EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA

TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

Tecnológico Nacional de México

Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico

Tesis de Maestría

Análisis descriptivo del panorama actual del cómputo cuántico para las propuestas de ingeniería de software cuántico

presentada por

Ing. Jesús Alfonso Ocampo Mújica

como requisito para la obtención del grado de

Maestro en Ciencias de la Computación

Directora de tesis

Dra. Blanca Dina Valenzuela Robles

Cuernavaca, Morelos, México. Agosto de 2026.

cenidet
Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico

Educación
Secretaría de Educación Pública

TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO



Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico
Departamento de Ciencias Computacionales

Cuernavaca, Mor., 29/JUNIO/2026
OFICIO No. DCC/138/2026
Asunto: Aceptación de documento de tesis
CENIDET-AC-004-M14-OFICIO

CARLOS MANUEL ASTORGA ZARAGOZA
SUBDIRECTOR ACADÉMICO
PRESENTE

Por este conducto, los integrantes de Comité Tutorial de **Jesús Alfonso Ocampo Mújica** con número de control **M24CE060**, de la Maestría en Ciencias de la Computación, le informamos que hemos revisado el trabajo de tesis de grado titulado **"Análisis descriptivo del panorama actual del cómputo cuántico para las propuestas de ingeniería de software cuántico"** y hemos encontrado que se han atendido todas las observaciones que se le indicaron, por lo que hemos acordado aceptar el documento de tesis y le solicitamos la autorización de impresión definitiva.

A T E N T A M E N T E
Excelencia en Educación Tecnológica®
"Conocimiento y Tecnología al Servicio de México"

Dra. Blanca Dina Valenzuela Robles
Directora de tesis

Dr. René Santaolaya Salgado
Revisor 1

M.C. José Luis Ramírez Alcántara
Revisor 2

C.c.p. Depto. Servicios Escolares.
Expediente / Estudiante



2026 año de Margarita Maza

cenidet® Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico

Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira,
C.P. 62490, Cuernavaca, Morelos Tel. 01 (777) 3627770, ext. 3201,
e-mail: dcc_cenidet@tecnm.mx | cenidet.tecnm.mx



Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico
Subdirección Académica

Cuernavaca Mor, 30/junio/2026
Oficio No. SAC/200/2026
Asunto: Autorización de impresión de tesis

JESÚS ALFONSO OCAMPO MÚJICA
CANDIDATO AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA COMPUTACIÓN
P R E S E N T E

Por este conducto, tengo el agrado de comunicarle que el Comité Tutorial asignado a su trabajo de tesis titulado **"Análisis descriptivo del panorama actual del cómputo cuántico para las propuestas de ingeniería de software cuántico"**, ha informado a esta Subdirección Académica, que están de acuerdo con el trabajo presentado. Por lo anterior, se le autoriza a que proceda con la impresión definitiva de su trabajo de tesis.

Esperando que el logro del mismo sea acorde con sus aspiraciones profesionales, reciba un cordial saludo.

A T E N T A M E N T E
Excelencia en Educación Tecnológica®
"Conocimiento y Tecnología al servicio de México"

EDUCACIÓN | TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO TECNOLÓGICO
SUBDIRECCIÓN ACADÉMICA

CARLOS MANUEL ASTORGA ZARAGOZA
SUBDIRECTOR ACADÉMICO

c.c.p. Departamento de Ciencias Computacionales
Departamento de Servicios Escolares

CMAZ/lmz



cenidet®
Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico

TECNÓLOGICO NACIONAL DE MÉXICO
CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO TECNOLÓGICO

CENIDET

Ciencias de la Computación

Maestría en Ciencias de la Computación

Análisis descriptivo del panorama actual del cómputo cuántico para las propuestas de ingeniería de software cuántico

Autor: Ing. Jesús Alfonso Ocampo Mújica

Directora: Dra. Blanca Dina Valenzuela Robles

Comité:
Dr. René Santaolaya Salgado
M.C. José Luis Ramírez Alcántara

agosto, 2026

A mi madre, Ana María Estela Mújica Figueroa, y a mi hermana, Guadalupe Karen Ocampo Mújica

Por ser mi origen, mi fuerza y una parte esencial de todo lo que soy. Gracias por su amor, apoyo y presencia incondicional. Todo este camino también les pertenece.

Agradecimientos

A mi madre y a mi hermana,

A mi madre, Ana María Estela Mújica Figueroa, y a mi hermana, Guadalupe Karen Ocampo Mújica, porque gracias a ellas soy la persona que soy hoy. Su apoyo, cariño y presencia constante, así como su ejemplo y fortaleza, han sido pilares esenciales en este camino.

A mis compañeros de vida,

A Minino, Mininota, Frida, Luna, Chanel y Canela, por su compañía silenciosa, leal e incondicional durante este recorrido. En los días de cansancio, incertidumbre o desvelo, su presencia fue una forma sencilla, pero profundamente significativa de calma, alegría y refugio.

A mi directora de tesis,

A la Dra. Blanca Dina Valenzuela Robles, por su guía, acompañamiento y consejos a lo largo de esta etapa. Su orientación fue fundamental tanto en lo académico como en lo personal, pues sus palabras y observaciones fueron esenciales para el desarrollo y culminación de este trabajo.

A mis revisores de tesis,

Al Dr. René Santaolaya Salgado y al Mtro. José Luis Ramírez Alcántara por sus valiosos comentarios y aportaciones. Sus observaciones críticas fortalecieron este trabajo y contribuyeron a mi formación académica. Asimismo, agradezco al Mtro. José Luis por su guía en la comprensión del cómputo cuántico, así como por su paciencia y dedicación durante este proceso.

A las instituciones que hicieron posible esta etapa,

A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación, por la beca otorgada durante mis estudios de maestría. Asimismo, al Tecnológico Nacional de México y al Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, por brindar las instalaciones y las condiciones académicas necesarias para el desarrollo de este trabajo y para mi crecimiento académico.

A quien me impulsó hacia este tema,

A Diego Carlos Luna Márquez, por haberme invitado a aventurarme en el campo del cómputo cuántico y por confiar en mí sin conocerme previamente. Su confianza marcó el inicio de una parte fundamental de esta investigación.

A mis amigos,

A cada una de las personas a las que llamo amigos, por haber estado presentes de distintas formas y en distintos momentos de este trayecto. Sus consejos, chistes, anécdotas y compañía hicieron más llevadera esta etapa. Cada uno de ustedes ha aportado algo valioso a mi vida.

A la vida, al tiempo y a aquello que nos acompaña,

Agradezco también a aquello que, de una u otra forma, está por encima de nosotros o nos acompaña en esta aventura que llamamos vida, al gran arquitecto del universo. Y, si no fuera así, agradezco simplemente al tiempo y a las casualidades de la vida, que suelen dar dulce salida a muchas amargas dificultades y recordarnos que, pese a todo, vale la pena vivir.

Jesús Alfonso Ocampo Mújica
Cuernavaca, Morelos, 2026

Maestría en Ciencias de la Computación – CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO TECNOLÓGICO (CENIDET)

Análisis descriptivo del panorama actual del cómputo cuántico para las propuestas de ingeniería de software cuántico

Ing. Jesús Alfonso Ocampo Mújica

Cuernavaca, Morelos, agosto 2026

Resumen

El cómputo cuántico plantea retos relevantes para la ingeniería de software en el diseño, integración, prueba, mantenimiento, calidad y formación asociada con el desarrollo de software cuántico. Sin embargo, la literatura sobre ingeniería de software cuántico se encuentra dispersa entre propuestas técnicas, metodológicas, educativas y conceptuales, lo que dificulta identificar una organización inicial de conocimientos para apoyar la formación de perfiles vinculados con este campo. Esta tesis tuvo como objetivo contribuir a dicha organización mediante un análisis descriptivo del panorama actual del cómputo cuántico en las propuestas de ingeniería de software cuántico.

Para ello, se integraron dos estrategias de revisión documental. La primera fue un análisis bibliométrico, que partió de 659 registros recuperados de Scopus y Web of Science, de los cuales se obtuvo un corpus final de 385 documentos correspondientes al periodo de 2020 a marzo de 2025. Sus resultados mostraron una evolución reciente del campo asociada con software cuántico, pruebas, lenguajes de programación cuántica, sistemas híbridos, herramientas y aplicaciones cuánticas. La segunda fue una revisión sistemática de la literatura, que partió de 1,571 registros recuperados de Web of Science, IEEE Xplore Digital Library y ACM Digital Library, de los cuales se seleccionaron 67 estudios finales correspondientes al periodo de 2019 a noviembre de 2025. Esta revisión permitió reconocer metodologías, buenas prácticas, ciclo de vida, calidad, verificación, validación y pruebas, desafíos de implementación, entornos tecnológicos y elementos formativos relacionados con la ingeniería de software cuántico.

Con base en estos resultados, se propone *QSEAK: Quantum Software Engineering Areas of Knowledge*, un marco de fundamentos referenciales cuya primera versión documentada, QSEAK_v0, se organizó en tres áreas: fundamentos, conocimientos técnicos especializados y conocimientos transversales y profesionales. La propuesta recibió cinco retroalimentaciones en una revisión académica inicial con especialistas externos, lo que permitió identificar fortalezas, límites y oportunidades de mejora. QSEAK_v0 se presenta como una base referencial inicial, trazable y abierta a refinamiento, con potencial para contribuir al desarrollo de futuras guías formativas y orientar discusiones académicas sobre la formación en ingeniería de software cuántico.

Palabras clave: Cómputo Cuántico, Ingeniería de Software Cuántico, Análisis Bibliométrico, Revisión Sistemática de la Literatura, Marco de Fundamentos Referenciales, Guías Formativas.

Abstract

Quantum computing poses significant challenges for software engineering in the design, integration, testing, maintenance, quality, and training associated with quantum software development. However, the literature on quantum software engineering is dispersed across technical, methodological, educational, and conceptual proposals, which makes it difficult to identify an initial organization of knowledge to support the training of professional profiles linked to this field. This thesis aimed to contribute to such organization through a descriptive analysis of the current landscape of quantum computing in quantum software engineering proposals.

To this end, two literature review strategies were integrated. The first was a bibliometric analysis based on 659 records retrieved from Scopus and Web of Science, from which a final corpus of 385 documents corresponding to the period from 2020 to March 2025 was obtained. Its results showed a recent evolution of the field associated with quantum software, testing, quantum programming languages, hybrid systems, tools, and quantum applications. The second was a systematic literature review based on 1,571 records retrieved from Web of Science, IEEE Xplore Digital Library, and ACM Digital Library, from which 67 final studies corresponding to the period from 2019 to November 2025 were selected. This review made it possible to identify methodologies, good practices, life cycle proposals, quality, verification, validation and testing approaches, implementation challenges, technological environments, and educational elements related to quantum software engineering.

Based on these results, *QSEAK: Quantum Software Engineering Areas of Knowledge* is proposed as a reference framework of foundational knowledge. Its first documented version, QSEAK_v0, was organized into three areas: foundations, specialized technical knowledge, and transversal and professional knowledge. The proposal received five feedback reports in an initial academic review with external specialists, which made it possible to identify strengths, limitations, and opportunities for improvement. QSEAK_v0 is presented as an initial, traceable reference base open to refinement, with the potential to contribute to the development of future educational guidelines and to guide academic discussions on education in quantum software engineering.

Keywords: Quantum Computing, Quantum Software Engineering, Bibliometric Analysis, Systematic Literature Review, Reference Framework of Foundational Knowledge, Educational Guidelines.

