicaciones científicas y patentes en computación cuántica producidas por países de América Latina y el Caribe y países del resto del mundo (2007-2022)

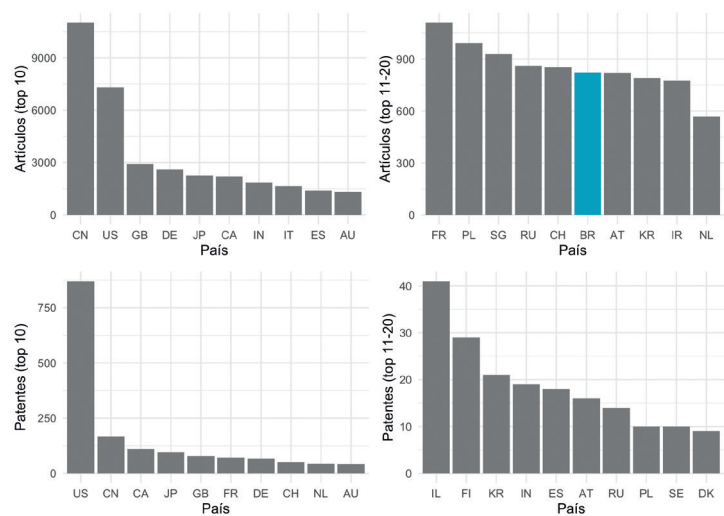


Fuente: elaboración propia.

des relacionadas con este campo. La dificultad reside aquí en observar dichas capacidades, ya que estas residen en conocimiento a veces tácito y no siempre codificado. Para ello, podemos usar publicaciones científicas como indicador del conocimiento científico y patentes para capturar el conocimiento tecnológico. En ambos casos es preciso señalar que, aunque estos indicadores pueden ayudarnos a desvelar la existencia de dichos conocimientos, no consiguen ser exhaustivos, es decir, capturan tan solo parcialmente la presencia de dichas capacidades.

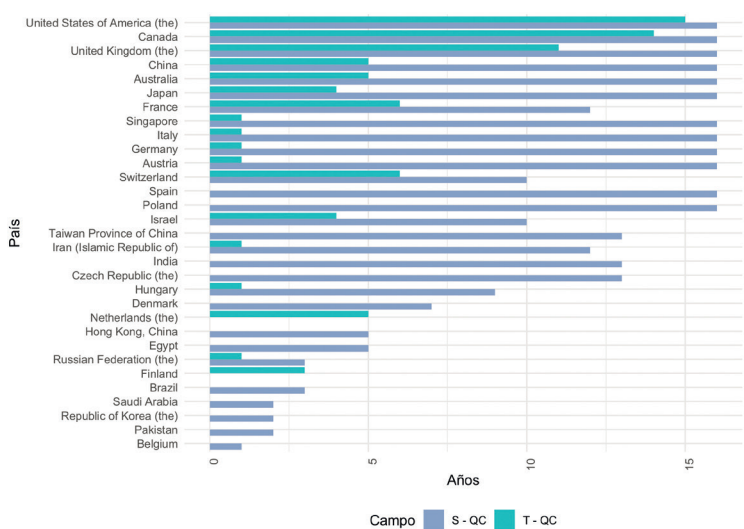
El primer paso sería ver cómo ha ido evolucionando, en los últimos años, la producción total de publicaciones científicas y patentes en el ámbito de la computación cuántica. Para ello, la **Figura 3** nos

Figura 4. Número de publicaciones científicas y patentes en computación cuántica por país (2007-2022)



Fuente: elaboración propia.

Figura 5. Número de años de especialización en ciencia y tecnología de la computación cuántica por país (2007-2022)



Fuente: elaboración propia.

muestra en la parte superior la cantidad de patentes producidas por países de América Latina y el Caribe (a la izquierda) y por el resto de los países del mundo (a la derecha). Por un lado, es posible observar que la aportación de patentes en computación cuántica por parte de América Latina y el Caribe es bastante reducida, contando con tan solo una patente por año en este campo, desde 2016, con la excepción del 2020 en el que se registraron dos. Por otro lado, es posible observar que la producción de patentes en computación cuántica por el resto del mundo ha ido creciendo en los últimos años. Hasta 2012 se registraron pocas patentes en computación cuántica. Sin embargo, a partir de 2013 se observa un aumento considerable hasta llegar a un pico en 2020 con más de 400 patentes. A partir de entonces se registra una notable caída hasta el final del periodo estudiado.

Por lo tanto, observamos que, aunque la participación de América Latina y el Caribe en la producción total de patentes en computación cuántica es reducida, la producción total mundial también lo es. De

este modo, podemos destacar positivamente que los países de la región hagan un aporte, aunque sea reducido, a la producción de nuevo conocimiento tecnológico en este ámbito. Ahora bien, la **Figura 3** también nos muestra en la parte inferior la producción total de publicaciones científicas en computación cuántica, tanto por América Latina y el Caribe (a la izquierda) como por el resto del mundo (a la derecha).

Se puede observar cómo la participación de América Latina y el Caribe en cuanto a conocimiento científico en computación cuántica es mucho mayor que en el caso del conocimiento tecnológico. Además, esta va creciendo con los años, subrayando la creciente aportación de los países de la región en este campo. Una tendencia similar se observa al mirar al resto de países del mundo. Existe una clara tendencia positiva en la cantidad de publicaciones científicas producidas. En concreto, se pasa de unas 1000 publicaciones en 2007 a más de 6000 en 2022. Esto nos muestra cómo los estudios científicos en computación cuántica son cada vez más, señalando lo dinámico del campo en cuestión.

Ahora bien, veamos cuáles son los países líderes en esta producción total de conocimiento científico y tecnológico en el campo de la computación cuántica. Hasta ahora hemos visto la producción total distinguiendo solamente entre países de América Latina y el Caribe y países del resto del mundo. Para ello, la **Figura 4** muestra la cantidad de publicaciones científicas y patentes en computación cuántica generadas por los países líderes en dichos campos entre 2007 y 2022.

De este modo, la **Figura 4** nos muestra en la parte superior la cantidad de publicaciones científicas publicadas por los 20 países con mayor producción científica en el ámbito de la computación cuántica. Entre dichos países, el único país de América Latina y el Caribe que encontramos es Brasil (en verde). En este sentido, Brasil es el decimosexto país en cuanto a producción científica en computación cuántica del mundo, entre 2007 y 2022. Esto nos muestra como Brasil tiene ya capacidades científicas en este ámbito, lo cual puede resultar clave para promover un mayor uso y desarrollo de la computación cuántica en procesos productivos.

Además, la **Figura 4** incluye en su parte inferior la cantidad de patentes producidas por los 20 países con mayor número de patentes desarrolladas en computación cuántica en el referido periodo 2007-2022. En este caso se puede observar cómo ningún país de América Latina y el Caribe está entre los 20 primeros del mundo. En particular, observamos como a pesar de que Brasil tiene capacidades científicas en computación cuántica, dicho conocimiento no se tradu-

ce en avances tecnológicos. Existe pues un problema a la hora de aplicar al ámbito tecnológico los conocimientos científicos ya presentes en el territorio.

Veamos por lo tanto cómo es la relación entre el conocimiento científico y tecnológico en computación cuántica. Es decir, veamos si aquellos países que se especializan en ciencia de la computación cuántica también tienden a especializarse en la producción de nuevo conocimiento tecnológico en esta área. Para ello, la **Figura 5** nos muestra aquellos países que han estado más años especializados en ciencia (rojo) y tecnología (azul) de computación cuántica en el periodo 2007-2022.

Respecto a la **Figura 5** podemos observar como las capacidades en ciencia de la computación cuántica están más distribuidas a nivel global. Se puede apreciar que las barras rojas son notablemente superiores a las barras azules, indicando que más países suelen estar más años especializados en ciencia, en comparación con lo que pasa en tecnología de la computación cuántica. Además, respecto a la importancia de la ciencia de la computación cuántica es necesario destacar que hay muchos países que, a pesar de haber estado especializados en ciencia, no llegan a especializarse en tecnología. Esto es precisamente lo que se comentaba para el caso de Brasil en América Latina y el Caribe. Entre los países que siguen este patrón podemos destacar a España, Polonia, India, Republica Checa, Egipto, Arabia Saudí, Corea o Bélgica, entre otros. Por lo tanto, el caso de Brasil no es una excepción, sino que confirma la intrínseca dificultad para pasar de estar especializado en ciencia de la computación cuántica a tecnologías en dicha área.

Por otro lado, si nos fijamos en los países que están más años especializados en tecnología de la computación cuántica, observamos que se trata de un conjunto de países altamente desarrollados y líderes mundiales en innovación. En este sentido sobresalen Estados Unidos, Canadá, Reino Unido, China, Australia, Japón, Francia o Suiza, entre otros. Es también llamativo el caso de Países Bajos y Finlandia, quienes a pesar de estar varios años especializados en tecnología de computación cuántica, no cuentan con ningún año de especialización en dicha ciencia. En todo caso, se puede observar que existe una alta concentración geográfica en las capacidades tecnológicas en computación cuántica. Dicho fenómeno no debe ser sorprendente, ya que las tecnologías complejas, como es el caso de la computación cuántica, tienden a estar altamente concentradas en el espacio (Balland & Rigby, 2017; Balland *et al.*, 2020).

Como se ha podido observar, los países de América Latina y el Caribe no cuentan con demasiadas capacidades tecnológicas y científicas en el campo de la computación cuántica mirando directamente al número total de publicaciones científicas y patentes. Estas capacidades resultan necesarias para, sobre ellas, poder construir nuevas competencias que permitan abrir nuevas vías de desarrollo. En cualquier caso, hasta este momento solamente hemos analizado las capacidades existentes dentro de este campo. Sin embargo, existen otras capacidades afines al campo de la computación cuántica que también pueden aportar

competencias. Nos referimos a conocimiento productivo, científico y tecnológico en áreas afines a la computación cuántica (Moscatelli *et al.*, 2024). Ahora bien, la cuestión es de nuevo saber dónde residen estas capacidades relacionadas o afines a la computación cuántica.

Una forma de descubrir estas capacidades relacionadas es usar métricas de afinidad (*relatedness*) para así observar qué otros campos tecnológicos, productos y conocimientos científicos están relacionados con la computación cuántica (Hidalgo *et al.*, 2007; Balland *et al.*, 2019). Estas métricas se basan en la coocurrencia repetida de especialización de pares de productos, tecnologías y campos científicos. Funcionan como los algoritmos de los sistemas de recomendación. Por ejemplo, al comprar un producto *online* nos salen sugerencias de otros productos que nos pueden interesar. Del mismo modo, cuando vemos un video *online* las plataformas nos ofrecen nuevos videos para ver. Estas recomendaciones no son aleatorias, sino que se basan en experiencias previas de usuarios. Es decir, aquellos usuarios que ya vieron el video que acabamos de ver, también vieron el otro que se nos recomienda. De esta manera, podemos observar qué productos, tecnologías y campos científicos están presentes en aquellos países que están especializados en computación cuántica. Así lograremos observar cómo se relacionan dichos campos entre ellos y cuál es el grado de afinidad entre la computación cuántica y los mismos.

Para observar esta afinidad, la **Tabla 1** nos muestra los principales productos exportados, tecnologías y campos científicos que se encuentran relacionados con la computación cuántica. De este modo, tener capacidades en dichos campos afines puede ser también una palanca de cambio y una fuente de competencias para construir capacidades en computación cuántica en los países de la región. A pesar de que no son conocimientos directos en el campo de la computación cuántica, son capacidades afines que serán similares a las requeridas para especializarse en la misma.

La **Tabla 1** nos muestra en primer lugar los productos, tecnologías y campos científicos afines al conocimiento científico en computación cuántica (1-15). La primera letra de la columna “Campo ID” nos señala si el campo en cuestión es un producto exportado (P), un campo científico (S) o una tecnología (T). Además, la columna “Años en top 5” nos muestra cuántos años dicho campo ha estado entre los 5 campos más afines a la ciencia en computación cuántica. En este sentido, podemos observar que campos científicos como la física atómica, molecular y óptica, teoría computacional y matemáticas o matemáticas discreta y combinatoria se encuentran entre los más afines a la computación cuántica. También aparecen productos como el gas industrial, radios o relojes. Sin embargo, no encontramos ninguna tecnología que suela coocurrir con la ciencia en computación cuántica.

En segundo lugar, la **Tabla 1** nos muestra aquellos 15 campos (productos, campos científicos y tecnologías) más afines a la tecnología en computación cuántica (16-31). En este sentido podemos observar algunos productos de alta precisión como relojes, gas industrial o mineral

Tabla 1. Productos, campos científicos y tecnologías más afines a la computación cuántica

	QC	Field.ID	Field.Name	yearsRel	both
1	S - QC	S - 3107	Atomic and Molecular Physics, and Optics	6	0
2	S - QC	P - C662	Clay Materials	2	0
3	S - QC	P - C325	Coke	4	0
4	S - QC	S - 1703	Computational Theory and Mathematics	2	0
5	S - QC	S - 1704	Computer Graphics and Computer-Aided Design	3	0
6	S - QC	S - 2607	Discrete Mathematics and Combinatorics	2	0
7	S - QC	S - 2103	Fuel Technology	5	0
8	S - QC	P - C345	Industrial Gas	4	1
9	S - QC	P - C264	Jute	2	0
10	S - QC	P - C277	Natural Abrasives	4	1
11	S - QC	P - C762	Radios	2	0
12	S - QC	P - C712	Steam Turbines	5	0
13	S - QC	S - 2614	Theoretical Computer Science	2	0
14	S - QC	P - C286	Uranium Ore	3	1
15	S - QC	P - C885	Watches	6	1
16	T - QC	P - C896	Art and Antiques	6	0
17	T - QC	T - G04	Clocks & Timekeeping	2	0
18	T - QC	P - C321	Coal	5	1
19	T - QC	T - C40	Combinatorial Chemistry	3	0
20	T - QC	P - C212	Fur Skins	2	0
21	T - QC	S - 3318	Gender Studies	2	0
22	T - QC	S - 3200	General Psychology	3	0
23	T - QC	P - C345	Industrial Gas	3	1
24	T - QC	S - 3309	Library and Information Sciences	12	0
25	T - QC	T - E21	Mining & Drilling	3	1
26	T - QC	S - 1210	Music	4	0
27	T - QC	P - C284	Nickel Ore	4	1
28	T - QC	P - C045	Other Cereals	2	0
29	T - QC	T - B41	Printing & Publishing	2	0
30	T - QC	P - C342	Propane and Butane	2	1
31	T - QC	P - C885	Watches	2	1

Fuente: elaboración propia.

de níquel. En cuanto a los principales campos científicos más afines encontramos algunos tales como bibliotecas y ciencias de la información, música o psicología. Finalmente, las tecnologías más afines a la tecnología en computación cuántica versan sobre relojes y tiempo, química combinatoria, minería y excavación e impresión y publicación. En concreto, de nuevo podemos observar en la columna “Años en top 5” que el principal campo en afinidad a la tecnología cuántica es la ciencia de la información, estando 12 años entre los campos más afines. Del mismo modo, es preciso apuntar que a veces se producen afinidades que podrían ser espurias como por ejemplo el caso de la afinidad entre la exportación de cereales. Por ello, resulta necesario observar repetidamente cómo evoluciona la coocurrencia de estos campos a lo largo del tiempo y en diferentes territorios.

De este modo, los países de América Latina y el Caribe que tengan competencias ya existentes en dichos productos, tecnologías y campos científicos afines a la computación

cuántica se encontrarán en mejor posición para especializarse en ciencia y tecnología de la computación cuántica. Estos campos afines pueden aportar capacidades afines que ayuden al desarrollo de capacidades propias en la producción de nuevo conocimiento científico y tecnológico en el campo de interés.