Índice general

Agradecimientos iv
Resumen v
Abstract vi
Índice de figuras x
Índice de tablas xi
Lista de siglas, abreviaturas y herramientas metodológicas xii
Capítulo 1. Introducción 1
1.1. Contextualización 1
1.2. Problema de investigación 2
1.3. Objetivo general 2
1.4. Objetivos específicos 2
1.5. Alcances 3
1.6. Limitaciones 3
1.7. Justificación 3
Capítulo 2. Marco conceptual y estado del arte 5
2.1. Conceptos generales 5
2.1.1. Cómputo cuántico 5
2.1.2. Ingeniería de software 7
2.1.3. Ingeniería de software cuántico 8
2.1.4. Sistemas híbridos clásico-cuánticos 9
2.2. Panorama reciente de investigación en ingeniería de software cuántico 10
2.3. Formación en cómputo cuántico e ingeniería de software cuántico 10
2.4. Trabajos relacionados 12
Capítulo 3. Metodología 15
3.1. Fases de la investigación 15
3.1.1. Fase I: Análisis bibliométrico 17
3.1.2. Fase II: Revisión sistemática de la literatura 17
3.1.3. Fase III: Propuesta de marco referencial 18
3.2. Análisis bibliométrico 18
3.2.1. Fuentes de información y estrategia de búsqueda 18
3.2.2. Criterios de depuración y normalización 19
3.2.3. Tipo de análisis, herramientas y técnicas empleadas 21
3.2.4. Síntesis del proceso de análisis bibliométrico 23

3.3. Revisión sistemática de la literatura 23
3.3.1. Revisiones previas y pertinencia del estudio 24
3.3.2. Preguntas de investigación 24
3.3.3. Fuentes de información y estrategia de búsqueda 25
3.3.4. Criterios de inclusión, exclusión y notas metodológicas 26
3.3.5. Proceso de selección de artículos académicos 27
3.3.6. Evaluación de calidad y extracción de datos 27
3.3.7. Síntesis y análisis de la información 28
3.4. Elaboración de la versión inicial del marco referencial 29
3.4.1. Clasificación temática 29
3.4.2. Priorización de contenido 30
3.4.3. Elaboración de la propuesta inicial 31
3.4.4. Desarrollo de las versiones en español e inglés 31
3.5. Revisión y refinamiento 32
Capítulo 4. Resultados 34
4.1. Resultados del análisis bibliométrico 34
4.1.1. Corpus y alcance del análisis 34
4.1.2. Evolución temporal y productividad científica 34
4.1.3. Estructura temática y evolución del campo 36
4.1.4. Redes de colaboración 38
4.1.5. Aporte del análisis bibliométrico a la investigación 42
4.2. Resultados de la revisión sistemática de la literatura 42
4.2.1. Identificación, selección y clasificación temática 43
4.2.2. Metodologías y buenas prácticas 45
4.2.3. Propuestas de ciclo de vida 46
4.2.4. Calidad, verificación, validación y pruebas 47
4.2.5. Desarrollo de software en sistemas híbridos clásico-cuánticos 48
4.2.6. Qiskit y ecosistema tecnológico 50
4.2.7. Enseñanza y formación en ingeniería de software cuántico 51
4.2.8. Aporte de la revisión sistemática de la literatura a la investigación 52
4.3. Versión inicial del marco referencial 52
4.3.1. Propósito y delimitación del marco referencial 53
4.3.2. Estructura general del marco referencial 54

4.3.3. Área 1: Fundamentos 56
4.3.4. Área 2: Conocimientos técnicos especializados 57
4.3.5. Área 3: Conocimientos transversales y profesionales 60
4.3.6. Síntesis del aporte del marco referencial 62
4.4. Resultados de la revisión académica inicial 62
4.4.1. Alcance y desarrollo de la revisión académica inicial 63
4.4.2. Retroalimentación recibida por revisor 64
4.4.3. Oportunidades de mejora para una versión posterior del marco referencial 66
4.5. Discusión de los resultados 67
4.6. Amenazas a la validez 69
4.6.1. Amenazas internas 69
4.6.2. Amenazas externas 71
4.7. Productos obtenidos 72
4.8. Cumplimiento de los objetivos de la investigación 73
Capítulo 5. Conclusiones y trabajos futuros 75
5.1. Conclusiones 75
5.2. Trabajos futuros 76
Bibliografía 78
Anexos 86

Índice de figuras

Figura 1. Ruta metodológica general de la investigación. 16
Figura 2. Distribución temporal de documentos del corpus bibliométrico entre 2020 y el primer trimestre de 2025 35
Figura 3. Mapa de evolución temática del corpus bibliométrico durante el periodo 2020-primer trimestre de 2025 basado en documentos. 36
Figura 4. Red de coautoría de autores en el corpus bibliométrico durante el periodo 2022-2024 39
Figura 5. Red de citación entre instituciones en el corpus bibliométrico durante el periodo 2022-2024. 40
Figura 6. Red de citación entre países en el corpus bibliométrico durante el periodo 2022-2024 40
Figura 7. Diagrama PRISMA 2020 para la identificación, cribado y selección de estudios de la revisión sistemática de la literatura. 43
Figura 8. Distribución de los estudios clasificados por categoría temática de la revisión sistemática de la literatura. 45
Figura 9. Estructura general de la versión inicial del marco referencial. 55
Figura 10. Componentes del Área 1: Fundamentos en la versión inicial del marco referencial. 56
Figura 11. Componentes del Área 2: Conocimientos técnicos especializados en la versión inicial del marco referencial. 58
Figura 12. Componentes del Área 3: Conocimientos transversales y profesionales en la versión inicial del marco referencial. 60

Índice de tablas

Tabla 1. Trabajos relacionados y posicionamiento de esta investigación. 12
Tabla 2. Síntesis metodológica de la investigación. 16
Tabla 3. Conformación del corpus del análisis bibliométrico. 20
Tabla 4. Técnicas y configuración del análisis bibliométrico. 21
Tabla 5. Preguntas de investigación de la revisión sistemática de la literatura. 24
Tabla 6. Clústeres temáticos por periodo del análisis bibliométrico. 36
Tabla 7. Entidades destacadas en las redes bibliométricas. 41
Tabla 8. Distribución de los estudios clasificados por categoría temática de la revisión sistemática de la literatura. 44
Tabla 9. Seguimiento del contacto con especialistas para la revisión académica inicial. ... 63
Tabla 10. Síntesis del cumplimiento de los objetivos de la investigación. 74

Lista de siglas, abreviaturas y herramientas metodológicas

En esta lista se incluyen las siglas, abreviaturas y herramientas metodológicas utilizadas de forma recurrente en la tesis. Su propósito es facilitar la lectura del documento y evitar aclaraciones repetidas en el cuerpo del texto.

Elemento	**Significado o descripción**
AB	Análisis bibliométrico
CE	Criterios de exclusión
CI	Criterios de inclusión
CQ	Cómputo cuántico
IS	Ingeniería de software
ISQ	Ingeniería de software cuántico
NISQ	Cómputo cuántico ruidoso de escala intermedia
NM	Notas metodológicas
QA	Criterios de calidad
QSEAK	Quantum Software Engineering Areas of Knowledge
QSEAK_v0	Versión inicial de QSEAK
RQ	Preguntas de investigación
RSL	Revisión sistemática de la literatura
PRISMA	Guía para reportar revisiones sistemáticas y metaanálisis
SciMAT	Herramienta para análisis de mapeo científico y evolución temática
VOSviewer	Herramienta para construcción y visualización de redes bibliométricas
Scopus	Base de datos bibliográfica
Web of Science	Base de datos bibliográfica

Capítulo 1. Introducción

Este capítulo presenta el encuadre general de la investigación y delimita los elementos que orientan su desarrollo. En primer lugar, se ofrece una presentación del contexto, el enfoque y el producto integrador de la tesis. Posteriormente, se plantea el problema de investigación, se establecen el objetivo general y los objetivos específicos, y se precisan los alcances y limitaciones del estudio. Finalmente, se desarrolla la justificación de la investigación.

1.1. Contextualización

El cómputo cuántico (CQ) ha evolucionado desde sus primeras formulaciones teóricas hasta configurarse como un campo de investigación con implicaciones computacionales, tecnológicas y de ingeniería [1]. El CQ ha abierto nuevas posibilidades de procesamiento para abordar problemas que resultan difíciles de tratar mediante enfoques computacionales clásicos [2], [3]. Sin embargo, su desarrollo no sólo implica avances físicos, matemáticos o algorítmicos, sino también desafíos relacionados con la ingeniería de software (IS) [4], [5]. La construcción de software cuántico requiere considerar aspectos como diseño, integración con sistemas clásicos, pruebas, mantenimiento, documentación, calidad, reproducibilidad y formación especializada [4], [6], [7].

En este contexto, la ingeniería de software cuántico (ISQ) se perfila como un campo emergente orientado a estudiar métodos, procesos, herramientas y prácticas para el desarrollo de software cuántico y sistemas clásico-cuánticos (híbridos) [4], [8], [9]. Aunque la literatura reciente muestra aportes relevantes, estos se encuentran distribuidos entre enfoques técnicos, metodológicos, educativos y conceptuales, lo que refleja un campo todavía fragmentado en cuanto a la organización de sus conocimientos [5], [10], [11].

Esta investigación aborda dicha necesidad mediante un análisis descriptivo del panorama actual del CQ en las propuestas de ISQ. Para ello, se articula un análisis bibliométrico (AB), una revisión sistemática de la literatura (RSL) y la elaboración de una propuesta inicial de marco de fundamentos referenciales.

Como producto integrador de esta investigación, se propone *QSEAK: Quantum Software Engineering Areas of Knowledge*, cuya primera versión documentada corresponde a QSEAK_v0. Esta propuesta constituye una organización referencial de conocimientos orientada a la formación inicial en ISQ y fue sometida a una revisión académica inicial con especialistas externos.

La tesis se organiza en cinco capítulos. El primero presenta el problema de investigación, los objetivos, los alcances, las limitaciones y la justificación del estudio. El segundo desarrolla el marco conceptual y el estado del arte. El tercero describe la metodología

empleada. El cuarto presenta los resultados del AB, la RSL, QSEAK_v0 y la revisión académica inicial. Finalmente, el quinto capítulo expone las conclusiones y los trabajos futuros.

1.2. Problema de investigación

A pesar de los avances en CQ e ISQ, el conocimiento necesario para comprender la relación entre ambos campos permanece distribuido entre contribuciones que abordan de manera parcial fundamentos, procesos, herramientas, prácticas y aspectos formativos [4], [5], [8], [12], [13]. En este contexto, el dominio de *las propuestas de ISQ carece de un cuerpo de conocimiento unificado y consistente* que organice los principales elementos del CQ relevantes para su comprensión y desarrollo [10], [12].

Esta carencia dificulta identificar y relacionar dichos elementos desde una perspectiva de IS, así como utilizarlos como referencia para la formación de ingenieros de software interesados en el desarrollo de software cuántico. Por tanto, el problema no radica en la ausencia de aportes individuales, sino en la falta de una organización integrada que permita articular el conocimiento disponible [10], [12].

1.3. Objetivo general

Contribuir al establecimiento de un cuerpo de conocimiento unificado y consistente que sirva como recurso para la formación de ingenieros de software involucrados en el desarrollo de software cuántico, realizando un análisis descriptivo del estado actual de los principales elementos del CQ en las propuestas de ISQ, mediante la aplicación de métodos cuantitativos, estadísticos, estructurados y reproducibles.

1.4. Objetivos específicos

- Realizar un AB para la comprensión cuantitativa y objetiva del estado, desarrollo y dirección del panorama actual del CQ en las propuestas de ISQ.
- Realizar una RSL para proporcionar una base sólida, exhaustiva y confiable de evidencia que permita comprender el panorama actual del CQ en las propuestas de ISQ.
- Realizar un documento de propuesta de marco de fundamentos referenciales para la formación de ingenieros de software sobre el panorama actual del CQ en las propuestas de ISQ.

1.5. Alcances

- El AB comprende la redacción y difusión de los hallazgos obtenidos a partir de la producción científica correspondiente al periodo de 2020 al primer trimestre de 2025.
- La RSL incluye la redacción y difusión de un informe sustentado en literatura científica correspondiente al periodo de 2019 a 2025.
- La investigación considera la elaboración de un documento que presente una propuesta de marco de fundamentos referenciales, orientada a contribuir a la formación inicial en ISQ y sustentada principalmente en los hallazgos del AB y la RSL.
- La propuesta incorpora una revisión académica inicial con especialistas externos vinculados con ISQ o áreas afines, con el propósito de obtener retroalimentación e identificar oportunidades de mejora.

1.6. Limitaciones

- El contenido temático de la propuesta de marco de fundamentos referenciales comprende únicamente los aspectos identificados y documentados en la literatura científica revisada.
- La revisión académica inicial de la propuesta como recurso formativo quedó condicionada por la disponibilidad y participación de especialistas en ISQ o áreas afines que aceptaron proporcionar retroalimentación.
- La investigación se centra en describir el panorama analizado y organizar los conocimientos identificados, por lo que no contempla la formulación de estándares para la ISQ ni la validación experimental o curricular de la propuesta.

1.7. Justificación

El CQ es una tecnología emergente con el potencial de transformar áreas como la seguridad informática, la simulación de sistemas complejos y el desarrollo de inteligencia artificial [1]–[4], [6], [9], [14]. A nivel mundial, los avances en este campo han generado un interés significativo en su aplicación práctica [2], [3], pero también han expuesto desafíos relacionados con la integración de tecnologías cuánticas en la IS [4]–[9], [11].

En este contexto, la pertinencia de esta investigación radica en organizar y articular conocimientos relevantes de CQ e ISQ que actualmente se encuentran distribuidos en la literatura científica. Esta dispersión dificulta la comprensión integrada de los elementos que vinculan ambos campos y representa un desafío para la formación de ingenieros de

software interesados en aproximarse al desarrollo de software cuántico [6], [9], [10], [14]–[17].

Esta investigación busca aportar al cierre de esta brecha mediante un análisis descriptivo del panorama actual del CQ en las propuestas de ISQ. A partir de la identificación y descripción de los elementos más relevantes, se pretende facilitar el acceso al conocimiento y ofrecer un recurso formativo para ingenieros de software en formación [4], [5], [9], [10], [14], [18]–[20]. Asimismo, este aporte puede favorecer el desarrollo de nuevas líneas de investigación y el avance del campo en entornos académicos y profesionales, en concordancia con la necesidad de consolidar metodologías y referentes propios de la ISQ [9], [17]–[20].

La disponibilidad de una base estructurada de estos conocimientos también puede fortalecer la capacidad de las instituciones académicas para participar activamente en esta área emergente [4]–[6], [9], [10], [14], [20], [21]. A largo plazo, una formación más estructurada y una mejor articulación entre CQ e IS pueden contribuir a la incorporación de tecnologías cuánticas en proyectos y soluciones que integren componentes clásicos y cuánticos, con posibles aplicaciones en ámbitos como la salud, las finanzas y la simulación molecular [2]–[4], [9], [14].

Desde esta perspectiva, la investigación constituye una contribución inicial a la organización de conocimientos relevantes para la formación en ISQ, con un alcance acorde con el carácter emergente del campo y con las limitaciones establecidas para este estudio. El capítulo siguiente desarrolla los fundamentos conceptuales y el estado del arte que sustentan la investigación y permiten comprender la relación entre CQ, IS e ISQ.

Capítulo 2. Marco conceptual y estado del arte

Este capítulo desarrolla el sustento teórico y conceptual que enmarca la investigación, así como el análisis del estado del arte en torno al CQ, la IS y la ISQ. En primer lugar, se presentan los conceptos generales necesarios para delimitar el dominio de estudio. Posteriormente, se revisa el panorama reciente de investigación en ISQ y la dimensión formativa asociada con el campo. Finalmente, se describen los trabajos relacionados más cercanos a la aportación de este trabajo.

2.1. Conceptos generales

Para situar el marco teórico de esta investigación, se establece una base conceptual mínima en torno a cuatro nociones articuladoras: CQ, IS, ISQ y sistemas híbridos. Estos conceptos permiten delimitar el dominio de estudio y proporcionar los referentes necesarios para comprender el desarrollo de software cuántico desde una perspectiva de IS.

Los apartados siguientes desarrollan estas nociones de manera progresiva, partiendo de los fundamentos del CQ y de la base disciplinar de la IS, para posteriormente abordar la ISQ y el contexto de los sistemas híbridos.

2.1.1. Cómputo cuántico

El CQ puede entenderse como un paradigma de procesamiento de información que utiliza principios de la mecánica cuántica para representar, transformar y medir información de manera distinta al modelo clásico. Mientras que la computación clásica opera con bits cuyos valores se representan como 0 o 1, el CQ utiliza el qubit como unidad básica de información, cuyo estado no se restringe exclusivamente a uno de estos dos valores. Esta diferencia no implica sólo un cambio en la representación de los datos, sino también una manera distinta de formular operaciones, diseñar algoritmos e interpretar resultados [22], [23].

El qubit puede describirse como un sistema capaz de encontrarse en los estados base $|0\rangle$ y $|1\rangle$ o en una combinación lineal de ambos, por lo que su estado puede expresarse como $|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$. Los valores α y β, denominados amplitudes de probabilidad, están asociados respectivamente a cada estado base. Estas amplitudes no representan directamente probabilidades, pero a partir de sus magnitudes al cuadrado puede determinarse qué tan probable es obtener cada resultado al medir el qubit. En particular, la probabilidad de obtener 0 es $|\alpha|^2$ y la de obtener 1 es $|\beta|^2$, por lo que se cumple la condición de normalización $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$. La posibilidad de representar el estado del qubit como una combinación lineal de los estados base se conoce como *superposición*. Sin embargo, las amplitudes que describen dicho estado no son directamente observables

mediante una sola medición. Al medir el sistema en la base computacional, se obtiene un resultado clásico, 0 o 1, de acuerdo con las probabilidades asociadas a su estado. Por ello, su comportamiento probabilístico se estima a partir de distribuciones de resultados obtenidas mediante múltiples ejecuciones [22], [23].

Además de la *superposición*, el *entrelazamiento* constituye una de las propiedades distintivas del CQ. Este fenómeno ocurre cuando dos o más qubits no pueden describirse de manera independiente y pasan a formar parte de un mismo estado conjunto. Puede entenderse como una situación en la que los qubits quedan relacionados entre sí, de modo que para describir correctamente el sistema es necesario considerar al conjunto y no a cada qubit por separado. Al medirlos, sus resultados pueden presentar correlaciones determinadas por ese estado compartido, aun cuando cada qubit sea medido individualmente. En términos computacionales, el *entrelazamiento* permite representar correlaciones que no tienen un equivalente directo en la descripción clásica tradicional.

Por su parte, la *interferencia* puede entenderse de forma semejante a lo que sucede cuando dos ondas se encuentran. Dependiendo de cómo coincidan, pueden reforzarse o reducirse hasta llegar, en determinadas condiciones, a cancelarse. En un sistema cuántico ocurre algo semejante con las amplitudes de probabilidad asociadas con las distintas posibilidades del sistema: *algunas pueden reforzarse y otras cancelarse*. Estas propiedades pueden aprovecharse durante la ejecución de algoritmos cuánticos: el *entrelazamiento* permite establecer correlaciones entre los qubits, mientras que la *interferencia* permite modificar la contribución relativa de determinadas amplitudes de probabilidad y favorecer ciertos resultados al realizar la medición final [3], [12], [22].

Un algoritmo cuántico puede entenderse como una secuencia estructurada de transformaciones aplicadas a un estado inicial, seguida generalmente de un proceso de medición. En CQ, estas operaciones suelen representarse mediante compuertas cuánticas organizadas en circuitos. Cada compuerta transforma el estado de uno o más qubits y, en el modelo ideal, se describe mediante una operación *reversible* y *unitaria*. La representación mediante circuitos resulta relevante porque permite expresar de forma gráfica y formal la evolución del sistema, así como analizar la relación entre las operaciones, los qubits, las mediciones y los resultados [22], [23].

El potencial del CQ no debe interpretarse como una superioridad general sobre la computación clásica para cualquier tipo de problema. Su relevancia se asocia con clases específicas de problemas en las que ciertos algoritmos cuánticos pueden ofrecer ventajas teóricas o prácticas, como ocurre en *factorización, búsqueda, simulación de sistemas físicos* u *optimización*. En este sentido, el CQ no sustituye de manera directa a la computación clásica, sino que amplía el conjunto de modelos y recursos disponibles para abordar problemas específicos [3], [23].

En la etapa actual del desarrollo tecnológico, gran parte de los dispositivos cuánticos disponibles se ubican en contextos de cómputo cuántico ruidoso de escala intermedia

(NISQ, por sus siglas en inglés), caracterizados por hardware ruidoso, recursos limitados y ausencia de tolerancia a fallos plenamente consolidada. Entre los factores que condicionan la implementación de circuitos y la calidad de los resultados obtenidos se encuentra la *decoherencia*, entendida como la pérdida progresiva de las propiedades cuánticas de un sistema debido, entre otras causas, a su interacción con el entorno. También influyen la *fidelidad de las compuertas*, la *conectividad limitada*, la *variabilidad de los dispositivos* y los *errores de ejecución*. Por ello, el CQ actual debe comprenderse no sólo desde sus fundamentos teóricos, sino también desde las restricciones prácticas que impone la tecnología disponible [1], [24], [25].

Para esta investigación, los conceptos y restricciones descritos proporcionan la base necesaria para comprender posteriormente los problemas que surgen al desarrollar software en el dominio cuántico y analizar su relación con la IS.

2.1.2. Ingeniería de software

La IS puede entenderse como una disciplina orientada al desarrollo, operación, mantenimiento y evolución sistemática de sistemas de software. Su propósito no se limita a la programación, sino que abarca procesos, métodos, prácticas, herramientas y criterios de calidad necesarios para construir software de manera organizada, confiable y sostenible. Desde esta perspectiva, el software no se concibe únicamente como código fuente, sino como un producto técnico que requiere análisis, diseño, documentación, verificación, gestión y mejora continua a lo largo de su ciclo de vida [26], [27].

Uno de los aportes centrales de la IS es comprender el desarrollo de software como un proceso estructurado. Esto implica organizar actividades relacionadas con la identificación de necesidades, la *especificación de requerimientos*, el *diseño*, la *implementación*, las *pruebas*, el *despliegue*, el *mantenimiento* y la *evolución del sistema*. Dichas actividades pueden estructurarse mediante distintos modelos de proceso, de acuerdo con el tipo de proyecto, el contexto organizacional y las características del sistema desarrollado [26], [27].

La IS también proporciona principios para enfrentar la complejidad del software, entre ellos la *abstracción*, la *modularidad*, la *separación de responsabilidades*, la *trazabilidad*, la *reusabilidad*, la *verificabilidad* y la *mantenibilidad*. Estos principios permiten organizar sistemas complejos en componentes comprensibles, facilitar su análisis, reducir errores, apoyar su evolución y justificar decisiones de diseño. En este sentido, la IS no sólo busca que un *programa funcione*, sino que pueda ser *comprendido, probado, modificado, integrado* y *mantenido* bajo condiciones cambiantes [26], [27].

De manera complementaria, la IS se apoya en referentes normativos y modelos de calidad que permiten estructurar procesos, productos y criterios de evaluación del software. Estándares como ISO/IEC/IEEE 12207, asociado con los procesos del ciclo de vida del

software, e ISO/IEC 25010, vinculado con modelos de calidad del producto de software, ofrecen referentes para analizar de manera sistemática distintas dimensiones del desarrollo y evaluación de sistemas de software [27].

Para esta investigación, la IS proporciona la base disciplinar desde la cual se analiza posteriormente el desarrollo de software cuántico y su articulación con las particularidades del dominio cuántico.