Además, podemos ir aún un paso más allá. Basándonos en la afinidad entre los distintas exportaciones, tecnologías y campos científicos afines a la computación cuántica, podemos desarrollar indicadores de densidad de afinidad (Balland *et al.*, 2019). La densidad de afinidad es un indicador que captura el porcentaje de productos, tecnologías y campos científicos, que están relacionados con la computación cuántica en este caso, y en los cuales el país en cuestión está ya especializado. Dicho indicador va de 0 %, en el caso en que el país no está especializado en ningún campo afín, hasta 100 % en el caso en el que el país está especializado en todos los campos afines. De este modo, se entiende que cuanto mayor es la densidad de afinidad

en un país, más fácil será para dicho país entrar en el campo de la computación cuántica (Hidalgo *et al.*, 2018). La **Figura 6** nos muestra la densidad de afinidad de los países con mayor densidad de afinidad respecto a la computación cuántica.

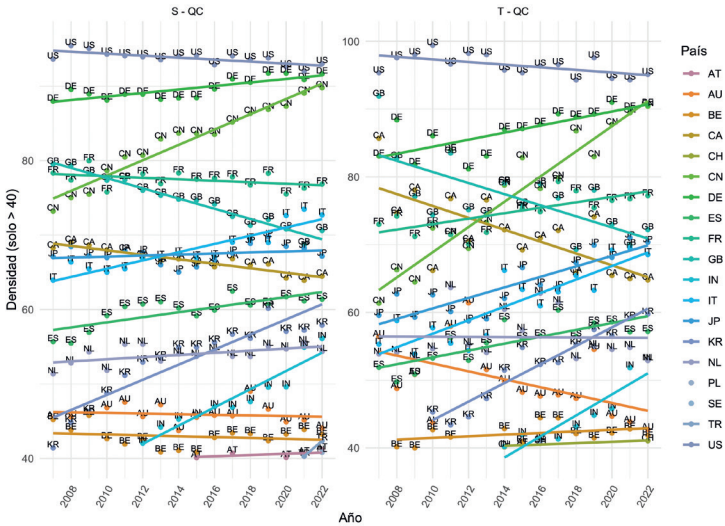
En concreto, podemos observar la evolución de la densidad de afinidad de aquellos países que están especializados en al menos el 40% de campos afines a la computación cuántica en el periodo 2007-2022. Mientras que en el gráfico de la izquierda observamos la densidad de afinidad respecto a la ciencia en computación cuántica, en el gráfico de la derecha observamos la densidad de afinidad respecto a la tecnología en computación cuántica. De este modo, estos países pudiendo o no estar ya especializados en computación cuántica, poseen capacidades relacionadas en campos afines, incrementando así las posibilidades en entrar en el ámbito de la computación cuántica usando capacidades afines. Entre los países con mayor densidad de afinidad tanto para la ciencia como para la tecnología en computación cuántica destacan Estados Unidos, Alemania, Canadá, Francia y Reino Unido. El caso de China es particularmente interesante ya que muestra un sostenido crecimiento en su densidad, tanto con respecto a la ciencia como a la tecnología, llegando a ocupar el tercer lugar en ambas para el final del periodo.

Como se puede ver, entre aquellos países con una densidad de afinidad superior al 40% no encontramos a ningún país de América Latina y el Caribe. Sin embargo, esto no debe traducirse automáticamente en una barrera o imposibilidad para dichos países a la hora entrar en el ámbito de la computación cuántica.

Aunque tengan menor densidad de afinidad, es posible fomentar el desarrollo de competencias afines e incluso, aunque resulta más costoso, promover diversificación desde campos menos afines (Pinheiro *et al.*, 2022; Boschma *et al.*, 2023). Para analizar con más detalle el caso de América Latina y el Caribe, la **Figura 7** nos muestra la evolución de la densidad de afinidad en los países líderes en este sentido de la región.

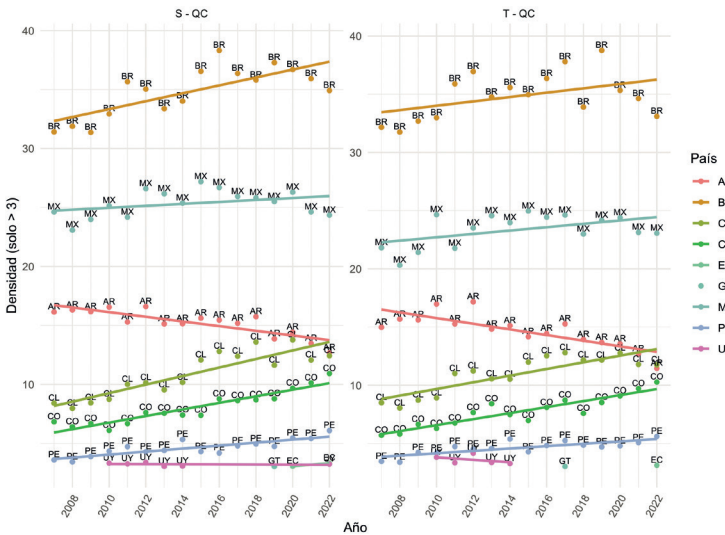
En este caso, observamos aquellos países de América Latina y el Caribe que cuentan con una densidad de afinidad respecto a la computación cuántica de al menos un 3% entre 2007 y 2022. Es decir, se muestra cómo ha evolucionado la densidad de afinidad para aquellos países de la región que al menos están especializados en un 3% de todos los campos afines a la computación cuántica, como los señalados en la **Tabla 1**. Al igual que en el gráfico anterior, la **Figura 7** nos muestra a la izquierda la evolución de la densidad de afinidad respecto a la ciencia en compu-

Figura 6. Evolución de la densidad de afinidad en los países con valores superiores al 40% (2007-2022)



Fuente: elaboración propia.

Figura 7. Evolución de la densidad de afinidad en los países de América Latina y el Caribe (2007-2022)

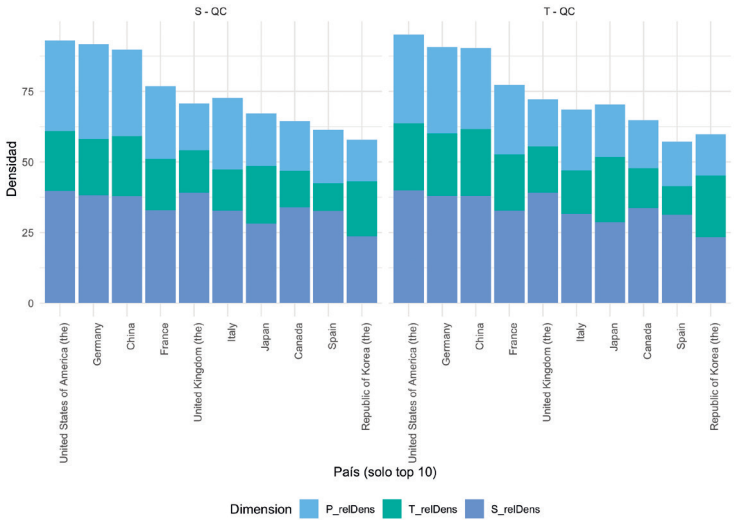


Fuente: elaboración propia.

tación cuántica y a la derecha la evolución respecto a la tecnología de la computación cuántica. En este sentido, 9 países de la región destacan sobre el resto: Argentina, Brasil, Chile, Colombia, Ecuador, Guatemala, México, Perú y Uruguay. Es posible observar que dos países se muestran consistentemente por encima del resto, estos son Brasil y México. Estas son las principales economías de la región, y también cuentan con las metrópolis más importantes. Esto lleva a que sus sistemas de innovación sean de los más diversificados, pero también a que se observen importantes disparidades a nivel interno de sus territorios.

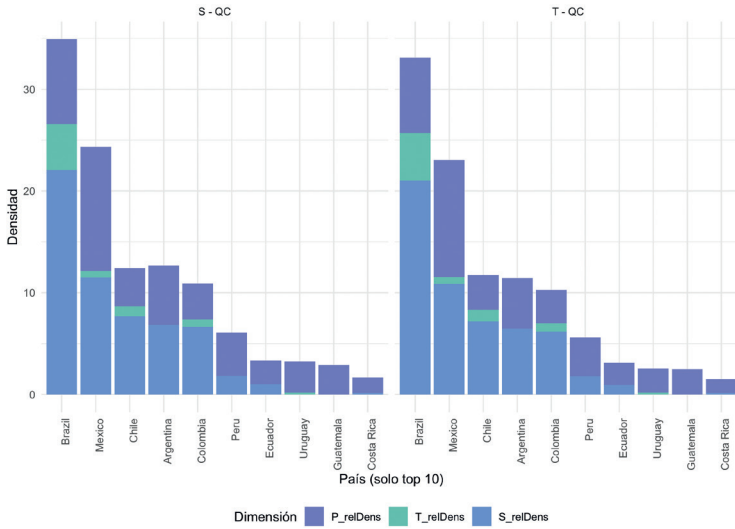
Como ya se señaló, Brasil es el país líder en computación cuántica dentro de la región. Sin embargo, anteriormente vimos que Brasil tenía principalmente capacidades en ciencia de la computación cuántica, lo cual se verifica en el gráfico de la izquierda. Además, vemos a la derecha que, aunque Brasil no está especializado en tecnología de la computación cuántica, sí está especializado en muchos cam-

Figura 8. Composición de la densidad de afinidad en los países líderes en computación cuántica



Fuente: elaboración propia.

Figura 9. Composición de la densidad de afinidad en los países líderes de América Latina y el Caribe en computación cuántica



Fuente: elaboración propia.

pos afines a la misma. Esto quiere decir que Brasil cuenta con capacidades similares que pueden resultar útiles para desarrollar una futura especialización no solo en ciencia, sino también en tecnología de la computación cuántica. En concreto, Brasil está especializado en entre el 30% y el 40% de campos afines a la tecnología de la computación cuántica. Además, cabe resaltar el hecho positivo de que, a lo largo del periodo estudiado, la densidad de afinidad ha ido creciendo, tanto para la ciencia como para la tecnología de la computación cuántica.

Tras los pasos de Brasil vemos que México también está construyendo capacidades en campos afines tanto a la ciencia como a la tecnología de computación cuántica. En este caso, México está especializado entre alrededor del 20% y 30% de campos afines a la computación cuántica. Es también destacable la tendencia al alza de dicha densidad de afinidad en el caso mexicano.

Mientras que Brasil y México son líderes en cuanto a densidad de afinidad en computación cuántica en América Latina y el Caribe, otros países conforman un conjunto homogéneo alcanzando niveles superiores al 10% de densidad de afinidad. Estos son Argentina, Chile y Colombia. Sin embargo, mientras que Chile y Colombia muestran una tendencia positiva, es decir, han ido especializándose en cada vez más campos afines, Argentina presenta una tendencia negativa. En el caso argentino, se observa claramente como la densidad de afinidad ha ido retrocediendo entre 2007 y 2022. A pesar de que aún se mantiene como el tercer país de América Latina y el Caribe con mayor densidad de afinidad, Argentina parece mostrar un proceso de desacumulación de capacidades que puede estar asociado a un periodo de inestabilidad económica. Este deterioro puede comprometer sus oportunidades de diversificaciones en computación cuántica, tanto en ciencia como en tecnología.

Finalmente, en la **Figura 7** encontramos un grupo de cuatro países, que muestran tener algunas capacidades vinculadas a la computación cuántica, pero difícilmente superan el 5% y su presencia no es constante en el gráfico. Se trata de Ecuador, Guatemala, Perú y Uruguay. Estas son economías relativamente más pequeñas que las anteriores, aunque con niveles de desarrollo dispares. Estos países podrían intentar favorecerse de los vínculos de colaboración, con la región y el resto del mundo, para suplir las limitaciones que le impone el tamaño de sus economías. Si bien en este trabajo no se aborda el análisis de los vínculos de colaboración, este puede ser un elemento central para toda la región, no solo para este grupo de países.

De este modo, en la **Figura 7** hemos podido observar que existen diferencias en cuanto a los valores totales de densidad de afinidad en los países de América Latina y el Caribe. Ahora bien, la densidad de afinidad puede venir de muchos campos afines. Como se mostró en la **Tabla 1**, para construir esta densidad de afinidad, los países pueden basarse tanto en productos exportados como en campos científicos y tecnologías. El siguiente paso lógico es, por lo tanto, descubrir de dónde viene la densidad de afinidad. De este modo, la **Figura 8** nos muestra el origen de la densidad de afinidad para los países líderes tanto en ciencia (a la izquierda) como en tecnología (a la derecha) en computación cuántica, entre los cuales no se encuentra ningún país de América Latina y el Caribe. La zona coloreada de rojo nos señala la densidad de afinidad que viene de productos exportados, la verde de otras tecnologías y la azul de otros campos científicos.

En este sentido, observamos como tanto para la ciencia como la tecnología en computación

cuántica los países líderes se basan principalmente en otros campos científicos afines. Además, también usan otras tecnologías afines y en similar medida productos exportados. En todo caso, vemos cómo tanto para ciencia como tecnología en computación cuántica los países líderes construyen capacidades afines en las tres categorías, es decir, tanto en productos exportados, tecnologías y campos científicos. Ahora bien, veamos si en los países de América Latina y el Caribe este patrón en la composición de la densidad de afinidad se mantiene o si existen desviaciones con respecto a los países líderes en el mundo. Para ello veamos la **Figura 9**.

La **Figura 9** nos muestra la composición de la densidad de afinidad con la ciencia (a la izquierda) y la tecnología (a la derecha) en computación cuántica para los diez países de América Latina y el Caribe con mayor densidad de afinidad. Al igual que en la **Figura 8**, el color rojo representa las competencias en productos exportados, el color verde las competencias en tecnologías afines y el color azul las competencias en otros campos científicos afines. En el caso de América Latina y el Caribe se puede observar una mayor heterogeneidad que en el caso anterior de los países líderes. En primer lugar, vemos cómo Brasil basa principalmente su densidad de afinidad en campos científicos afines a la computación cuántica. El aporte de otras tecnologías y productos exportados es notoriamente menor. Sin embargo, México, que sigue de cerca los pasos de Brasil en cuanto a densidad de afinidad total, tiene una composición diferente a Brasil. México compone su densidad de afinidad, de manera pareja, entre productos exportados y campos científicos. Esta mayor importancia de los productos exportados en el caso mexicano puede deberse a la alta integración de México en la cadena de valor norteamericana, la cual puede funcionar como una fuente de nuevas capacidades para promover cambios estructurales y diversificación (Hernández-Rodríguez *et al.*, 2025).

Finalmente, observamos otro hecho notable al observar cómo varios países -tales como Argentina, Perú, Ecuador, Guatemala y Costa Rica- basan su densidad de afinidad exclusivamente en productos exportados y campos científicos. El aporte de otras tecnologías es en esos casos nulo. Esto pone de manifiesto cómo los países de la región de América Latina y el Caribe no llegan a explotar el potencial de capacidades que residen en la especialización en tecnologías afines a la ciencia y la tecnología de la computación cuántica. Esto puede actuar como barrera a la construcción de sistemas de innovación y desarrollo de capacidades en el ámbito de la computación cuántica para la región.

CONCLUSIONES

El potencial de la computación cuántica para transformar distintas áreas de la actividad humana en general, y de la economía en particular, es aún incierto. Pero la fuerte apuesta de las grandes potencias económicas, así como el enorme interés de la comunidad científica mundial, respaldan la idea de que esta tecnología puede transformar profundamente nuestra sociedad. Si una parte de las posibilidades se realiza, esta tecnología podría generar cam-

bios revolucionarios en muchas áreas. Su aplicación a procesos productivos puede abrir nuevas vías de desarrollo económico sostenible. Esto podría representar una oportunidad para los países de América Latina y el Caribe, en la medida en que sean capaces de identificar capacidades que les permitan participar activamente en el desarrollo de esta tecnología (Brooks, 2023; Rietsche *et al.*, 2022).

Sin embargo, la alta complejidad de las capacidades asociadas a la computación cuántica hace que lograr desarrollarlas sea una empresa desafiante. En particular, para una región en la que la dependencia de los recursos naturales, la inmadurez de los sistemas de innovación, la baja inversión en investigación y desarrollo o la fragilidad institucional y económica hacen muy difícil establecer estrategias de desarrollo de capacidades que, necesariamente, deberían mirar al mediano y largo plazo. En contraposición, la alta complejidad de la computación cuántica ofrece incentivos, ya que diversificar hacia campos complejos puede traducirse en un mayor crecimiento económico, menor desigualdad y niveles de contaminación más bajos (Stojkoski *et al.*, 2023). Por lo tanto, el cambio estructural y la especialización en tales actividades complejas resultan atractivos para economías como las de América Latina y el Caribe. Como se ha visto a lo largo de este trabajo, los países de América Latina y el Caribe no se encuentran entre las economías líderes en la producción de conocimiento científico y tecnológico en computación cuántica. Sin embargo, se ha puesto de manifiesto que dichas economías sí cuentan con capacidades afines a dicho campo que pueden actuar como palanca de cambio e iniciar procesos de diversificación hacia la computación cuántica. En particular, países como Brasil o México se encuentran en una posición ventajosa para liderar este cambio estructural dentro de América Latina y el Caribe. Además, otros países tales como Chile, Colombia o Argentina también cuentan con herramientas que pueden contribuir a dicha diversificación.

No obstante, entre los países de América Latina y el Caribe existe una alta heterogeneidad en cuanto a sus estructuras productivas y el origen de sus capacidades afines a la computación cuántica. Esto debe necesariamente traducirse en el desarrollo de estrategias diseñadas a medida, para cada uno de los países de la región. De este modo, cada país podrá utilizar sus capacidades existentes, independientemente de que vengan de productos exportados, ciencia o tecnologías. En este sentido, las recomendaciones de políticas públicas deberán tratar de entender cómo funciona cada uno de los ecosistemas de innovación en los distintos países de la región, fomentando las fortalezas de capacidades ya existentes y tratando de solucionar la falta de competencias en áreas afines cuyo aporte aún no está siendo explotado. En este sentido, las políticas que apunten a desarrollar lazos de colaboración estratégicos, basados en complementariedades de las capacidades, pueden ser de vital importancia. Estas estrategias de colaboración no deben descuidar el hecho de que, el acceso a flujos globales de conocimiento no puede ser aprovechado sin el desarrollo de capacidades locales de absorción. Por lo tanto, la estrategia en este sentido debería contemplar tanto el nivel interno, incluso abordando la dimensión subnacional, como la inserción externa.

BIBLIOGRAFÍA

Arocena, R. & Sutz, J. (2000). Looking at National Systems of Innovation from the south. *Industry and Innovation*, 7(1), 55-75.

Balland, P.-A., Boschma, R., Crespo, J. & Rigby, D. L. (2019). Smart specialization policy in the European Union: Relatedness, knowledge complexity and regional diversification. *Regional Studies*, 53(9), 1252-1268.

Balland, P.-A., Jara-Figueroa, C., Petralia, S. G., Steijn, M. P., Rigby, D. L. & Hidalgo, C. A. (2020). Complex economic activities concentrate in large cities. *Nature Human Behaviour*, 4(3), 248-254.

Balland, P.-A. & Rigby, D. (2017). The geography of complex knowledge. *Economic Geography*, 93(1), 1-23.

Bianchi, C., Galaso, P. & Palomeque, S. (2021). Patent Collaboration Networks in Latin America: Extra-regional Orientation and Core-Periphery Structure. *Journal of Scientometric Research*, 10(1s), s59-s70.

Bianchi, C., Galaso, P. & Palomeque, S. (2023). Absorptive capacities and external openness in underdeveloped innovation systems: a patent network analysis for Latin American countries 1970-2017. *Cambridge Journal of Economics*, 47(6), 1139-1170.

- 68 Boschma, R., Miguelez, E., Moreno, R. & Ocampo-Corralles, D. B. (2023). The role of relatedness and unrelatedness for the geography of technological breakthroughs in europe. *Economic Geography*, 99(2), 117-139.
- Brooks, M. (2023). Quantum computers: What are they good for? *Nature*, 617(7962), S1-S3.

Gill, S. S., Kumar, A., Singh, H., Singh, M., Kaur, K., Usman, M. & Buyya, R. (2022). Quantum computing: A taxonomy, systematic review and future directions. *Software: Practice and Experience*, 52(1), 66-114.

Hartmann, D., Guevara, M. R., Jara-Figueroa, C., Aristrán, M. & Hidalgo, C. A. (2017). Linking economic complexity, institutions, and income inequality. *World Development*, 93, 75-93.

Hernández-Rodríguez, E., Boschma, R., Morrison, A. & Ye, X. (2025). The role of complementary interregional linkages for functional upgrading and downgrading of global value chains in eu regions. *Industry and Innovation*, 1-35.

Hidalgo, C. A., Balland, P.-A., Boschma, R., Delgado, M., Feldman, M., Frenken, K., Glaeser, E., He, C., Kogler, D. F. & Morrison, A. *et al.* (2018). The principle of relatedness. In *International conference on complex systems*, 451-457. Springer.

Hidalgo, C. A. & Hausmann, R. (2009). The building blocks of economic complexity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(26), 10570-10575.

Hidalgo, C. A., Klinger, B., Barabási, A.-L. & Hausmann, R. (2007). The product space conditions the development of nations. *Science*, 317(5837), 482-487.

Knill, E. (2010). Quantum computing. *Nature*, 463(7280), 441-443.

Ladd, T. D., Jelezko, F., Laflamme, R., Nakamura, Y., Monroe, C. & O'Brien, J. L. (2010). Quantum computers. *Nature*, 464(7285), 45-53.

Moscattelli, F., Chacua, C., Matha, S. G., Hartog, M., Hernandez Rodriguez, E., Raffo, J. D. & Yil-dirim, M. A. (2024). Can we map innovation capabilities? *World Intellectual Property Organization (WIPO) Economic Research Working Paper Series*, (81).

Nobel Prize Outreach (2025). The Nobel Prize in Physics 2025.

Perez, C. (2010). Technological revolutions and techno-economic paradigms. *Cambridge Journal of Economics*, 34(1), 185-202.

Perez, C. & Soete, L. (1988). Catching up in technology: entry barriers and windows of opportunity. En G. Dosi, C. Freeman, R. Nelson, G. Silverberg & L. Soete (Eds.), *Technical change and economic theory* (458-479). Pinter.

Pinheiro, F. L., Hartmann, D., Boschma, R. & Hidalgo, C. A. (2022). The time and frequency of unrelated diversification. *Research Policy*, 51(8), 104323.

Rietsche, R., Dremel, C., Bosch, S., Steinacker, L., Meckel, M. & Leimeister, J.-M. (2022). Quantum computing. *Electronic Markets*, 32(4), 2525-2536.

Stojkoski, V., Koch, P. & Hidalgo, C. A. (2023). Multidimensional economic complexity and inclusive green growth. *Communications Earth & Environment*, 4(1), 130.

Yoguel, G. & Robert, V. (2010). Capacities, Processes, and Feedbacks: The Complex Dynamics of Development. *Seoul Journal of Economics*, 23(2), 187-237.

2.4. COMPUTACIÓN CUÁNTICA: DESBLOQUEANDO UNA NUEVA FRONTERA COMPUTACIONAL

ALEJANDRO ZUNINO *

INTRODUCCIÓN: MÁS ALLÁ DEL BIT

Desde su concepción, la computación digital se ha fundamentado en el *bit*, la unidad de información más básica, que puede existir en uno de dos estados definidos: 0 o 1. Toda la información que procesamos hoy en día, desde este texto hasta los complejos modelos climáticos, se reduce a enormes secuencias de estos simples interruptores binarios.

La computación cuántica, sin embargo, opera en un dominio completamente diferente: el mundo subatómico de la mecánica cuántica. En esta escala, las reglas de la física clásica se desvanecen y son reemplazadas por fenómenos contraintuitivos. La unidad fundamental de la computación cuántica es el *qubit* (del inglés *quantum bit*). A diferencia de un *bit*, un *qubit* no está limitado a los estados 0 o 1. Gracias al principio de superposición, un *qubit* puede ser 0, 1, o una combinación de ambos estados simultáneamente.

Para visualizarlo, imaginemos una moneda. Un *bit* clásico es como una moneda sobre una mesa: o es cara (1) o es cruz (0). Un *qubit* es como esa misma moneda mientras gira en el aire: hasta que no la medimos (la atrapamos), existe en una superposición de ambos estados. Esta capacidad de mantener múltiples valores a la vez es lo que otorga a las computadoras cuánticas su enorme potencial de procesamiento paralelo.

Además, los *qubits* pueden exhibir un fenómeno llamado entrelazamiento cuántico (*quantum entanglement*). Cuando dos o más *qubits* están entrelazados, sus des-

tinios quedan inextricablemente unidos, sin importar la distancia que los separe. Si medimos el estado de un *qubit*, conocemos instantáneamente el estado del otro, una propiedad que Albert Einstein describió como “acción fantasmal a distancia”. Esta interconexión permite crear correlaciones complejas y potentes que son imposibles en sistemas clásicos.

1. AVANCES RECIENTES Y EL ESTADO ACTUAL

La construcción y operación de computadoras cuánticas es un desafío monumental, principalmente debido a la fragilidad de los estados cuánticos, un fenómeno conocido como “decoherencia”. La más mínima perturbación ambiental (vibraciones, cambios de temperatura) puede destruir la superposición y el entrelazamiento, generando errores en el cálculo.

A pesar de ello, los avances en los últimos años han sido extraordinarios. Hemos pasado de experimentos con un puñado de *qubits* a máquinas que integran cientos de ellos. Gigantes tecnológicos como Google, IBM, Microsoft y diversas *startups* han desarrollado procesadores cuánticos basados en distintas tecnologías, como los circuitos superconductores y las trampas de iones.

Un hito importante fue alcanzado en 2019, cuando Google afirmó haber logrado la supremacía cuántica con su procesador Sycamore (Arute *et al.*, 2019). Demostraron que su máquina podía realizar en 200 segundos una tarea de muestreo de nú-

* ISISTAN (UNCPBA - CONICET), Argentina.

meros aleatorios que, según sus estimaciones, le tomaría a la supercomputadora clásica más avanzada unos 10.000 años. Aunque este problema específico no tiene una aplicación práctica inmediata, sirvió como una prueba de principio fundamental: las computadoras cuánticas pueden, de hecho, superar a las clásicas en ciertas tareas. Actualmente, nos encontramos en la era NISQ (*noisy intermediate-scale quantum*), caracterizada por computadoras cuánticas de escala intermedia y aún propensas a errores, pero ya lo suficientemente potentes para empezar a explorar problemas reales (Preskill, 2018).

2. APLICACIONES Y POTENCIAL IMPACTO

El verdadero poder de la computación cuántica no reside en reemplazar a las computadoras clásicas para tareas cotidianas como navegar por Internet o enviar correos, sino en abordar una clase específica de problemas computacionalmente intratables.

2.1. Inteligencia artificial y optimización

Muchos de los problemas más difíciles en inteligencia artificial (IA), especialmente en el campo del *machine learning*, son en esencia problemas de optimización: encontrar la mejor solución posible entre un número astronómico de opciones. Los algoritmos cuánticos, como el *quantum approximate optimization algorithm* (QAOA), son inherentemente buenos para explorar vastos espacios de soluciones simultáneamente. Esto podría acelerar drásticamente el entrenamiento de modelos de IA, resolver problemas logísticos complejos (como la optimización de rutas de transporte) y mejorar el reconocimiento de patrones (Biamonte *et al.*, 2017).

2.2. Seguridad informática

La computación cuántica presenta una doble cara para la seguridad. Por un lado, supone una amenaza existencial para la criptografía actual. Gran parte de la seguridad de internet se basa en algoritmos como RSA, cuya fortaleza radica en la dificultad de factorizar números grandes. En 1994, Peter Shor desarrolló un algoritmo cuántico que puede realizar esta factorización de manera eficiente (Shor, 1997). Una computadora cuántica a gran escala y tolerante a fallos podría, en teoría, romper la mayoría de los sistemas de encriptación que protegen nuestras comunicaciones y transacciones financieras.

Por otro lado, la misma mecánica cuántica ofrece la solución. La distribución de claves cuánticas (*quantum key distribution*, QKD) utiliza los principios cuánticos para crear canales de comunicación teóricamente inviolables. Además, la comunidad criptográfica está desarrollando activamente la criptografía poscuántica (*post-quantum cryptography*, PQC), que consiste en nuevos algoritmos de encriptación (clásicos) diseñados para ser resistentes a ataques tanto de computadoras clásicas como cuánticas (Bernstein & Lange, 2017).

2.3. Simulación cuántica para ciencia y medicina

Quizás la aplicación más natural y de corto plazo de la computación cuántica es la simulación de sistemas cuánticos.

La naturaleza es cuántica, y simular el comportamiento de moléculas y materiales a este nivel es extremadamente difícil para las computadoras clásicas.

Las computadoras cuánticas son la herramienta perfecta para esta tarea. Podrían simular con precisión las interacciones moleculares para diseñar nuevos fármacos y tratamientos médicos de forma mucho más rápida y eficiente. En la ciencia de materiales, permitirían diseñar nuevos compuestos con propiedades deseadas, como superconductores a temperatura ambiente, baterías más eficientes o catalizadores que ayuden a combatir el cambio climático (Cao *et al.*, 2019).

CONCLUSIÓN

La computación cuántica está todavía en su infancia, y los desafíos para construir máquinas a gran escala y tolerantes a errores son inmensos. Sin embargo, la promesa de esta tecnología es innegable. No es una simple evolución de la computación clásica, sino una revolución que nos proporcionará una nueva lente para observar y manipular el universo a su nivel más fundamental. A medida que superemos los obstáculos técnicos, la computación cuántica desbloqueará capacidades que hoy apenas podemos imaginar, redefiniendo industrias enteras y expandiendo las fronteras del conocimiento humano.

BIBLIOGRAFÍA

- Arute, F., Arya, K., Babbush, R., Bacon, D., Bardin, J. C., Barends, R., Martinis, J. M. *et al.* (2019). Quantum supremacy using a programmable superconducting processor. *Nature*, 574(7779), 505-510. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1666-5>.
- Bernstein, D. J. & Lange, T. (2017). Post-quantum cryptography. *Nature*, 549(7671), 188-194. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature23461>.
- Biamonte, J., Wittek, P., Pancotti, N., Rebentrost, P., Wiebe, N. & Lloyd, S. (2017). Quantum machine learning. *Nature*, 549(7671), 195-202. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature23474>.
- Cao, Y., Romero, J., Olson, J. P., Degroote, M., Johnson, P. D., Kieferová, M., Aspuru-Guzik, A. *et al.* (2019). Quantum chemistry in the age of quantum computing. *Chemical Reviews*, 119(19), 10856-10915. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.8b00803>.
- Preskill, J. (2018). Quantum computing in the NISQ era and beyond. *Quantum*, 2, 79. DOI: <https://doi.org/10.22331/q-2018-08-06-79>.
- Shor, P. W. (1997). Polynomial-time algorithms for prime factorization and discrete logarithms on a quantum computer. *SIAM Journal on Computing*, 26(5), 1484-1509. DOI: <https://doi.org/10.1137/s0097539795293172>.