2.1.3. Ingeniería de software cuántico

La ISQ puede entenderse como una disciplina emergente orientada a adaptar y extender principios, procesos, métodos y herramientas de la IS al desarrollo de soluciones de software cuántico e híbrido. Su surgimiento responde a la necesidad de abordar el software cuántico no sólo como programación de circuitos, sino como una actividad de ingeniería que comprende distintas etapas y preocupaciones asociadas con su desarrollo, evaluación, integración, operación y evolución [4], [9], [28], [29].

Esta distinción resulta relevante porque el desarrollo de software cuántico presenta condiciones que no se explican por completo desde la IS tradicional ni desde el CQ entendido únicamente como fundamento físico o computacional. La naturaleza probabilística de la medición, la dificultad para observar directamente los estados cuánticos sin alterarlos, la presencia de ruido, la dependencia del hardware y las restricciones de los dispositivos actuales modifican la forma en que se diseñan, ejecutan, prueban e interpretan los programas cuánticos [7], [8].

Desde esta perspectiva, la ISQ no sustituye a la IS, sino que parte de sus principios y prácticas para reconsiderarlos frente a las particularidades del dominio cuántico. Esta adaptación implica atender problemas específicos como la validación probabilística, la reproducibilidad de resultados, la selección de plataformas de ejecución y la evolución de soluciones condicionadas por hardware todavía inmaduro [4], [7], [30], [31].

La ISQ también se relaciona estrechamente con el desarrollo de software híbrido, ya que muchas soluciones actuales combinan componentes de ambos paradigmas dentro de una misma arquitectura [5], [11], [15]. Esta condición amplía el análisis hacia aspectos de integración, interoperabilidad, orquestación, despliegue y operación, los cuales se desarrollan con mayor detalle en el apartado siguiente.

Para esta investigación, la ISQ constituye el punto de convergencia entre el dominio tecnológico del CQ y la base disciplinar de la IS, y proporciona el marco conceptual desde el cual se analiza el desarrollo de software cuántico como una actividad de ingeniería.

2.1.4. Sistemas híbridos clásico-cuánticos

Los sistemas híbridos clásico-cuánticos pueden entenderse como soluciones de software en las que componentes clásicos y cuánticos interactúan dentro de un mismo flujo computacional. En estos sistemas, el componente cuántico no suele operar de manera aislada, sino como parte de una arquitectura más amplia en la que intervienen programas clásicos, simuladores, servicios en la nube, plataformas de ejecución cuántica, mecanismos de orquestación y procesos de análisis de resultados. Esta configuración resulta especialmente relevante en la etapa actual del CQ, donde las restricciones del hardware favorecen esquemas de ejecución combinados [7], [32].

En estas soluciones, los componentes clásicos suelen encargarse de tareas como la preparación de datos, la formulación del problema, el control del flujo de ejecución, la optimización de parámetros, la gestión de iteraciones y el posprocesamiento de resultados. Los componentes cuánticos, por su parte, se incorporan para ejecutar circuitos, subrutinas o procedimientos específicos que buscan aprovechar propiedades del modelo cuántico en partes concretas del problema. Esta distribución requiere definir con claridad las responsabilidades de cada entorno y la forma en que ambos interactúan [15], [21].

Una de las decisiones centrales consiste en determinar la partición clásico-cuántica del problema. Antes de implementar una solución, es necesario analizar qué parte puede resolverse de manera clásica, qué parte podría beneficiarse de recursos cuánticos, qué datos deben codificarse, qué restricciones impone la plataforma disponible y cómo se evaluará el resultado obtenido. Estas decisiones influyen en el diseño de la arquitectura, la profundidad y complejidad de los circuitos, la comunicación entre componentes, la reproducibilidad de la ejecución y la comparación frente a soluciones clásicas [13], [33].

Desde una perspectiva arquitectónica y operativa, estos sistemas requieren coordinar artefactos heterogéneos y dependencias tecnológicas cambiantes. Una solución puede involucrar código clásico, circuitos cuánticos, bibliotecas de simulación, servicios externos, configuraciones de ejecución y flujos de despliegue. Esta heterogeneidad plantea desafíos de interoperabilidad, trazabilidad, mantenimiento, control de versiones y dependencia de proveedores. Además, la ejecución en dispositivos cuánticos reales introduce variabilidad asociada con ruido, calibración, conectividad, disponibilidad y errores de ejecución, por lo que la compilación, el despliegue y la operación deben considerar las condiciones del hardware disponible [13], [25], [34].

Para esta investigación, los sistemas híbridos representan el contexto práctico en el que convergen los componentes clásicos y cuánticos de una solución de software, y permiten comprender cómo las decisiones de arquitectura, integración y ejecución están condicionadas por las características del entorno cuántico.

2.2. Panorama reciente de investigación en ingeniería de software cuántico

La investigación reciente en ISQ muestra un campo en desarrollo, con avances conceptuales, metodológicos y técnicos, aunque con distintos grados de formalización entre sus líneas de trabajo. En la literatura destacan estudios orientados a delimitar el campo, caracterizar sus desafíos, analizar su evolución y sistematizar prácticas relacionadas con procesos, herramientas, calidad, pruebas, mantenimiento, integración híbrida y formación especializada [4], [8], [9], [28].

Una primera línea de atención se concentra en manifiestos, revisiones, estudios de mapeo y análisis de tendencias orientados a caracterizar y sistematizar el desarrollo de la ISQ como área de investigación. Estos trabajos muestran una base conceptual en expansión, pero también evidencian dispersión terminológica, diferencias en el nivel de formalización de las propuestas y una articulación todavía limitada entre resultados técnicos, metodológicos y formativos [5], [11].

Otra línea relevante aborda modelos de ciclo de vida, metodologías, arquitectura, integración y buenas prácticas para el desarrollo de software cuántico e híbrido. En este ámbito se estudian problemas como la partición clásico-cuántica, la selección de plataformas de ejecución, la dependencia del hardware, la interoperabilidad, la reusabilidad, la variabilidad tecnológica y la operación de soluciones que combinan componentes clásicos, circuitos cuánticos, simuladores y servicios en la nube [7], [13], [15], [32].

De manera complementaria, la calidad, la verificación, la validación, las pruebas, la reproducibilidad y la formación especializada también forman parte de las líneas abordadas en la literatura reciente. Su presencia muestra que el desarrollo de la ISQ no depende únicamente de nuevos algoritmos o herramientas, sino también de prácticas evaluables, criterios de confiabilidad y propuestas formativas acordes con las necesidades de un campo todavía en desarrollo. En términos generales, el panorama revisado muestra una disciplina activa, pero heterogénea, con distintos niveles de desarrollo entre sus dimensiones conceptuales, metodológicas, técnicas y formativas [5], [11], [35].

2.3. Formación en cómputo cuántico e ingeniería de software cuántico

La formación en CQ ha adquirido mayor relevancia conforme el campo se ha vinculado con plataformas de programación, simuladores, servicios en la nube y herramientas accesibles para estudiantes, investigadores y desarrolladores. Este crecimiento ha favorecido la aparición de cursos, laboratorios, tutoriales, entornos interactivos y experiencias prácticas orientadas a enseñar fundamentos cuánticos, algoritmos, circuitos y programación cuántica. Sin embargo, la disponibilidad creciente de estos recursos no

implica, por sí misma, la consolidación de trayectorias formativas específicas en ISQ [36], [37].

En términos generales, la formación en CQ suele concentrarse en contenidos como qubits, *superposición*, *entrelazamiento*, *medición*, *circuitos*, *compuertas*, *algoritmos introductorios* y *uso de plataformas de desarrollo*. Estos conocimientos constituyen una base necesaria para aproximarse al software cuántico, pero resultan insuficientes cuando el propósito formativo se orienta hacia perfiles vinculados con el desarrollo de software cuántico o híbrido desde una perspectiva de IS [35], [38].

Esta diferencia permite distinguir entre aprender CQ, programar circuitos cuánticos y formarse en ISQ. Aprender CQ supone comprender los fundamentos conceptuales, matemáticos y computacionales del paradigma cuántico. *Programar circuitos cuánticos implica utilizar lenguajes, bibliotecas, simuladores o plataformas para implementar procedimientos cuánticos*. En cambio, *formarse en ISQ requiere articular esos conocimientos con principios, procesos y prácticas de IS*, de modo que el estudiante pueda razonar sobre el ciclo de vida, la arquitectura, la calidad, las pruebas, la integración clásico-cuántica, la reproducibilidad, el mantenimiento, la evolución y la operación de las soluciones desarrolladas [38], [39].

Las propuestas educativas recientes muestran esfuerzos por reducir la barrera de entrada al CQ y a la programación cuántica mediante cursos introductorios, laboratorios guiados, actividades de programación, entornos reproducibles, cuadernos interactivos y ejercicios de ejecución en simuladores o hardware real. Asimismo, las experiencias de diseño de cursos muestran que la formación en CQ requiere decisiones pedagógicas explícitas sobre profundidad conceptual, selección de herramientas, tipo de ejercicios y progresión del aprendizaje [40]. Estas iniciativas favorecen experiencias prácticas de implementación, depuración, ejecución y análisis de resultados. No obstante, una parte importante de ellas continúa orientada a la enseñanza general de CQ o programación cuántica, más que a una formación específica en ISQ [36], [41]–[43].

A partir de esta evidencia, se reconoce una brecha formativa específica en la articulación entre los conocimientos del dominio cuántico y las dimensiones propias de la IS. Aunque la literatura muestra avances en recursos educativos y experiencias prácticas relacionadas con CQ y programación cuántica, la formación específicamente orientada a ISQ continúa siendo limitada y dispersa. Esta brecha evidencia la necesidad de fortalecer la articulación entre los contenidos de CQ y las dimensiones propias de la IS dentro de la formación en ISQ.

2.4. Trabajos relacionados

Después de presentar el panorama reciente de investigación en ISQ y la dimensión formativa asociada con el campo, esta sección examina los trabajos más cercanos a la aportación de esta investigación y delimita sus principales diferencias de alcance. Los antecedentes revisados abordan la ISQ desde perspectivas conceptuales, técnicas y educativas, por lo que su análisis permite situar la propuesta desarrollada en esta tesis dentro del conocimiento existente.

Una primera línea de trabajos ha contribuido a establecer la necesidad de una disciplina orientada al desarrollo sistemático de software cuántico. En esta dirección se encuentran manifiestos, propuestas conceptuales y rutas de consolidación del campo que destacan la importancia de adaptar principios de la IS al dominio del CQ, aprovechando la experiencia acumulada en la IS tradicional para enfrentar los retos del nuevo paradigma [8], [9], [19], [28], [29], [31]. De manera complementaria, revisiones y estudios de mapeo recientes han identificado desafíos asociados con metodologías, ciclo de vida, pruebas, calidad, mantenimiento, arquitectura, herramientas, integración híbrida y colaboración interdisciplinaria [5], [7], [11]. Estos trabajos ofrecen una lectura amplia del campo, aunque suelen concentrarse en su delimitación, caracterización o evolución.

Otra línea relevante se orienta hacia dimensiones técnicas y formativas específicas del desarrollo de software cuántico. Los trabajos sobre ciclo de vida, arquitectura de software y retos desde la perspectiva de desarrolladores muestran la necesidad de considerar decisiones de diseño, integración, despliegue, operación, pruebas, evaluación y mantenimiento [13], [15], [32], [33].

En paralelo, los estudios sobre educación y formación destacan la preparación de perfiles capaces de articular fundamentos cuánticos, prácticas de desarrollo, competencias técnicas y criterios de calidad asociados con la ISQ [35], [38], [40]. Estas contribuciones evidencian que el campo requiere integrar conocimientos conceptuales, técnicos y formativos, aunque generalmente los abordan desde alcances particulares.

La Tabla 1 sintetiza las principales líneas de trabajos relacionados, su enfoque y la diferencia de alcance respecto de esta investigación.