2.5. CHILE EN LA ERA CUÁNTICA: AVANCES, DESAFÍOS Y ESTRATEGIA NACIONAL

DIVISIÓN DE TECNOLOGÍAS EMERGENTES MINISTERIO DE CIENCIA, TECNOLOGÍA, CONOCIMIENTO E INNOVACIÓN DE CHILE

INTRODUCCIÓN

La revolución cuántica dejó hace tiempo de ser un concepto reservado a la física fundamental. Hoy, la computación cuántica se perfila como un vector transformador que puede redefinir industrias, servicios y hasta la forma en que organizamos la vida en sociedad. En este escenario global, Chile ha comenzado a trazar su propio camino. Desde la academia y la investigación aplicada hasta la innovación tecnológica y la formulación de políticas públicas, el país está construyendo un ecosistema que combina ciencia de frontera con un enfoque pragmático en torno a los desafíos productivos, sociales y estratégicos.

Este artículo busca mostrar cómo se ha ido conformando este ecosistema a través de iniciativas concretas que ilustran la diversidad de actores y enfoques involucrados. Universidades, centros de investigación, organismos públicos e incluso la Armada de Chile han abierto rutas para la incorporación de tecnologías cuánticas en ámbitos como la minería, la salud, las telecomunicaciones, la logística y la seguridad. Estos avances se encuentran hoy articulados por un esfuerzo mayor: la construcción de la Estrategia Nacional de Tecnologías Cuánticas, un instrumento de política pública que se plantea como hoja de ruta a diez años para orientar el desarrollo nacional en este campo.

UNIVERSIDADES EN LA AGENDA CUÁNTICA NACIONAL

Un aspecto central del despliegue chileno ha sido la creciente incorporación de universidades al debate y la experimentación en torno a las tecnologías cuánticas. La Sema-

na de las Tecnologías Cuánticas 2025, organizada por el Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación, se transformó en un hito de articulación. Durante tres días, instituciones como la Universidad de Concepción, la Universidad Técnica Federico Santa María, la Universidad de Santiago, la Universidad de Chile, la Pontificia Universidad Católica de Chile, la Universidad Mayor, la Universidad Diego Portales y la Universidad Adolfo Ibáñez participaron en charlas, talleres y actividades abiertas al público, abordando temas que van desde baterías cuánticas hasta los fundamentos de la criptografía poscuántica. Esta diversidad de aportes refleja cómo la agenda ministerial ha logrado movilizar a la academia en torno a un objetivo común: preparar al país para una transición tecnológica que será determinante en las próximas décadas. Además, muchas de estas universidades forman parte de la mesa de expertos que actualmente asesora al ministerio en la elaboración de la Estrategia Nacional de Tecnologías Cuánticas, aportando su experiencia en investigación, docencia y transferencia para dar sustento académico y técnico al proceso.

CASOS DE ÉXITO: PIONERISMO EDUCATIVO Y ENLACES CON LA INDUSTRIA

Entre los actores que más tempranamente apostaron por la cuántica en Chile destaca la Universidad Adolfo Ibáñez (UAI). Su trayectoria ha estado marcada por un enfoque pionero que combinó educación, vinculación social y proyección internacional. Entre 2017 y 2019, la UAI lideró -junto a la Universidad Técnica Federico Santa María y en alianza con IBM la iniciativa *#ChileCuántico*- la primera experiencia educativa de computación cuántica en América Latina. Lo que comenzó como cursos teórico-prácticos

para estudiantes universitarios y profesionales pronto se expandió a la educación secundaria, llegando incluso a un colegio en La Pintana. La idea era clara: democratizar el acceso a un conocimiento que, hasta entonces, parecía reservado a pocos.

El impulso inicial cristalizó en 2019 con la creación del primer curso formal de computación cuántica en la región, el programa ING426-QC, que integraba fundamentos teóricos con programación práctica en plataformas de IBM Quantum. Esta institucionalización marcó un antes y un después: Chile no solo experimentaba con talleres aislados, sino que comenzaba a formar capacidades sistemáticas en un área de frontera.

El trabajo de la UAI trascendió, además, las fronteras nacionales. Profesores y profesoras de la universidad participaron en foros internacionales como el Science Technology in Society Forum en Japón, donde compartieron panel con figuras como Klaus von Klitzing, ganador del Premio Nobel, o en cumbres como el Women in Quantum Summit y el IBM Quantum Summit Latinoamérica 2025 en Río de Janeiro. Estas instancias no solo proyectaron a la UAI como referente, sino que también visibilizaron a Chile como un país que no se limita a observar la carrera cuántica, sino que se integra activamente a ella.

En conjunto, la trayectoria de la UAI ilustra cómo la educación y la internacionalización pueden convertirse en motores de un ecosistema naciente. Al acercar la cuántica a estudiantes, territorios y foros globales, la universidad ha contribuido a posicionar a Chile como pionero en la formación de capacidades humanas en la región.

Si la UAI abrió camino en educación, la Universidad Católica del Norte (UCN) se ha destacado por vincular la cuántica con la economía real, en particular con la minería y la sostenibilidad. En Antofagasta, la región que concentra la producción cuprífera del país, la UCN ha consolidado un polo de investigación donde técnicas de *quantum machine learning* se aplican a problemas como la planificación minera bajo incertidumbre o el análisis de datos geoquímicos. Estudiantes de magíster y doctorado han incorporado estas metodologías en sus proyectos, y los resultados han comenzado a trascender a foros internacionales, con presentaciones en conferencias especializadas como APCOM 2025 en Australia.

La universidad ha fortalecido este trabajo con infraestructura y redes. Su centro de supercómputo (HPC-UCN), asociado al Laboratorio Nacional de Computación de Alto Rendimiento (NLHPC), ha servido de plataforma para experimentar con algoritmos cuánticos y simulaciones híbridas, mientras que el proyecto CIARA, financiado por el Gobierno Regional de Antofagasta, busca consolidar un polo regional con equipamiento y formación avanzada en tecnologías cuánticas.

A ello se suma una línea en ingeniería de *software* cuántico, liderada por investigadores como Daniel San Martín, que explora buenas prácticas de diseño, análisis estático y herramientas de DevOps adaptadas a entornos NISQ. Este

trabajo se inserta además en la Red Iberoamericana para el Avance de la Ingeniería de Software Cuántico (RIPAISC) y en colaboraciones con empresas tecnológicas, ampliando el alcance de la UCN más allá de la minería.

En conjunto, estos esfuerzos posicionan a la UCN como un actor relevante para descentralizar el ecosistema cuántico chileno y vincular la investigación de frontera con sectores estratégicos para el país.

LA ARMADA DE CHILE: APLICACIONES DUALES CON IMPACTO CIVIL

El ecosistema cuántico chileno no se limita al mundo académico. Un actor inesperado, la Armada de Chile, ha impulsado investigaciones que muestran cómo la cuántica puede aplicarse tanto en defensa como en ámbitos civiles. Sus proyectos en colaboración con la Universidad de Waterloo en Canadá se han centrado en el uso de redes híbridas cuántico-clásicas (HQNN) aplicadas a radares. Estos experimentos han permitido avanzar en la detección de drones, el monitoreo de ocupación en interiores y el conteo de personas en condiciones de bajo nivel de señal, superando incluso a modelos tradicionales de inteligencia artificial en entornos complejos.

Pero lo más interesante es cómo estas capacidades se proyectan hacia la sociedad. La misma tecnología que permite a un radar detectar drones puede adaptarse para monitorear flujos hospitalarios de manera no intrusiva, reforzar la seguridad en telecomunicaciones mediante criptografía poscuántica, mejorar la resiliencia de la infraestructura energética a través de sensores de precisión o apoyar operaciones de búsqueda y rescate en contextos donde los sistemas de navegación satelital fallan.

La Armada demuestra, así, que la cuántica puede ser un recurso estratégico con impacto transversal. Su trabajo ilustra cómo la investigación aplicada puede alimentar tanto la defensa nacional como la innovación tecnológica y la seguridad ciudadana, integrando a Chile en la frontera del conocimiento con un enfoque dual que otros países de la región aún no han explorado.

LA ESTRATEGIA NACIONAL DE TECNOLOGÍAS CUÁNTICAS

El paso más decisivo que ha dado Chile es la elaboración de su Estrategia Nacional de Tecnologías Cuánticas 2025–2035, actualmente en proceso de consulta pública redacción final. Uno de sus rasgos más innovadores es el carácter participativo. La estrategia se está construyendo a través de mesas de expertos en computación, comunicación y metrología, pero también mediante una consulta ciudadana abierta, que permite que investigadores, empresas, organizaciones sociales y personas interesadas aporten su visión. Esta gobernanza anticipatoria refleja la madurez institucional del país en materia de tecnologías emergentes, reconociendo que la cuántica no es solo un desafío científico, sino también ético, económico y social.

La importancia de esta estrategia es múltiple. Permite vincular la cuántica con sectores productivos estratégicos como minería, energía, logística y salud, establece un objetivo de soberanía tecnológica frente a riesgos de dependencia crítica, y fomenta la descentralización territorial al crear polos de desarrollo en regiones como Concepción. Además, proyecta a Chile como un actor activo en la cooperación internacional, capaz de dialogar de igual a igual con países como Canadá, Estados Unidos o miembros de la Unión Europea, y de impulsar colaboraciones regionales en América Latina.

En conjunto, lo que está ocurriendo en Chile en torno a la computación cuántica constituye una base sólida y en expansión dentro del país. El uso temprano e intensivo de *hardware* IBM por parte de la UAI abrió un camino educativo que acercó esta tecnología a nuevas generaciones; la UCN ha llevado los algoritmos híbridos al corazón de la minería, explorando además la ingeniería de *software* cuántico como disciplina emergente; y la Armada de Chile ha demostrado la viabilidad de redes HQNN aplicadas a radares en condiciones reales. A ello se suma la presencia en foros técnicos internacionales como APCOM, MAPCON e IBM Quantum Summit, que ha dado visibilidad global al ecosistema chileno. Estos hitos muestran que el país no solo observa la carrera cuántica, sino que ya experimenta con *hardware*, algoritmos y aplicaciones concretas, fortaleciendo la necesidad y la pertinencia de contar con una estrategia nacional de tecnologías cuánticas que articule y potencie estos esfuerzos de manera coordinada hacia el futuro.

El camino hacia 2035 será decisivo. Si Chile logra consolidar un plan de acción robusto apoyado en capacidades académicas, industriales y ciudadanas, podrá posicionarse como referente latinoamericano en la revolución cuántica que marcará la ciencia y la tecnología durante el presente siglo.

2.6. COMPUTACIÓN CUÁNTICA EN EL BARCELONA SUPERCOMPUTING CENTER

ALBA CERVERA LIERTA *

La computación de alto rendimiento (HPC) continúa evolucionando, pero los límites fundamentales de la computación tradicional se están acercando. En este contexto, la computación cuántica se presenta como una alternativa prometedora, diseñada para ofrecer soluciones más eficaces en ciertos problemas computacionales complejos. Aunque aún se encuentra en una etapa temprana de desarrollo, esta tecnología sigue su progreso y ya ha dado el salto a su era operacional. Centros de supercomputación están empezando a instalar estos dispositivos y a ofrecer sus servicios de forma pública.

COMPUTACIÓN CUÁNTICA: QUÉ ES Y PARA QUÉ SIRVE

La información en los sistemas clásicos se representa mediante el código binario, utilizando los *bits*, que adoptan los valores definidos de “0” o “1”. En contraste, la computación cuántica utiliza unidades llamadas *qubits* (*bits* cuánticos), que poseen propiedades únicas derivadas de las leyes de la mecánica cuántica. Estas propiedades permiten que los *qubits* puedan adoptar estados intermedios entre el 0 y el 1, la llamada superposición cuántica. Sin profundizar en su definición, es importante señalar que estas propiedades permiten abordar ciertos problemas matemáticos complejos de forma más eficiente que con los métodos tradicionales.

La idea original de la computación cuántica surgió como una solución para simular de manera más eficiente los

sistemas cuánticos. Replicar la física del mundo cuántico en ordenadores clásicos suele implicar un coste computacional exponencial. Esto llevó, en la década de 1980, a plantear el desarrollo de computadoras que funcionaran bajo las mismas reglas que los sistemas cuánticos, para así evitar ese coste computacional en las simulaciones. Entender y simular mejor el mundo cuántico tiene importantes aplicaciones en campos como la química o la ciencia de materiales.

Además, existen ciertos problemas matemáticos considerados intratables para la computación clásica que teóricamente podrían resolverse con mayor eficiencia mediante algoritmos cuánticos. Un ejemplo emblemático es el algoritmo de Shor, que permite factorizar números enteros de forma más eficiente que cualquier método clásico conocido. Esta capacidad pone en riesgo la seguridad de los sistemas criptográficos actuales. Si llegase a desarrollarse un ordenador cuántico lo suficientemente potente, sería capaz de romper la mayoría de los esquemas de cifrado existentes, tanto pasados como presentes. Aunque se requiere de ordenadores cuánticos mucho más potentes de los que tenemos hoy en día, ya se están diseñando sistemas criptográficos resistentes a la computación cuántica, conocidos como criptografía poscuántica. Paralelamente, se investiga una solución más a largo plazo y segura: la criptografía cuántica.

Por último, también se están explorando otras áreas prometedoras de aplicación, como la inteligencia artificial cuántica

* Investigadora *senior* en el Barcelona Supercomputing Center – Centro Nacional de Supercomputación (BSC-CNS).

y la optimización de problemas complejos. En muchos de estos casos, aunque aún no se ha demostrado formalmente una ventaja cuántica, los resultados se comparan empíricamente con los obtenidos por algoritmos clásicos, mostrando potenciales mejoras en determinadas situaciones.

QUÉ TIPOS DE ORDENADORES CUÁNTICOS EXISTEN

Un computador cuántico se estructura en tres componentes fundamentales. En primer lugar, está la unidad de procesamiento cuántico (QPU), que constituye el núcleo del *hardware* cuántico y contiene los *qubits*. En segundo lugar, se encuentra el sistema de control de la QPU, compuesto por elementos como electrónica de alta velocidad, dispositivos fotónicos y generadores de señales. Finalmente, el tercer componente es el *software*, que permite enviar instrucciones a la QPU a través del sistema de control.

La programación de estos dispositivos se realiza desde un ordenador clásico, utilizando librerías de *software* que traducen comandos abstractos como puertas lógicas cuánticas y circuitos cuánticos en operaciones físicas concretas. Al finalizar la ejecución, el sistema devuelve señales que representan las mediciones de los *qubits*, las cuales se procesan posteriormente para obtener los resultados finales. Estas librerías están programadas mayoritariamente en Python, lo que facilita la integración de estas con otras librerías de aplicaciones diversas.

A diferencia de los ordenadores tradicionales, que se basan principalmente en la tecnología de semiconductores, los ordenadores cuánticos pueden fabricarse con diferentes plataformas. Entre estas se incluyen los circuitos superconductores (merecedores del reciente Premio Nobel de Física 2025), la óptica cuántica (fotónica), los átomos neutros, los iones atrapados y los puntos cuánticos, entre otros. Actualmente, no existe consenso sobre cuál de estas tecnologías será la más adecuada a largo plazo, lo que ha motivado a múltiples empresas y centros de investigación a explorar diferentes alternativas de forma simultánea.

Un aspecto común a todos estos sistemas es que, por el momento, no son resistentes a errores. Esto significa que durante la ejecución de algoritmos cuánticos pueden generarse fallos que deben corregirse con códigos de corrección de errores cuánticos. Para ello, se requiere de muchos *qubits* físicos de muy buena calidad para poder representar y corregir cada *qubit* lógico tolerante a fallos. Este requisito es difícil de implementar, dado que la escalabilidad de estos sistemas no está todavía resuelta en ninguna de las tecnologías. Aun así, empezamos a adentrarnos en esta era, y cada vez hay más estudios experimentales que demuestran que es posible y lo mejoran año a año.