Tabla 1. Trabajos relacionados y posicionamiento de esta investigación.

Línea o trabajo relacionado	**Referencias**	**Enfoque principal**	**Diferencia con esta investigación**
Manifiestos, propuestas conceptuales y rutas de consolidación del campo	[8], [9], [19], [28], [29], [31]	Contribuyen a delimitar la ISQ como disciplina emergente y proponen principios, retos y rutas de consolidación.	Aportan orientación conceptual y estratégica para organizar el campo, pero no desarrollan una estructura formativa de conocimientos.

Revisiones, estudios de mapeo y panoramas recientes	[5], [7], [11]	Sintetizan o caracterizan literatura, tendencias, retos y brechas del campo.	Mapean o discuten el estado de la ISQ, sin articular en un mismo proceso un AB, una RSL y una propuesta de marco referencial.
Trabajos técnicos sobre ciclo de vida, arquitectura y desarrollo híbrido	[13], [15], [32], [33]	Abordan procesos, arquitectura, integración, operación y retos del desarrollo cuántico o híbrido.	Profundizan en dimensiones técnicas específicas, pero no proponen una organización formativa amplia de conocimientos.
Trabajos educativos y de competencias	[35], [38], [40]	Analizan formación, competencias, cursos, fuerza laboral y brechas educativas.	Respaldan la necesidad de formación especializada, aunque no integran esa necesidad con una estructura referencial amplia para ISQ.
Taxonomías y fundamentos de CQ vinculados con IS	[12]	Proponen una visión taxonómica de fundamentos de CQ y conceptos vinculados con ISQ.	Constituyen uno de los antecedentes más cercanos, pero se concentran principalmente en fundamentos y conceptos base.
Esta investigación	—	Integra AB, RSL y una propuesta inicial de marco de fundamentos referenciales.	Articula evidencia bibliométrica, revisión sistemática y organización referencial para la formación inicial en ISQ.

Entre los antecedentes identificados, destaca un trabajo [12] orientado a organizar los fundamentos de CQ y su relación con la IS. Este antecedente resulta especialmente cercano al propósito de esta investigación por su interés en estructurar conceptos que permitan aproximar el dominio cuántico a perfiles de ciencias computacionales. Asimismo, propone una visión taxonómica de conceptos fundamentales del CQ y de conceptos derivados vinculados con la ISQ, con el propósito de ofrecer una base de comprensión para estudiantes y docentes que no necesariamente provienen de una formación especializada en física.

La cercanía entre ambos trabajos se observa en que reconocen la importancia de los fundamentos de CQ para comprender la ISQ y parten de la necesidad de organizar conocimientos en un campo interdisciplinario. La diferencia se encuentra en el alcance, el proceso metodológico y el producto resultante. Mientras dicho antecedente se concentra principalmente en una taxonomía de fundamentos cuánticos y conceptos asociados con software cuántico, esta investigación articula una caracterización bibliométrica, una RSL y una propuesta de marco de fundamentos referenciales orientada a la formación inicial en ISQ. Desde esta perspectiva, la investigación amplía el foco hacia fundamentos

matemáticos, computacionales, de IS y de CQ, así como hacia conocimientos técnicos especializados y dimensiones transversales y profesionales.

A partir de los trabajos revisados, la aportación de esta investigación se sitúa como una integración complementaria de evidencia bibliométrica, revisión sistemática y organización referencial de conocimientos para la formación inicial en ISQ. Dentro del alcance de la literatura revisada, no se identificó una propuesta equivalente que articule estos tres elementos dentro de un mismo proceso. El capítulo siguiente describe la metodología empleada para desarrollar esta propuesta, mientras que QSEAK_v0 se presenta posteriormente como su primera versión documentada.

Capítulo 3. Metodología

Este capítulo presenta la metodología empleada en la investigación, desde la caracterización bibliométrica del campo hasta la elaboración del QSEAK_v0 y su revisión académica inicial. En primer lugar, se expone la ruta metodológica general. Posteriormente, se detallan los procedimientos correspondientes al AB, la RSL, la construcción de la versión inicial del marco y la revisión académica inicial.

3.1. Fases de la investigación

La investigación se desarrolló mediante una ruta metodológica organizada en tres fases principales: AB, RSL y elaboración de la propuesta de marco de fundamentos referenciales. Estas fases se articularon de manera progresiva para avanzar desde una caracterización general del campo hacia una revisión especializada de la literatura y, posteriormente, hacia la construcción de una propuesta orientada a la formación inicial en ISQ.

El AB proporcionó una caracterización contextual del campo, la RSL permitió profundizar en la evidencia documental especializada y la tercera fase integró los insumos previos en la construcción del QSEAK_v0. Como parte de esta última fase, también se realizó una revisión académica inicial con especialistas externos, concebida como un ejercicio de contraste preliminar y no como una validación definitiva.

Antes de las tres fases principales, se realizó una etapa exploratoria inicial orientada a reconocer el estado general del campo y delimitar el problema de investigación. De esta etapa se derivó un artículo académico que funciona como antecedente documental del estudio y se integra como Anexo A.

La Figura 1 presenta de manera sintética la relación entre las tres fases de la investigación.



Figura 1. Ruta metodológica general de la investigación.

La Tabla 2 complementa esta representación al sintetizar los insumos utilizados, los procesos desarrollados, los productos generados y el uso posterior de cada resultado dentro de la investigación.

Tabla 2. Síntesis metodológica de la investigación.

Fase	**Insumo principal**	**Proceso metodológico**	**Producto generado**	**Uso posterior**
Fase I: AB	Registros bibliográficos sobre CQ e ISQ	Recuperación, depuración, normalización y AB del corpus.	Diagnóstico bibliométrico del campo: tendencias, estructura temática y redes.	Delimitar la RSL y orientar líneas de análisis especializado.

Fase II: RSL	Estudios seleccionados mediante el protocolo de revisión	Búsqueda, selección, evaluación de calidad, extracción de datos y síntesis temática.	Base documental especializada sobre enfoques, propuestas, herramientas, desafíos y elementos formativos de la ISQ.	Aportar insumos técnicos y temáticos para la elaboración del marco referencial.
Fase III: Propuesta de Marco Referencial	Resultados del AB y la RSL, referentes sobre CQ, IS e ISQ	Clasificación temática, priorización de contenidos, organización referencial y revisión académica inicial.	QSEAK_v0 como versión inicial del marco de fundamentos referenciales, con observaciones para su refinamiento.	Constituir el producto central de la tesis y orientar versiones posteriores del marco.

3.1.1. Fase I: Análisis bibliométrico

La primera fase de la investigación correspondió al AB. A partir de un corpus bibliográfico previamente depurado y normalizado, se analizaron patrones generales de producción científica, evolución temática y redes de colaboración relacionados con el CQ y las propuestas de ISQ.

El alcance de esta fase fue panorámico. Su propósito no fue examinar en profundidad el contenido técnico de cada estudio, sino identificar tendencias generales, concentraciones temáticas y relaciones entre actores y conceptos dentro del campo. Los resultados obtenidos se utilizaron posteriormente para orientar la delimitación temática de la RSL.

3.1.2. Fase II: Revisión sistemática de la literatura

En la segunda fase se desarrolló la RSL, orientada a examinar estudios relacionados con ISQ para identificar enfoques, propuestas, herramientas, desafíos, prácticas técnicas y elementos formativos documentados en la literatura especializada.

Su alcance fue especializado y se orientó a analizar evidencia relevante para las preguntas de investigación (RQ) definidas en la revisión. Los hallazgos obtenidos se utilizaron posteriormente como insumo documental para la elaboración del QSEAK_v0.

3.1.3. Fase III: Propuesta de marco referencial

La tercera fase se orientó a la elaboración del QSEAK_v0 como primera versión documentada del marco de fundamentos referenciales QSEAK. Esta fase integró los resultados del AB, los hallazgos de la RSL y referentes teóricos y técnicos sobre CQ, IS e ISQ, con el propósito de organizar conocimientos relevantes para la formación inicial en ISQ.

A partir de estos insumos se construyó una propuesta que posteriormente fue sometida a una revisión académica inicial con especialistas externos. El procedimiento de elaboración se desarrolla en la sección 3.4, mientras que la revisión académica inicial se describe en la sección 3.5. La estructura y el aporte del QSEAK_v0 se presentan como resultados en el Capítulo 4.

3.2. Análisis bibliométrico

Esta sección documenta el procedimiento seguido para el AB, incluyendo las decisiones operativas relacionadas con la recuperación, depuración, normalización y análisis del corpus bibliográfico. Los estudios bibliométricos permiten examinar la estructura intelectual, social y temática de un área de investigación, así como reconocer patrones de productividad, colaboración y evolución científica [44]. Con base en este enfoque, el corpus se examinó desde una perspectiva cuantitativa y estructural.

El procedimiento se organiza en cuatro momentos. En primer lugar, se presentan las fuentes de información y la estrategia de búsqueda empleada para recuperar los registros. En segundo lugar, se describen los criterios aplicados para depurar y normalizar el corpus. Posteriormente, se especifican las herramientas y técnicas utilizadas para analizar la producción científica, la evolución temática y las redes bibliométricas. Finalmente, se sintetiza el proceso desarrollado. Los resultados obtenidos se presentan en el Capítulo 4.

3.2.1. Fuentes de información y estrategia de búsqueda

La recuperación de información para el AB se realizó en las bases de datos Scopus y Web of Science. Estas fuentes se seleccionaron por su cobertura multidisciplinaria, calidad de indexación y disponibilidad de metadatos bibliográficos necesarios para analizar producción científica, autores, instituciones, países, fuentes de publicación, palabras clave y relaciones bibliográficas [45]–[47]. Su uso combinado permitió ampliar la cobertura del corpus y reducir la dependencia de una única fuente de información.

La búsqueda se efectuó el 25 de marzo de 2025 y se delimitó al periodo comprendido entre 2020 y el primer trimestre de 2025. Esta delimitación temporal respondió al interés de analizar la producción científica reciente asociada con CQ e ISQ, en un intervalo en el que

el software cuántico, las herramientas de programación, los sistemas híbridos y las propuestas de ISQ adquirieron mayor presencia en la literatura especializada.

La estrategia de búsqueda se construyó a partir de dos bloques conceptuales. El primero reunió términos asociados con desarrollo, diseño, arquitectura, ciclo de vida, metodologías y pruebas de software cuántico. El segundo incorporó términos relacionados con software cuántico, programación cuántica, sistemas híbridos, entornos de desarrollo y herramientas. La cadena general de búsqueda utilizada fue la siguiente:

(("quantum software engineering" OR "quantum software development" OR "quantum software lifecycle" OR "quantum software methodologies" OR "quantum software architecture" OR "quantum software design" OR "quantum software testing") AND ("quantum software" OR "quantum programming" OR "quantum hybrid systems" OR "quantum software frameworks" OR "quantum software tools"))

El diseño de la cadena buscó equilibrar especificidad y amplitud mediante la combinación de expresiones directamente vinculadas con prácticas y procesos de ISQ y términos más amplios relacionados con el ecosistema de software cuántico. De esta forma, la búsqueda no se restringió a documentos que utilizaran explícitamente la expresión "*quantum software engineering*", sino que también consideró trabajos relacionados con el desarrollo de software cuántico.

La cadena se ejecutó en Scopus mediante el campo TITLE-ABS-KEY y en Web of Science mediante el campo TS. Los resultados se restringieron al idioma inglés. Los metadatos recuperados incluyeron título, resumen, palabras clave, autores, afiliaciones, fuente de publicación y referencias citadas. Posteriormente, los registros se exportaron en formatos compatibles con las herramientas empleadas en el AB: RIS para SciMAT y CSV para VOSviewer.

Los registros recuperados mediante esta estrategia conformaron el conjunto inicial del AB y fueron sometidos posteriormente al proceso de depuración, revisión de pertinencia y normalización de metadatos descrito en el apartado siguiente.