Estas limitaciones restringen las aplicaciones prácticas actuales de la computación cuántica, pero también abren un amplio campo para la investigación y la innovación. A

pesar de estos obstáculos, el avance tecnológico ha sido notable: en menos de una década se ha pasado de prototipos con apenas cinco *qubits* a sistemas que ya superan los 1000, lo que demuestra el rápido progreso en esta área emergente. También ha permitido el desarrollo de algoritmos cuánticos NISQ (*noisy intermediate-scale quantum*), que precisamente utilizan computación tradicional para asistir a la ejecución en el ordenador cuántico para poder mitigar sus posibles errores.

DESPLIEGUE TECNOLÓGICO

En este contexto, de mejora continua de los ordenadores cuánticos y la búsqueda de sus aplicaciones potenciales, es imprescindible que universidades, centros de investigación, empresas y gobiernos colaboren estrechamente. Por un lado, la tecnología se desarrolla y mejora en las universidades y laboratorios privados. Por otro, se requiere de un tejido industrial sólido en el campo de las tecnologías cuánticas, para que los prototipos que se generan puedan escalarse y convertirse en un ordenador cuántico operacional. Por último, es esencial que la computación cuántica se vuelva accesible para un público más amplio, tal como ha sucedido con otras tecnologías disruptivas a lo largo de la historia. Hasta ahora, el acceso a los primeros ordenadores cuánticos a través de la nube ha estado mayormente en manos de grandes corporaciones tecnológicas que lideran su desarrollo, como IBM o Google, así como de *startups* emergentes vinculadas a los pioneros en investigación cuántica, como Rigetti o IonQ. Este acceso se ha vuelto cada vez más restrictivo para la investigación, pues está limitado a aquellos colaboradores estrechos de estas empresas o bien hay que pagar por el uso de los ordenadores cuánticos más sofisticados.

En la actualidad, plataformas como Amazon Braket o Microsoft Azure ofrecen servicios de computación cuántica bajo un modelo de pago por uso. Sin embargo, a medida que crece el interés por parte de la comunidad científica y del sector empresarial, se vuelve cada vez más urgente garantizar un acceso más amplio y equitativo a estas tecnologías, especialmente para fines de investigación y desarrollo.

Es importante recordar que la computación cuántica aún se encuentra en una etapa inicial de evolución. Para que su potencial se materialice, es necesario que investigadores, ingenieros y desarrolladores de diferentes ámbitos puedan experimentar, probar y contribuir a su avance. En este sentido, los centros de supercomputación representan un entorno ideal para alojar ordenadores cuánticos, al igual que lo han sido tradicionalmente para la computación de alto rendimiento.

Integrar recursos cuánticos en estas infraestructuras públicas no solo permitiría democratizar su uso, sino también fomentar la colaboración interdisciplinaria, acelerar el progreso científico y facilitar la formación de talento especializado. Así, se estaría sentando una base sólida para que la computación cuántica se desarrolle como una herramienta tecnológica accesible, útil y transformadora para la sociedad en su conjunto.

SERVICIOS PÚBLICOS DE COMPUTACIÓN CUÁNTICA EN ESPAÑA

En España contamos con proyectos como Quantum Spain, impulsado por la Secretaría de Estado de Digitalización y Inteligencia Artificial y financiado con los fondos NextGeneration de la Unión Europea. Este proyecto ha permitido la instalación de un ordenador cuántico desarrollado íntegramente con tecnología europea, lo que representa un hito clave en la estrategia de soberanía tecnológica que impulsa la Unión Europea. En particular, las compañías responsables del diseño y fabricación de este sistema son españolas, Qilimanjaro Quantum Tech y GMV. El objetivo principal de este proyecto es ofrecer el acceso a este ordenador cuántico de forma pública y gratuita a través de la Red Española de Supercomputación (RES). Este acceso se ofrece de un modo competitivo; es decir, los investigadores interesados deben presentar un proyecto científico que es luego evaluado por un comité de expertos. Esto permite que grupos de investigación y entidades interesadas puedan experimentar con esta tecnología emergente y garantiza el buen uso de la financiación pública que reciben proyectos como este.

Figura 1. MareNostrum5 Ona, la partición cuántica del superordenador MareNostrum5, instalado en el BSC-CNS



Fuente: Mario Ejarque (BSC-CNS).

Quantum Spain va más allá del acceso a computadores cuánticos. En este proyecto, coordinador por el Barcelona Supercomputing Center - Centro Nacional de Supercomputación (BSC-CNS), participan 27 instituciones de investigación españolas, los grandes expertos en algoritmos cuánticos del país. Se desarrollan también aplicaciones de la computación cuántica y se forma a toda una generación de investigadores en este campo. El proyecto tiene una financiación de 22 millones de euros y una duración de unos cuatro años (finaliza a principios de 2026). Por último, también se impulsa la formación en el ámbito de la computación cuántica. El programa TalentQ coordina muchas iniciativas desde congresos, seminarios, premios de tesis, concurso de infografías, etc. El objetivo es acercar esta tecnología a toda la sociedad.

A nivel europeo, la Unión Europea ha decidido fortalecer la iniciativa EuroHPC-Joint Undertaking, con el objetivo de incorporar ordenadores cuánticos en las infraestructuras de supercomputación de su red. Uno de los primeros centros seleccionados para esta misión es el BSC-CNS,

donde vamos a albergar un segundo ordenador cuántico, complementario al de Quantum Spain. Como se ha mencionado anteriormente, hay varias formas de fabricar ordenadores cuánticos. Europa quiere que se desarrollen todas las tecnologías posibles en sus estados miembros y que a la vez los usuarios puedan experimentar con todas ellas. Por ello, los ordenadores cuánticos de EuroHPC cuentan con características distintas. Todos ellos serán accesibles de forma pública y competitiva, como lo son ya los superordenadores de esta red.

En resumen, los centros de supercomputación se postulan como un sitio natural en el que albergar y dar servicio de una tecnología como la computación cuántica. Todo ello es posible gracias a la existencia de empresas especializadas que pueden hacer la fabricación e instalación de estos dispositivos y de un sólido tejido de investigación básica que los mejora día a día. Este tipo de iniciativas no solo refuerza la posición de Europa en el desarrollo de la computación cuántica, sino que también asegura que el conocimiento y la infraestructura asociados a esta revolución tecnológica queden en manos locales, promoviendo una economía del conocimiento más resiliente, autónoma y alineada con los valores europeos de accesibilidad y cooperación científica.

2.7. EL AMANECER DE LA VENTAJA CUÁNTICA

ZAIRA NAZARIO *

La Organización de las Naciones Unidas (ONU) declaró el 2025 como Año Internacional de la Ciencia y la Tecnología Cuánticas. Como proveedor líder de computación cuántica, la empresa tecnológica IBM está entusiasmada por mostrar cómo, junto con nuestros socios, está haciendo de la computación cuántica una tecnología útil al mundo. El Año Internacional de la Ciencia y la Tecnología Cuánticas celebra un siglo de tremendo progreso en la comprensión y el uso de la mecánica cuántica. Su objetivo es “concienciar al público sobre la importancia y el impacto de la ciencia cuántica y sus aplicaciones en todos los aspectos de la vida”, según la UNESCO. Desde el inicio de este campo, el mundo ha sido testigo de sucesivas revoluciones cuánticas: ahora podemos aprovechar la mecánica cuántica en tecnologías que van desde láseres hasta máquinas de resonancia magnética, paneles solares y computadoras cuánticas.

Esas computadoras cuánticas son la última y quizás más significativa revolución cuántica. Ahora podemos utilizar la mecánica cuántica para descubrir nuevos métodos matemáticos para resolver problemas en la ciencia de los materiales, el desarrollo de medicamentos y acelerar el descubrimiento científico en general. Desbloquear estas soluciones podría contribuir a que las personas sean más saludables, el planeta más seguro, las economías más eficientes, y generar miles de millones de dólares en valor comercial. Como líder que contribuye a esta evolución, IBM desea aprovechar el Año Internacional de la Ciencia y la Tecnología Cuánticas como una oportunidad para ayudar a construir una comunidad cuántica global capaz de emplear esta tecnología.

DE LA TEORÍA A LA REALIDAD Y A LA VENTAJA

La computación cuántica es un nuevo paradigma informático, donde usamos los postulados de la mecánica cuántica para procesar información. IBM jugó un papel central en la historia de la computación cuántica. En 1981, en conjunto con el Massachusetts Institute of Technology (MIT), investigadores de IBM organizaron la Conferencia de Física de la Computación, donde el famoso físico Richard Feynman propuso por primera vez un simulador mecánico cuántico de la naturaleza.

La experiencia de IBM sustenta muchos avances fundamentales en ciencia de la información cuántica, criptografía y *hardware* de computación cuántica. Los investigadores de IBM fueron los primeros en implementar el algoritmo de factorización de Shor para factorizar el número 15, e IBM fue la primera empresa en poner una computadora cuántica a disposición del público en 2016. Hoy en día, IBM ofrece la flota más grande y potente de computadoras cuánticas. Todo accesible a través de la nube, alimentado por procesadores con más de 100 *qubits* capaces de ejecutar rutinas con más de 5000 puertas de dos *qubits*: esta es una escala que va más allá de la capacidad de la computación clásica de fuerza bruta por sí sola.

Esta década marca un punto de inflexión importante en la historia de la cuántica. Por primera vez, las computadoras cuánticas han demostrado la capacidad de ejecutar cálculos más allá de los límites de la computación clásica de

79

* Directora de Matemáticas de la Computación en IBM Research.

fuerza bruta (es decir, donde las computadoras clásicas intentan simular exactamente una computadora cuántica), un hito llamado “utilidad cuántica”. Estamos a punto de lograr otro hito importante: la ventaja cuántica, que ocurrirá cuando una computadora cuántica pueda ejecutar un cálculo con mayor precisión, de manera más económica y eficiente que una computadora clásica. Predecimos que entre ahora y finales de 2026 la comunidad cuántica habrá descubierto las primeras ventajas cuánticas.

Seguimos impulsando nuestro *hardware* según nuestro plan de desarrollo, con el objetivo de trazar la próxima frontera en la computación cuántica. En 2029 lanzaremos IBM Quantum Starling, una computadora cuántica a gran escala y resistente a errores que se espera que realice 20.000 veces más operaciones que las computadoras cuánticas actuales. Mantenemos Qiskit, el SDK cuántico de mayor desempeño, y la IBM Quantum Network, una comunidad de más de 300 miembros de la industria, academia e investigación que trabajan para avanzar en el campo de la cuántica.

DESARROLLANDO EL ECOSISTEMA CUÁNTICO

Con todo este progreso, IBM también se centra en crear educación sobre cuántica, cadenas de suministro y oportunidades profesionales, impulsando aún más la misión del Año Internacional de la Ciencia y la Tecnología Cuánticas. Las carreras en este campo tienen un enorme potencial de ser gratificantes, bien remuneradas, y de generar un impacto real en el planeta. Sin embargo, hoy en día todavía estamos rezagados en la preparación del talento necesario para aprovechar al máximo la próxima revolución cuántica.

A lo largo del año, incluimos nuevos cursos en las plataformas IBM Quantum Learning¹ e IBM SkillsBuild.² La educación en estas plataformas apoya a los nuevos estudiantes que buscan comprender la computación cuántica y a aquellos que buscan desarrollar habilidades cuánticas y obtener certificaciones digitales. Al mismo tiempo, estamos trabajando para dar acceso a la tecnología a la mayor cantidad posible de usuarios para ejecutar operaciones grandes y complejas a la escala en la que esperamos que aparezcan las primeras ventajas cuánticas.

En América Latina hay mucho más que esperar: desde su lanzamiento en 2023, la plataforma IBM Quantum Learning ha contado con más de 400 estudiantes de más de 85 instituciones en 15 países de la región. Además, más de 160 profesionales en 15 países han obtenido la certificación *IBM Quantum Developer*. Más de 700 participantes han sido parte de los eventos de la comunidad cuántica de IBM, que abarcan 19 países. IBM está comprometido a fomentar la próxima generación de innovadores cuánticos. Al combinar nuestro liderazgo tecnológico con iniciativas educativas y desarrollo comunitario, nuestro objetivo es

garantizar que los beneficios de la computación cuántica lleguen a través de fronteras, industrias y demografías.

El futuro cuántico no se trata solo de computadoras potentes: se trata de crear soluciones a los desafíos más urgentes de la humanidad, fomentar el crecimiento económico y abrir nuevas fronteras de descubrimiento. Invitamos a gobiernos, empresas, instituciones académicas e individuos a unirse a nosotros en este viaje cuántico, mientras transformamos colectivamente la promesa de la cuántica en aplicaciones prácticas que darán forma a nuestro mundo en las próximas décadas.

1. Más información disponible en: <https://quantum.cloud.ibm.com/learning/es>.

2. Más información disponible en: <https://skillsbuild.org/es/students/course-catalog/quantum-computing>.

3. LA POLÍTICA CTI EN FOCO

MARCOS INSTITUCIONALES
E INSTRUMENTOS
DE POLÍTICA DE LOS
PAÍSES IBEROAMERICANOS





A partir de la información alojada en la plataforma en línea **Políticas CTI** (www.politicascti.net), esta sección presenta una visión comparativa y detallada de los sistemas de ciencia, tecnología e innovación (CTI) de los países iberoamericanos.

Gestionada por el **Observatorio Iberoamericano de la Ciencia, la Tecnología y la Sociedad (OCTS) de la Organización de Estados Iberoamericanos (OEI)**, Políticas CTI sistematiza la información sobre las políticas y los instrumentos implementados en los sistemas institucionales de los países de la región. La fuente primaria de datos es la información que ponen a disposición los organismos nacionales de CTI. La plataforma facilita la búsqueda de experiencias, la comparación y el estudio de las dinámicas nacionales de CTI, sirviendo como una herramienta estratégica para el aprendizaje recíproco y la mejora en la toma de decisiones para la adopción de políticas más eficaces.

La sección se estructura alrededor de tres ejes principales para cada sistema nacional: i) su estructura institucional, donde se identifica a los organismos clave de definición, promoción y ejecución de políticas de CTI; ii) su marco normativo, que resalta los principales elementos legislativos y de planificación que sustentan el desarrollo científico-tecnológico y la innovación en cada país; y iii) un recuento del total de instrumentos de promoción a nivel nacional, activos a 2025 o último año disponible, realizado a partir de las categorías que clasifican y ordenan estas iniciativas, entre ellas: I+D, innovación, recursos humanos y cultura científica. La selección de los instrumentos destacados se basó en las trayectorias históricas de los diversos programas, la cobertura y el peso en el financiamiento, entre otros aspectos.

Para complementar esta descripción cualitativa y configurar un panorama completo de la dinámica de los sistemas de CTI en Iberoamérica, se incluye el último dato disponible de ciertos indicadores clave que surgen del relevamiento que la **Red Iberoamericana de Indicadores de Ciencia y Tecnología (RICYT)** lleva a cabo de manera anual.

Sistema institucional de CTI

Organismo de definición de políticas

Secretaría de Innovación, Ciencia y Tecnología

Organismo de promoción

Agencia Nacional de Promoción de la Investigación, el Desarrollo Tecnológico y la Innovación

Organismo de ejecución

CONICET, universidades, INTA, INTI, CNEA, CONAE, INVAP

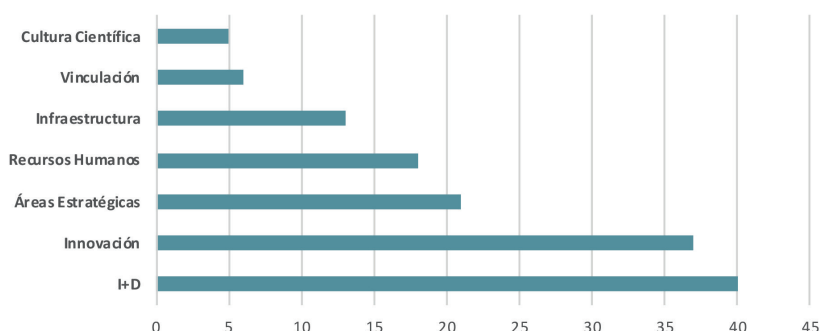
Principales elementos del marco normativo

Plan Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación 2030
Ley N° 25.467 de Ciencia, Tecnología e Innovación de 2001

83

Instrumentos de promoción de la CTI

Total de instrumentos por grandes categorías



140

instrumentos de promoción
a nivel nacional en 2025

Instrumentos destacados

Premio Raíces (RR.HH.)
FONCYT PICT (financiamiento de la I+D)

Principales indicadores

0,60%

inversión en I+D en relación
con el PBI

2,93

investigadores cada mil integrantes
de la PEA

Sistema institucional de CTI

Organismo de definición de políticas

Viceministerio de Ciencia y Tecnología – Ministerio de Educación

Organismo de promoción

Viceministerio de Ciencia y Tecnología – Ministerio de Planificación

Organismo de ejecución

FONDECYT, Universidades, INLASA, MNHN, INIAF

84

Principales elementos del marco normativo

Ley N° 2209 de Fomento de la Ciencia, Tecnología e Innovación
Ley N° 1493 (2022) - Decreto Supremo N° 5092 (2023) – Creación del Fondo de Desarrollo de la Ciencia y Tecnología (FONDECYT)
Plan Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (2013)

Instrumentos de promoción de la CTI

Total de instrumentos por grandes categorías

Categoría	Instrumentos
Recursos Humanos	1
Vinculación	1
I+D	3
Cultura Científica	4

9

instrumentos de promoción a nivel nacional en 2025

Instrumentos destacados

FONDECYT
(financiamiento de la I+D)

Principales indicadores

0,06%

inversión en I+D en relación con el PBI

0,12

investigadores cada mil integrantes de la PEA

Sistema institucional de CTI

Organismo de definición de políticas

Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación

Organismo de promoción

CNPq, FINEP, CAPES, BNDES, ABDI

Organismo de ejecución

Universidades, EMBRAPA, FIOCRUZ, INPE, CNEN

Principales elementos del marco normativo

Lei nº 11.196/2005 – “Lei do Bem”

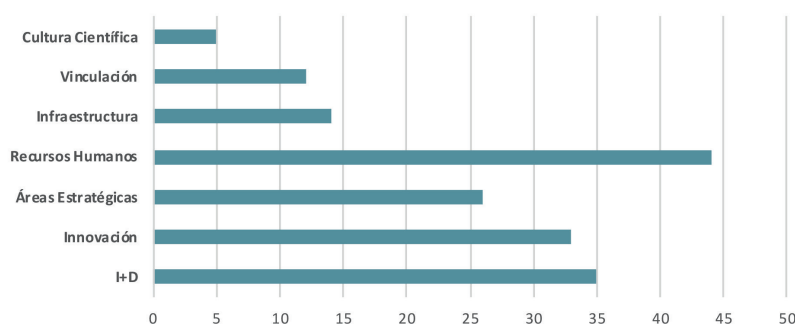
Legislação de TIC – Lei nº 8.248, de 10/ 1991, e Lei nº 13.969, 12/ 2019

Lei nº 13.243/2016 - “Novo Marco Legal da Ciência, Tecnologia e Inovação”

85

Instrumentos de promoción de la CTI

Total de instrumentos por grandes categorías



169

instrumentos de promoción
a nivel nacional en 2025

Instrumentos destacados

FINEP Inovacred (innovación)
FNDCT (fondos sectoriales)
CNPq Chamada Universal

Principales indicadores

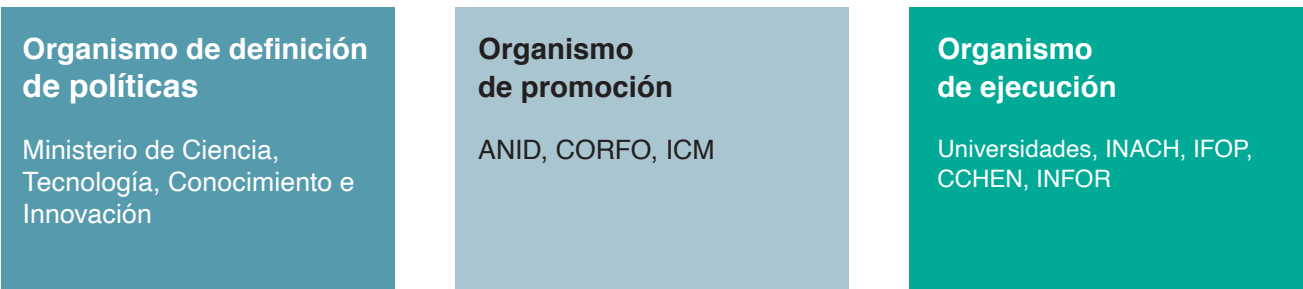
1,19%

Inversión en I+D en relación
con el PBI

1,62

investigadores cada mil integrantes
de la PEA

Sistema institucional de CTI

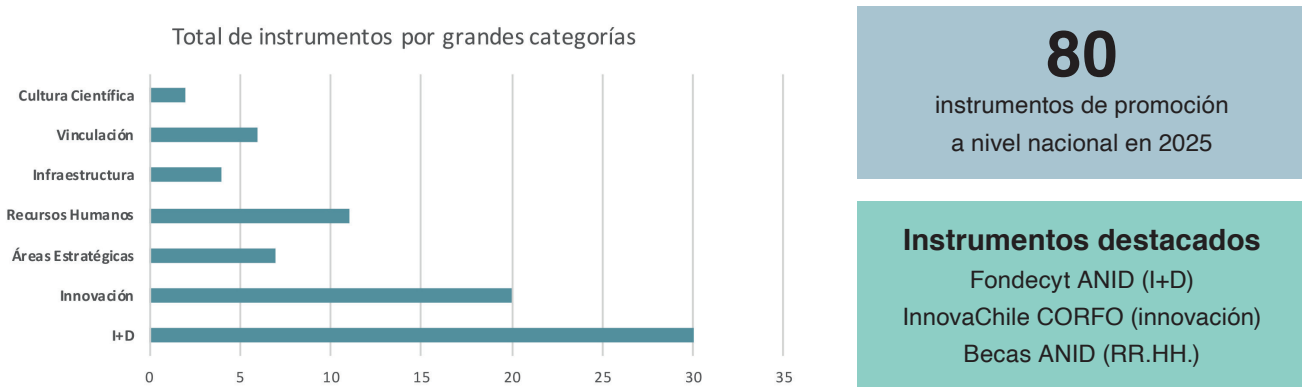


Principales elementos del marco normativo

Política Nacional de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación 2020-2030
Ley I+D

86

Instrumentos de promoción de la CTI



Principales indicadores

0,36% inversión en I+D en relación con el PBI	1,44 investigadores cada mil integrantes de la PEA
---	--

Sistema institucional de CTI

Organismo de definición de políticas

CONPES, MinCiencias, CACTI

Organismo de promoción

MinCiencias, FCTel del Sistema General de Regalías-SGR, OCYT

Organismo de ejecución

Instituto Humboldt, Agrosavia, IDEAM, INS, SINCHI, Universidades, Sena

Principales elementos del marco normativo

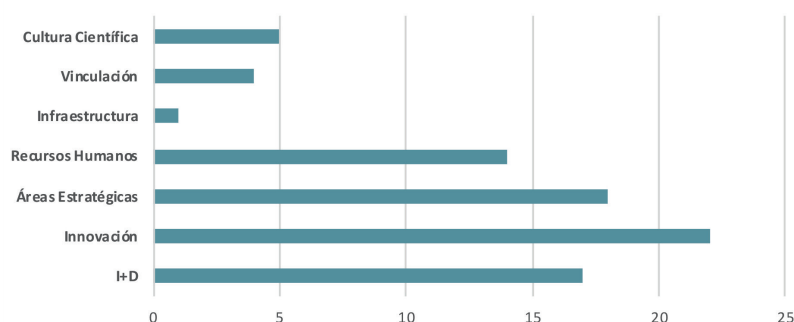
Política nacional de ciencia, tecnología e innovación 2022 – 2031 – CONPES 4069

Constitución Política de Colombia (Artículo 361), Ley 1530 (2012) y Ley 1923 (2018): reglamentación del Fondo de Ciencia, Tecnología e Innovación (FCTel),

87

Instrumentos de promoción de la CTI

Total de instrumentos por grandes categorías



81

instrumentos de promoción a nivel nacional en 2025

Instrumentos destacados

FCTel (innovación)
Minciencias Orquídeas (género)
Minciencias Reconocimiento de actores (vinculación)

Principales indicadores

0,31%

Inversión en I+D en relación con el PBI

0,17

investigadores cada mil integrantes de la PEA

COSTA RICA

Sistema institucional de CTI

Organismo de definición de políticas
Ministerio de Ciencia, Innovación, Tecnología y Telecomunicaciones (MICITT)

Organismo de promoción
MICITT, Promotora Costarricense de Innovación, AEC

Organismo de ejecución
Universidades, CATIE, CCT, CENAT, INBIO, ITCR

Principales elementos del marco normativo
Ley n.º 7169 Promoción Desarrollo Científico y Tecnológico y Creación del MICYT (Ministerio de Ciencia y Tecnología)
Ley n.º 8642 Ley General de Telecomunicaciones
Plan Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (2022-2027)

Instrumentos de promoción de la CTI

Total de instrumentos por grandes categorías

Categoría	Instrumentos
Cultura Científica	5
Vinculación	3
Infraestructura	2
Recursos Humanos	4
Áreas Estratégicas	1
Innovación	9
I+D	6

30
instrumentos de promoción a nivel nacional en 2025

Instrumentos destacados
Promotora Fondo Propyme (innovación)
Promotora Talento STEM (RR.HH.)
MICITT Premios “Clodomiro Picado Twilight” (cultura científica)

Principales indicadores

0,34%
inversión en I+D en relación con el PBI

1,15
investigadores cada mil integrantes de la PEA

Sistema institucional de CTI

Organismo de definición de políticas

Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente (CITMA)

Organismo de promoción

CITMA, Academia de Ciencias de Cuba

Organismo de ejecución

BIOCUBAFARMA, Inst. Meteorología, Inst. Geofísica, Inst. Recursos Hidráulicos

Principales elementos del marco normativo

5 GOO No. 15 de 24/3/98 Normas para la elaboración y control de los planes de ciencia e innovación tecnológica
Res.185/2020 Programa Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación 2020
Plan Nacional de Desarrollo Económico y Social hasta el 2030 – Macroprograma Ciencia, Tecnología e Innovación

89

Instrumentos de promoción de la CTI

Total de instrumentos por grandes categorías

Categoría	Instrumentos
Cultura Científica	8
Vinculación	1
Áreas Estratégicas	6
Innovación	7
I+D	14

36

instrumentos de promoción a nivel nacional en 2025

Instrumentos destacados

CITMA FONCI (innovación)
Premios CITMA (cultura científica)

Principales indicadores

0,39%

Inversión en I+D en relación con el PBI

4,95

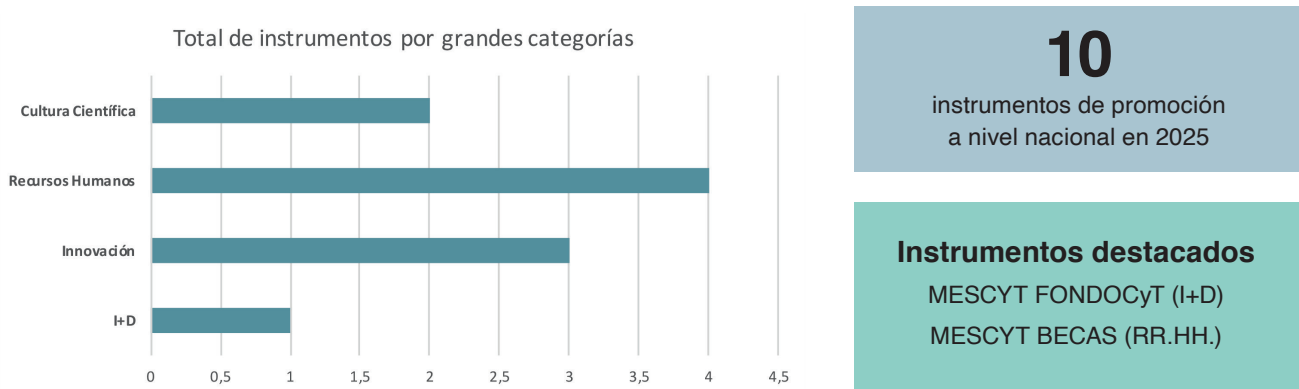
investigadores cada mil integrantes de la PEA

Sistema institucional de CTI

Organismo de definición de políticas Ministerio de Educación Superior, Ciencia y Tecnología	Organismo de promoción Ministerio de Educación Superior, Ciencia y Tecnología	Organismo de ejecución IDIAF, IIBI, INDOTEL, LNSPDD
---	---	---

Principales elementos del marco normativo Ley No. 139-01 – Ley de Educación Superior, Ciencia y Tecnología (2001) Política Nacional de Innovación 2030

Instrumentos de promoción de la CTI



Principales indicadores

0,04 investigadores cada mil integrantes de la PEA
--

Sistema institucional de CTI

Organismo de definición de políticas

Secretaría de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación

Organismo de promoción

Secretaría de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación

Organismo de ejecución

INSPI, INIAP, INAE, INOCAR, INABIO

Principales elementos del marco normativo

Código Orgánico de la Economía Social de los Conocimientos, Creatividad e Innovación “Ingenios” (2016)
Ley Orgánica de Emprendimiento e Innovación (LOEI) (2020)

Instrumentos de promoción de la CTI

Total de instrumentos por grandes categorías

Categoría	Número de instrumentos
Cultura Científica	3
Vinculación	5
Recursos Humanos	18
Innovación	3
I+D	8

37

instrumentos de promoción a nivel nacional en 2025

Instrumentos destacados

SENECYT BECAS (RR.HH.)