3.2.2. Criterios de depuración y normalización

Una vez recuperados los registros bibliográficos, se realizó un proceso de depuración y normalización con el propósito de conformar un corpus consistente para el AB. Esta etapa permitió reducir duplicidades, verificar la pertinencia temática de los documentos y disminuir inconsistencias en los metadatos antes de aplicar las técnicas bibliométricas.

La búsqueda inicial recuperó 659 registros: 519 provenientes de Scopus y 140 de Web of Science. En primer lugar, se eliminaron 130 documentos duplicados mediante la comparación de metadatos como título, DOI y autores, conservando la versión más completa de cada registro. Como resultado, se obtuvieron 529 documentos preliminares.

Posteriormente, se realizó una revisión de pertinencia temática. En esta etapa se examinaron los títulos para excluir documentos que no presentaban una relación suficiente con CQ, software cuántico o propuestas de ISQ, lo que redujo el corpus de 529 a 395 documentos. En los casos ambiguos, se revisaron los resúmenes para confirmar su relación con el campo de interés. Esta segunda revisión permitió excluir casos marginales y consolidar un corpus final de 385 documentos, compuesto por 377 registros presentes en Scopus y ocho registros únicos procedentes de Web of Science.

La Tabla 3 sintetiza el proceso de conformación del corpus utilizado en el AB.

Tabla 3. Conformación del corpus del análisis bibliométrico.

Etapa de conformación del corpus	**Cantidad**
Registros recuperados en Scopus	519
Registros recuperados en Web of Science	140
Total de registros iniciales	659
Registros duplicados eliminados	130
Registros tras eliminar duplicados	529
Registros conservados tras revisión de pertinencia por título	395
Corpus final tras revisión de resúmenes	385
Registros del corpus final presentes en Scopus	377
Registros únicos del corpus final procedentes de Web of Science	8

Además de la depuración documental, se realizó la normalización de autores con el propósito de unificar variantes de escritura, abreviaturas, diferencias en iniciales y formas alternativas de un mismo nombre. Para ello, se priorizó la variante asociada con el mayor número de publicaciones y, en caso de coincidencias, se conservó la forma más estandarizada. Como resultado de este proceso, el conjunto de autores se redujo de 1,378 a 1,057.

También se depuraron y normalizaron las palabras clave. El conjunto inicial estuvo compuesto por 2,983 términos, que se redujeron a 2,061 después de una primera limpieza. Posteriormente, se conservaron los términos con presencia en al menos el 2.5 % de los documentos relevantes, equivalente a 10 o más documentos dentro del periodo analizado. Este criterio permitió generar 61 agrupaciones iniciales de palabras clave, posteriormente consolidadas en 57 mediante la fusión de sinónimos, variantes terminológicas y expresiones equivalentes.

Este procedimiento permitió conformar una base documental consistente para los análisis posteriores, reduciendo el efecto de duplicidades, variantes en los nombres de autor y dispersión terminológica sobre la interpretación de los resultados bibliométricos.

3.2.3. Tipo de análisis, herramientas y técnicas empleadas

Una vez conformado el corpus bibliométrico, el AB se desarrolló mediante dos enfoques complementarios: análisis de desempeño y mapeo científico. El primero permitió examinar indicadores de productividad e impacto, como el número de publicaciones, la distribución temporal de documentos, las citas y el índice h. El segundo se orientó a representar la estructura temática y colaborativa del campo mediante relaciones bibliométricas.

Para el análisis temático y evolutivo se utilizó SciMAT, herramienta orientada al mapeo científico y al estudio longitudinal de campos de investigación [48]. Mediante esta herramienta se construyeron redes de coocurrencia de palabras clave y se generaron diagramas estratégicos, mapas de evolución y mapas de solapamiento para los periodos establecidos en el AB.

De manera complementaria, se utilizó VOSviewer para el análisis estructural y de colaboración [49]. Esta herramienta permitió generar redes de coautoría entre autores y redes de citación entre instituciones y países, con el propósito de examinar patrones de colaboración, participación institucional y distribución geográfica de la producción científica relacionada con la ISQ.

La Tabla 4 sintetiza los enfoques, técnicas y configuraciones metodológicas aplicados durante el AB.

Tabla 4. Técnicas y configuración del análisis bibliométrico.

Herramienta o enfoque	**Propósito analítico**	**Configuración metodológica aplicada**
Análisis de desempeño	Productividad e impacto científico	Revisión de indicadores descriptivos: número de publicaciones, distribución temporal de documentos, suma de citas e índice h.
SciMAT	Análisis temático y evolutivo	Unidad de análisis basada en palabras; uso de palabras de autor y palabras de fuente; exclusión de palabras clave añadidas; periodos de análisis anuales entre 2020 y 2024, más el primer trimestre de 2025; matriz de coocurrencia e índice de equivalencia; generación de mapas estratégicos, de evolución y de solapamiento.

SciMAT	Agrupamiento y valoración de clústeres	Frecuencia mínima de 1; fuerza mínima de enlace de 1; algoritmo Simple Centers; tamaño de clúster entre 3 y 12 términos; uso de mapeo principal y mapeo secundario como estrategias de mapeo temático; valoración mediante índice h y suma de citas; análisis longitudinal con índices de Jaccard e inclusión.
VOSviewer	Mapeo de redes bibliométricas	Datos bibliográficos exportados desde Scopus; método de conteo completo; redes de coautoría entre autores y redes de citación entre instituciones y países; umbral mínimo de 5 publicaciones por entidad; máximo de 25 entidades por documento y de 10 para el caso de instituciones, según el tipo de mapa generado.
VOSviewer	Delimitación temporal de las redes	Análisis concentrado en el periodo 2022–2024, correspondiente al intervalo en el que los datos cumplieron las condiciones de productividad y conectividad necesarias para generar redes interpretables.

En el caso de SciMAT, la selección de palabras de autor y palabras de fuente permitió trabajar con términos provenientes directamente de los metadatos bibliográficos. Asimismo, se excluyeron las palabras clave añadidas para evitar la incorporación de términos externos al corpus. Durante la reducción de datos, se estableció una frecuencia mínima de 1 debido al tamaño relativamente acotado del conjunto documental, con el fin de no excluir términos poco frecuentes que pudieran ser relevantes para describir un campo emergente.

La red temática se construyó a partir de una matriz de coocurrencia y se aplicó el índice de equivalencia para normalizar las relaciones entre términos. La fuerza mínima de enlace de 1 permitió conservar relaciones temáticas básicas entre palabras clave, evitando umbrales más altos que pudieran excluir conexiones potencialmente relevantes. Para la agrupación temática se utilizó el algoritmo Simple Centers. El tamaño de los clústeres se estableció entre 3 y 12 términos con el propósito de evitar tanto agrupamientos demasiado reducidos o poco interpretables como agrupamientos excesivamente amplios. Esta configuración buscó mantener un equilibrio entre granularidad e interpretabilidad temática.

La valoración de los clústeres se apoyó en el índice h y en la suma de citas, con el propósito de considerar no sólo la presencia temática de los grupos identificados, sino también su relevancia relativa dentro del corpus. Para el análisis longitudinal se emplearon los índices de Jaccard e inclusión, utilizados respectivamente en los mapas de evolución y solapamiento, lo que permitió examinar la continuidad, estabilidad y transformación temática entre periodos consecutivos.

En el caso de VOSviewer, las redes se construyeron a partir de los datos bibliográficos procedentes de Scopus, debido a que esta base concentró la mayor cobertura del corpus final. La configuración consideró el método de conteo completo y umbrales mínimos de

participación para destacar entidades con presencia sostenida dentro del campo. Asimismo, se establecieron límites en el número de entidades por documento con el propósito de reducir posibles efectos derivados de la hiperautoría o de una agregación excesiva en los niveles institucional y nacional.

Como consecuencia de estos criterios, el análisis efectivo de redes se concentró en el periodo 2022–2024, intervalo en el que los datos cumplieron las condiciones de productividad y conectividad necesarias para generar redes interpretables. Por esta razón, las redes obtenidas con VOSviewer corresponden específicamente a dicho periodo y no a la totalidad del intervalo general considerado en el AB.

3.2.4. Síntesis del proceso de análisis bibliométrico

El procedimiento del AB integró la recuperación de registros, la depuración y normalización del corpus y la aplicación de técnicas de análisis de desempeño y mapeo científico. A partir de estas etapas se obtuvieron indicadores de productividad e impacto, agrupamientos temáticos, mapas estratégicos, de evolución y solapamiento, así como redes de coautoría y citación.

El desarrollo ampliado del AB se presenta en el Anexo B, mientras que los materiales técnicos complementarios se concentran en el Anexo C.

3.3. Revisión sistemática de la literatura

Esta sección documenta el procedimiento metodológico empleado para conducir la RSL mediante un protocolo orientado a identificar, seleccionar, evaluar, extraer y sintetizar información de estudios relacionados con ISQ. La revisión se planteó como un estudio descriptivo y exploratorio.

La revisión se desarrolló con apoyo en lineamientos utilizados en IS para planificar, conducir y reportar revisiones sistemáticas de literatura [50], complementados con criterios de transparencia para documentar el proceso de identificación, cribado e inclusión de estudios [51]. Con base en esta orientación, el protocolo comprendió la definición de RQ, la selección de fuentes de información, la construcción de la estrategia de búsqueda, los criterios de inclusión (CI) y exclusión (CE), las notas metodológicas (NM), el proceso de selección de artículos académicos, la evaluación de calidad, la extracción de datos y la síntesis de la información.

Los apartados siguientes describen la pertinencia de la RSL frente a revisiones previas, las RQ formuladas, las fuentes de información y la estrategia de búsqueda, los CI, CE y NM, el proceso de selección de artículos académicos, la evaluación de calidad, la extracción de

datos y el procedimiento de síntesis y análisis de la información. Los resultados derivados de la aplicación del protocolo se presentan en el Capítulo 4.

3.3.1. Revisiones previas y pertinencia del estudio

Como parte del diseño de la RSL, se examinaron revisiones y estudios de mapeo previos relacionados con CQ, ISQ y desarrollo de software cuántico, con el propósito de valorar su cobertura y trazabilidad metodológica.

Entre estos antecedentes se identificó una revisión centrada directamente en ISQ, orientada a explorar la relación entre CQ e IS y a describir el estado del área [8]. Sin embargo, dicha revisión presenta un carácter principalmente narrativo y no explicita un protocolo sistemático de búsqueda, selección, evaluación y síntesis de estudios, lo que limita su trazabilidad metodológica.

Asimismo, se identificaron revisiones sistemáticas, estudios de mapeo y revisiones generales relacionadas con subdominios específicos del CQ y del desarrollo de software cuántico [2], [13], [18], [52], [53]. Estos trabajos aportan antecedentes relevantes, aunque su cobertura se concentra en subdominios específicos y no aborda de manera conjunta las dimensiones consideradas en la RSL.

A partir de esta revisión de antecedentes, se consideró pertinente desarrollar una RSL sustentada en un protocolo explícito y trazable, orientado a integrar evidencia reciente de acuerdo con las RQ definidas.

3.3.2. Preguntas de investigación

Con base en el objetivo definido para la RSL y en la delimitación temática derivada del AB, se formularon las RQ que guiaron el proceso de revisión. Estas preguntas permitieron delimitar los aspectos de la ISQ examinados y orientar la selección, extracción y organización de la evidencia.

La Tabla 5 presenta las RQ formuladas para la RSL.

Tabla 5. Preguntas de investigación de la revisión sistemática de la literatura.

Identificador	Pregunta de investigación
RQ1	¿Qué metodologías y buenas prácticas se están empleando en la ISQ?
RQ2	¿Qué propuestas existen para definir y estructurar el ciclo de vida del software cuántico?