Principales indicadores

0,44%

inversión en I+D en relación con el PBI

0,88

investigadores cada mil integrantes de la PEA

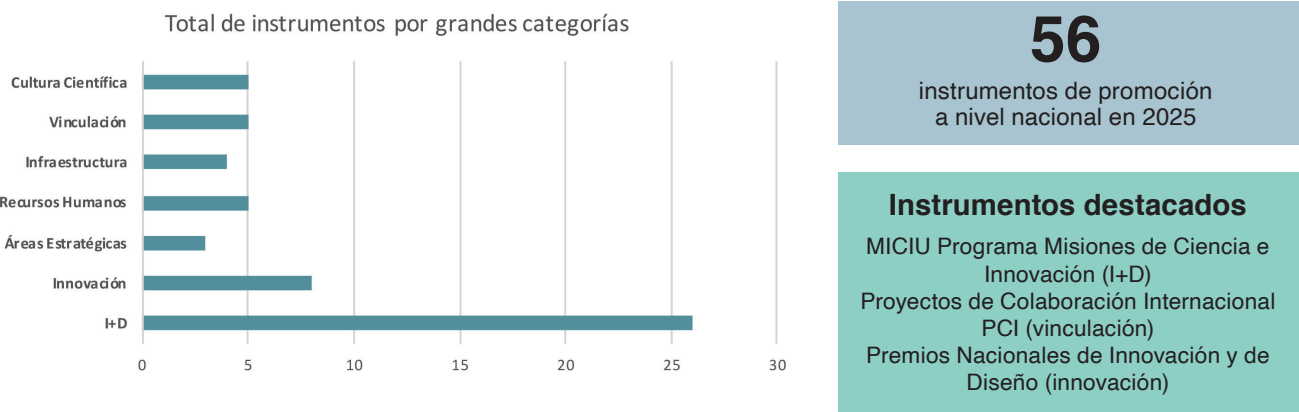
Sistema institucional de CTI

Organismo de definición de políticas Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades (MICIU)	Organismo de promoción MICIU, CSIC, FECYT, AEI, CDTI	Organismo de ejecución INTA, CIEMAT, INIA, IEO, IGME, IAC
--	--	---

Principales elementos del marco normativo

Ley 14/2011 de la Ciencia, la Tecnología y la Innovación
Estrategia Española de Ciencia, Tecnología e Innovación 2021-2027

Instrumentos de promoción de la CTI



Principales indicadores

1,49% inversión en I+D en relación con el PBI	7,26 investigadores cada mil integrantes de la PEA
---	--

Sistema institucional de CTI

Organismo de definición de políticas

Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONCYT)
Secretaría Nacional de Ciencia y Tecnología (SENACYT)

Organismo de promoción

SENACYT, FONACYT

Organismo de ejecución

INAB, Universidades, ICTA

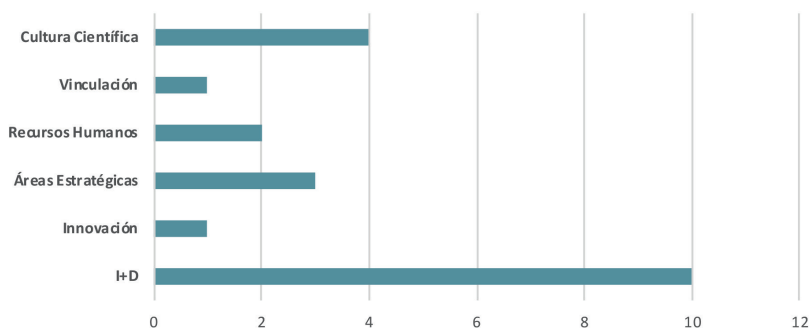
Principales elementos del marco normativo

Decreto Legislativo N° 63/1991. Ley de Promoción de Desarrollo Científico y Tecnológico Nacional
Reglamento De La Ley De Promoción Del Desarrollo Científico Tecnológico Nacional (1994)
Política CTi (2015) FONACYT

93

Instrumentos de promoción de la CTI

Total de instrumentos por grandes categorías



21

instrumentos de promoción
a nivel nacional en 2025

Instrumentos destacados

SENACYT - Fondo Nacional de Ciencia y Tecnología (I+D)
SENACYT - ProCienciaGt (I+D)
SENACYT - Medalla de ciencia y Tecnología (cultura científica)

Principales indicadores

0,06%

inversión en I+D en relación
con el PBI

0,03

investigadores cada mil integrantes
de la PEA

HONDURAS

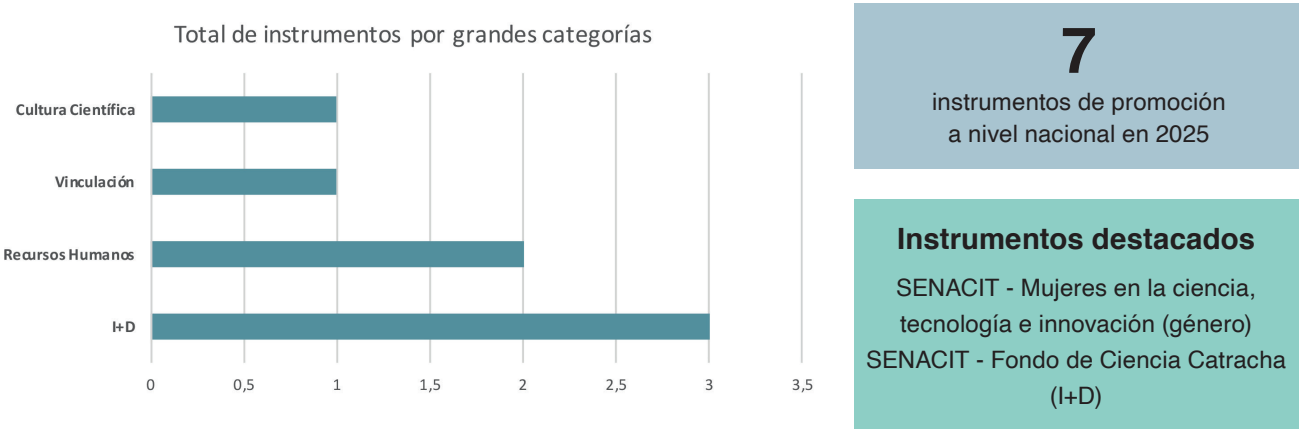
Sistema institucional de CTI

Organismo de definición de políticas Consejo Nacional de Fomento de la Ciencia, la Tecnología y la innovación (CONFOCIT)	Organismo de promoción SENACIT IHCITI	Organismo de ejecución DICTA, IHCAFE, INA, Universidades, SENACIT IHCITI
--	--	---

Principales elementos del marco normativo

Decreto No 276/2013. Ley para la promoción y el fomento del desarrollo científico, tecnológico y la innovación

Instrumentos de promoción de la CTI



Principales indicadores

0,06%

inversión en I+D en relación con el PBI

0,08

investigadores cada mil integrantes de la PEA

Sistema institucional de CTI

Organismo de definición de políticas

Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (Secihti)

Organismo de promoción

Secihti

Organismo de ejecución

Secihti, Centros Públicos de investigación, universidades, INIFAP, INECC, INSP, IMP

Principales elementos del marco normativo

Ley General en Materia de Humanidades, Ciencias, Tecnologías e Innovación (LGMHCTI) (2023)
Programa Sectorial de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación 2025-2030 (PSCHTI)

95

Instrumentos de promoción de la CTI

Total de instrumentos por grandes categorías

Categoría	Instrumentos
Cultura Científica	4
Vinculación	7
Infraestructura	2
Recursos Humanos	12
Áreas Estratégicas	20
Innovación	3
I+D	20

68

instrumentos de promoción a nivel nacional en 2025

Instrumentos destacados

Secihti Becas Posgrado (RR.HH.)
Secihti EFIDT (I+D)
Secihti Foros regionales (cultura científica)

Principales indicadores

0,27%

inversión en I+D en relación con el PBI

0,89

investigadores cada mil integrantes de la PEA

Sistema institucional de CTI

Organismo de definición de políticas

Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (SENACYT)

Organismo de promoción

SENACYT, Ciudad del Saber

Organismo de ejecución

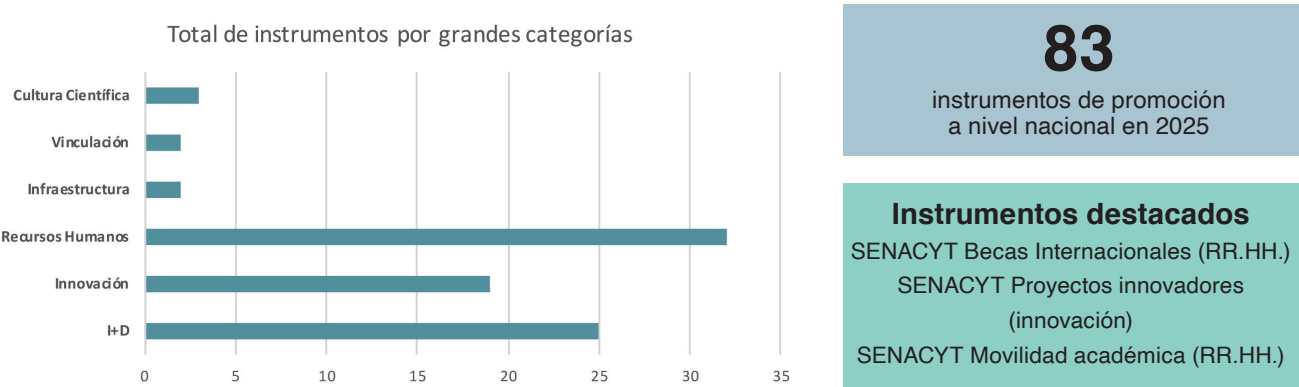
IDIAP, INDICASAT, IFARHU, Universidades

96

Principales elementos del marco normativo

Ley 13 de 15 de abril de 1997, modificada por la Ley 50 de 21 de diciembre de 2005 y por la Ley 55 de 14 de diciembre de 2007 – Sobre la Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación
Plan Estratégico Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (PENCYT 2025-2029)

Instrumentos de promoción de la CTI



Principales indicadores

0,18%

inversión en I+D en relación con el PBI

0,47

investigadores cada mil integrantes de la PEA

Sistema institucional de CTI

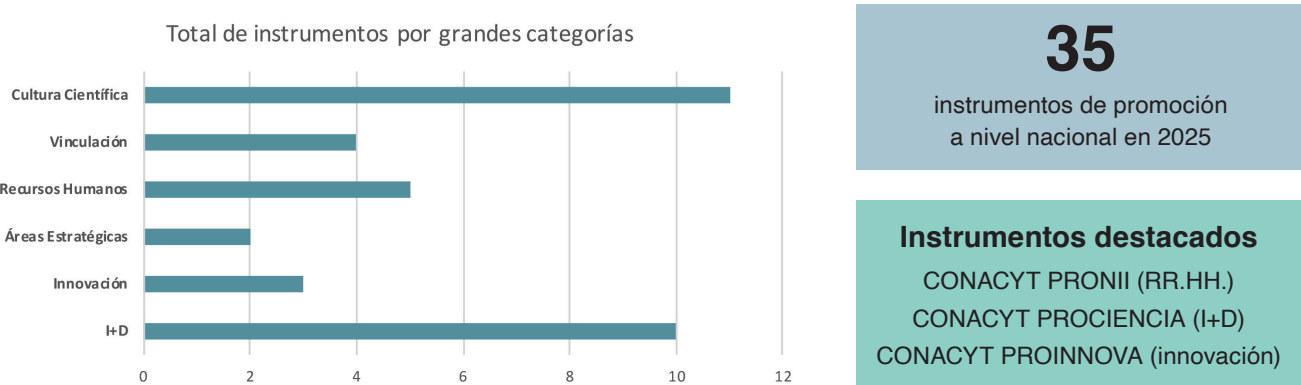
Organismo de definición de políticas Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)	Organismo de promoción CONACYT, Agencia Espacial, FEEI	Organismo de ejecución IPTA, INTN, CEMIT, Universidades
---	--	---

Principales elementos del marco normativo

Ley 2.279/03 “que modifica y amplía artículos de la ley 1028/97 general de ciencia y tecnología”
Política Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Paraguay 2017-2030
Decreto N° 3024/24 Amplía la Ley N° 1028/1997, ‘General de Ciencia y Tecnología’.

97

Instrumentos de promoción de la CTI



Principales indicadores

0,14% inversión en I+D en relación con el PBI	0,31 investigadores cada mil integrantes de la PEA
---	--

Sistema institucional de CTI

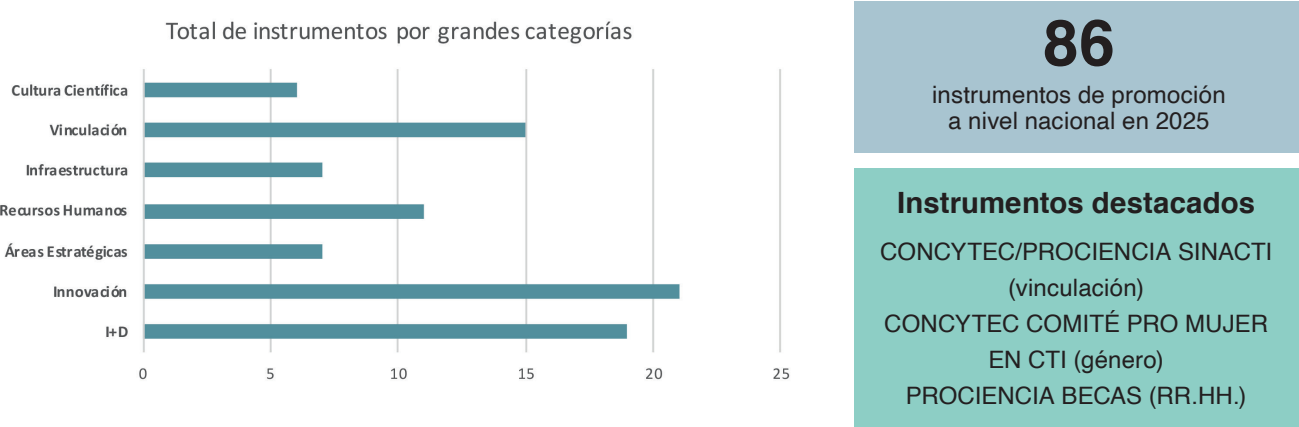
Organismo de definición de políticas Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (Concytec)	Organismo de promoción CONCYTEC, CONIDA, ProCiencia, OCTI Perú	Organismo de ejecución Universidades, INGEMMET, INIA, IGP, IIAP, IPEN, IMARPE
--	--	---

Principales elementos del marco normativo

Ley 31250/21 Ley del sistema nacional de ciencia, tecnología e innovación (SINACTI)
Política Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación al 2030 (POLCTI)

98

Instrumentos de promoción de la CTI



Principales indicadores

0,18%

inversión en I+D en relación con el PBI

Sistema institucional de CTI

Organismo de definición de políticas

Ministério da Ciência, Tecnologia e Ensino Superior (MCTES)

Organismo de promoción

FCT, ANI, Ciência Viva

Organismo de ejecución

Universidades, CONICYT

Principales elementos del marco normativo

Decreto-Lei n.º 125/99 Estabelece o quadro normativo aplicável às instituições que se dedicam à investigação científica e desenvolvimento tecnológico

Resolução do Conselho de Ministros n.º 21/2016 - Política Nacional de Ciência Aberta

99

Instrumentos de promoción de la CTI

Total de instrumentos por grandes categorías

Categoría	Instrumentos
Cultura Científica	4
Vinculación	3
Infraestructura	8
Recursos Humanos	19
Áreas Estratégicas	1
Innovación	17
I+D	20

72

instrumentos de promoción a nivel nacional en 2025

Instrumentos destacados

ANI FITEC (innovación)
FCT Bolsas (RR.HH.)
Portugal 2030 (I+D)

Principales indicadores

1,69%

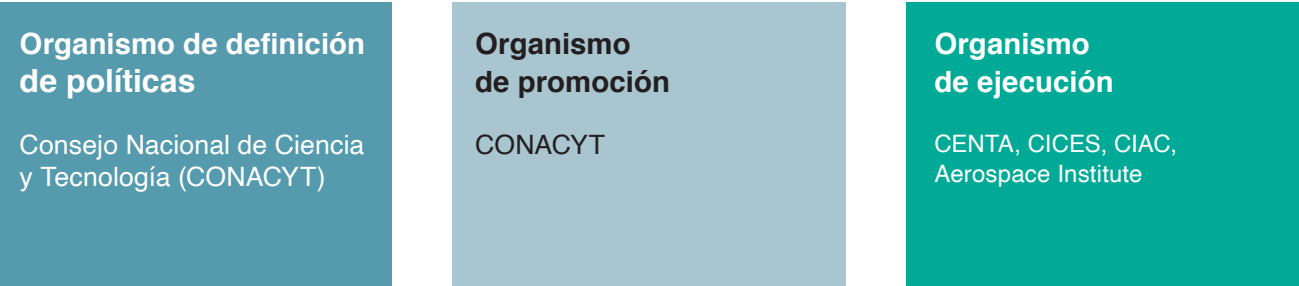
inversión en I+D en relación con el PBI

11,56

investigadores cada mil integrantes de la PEA

EL SALVADOR

Sistema institucional de CTI



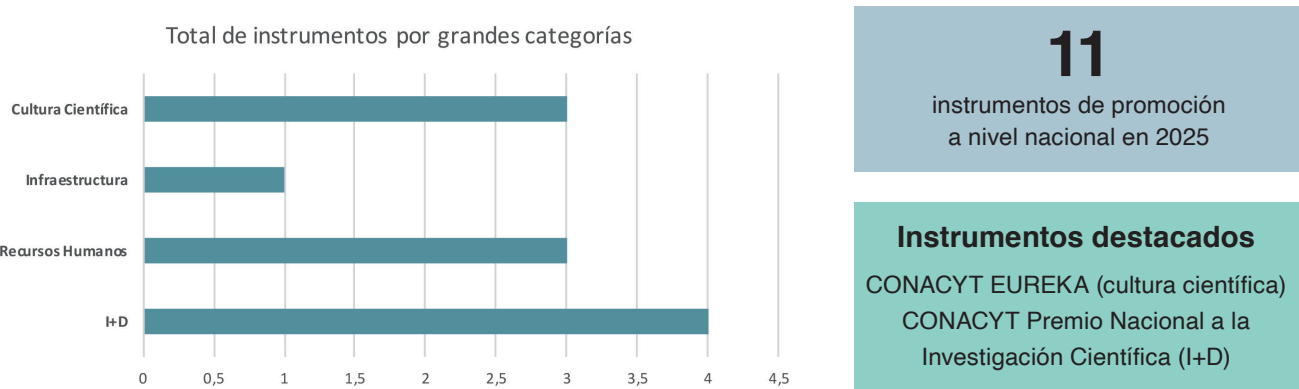
Principales elementos del marco normativo

Ley del consejo nacional de ciencia y tecnología, Decreto legislativo nº 287/92

Ley de desarrollo científico y tecnológico, Decreto legislativo nº 234/2012

Plan Estratégico 2019-2024 y Plan Anual de Trabajo 2022 CONACYT

Instrumentos de promoción de la CTI



Principales indicadores

0,1%

inversión en I+D en relación con el PBI

0,11

investigadores cada mil integrantes de la PEA

Sistema institucional de CTI

Organismo de definición de políticas

Dirección Nacional de Innovación, Ciencia y Tecnología – Ministerio de Educación y Cultura

Organismo de promoción

ANII, CONICYT, MEC

Organismo de ejecución

Universidades, INIA, LATU, IIBCE, IP Montevideo, IAU, ANNI

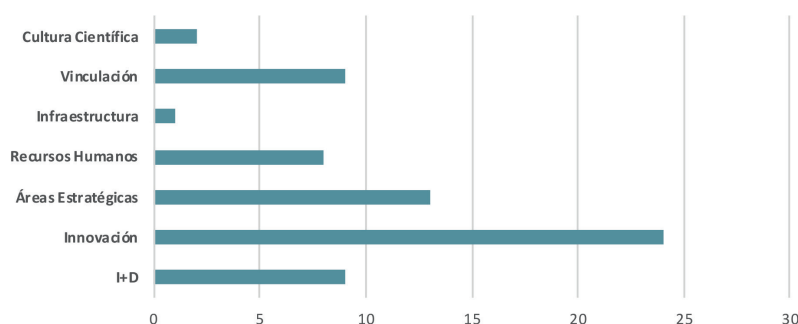
Principales elementos del marco normativo

Ley N° 18.084 de fecha 28/12/2006. Cometidos y competencias del GMI, de la ANNI y del Conicyt
Plan Estratégico Nacional De Ciencia Tecnología E Innovación (PENCTI) - 2010

101

Instrumentos de promoción de la CTI

Total de instrumentos por grandes categorías



66

instrumentos de promoción a nivel nacional en 2025

Instrumentos destacados

ANII Fondos sectoriales (innovación e I+D)
Sistema Nacional de Investigadores (RR.HH.)
ANII Becas (RR.HH.)

Principales indicadores

0,71%

inversión en I+D en relación con el PBI

1,39

investigadores cada mil integrantes de la PEA

Sistema institucional de CTI

Organismo de definición de políticas

Ministerio del Poder Popular para Ciencia y Tecnología (MINCYT)

Organismo de promoción

FONACIT, FUNDACITEs, ABAE, MINCYT, ONCTI

Organismo de ejecución

IVIC, INTEVEP, CENDITEL, INIA, FUNVISIS, IDEA

Principales elementos del marco normativo

Gaceta Oficial N° 39.575/2010 - Reforma de la Ley Orgánica de Ciencia, Tecnología e Innovación (LOCTI)

Instrumentos de promoción de la CTI

Total de instrumentos por grandes categorías

Categoría	Instrumentos
Cultura Científica	8
Vinculación	5
Recursos Humanos	4
Áreas Estratégicas	3
Innovación	5
I+D	4

29

instrumentos de promoción a nivel nacional en 2025

Instrumentos destacados

MINCYT Premios nacionales de ciencia, tecnología e innovación (cultura científica)

Principales indicadores

0,23

investigadores cada mil integrantes de la PEA

ANEXO
DEFINICIONES
BÁSICAS
UTILIZADAS



DEFINICIONES BÁSICAS UTILIZADAS



DEFINICIONES BÁSICAS UTILIZADAS

En este apartado se presentan las definiciones de los conceptos utilizados, confeccionadas sobre la base del Manual de Frascati 2015 (OCDE) y de las definiciones propuestas por la UNESCO.

Investigación y Desarrollo Experimental (I+D)

La Investigación y el Desarrollo Experimental (I+D) comprenden el trabajo creativo y sistemático realizado con el objeto de aumentar el volumen de conocimiento (incluyendo el conocimiento de la humanidad, la cultura y la sociedad) y concebir nuevas aplicaciones a partir del conocimiento disponible. Para que una actividad se considere I+D, debe cumplir con cinco criterios básicos.

- Novedosa
- Creativa
- Incierta
- Sistemática
- Transferible y/o reproducible

Actividades Científicas y Técnicas (ACT)

Las actividades científicas y tecnológicas comprenden las actividades sistemáticas estrechamente relacionadas con la producción, promoción, difusión y aplicación de los conocimientos científicos y técnicos en todos los campos de la ciencia y la tecnología. Incluyen actividades tales como la Investigación Científica y el Desarrollo Experimental (I+D), la Enseñanza y la Formación Científica y Técnica (EFCT) y los Servicios Científicos y Técnicos (SCT).

105

Enseñanza y Formación Científica y Técnica (EFCT)

Generalmente del tercer grado. Incluye todas las actividades de enseñanza y de formación de nivel superior no universitario especializado, de enseñanza y formación de nivel superior que conduzcan a la obtención de un título universitario, de formación y de perfeccionamiento posuniversitario y de formación permanente organizada de científico e ingenieros. Corresponde a los niveles 5A, 5B y 6 de la clasificación ISCED.

Servicios Científicos y Técnicos (SCT)

La definición de los SCT engloba las actividades relacionadas con la investigación y el desarrollo experimental que contribuyen a la producción, difusión y aplicación de conocimientos científicos y técnicos. A efectos de su uso en encuestas, la UNESCO ha dividido los SCT en cuatro subclases que pueden resumirse como sigue: Actividades técnicas de apoyo a la ciencia y la tecnología; Recolección y análisis de datos científicos; Gobernanza, gestión y marco jurídico que respaldan la ciencia y la tecnología; y Preservación, interpretación y difusión de información.

Sector Gobierno

Este sector comprende todos los ministerios, oficinas y otros organismos que suministran, generalmente a título gratuito, servicios colectivos que no sería económico ni fácil suministrar.

trar de otro modo y que, además, administran los asuntos públicos y la política económica y social de la colectividad (las empresas públicas se incluyen en el sector de empresas); y las instituciones privadas sin fines de lucro controladas y financiadas principalmente por la administración.

Sector Empresas

El sector de las empresas comprende todas las empresas, los organismos y las instituciones cuya actividad esencial consiste en la producción mercantil de bienes y servicios (exceptuando los de la enseñanza superior) para su venta al público, a un precio que corresponde al de la realidad económica; y las instituciones privadas sin fines de lucro que están esencialmente al servicio de dichas empresas.

Sector Educación Superior

Este sector comprende todas las universidades y centros de nivel universitario, cualquiera que sea el origen de sus recursos y su personalidad jurídica. Incluye también todos los institutos de investigación, estaciones experimentales y hospitales directamente controlados, administrados o asociados a centros de enseñanza superior.

Sector Organizaciones Privadas sin Fines de Lucro

El campo cubierto por este sector comprende las instituciones privadas sin fines de lucro que están fuera del mercado y al servicio de las economías domésticas (es decir, del público); y los individuos privados y las economías domésticas.

Sector Extranjero

Este sector comprende todas las instituciones e individuos situados fuera de las fronteras políticas de un país, a excepción de los vehículos, buques, aeronaves y satélites espaciales utilizados por instituciones nacionales, y de los terrenos de ensayo adquiridos por esas instituciones; y todas las organizaciones internacionales (excepto empresas), incluyendo sus instalaciones y actividades dentro de las fronteras de un país.

Investigadores

Los investigadores son profesionales que actúan en la concepción o creación de nuevo conocimiento. Llevan a cabo investigaciones, y mejoran y desarrollan conceptos, teorías, modelos, aparatos técnicos, programas informáticos y métodos operativos.

Personal de apoyo

Se compone de técnicos, personal asimilado y otro personal de apoyo.

Técnicos y personal asimilado

Los técnicos y el personal asimilado son personas cuyas tareas principales requieren unos conocimientos y una

experiencia de naturaleza técnica en uno o varios campos de la ingeniería, de las ciencias físicas y de la vida o de las ciencias sociales y las humanidades. Participan en la I+D ejecutando tareas científicas y técnicas que requieren la aplicación de métodos y principios operativos, generalmente bajo la supervisión de investigadores. El personal asimilado realiza los correspondientes trabajos bajo la supervisión de investigadores en ciencias sociales y humanidades. Sus tareas principales son las siguientes: realizar investigaciones bibliográficas y seleccionar el material apropiado en archivos y bibliotecas; elaborar programas para ordenador; llevar a cabo experimentos, pruebas y análisis; preparar los materiales y equipo necesarios para la realización de experimentos, pruebas y análisis; hacer mediciones y cálculos y preparar cuadros y gráficos; llevar a cabo encuestas estadísticas y entrevistas.

Otro personal de apoyo

El otro personal de apoyo incluye a los trabajadores, cualificados o no, y al personal de secretariado y de oficina que participan en la ejecución de proyectos de I+D o que están directamente relacionados con la ejecución de tales proyectos.

Equivalencia a Jornada Completa (EJC)

La Equivalencia a Jornada Completa (EJC) se calcula considerando para cada persona únicamente la proporción de su tiempo (o su jornada) que dedica a I+D (o ACT, cuando corresponda).

Un EJC puede entenderse como el equivalente a una persona/año. Así, quien habitualmente emplea el 30% de su tiempo a I+D y el resto a otras actividades (tales como enseñanza, administración universitaria y orientación de alumnos) debe ser considerado como 0,3 EJC. Igualmente, si un trabajador de I+D con dedicación plena está empleado en una unidad de I+D seis meses únicamente, el resultado es un EJC de 0,5. Puesto que la jornada (período) laboral normal puede diferir de un sector a otro, e incluso de una institución a otra, es imposible expresar la equivalencia a jornada completa en personas/año.

Teóricamente, la conversión en equivalencia a jornada completa debería aplicarse a todo el personal de I+D a tomar en consideración. En la práctica, se acepta que las personas que emplean más del 90% de su tiempo a I+D (por ejemplo, la mayor parte del personal empleado en laboratorios de I+D) sean consideradas con equivalencia de dedicación plena del 100%; y de la misma forma podría excluirse a todas las personas que dedican menos del 10% de su tiempo a I+D.

La I+D puede ser la función principal de algunas personas (por ejemplo, los empleados de un laboratorio de I+D), o solo la función secundaria (por ejemplo, los empleados de un establecimiento dedicado a proyectos y ensayos). La I+D puede igualmente representar una fracción apreciable de la actividad en determinadas profesiones (por ejemplo, los profesores universitarios y los estudiantes

postgraduados). Si se computaran únicamente las personas empleadas en centros de I+D, resultaría una subestimación del esfuerzo dedicado a I+D; por el contrario, si se contabilizaran todas las personas que dedican algún tiempo a I+D, se produciría una sobreestimación. Es preciso, por tanto, traducir a EJC el número de personas que realizan actividades de I+D.

Investigación básica

La investigación básica consiste en trabajos experimentales o teóricos que se emprenden fundamentalmente para obtener nuevos conocimientos acerca de los fundamentos de fenómenos y hechos observables, sin pensar en darles ninguna aplicación o utilización determinada.

Investigación aplicada

La investigación aplicada consiste también en trabajos originales realizados para adquirir nuevos conocimientos; sin embargo, está dirigida fundamentalmente hacia un objetivo práctico específico.

Desarrollo experimental

El desarrollo experimental consiste en trabajos sistemáticos basados en los conocimientos existentes, derivados de la investigación y/o la experiencia práctica, dirigidos a la producción de nuevos materiales, productos o dispositivos; al establecimiento de nuevos procesos, sistemas y servicios; o a la mejora sustancial de los ya existentes.

- 3.4 Biotecnología médica
- 3.5 Otras ciencias médicas

4. Ciencias Agrícolas

- 4.1 Agricultura, silvicultura y pesca
- 4.2 Ciencia animal y de los lácteos
- 4.3 Ciencia veterinaria
- 4.4 Biotecnología agrícola
- 4.5 Otras ciencias agrícolas

5. Ciencias Sociales

- 5.1 Psicología y ciencias cognitivas
- 5.2 Economía y comercio
- 5.3 Educación
- 5.4 Sociología
- 5.5 Derecho
- 5.6 Ciencia política
- 5.7 Geografía social y económica
- 5.8 Medios de comunicación
- 5.9 Otras ciencias sociales

6. Humanidades

- 6.1 Historia y arqueología
- 6.2 Lengua y literatura
- 6.3 Filosofía, ética y religión
- 6.4 Artes (arte, historia del arte, artes escénicas, música)
- 6.5 Otras humanidades

CAMPOS DE LA CIENCIA Y LA TECNOLOGÍA

1. Ciencias Naturales y Exactas

- 1.1 Matemáticas
- 1.2 Ciencias de la información y la computación
- 1.3 Ciencias físicas
- 1.4 Ciencias químicas
- 1.5 Ciencias de la tierra y ciencias relacionadas con el medio
- 1.6 Ciencias biológicas
- 1.7 Otras ciencias naturales

2. Ingeniería y Tecnología

- 2.1 Ingeniería civil
- 2.2 Ingeniería eléctrica, electrónica e informática.
- 2.3 Ingeniería mecánica
- 2.4 Ingeniería química
- 2.5 Ingeniería de los materiales
- 2.6 Ingeniería médica
- 2.7 Ingeniería ambiental
- 2.8 Biotecnología ambiental
- 2.9 Biotecnología industrial
- 2.10 Nanotecnología
- 2.11 Otras ingenierías y tecnologías

3. Ciencias Médicas

- 3.1 Medicina básica
- 3.2 Medicina clínica
- 3.3 Ciencias de la salud