RQ3	¿Qué enfoques de calidad, validación y pruebas han sido propuestos o adoptados para el desarrollo de software cuántico?
RQ4	¿Cuáles son los principales desafíos y limitaciones documentados en la literatura para el desarrollo de software cuántico en sistemas híbridos basados en el modelo de circuitos cuánticos con tecnología física de superconductores, considerando tanto los aspectos de hardware como los entornos de desarrollo?
RQ4a	¿Cuál es el impacto directo de estas limitaciones en la calidad, confiabilidad y rendimiento del software cuántico?
RQ5	¿Cómo se ha documentado en la literatura el uso y las aplicaciones de Qiskit como herramienta principal para el desarrollo de software cuántico?
RQ6	¿Qué propuestas o enfoques de enseñanza especializada en ISQ se han documentado en la literatura científica?

3.3.3. Fuentes de información y estrategia de búsqueda

La recuperación de estudios para la RSL se realizó en tres bases de datos científicas: Web of Science, IEEE Xplore Digital Library y ACM Digital Library. Estas fuentes se seleccionaron por su cobertura de literatura académica relacionada con IS, CQ, tecnologías emergentes y desarrollo de software, así como por incluir publicaciones en revistas, congresos y talleres relevantes para el campo. Scopus no pudo incorporarse a esta etapa debido a la pérdida de acceso a la base de datos antes de la ejecución de la RSL.

La búsqueda se efectuó el 18 de noviembre de 2025 y se delimitó al periodo 2019–2025. La fecha estableció el corte temporal para la recuperación de registros, mientras que el periodo respondió al interés de analizar literatura reciente relacionada con ISQ y desarrollo de software cuántico.

La estrategia de búsqueda se estructuró mediante una cadena booleana compuesta por dos bloques conceptuales. El primero agrupó términos asociados con el dominio base de la revisión, mientras que el segundo incorporó términos complementarios vinculados con actividades técnicas, metodológicas y formativas relacionadas con las RQ.

La cadena de búsqueda utilizada fue la siguiente:

(("quantum software engineering" OR "quantum software development" OR "quantum software lifecycle" OR "quantum software methodology" OR "quantum software design" OR "quantum software testing" OR "quantum software process" OR "quantum software validation" OR "quantum software evaluation" OR "quantum software quality" OR "quantum software tools" OR "quantum software frameworks" OR "quantum software education" OR "quantum software teaching" OR "quantum programming course" OR "qiskit" OR "quantum devops") AND ("code generation" OR "code" OR "verification" OR "testing framework" OR "best practice" OR "curriculum" OR "education" OR "teaching"

OR "learning" OR "competence" OR "pedagogy" OR "tutorial" OR "quantum circuits" OR "quantum hybrid systems" OR "hybrid systems"))

La misma cadena se utilizó en las tres bases de datos, con el propósito de mantener consistencia en la recuperación de estudios y reducir variaciones derivadas del uso de estrategias distintas entre fuentes. Los registros obtenidos mediante esta búsqueda conformaron el conjunto inicial de documentos de la RSL.

3.3.4. Criterios de inclusión, exclusión y notas metodológicas

Para delimitar el alcance de la RSL, se definieron CI, CE y NM. Estos elementos establecieron condiciones explícitas para determinar qué estudios podían incorporarse al análisis y cuáles debían excluirse por no ajustarse al objetivo de la revisión.

Los CI permitieron considerar literatura académica escrita en inglés, publicada entre 2019 y 2025, con revisión por pares y relación explícita con la ISQ o el desarrollo de software cuántico. Asimismo, se contemplaron estudios con aportes relacionados con metodologías, ciclos de vida, procesos, calidad, validación, pruebas, herramientas, entornos de desarrollo, Qiskit, desafíos técnicos con impacto en el software cuántico, sistemas híbridos, propuestas educativas y enfoques conceptuales aplicables al desarrollo o formación en ISQ.

Los CE permitieron descartar documentos que no cumplían las condiciones mínimas de pertinencia documental, metodológica o temática. Se excluyeron trabajos fuera del periodo definido, escritos en idiomas distintos del inglés, sin revisión por pares, sin acceso al texto completo o con menciones superficiales al software cuántico. También se descartaron estudios centrados exclusivamente en aspectos físicos, matemáticos, teóricos, de hardware, aprendizaje automático o aprendizaje automático cuántico cuando no establecían una relación explícita con procesos, herramientas, actividades o formación en ISQ.

Además de los CI y CE, se definieron NM para orientar la toma de decisiones en casos ambiguos. Estas notas resultaron necesarias debido a que parte de la literatura sobre software cuántico no especifica con claridad el modelo computacional, la tecnología física utilizada o la relación entre entornos de desarrollo, herramientas y actividades de desarrollo. Por ello, se establecieron criterios de interpretación para evitar exclusiones prematuras y mantener consistencia en la clasificación de estudios potencialmente relevantes.

La combinación de CI, CE y NM permitió mantener la coherencia del proceso de selección y reducir decisiones arbitrarias durante la revisión.

3.3.5. Proceso de selección de artículos académicos

El proceso de selección se aplicó a los registros recuperados mediante la estrategia de búsqueda descrita previamente. En primer lugar, se integraron los registros procedentes de las bases de datos seleccionadas y se eliminaron los documentos duplicados. Posteriormente, se realizó el cribado mediante la revisión de títulos y resúmenes, aplicando los CI y CE previamente definidos y recurriendo a las NM en los casos ambiguos. Este procedimiento permitió descartar documentos fuera del alcance de la RSL y conservar aquellos potencialmente pertinentes para una evaluación posterior.

Durante el cribado también se verificó la correspondencia general de los estudios retenidos con las RQ. Asimismo, los documentos se organizaron mediante los tópicos temáticos definidos para la revisión, con el propósito de facilitar las etapas posteriores de evaluación, extracción y síntesis de la información.

El proceso se documentó mediante un diagrama de flujo basado en PRISMA 2020 [51], utilizando la variante orientada a búsquedas en bases de datos y registros. Este recurso permitió registrar las etapas de identificación, eliminación de duplicados, cribado y selección de estudios. El flujo cuantitativo resultante se presenta en el apartado 4.2.1 como parte de los resultados de la RSL.

3.3.6. Evaluación de calidad y extracción de datos

Una vez concluido el proceso de selección, se evaluó la calidad de los artículos académicos retenidos mediante los criterios de calidad (QA) definidos específicamente para la RSL. Esta evaluación consideró la pertinencia, claridad y solidez de cada estudio respecto del objetivo de la revisión y de las RQ formuladas.

Los QA permitieron revisar aspectos como la existencia de una contribución sustantiva para la ISQ, la claridad de los objetivos, la definición del contexto cuántico, la adecuación del enfoque al desarrollo de software cuántico, la descripción metodológica, la evidencia o validación presentada, la reproducibilidad, la delimitación de la contribución y la calidad formal del documento.

Cada QA se valoró mediante una escala de cumplimiento de tres niveles: cumplimiento completo, cumplimiento parcial y no cumplimiento. Esta escala permitió determinar el grado en que cada estudio satisfacía los criterios definidos sin recurrir a una clasificación estrictamente binaria entre aceptación y rechazo. Asimismo, durante la evaluación se consideró la relación de cada estudio con las RQ.

A partir de este proceso, y considerando tanto el nivel de cumplimiento de los QA como la relevancia de cada estudio respecto de las RQ, se conformó un corpus final de 67 artículos académicos para análisis completo. La selección no se basó únicamente en la evaluación de

calidad, sino en una valoración combinada del cumplimiento de los criterios, la pertinencia temática y la contribución al objetivo de la RSL.

Posteriormente, se realizó la extracción de datos de los estudios seleccionados con el propósito de registrar la información necesaria para responder las RQ y sustentar la síntesis posterior. Entre los datos extraídos se consideraron el tipo de aporte del estudio, el tópico temático asociado, las RQ relacionadas, las herramientas o enfoques abordados, las características técnicas relevantes, las limitaciones reportadas y los elementos útiles para identificar patrones, brechas o necesidades formativas en ISQ.

3.3.7. Síntesis y análisis de la información

La síntesis y el análisis de la información se realizaron a partir de los datos extraídos de los 67 estudios seleccionados para análisis completo. Esta etapa tuvo como propósito organizar la evidencia y establecer una estructura de interpretación coherente con las RQ de la RSL.

El análisis combinó un tratamiento cuantitativo básico con una síntesis cualitativa de carácter narrativo. El componente cuantitativo retomó la clasificación temática T1–T8 para examinar la distribución general de los estudios por áreas de contribución. Esta revisión permitió identificar la presencia relativa de los tópicos dentro del corpus, sin asumir su frecuencia como una medida automática de importancia.

El componente cualitativo se desarrolló mediante una síntesis narrativa organizada alrededor de las RQ. Los estudios se analizaron según su relación con cada pregunta de investigación y con los tópicos temáticos previamente asignados, lo que permitió integrar contribuciones con enfoques distintos dentro de una estructura común de análisis.

Durante la síntesis también se consideraron las NM definidas previamente, especialmente ante ambigüedades terminológicas o diferencias en la forma de reportar el contexto cuántico, las herramientas utilizadas, el tipo de contribución o la relación del estudio con actividades propias del desarrollo de software cuántico. Esto permitió mantener consistencia en la interpretación de estudios con aportes parciales, transversales o relacionados con más de una RQ.

La síntesis no se planteó como un metaanálisis estadístico debido a la heterogeneidad de los estudios incluidos y a la diversidad de enfoques, herramientas, contextos y tipos de contribución identificados. En su lugar, se adoptó una síntesis descriptiva y narrativa orientada a reconocer patrones, tendencias, vacíos y relaciones entre los aportes documentados en la literatura.

El desarrollo ampliado del proceso y de los resultados de la RSL se presenta en el Anexo D, mientras que el listado completo de CI, CE, NM, categorías temáticas y QA se integra en el Anexo E, correspondiente a los instrumentos metodológicos de la revisión.

Los resultados de la RSL no fueron trasladados de forma automática al QSEAK_v0, sino que se utilizaron como insumo para el proceso de interpretación, reorganización y articulación formativa desarrollado en la fase siguiente.

3.4. Elaboración de la versión inicial del marco referencial

Esta sección describe el procedimiento empleado para elaborar la versión inicial del marco de fundamentos referenciales. Su construcción integró los resultados del AB y la RSL con literatura complementaria sobre CQ, IS e ISQ.

Metodológicamente, el proceso se organizó en cuatro actividades principales: clasificación temática, priorización de contenido, elaboración de la propuesta inicial y desarrollo de las versiones en español e inglés. Estas actividades permitieron organizar y articular los insumos documentales que sustentaron la estructura inicial del marco.

Para sustentar esta organización, se consideraron referentes especializados de ISQ, trabajos que vinculan fundamentos de CQ con IS y referentes disciplinares de IS [9], [12], [27]–[30].

La revisión académica inicial se aborda por separado en la sección 3.5, porque corresponde al contraste preliminar del producto construido.

3.4.1. Clasificación temática

La clasificación temática tuvo como propósito organizar los contenidos identificados durante la investigación en la estructura de la versión inicial del marco. Para ello, se establecieron tres niveles de organización: áreas de conocimiento, componentes y tópicos. Las áreas corresponden a los bloques generales del marco, los componentes agrupan contenidos relacionados y los tópicos representan unidades temáticas específicas.

La RSL constituyó el principal insumo para esta clasificación, al permitir reconocer temas, prácticas, herramientas, desafíos y necesidades documentadas en la literatura especializada sobre ISQ. Las categorías identificadas en la RSL se utilizaron como punto de partida para reconocer núcleos temáticos, relaciones entre contenidos y posibles funciones formativas.

La clasificación incorporó también literatura complementaria sobre CQ, IS e ISQ. Para ubicar contenidos de base, se retomaron trabajos relacionados con fundamentos de CQ, fundamentos matemáticos y referentes disciplinares de IS [12], [22], [23], [26], [27], [54], [55]. Esta revisión permitió distinguir los conocimientos que cumplían una función de base conceptual de aquellos vinculados con dimensiones técnicas, transversales o profesionales.

En el caso de los conocimientos técnicos especializados, la clasificación se apoyó principalmente en los hallazgos de la RSL. A partir de estos resultados, se agruparon

contenidos relacionados con actividades, artefactos, herramientas, procesos, integración, calidad y evaluación del software cuántico e híbrido. Esta organización buscó mantener una relación con preocupaciones propias de la IS, considerando al mismo tiempo las condiciones particulares del desarrollo clásico-cuántico.

Los conocimientos transversales y profesionales se organizaron a partir de literatura especializada en ISQ y de preocupaciones recurrentes relacionadas con adopción, gestión, comunicación, colaboración, reproducibilidad y actualización profesional [9], [28]–[30]. De esta manera, la clasificación incorporó dimensiones orientadas a situar la práctica de la ISQ en contextos académicos, profesionales y organizacionales, además de los contenidos conceptuales y técnicos.

La trazabilidad entre los insumos revisados, los temas identificados y su incorporación en la estructura inicial del marco se documenta en la matriz sintética incluida en el Anexo F. El desarrollo conceptual de las áreas, componentes y tópicos resultantes se presenta en el Capítulo 4.

3.4.2. Priorización de contenido

La priorización de contenido tuvo como propósito establecer un orden inicial para la presentación y articulación de los contenidos incluidos en la versión inicial del marco. Mientras que la clasificación temática permitió agruparlos dentro de la estructura del marco, esta actividad se orientó a definir una secuencia razonada para su presentación progresiva.

Esta actividad no se planteó como una evaluación formal para aceptar o descartar contenidos, sino como un proceso de ordenamiento interpretativo. Para ello, se consideraron criterios como su pertinencia para comprender la ISQ, recurrencia en la literatura, relación con otros temas identificados, dependencia conceptual y función de soporte para la formación inicial.

La recurrencia en la literatura se utilizó como un indicio relevante, pero no como un criterio automático de jerarquización. Algunos contenidos se priorizaron por aparecer de manera recurrente en los estudios revisados, mientras que otros se incorporaron por su función de soporte conceptual, su relación con contenidos posteriores o su capacidad para articular conocimientos de CQ, IS e ISQ.

También se consideró la dependencia conceptual entre los contenidos. A partir de este criterio, los fundamentos matemáticos, computacionales, de IS y de CQ se ubicaron como base inicial. Posteriormente, se organizaron los contenidos relacionados con el desarrollo, la integración y la evaluación del software cuántico e híbrido y, finalmente, se incorporaron las dimensiones transversales y profesionales vinculadas con gestión, colaboración, comunicación y actualización continua.

La secuencia resultante no se concibió como una jerarquía definitiva ni como una ruta curricular cerrada, sino como una organización metodológica razonada y adaptable.

3.4.3. Elaboración de la propuesta inicial

Una vez clasificados y priorizados los contenidos, se elaboró QSEAK_v0 como primera versión documentada del marco de fundamentos referenciales QSEAK. Esta actividad integró la organización temática previa en una propuesta estructurada y orientada a la formación inicial en ISQ.

Durante su elaboración se revisaron la coherencia interna de la estructura, la ubicación de los contenidos y la correspondencia entre los insumos documentales y la propuesta resultante. Se buscó que las áreas, componentes y tópicos mantuvieran relaciones temáticas claras y que cada elemento cumpliera una función definida dentro del marco.

El tratamiento de posibles duplicidades no implicó eliminar toda coincidencia temática entre componentes, sino evitar que un mismo contenido apareciera en distintos espacios sin una función diferenciada. Cuando un tema podía relacionarse con más de un área o componente, se ubicó de acuerdo con su función principal dentro de la formación inicial en ISQ.

Asimismo, se verificó que la estructura fuera consistente con la clasificación y priorización desarrolladas previamente, preservando la progresión definida sin convertirla en una secuencia curricular rígida. La delimitación de su propósito, alcance y carácter referencial se presenta en el Capítulo 4.

3.4.4. Desarrollo de las versiones en español e inglés

El desarrollo de las versiones en español e inglés tuvo como propósito disponer de dos documentos conceptualmente equivalentes correspondientes al QSEAK_v0, de manera que la propuesta pudiera ser comunicada y revisada en distintos contextos académicos. Esta actividad no modificó la estructura conceptual del marco, sino que buscó conservar la correspondencia entre áreas, componentes, tópicos y descripciones en ambos idiomas.

La versión en español se elaboró como documento principal de trabajo dentro de esta investigación. En ella se cuidó la consistencia terminológica entre los conceptos de CQ, IS e ISQ, así como la correspondencia interna entre los distintos niveles de organización del marco. Asimismo, se procuró mantener una redacción académica clara, homogénea y coherente con el carácter formativo de la propuesta.

Posteriormente, se preparó la versión en inglés para facilitar la comunicación y revisión del marco en contextos académicos no hispanohablantes. Esta versión no se planteó como una traducción literal, sino como una adaptación terminológica orientada a conservar el sentido

conceptual de la versión en español. Para ello, se revisó la correspondencia entre términos como Ingeniería de Software Cuántico y *Quantum Software Engineering*, Ingeniería de Software y *Software Engineering*, Cómputo Cuántico y *Quantum Computing*, así como otros conceptos relacionados con el desarrollo de software cuántico y sistemas híbridos.

Finalmente, se verificó la correspondencia entre las áreas, componentes, tópicos y descripciones de ambas versiones, evitando ajustes que modificaran el alcance conceptual de la propuesta. También se revisó la consistencia de títulos, acrónimos y expresiones técnicas con la literatura especializada y con el propósito formativo del marco.

Como resultado de esta actividad, se obtuvieron dos versiones lingüísticas del QSEAK_v0: la versión en español, integrada como Anexo G, y la versión en inglés, integrada como Anexo H.

3.5. Revisión y refinamiento

La revisión académica inicial tuvo como propósito someter QSEAK_v0 a la valoración de especialistas externos vinculados con ISQ, CQ, IS y áreas afines, con el fin de obtener retroalimentación sobre la claridad, alcance, profundidad, secuenciación y pertinencia de la propuesta. Esta etapa se concibió como un ejercicio de contraste académico preliminar y no como una validación formal o definitiva del marco. Las observaciones recibidas se utilizaron para identificar oportunidades de mejora y posibles líneas de refinamiento hacia una versión posterior.

La selección de posibles revisores se realizó de manera intencional, considerando su relación académica con el campo de estudio. Para ello, se conformó un listado de especialistas vinculados con ISQ, CQ, IS o áreas afines, identificados por su participación en redes académicas relacionadas con ISQ, por su presencia entre las referencias utilizadas durante la elaboración del marco o por su trayectoria en disciplinas cercanas al objeto de estudio. Esta selección no buscó conformar una muestra estadísticamente representativa, sino reunir perspectivas especializadas que permitieran contrastar críticamente la propuesta.

El proceso de contacto inició el 13 de mayo de 2026 y se desarrolló mediante rondas sucesivas de correos electrónicos. En la invitación se explicó el propósito de la revisión y se solicitó retroalimentación sobre la pertinencia de los contenidos, profundidad del tratamiento, secuenciación, claridad conceptual, alcance de la propuesta y posible presencia de elementos faltantes, sobredimensionados o susceptibles de reorganización. Las observaciones podían compartirse mediante comentarios en el documento, un archivo separado o una respuesta por correo electrónico, de acuerdo con la preferencia de cada revisor.

La propuesta se compartió en español o en inglés según el perfil de cada especialista. En ambos casos se mantuvo la misma estructura conceptual del QSEAK_v0, con el propósito

de facilitar la participación de revisores hispanohablantes y de especialistas de otros contextos académicos. Los mensajes base empleados para la invitación y el envío de la propuesta, así como la evidencia documental asociada con el proceso de contacto, se presentan en el Anexo I y en el archivo digital correspondiente.

Debido al carácter preliminar y no publicado de la propuesta, inicialmente se consideró solicitar la aceptación de un acuerdo de confidencialidad antes de compartir el documento. Sin embargo, tras recibir comentarios y revisar internamente esta decisión, el 22 de mayo de 2026 se retiró dicho requisito con el propósito de facilitar la participación de los especialistas. Al enviar la propuesta se mantuvo la indicación de utilizar el material únicamente con fines de revisión académica y retroalimentación.

Las observaciones recibidas se organizaron de acuerdo con su tipo de contribución. Se distinguieron ajustes puntuales de contenido, observaciones sobre secuenciación y claridad conceptual, recomendaciones de ampliación o reorganización y sugerencias metodológicas relacionadas con trazabilidad, validación futura y delimitación de alcances. La retroalimentación no se incorporó de manera automática al QSEAK_v0, sino que cada posible modificación se valoró considerando su pertinencia, justificación conceptual y posible sustento en la literatura.

El refinamiento realizado en esta etapa no implicó la construcción completa de una nueva versión del marco dentro de la tesis. Su alcance consistió en identificar oportunidades de mejora y líneas de ajuste para una versión posterior, identificada preliminarmente como QSEAK_v0.1. De esta manera, QSEAK_v0 se mantiene como la versión de partida documentada en la investigación, mientras que las observaciones académicas recibidas conforman una agenda de refinamiento posterior. El flujo de contacto, los perfiles de los revisores que proporcionaron retroalimentación y la síntesis de sus observaciones se presentan en el Capítulo 4.

Capítulo 4. Resultados

Este capítulo presenta los resultados obtenidos a partir de las fases desarrolladas en la investigación. En primer lugar, se exponen los hallazgos del AB y de la RSL. Posteriormente, se presentan la estructura y delimitación del QSEAK_v0, así como los resultados de su revisión académica inicial. Finalmente, se desarrolla la discusión de los resultados, se examinan las amenazas a la validez, se sintetizan los productos obtenidos y se relacionan las evidencias generadas con el cumplimiento de los objetivos de la investigación.

4.1. Resultados del análisis bibliométrico

Esta sección presenta los principales resultados del AB obtenidos a partir del corpus final correspondiente al periodo comprendido entre 2020 y el primer trimestre de 2025. La sección se organiza en cinco apartados: corpus y alcance del análisis, evolución temporal y productividad científica, estructura temática y evolución del campo, redes de colaboración y aporte del AB a la investigación.

4.1.1. Corpus y alcance del análisis

El corpus final del AB quedó conformado por 385 documentos en idioma inglés relacionados con la ISQ y áreas afines, correspondientes al periodo comprendido entre 2020 y el primer trimestre de 2025. Del total analizado, 377 documentos correspondieron a registros presentes en Scopus y ocho a registros únicos procedentes de Web of Science.

Los resultados correspondientes a 2025 deben interpretarse con cautela, debido a que representan únicamente el primer trimestre del año y, por tanto, no constituyen un periodo completo directamente comparable con los años anteriores.

El alcance del AB se centró en el análisis de metadatos bibliográficos, por lo que sus resultados permiten describir patrones de producción científica, evolución temática, relaciones entre palabras clave y redes de colaboración. Esta caracterización ofrece una visión panorámica del campo, mientras que el análisis especializado del contenido de los estudios corresponde a la RSL.

4.1.2. Evolución temporal y productividad científica

La evolución temporal de la producción científica muestra una tendencia ascendente en la cantidad de publicaciones relacionadas con la ISQ durante el periodo analizado. En 2020 se identificaron 22 documentos y, en los años posteriores, la producción aumentó

progresivamente hasta alcanzar en 2024 el mayor volumen registrado, con 129 documentos. Este comportamiento refleja una mayor presencia del campo en la literatura científica reciente.

La Figura 2 presenta la distribución temporal de los documentos del corpus entre 2020 y el primer trimestre de 2025.

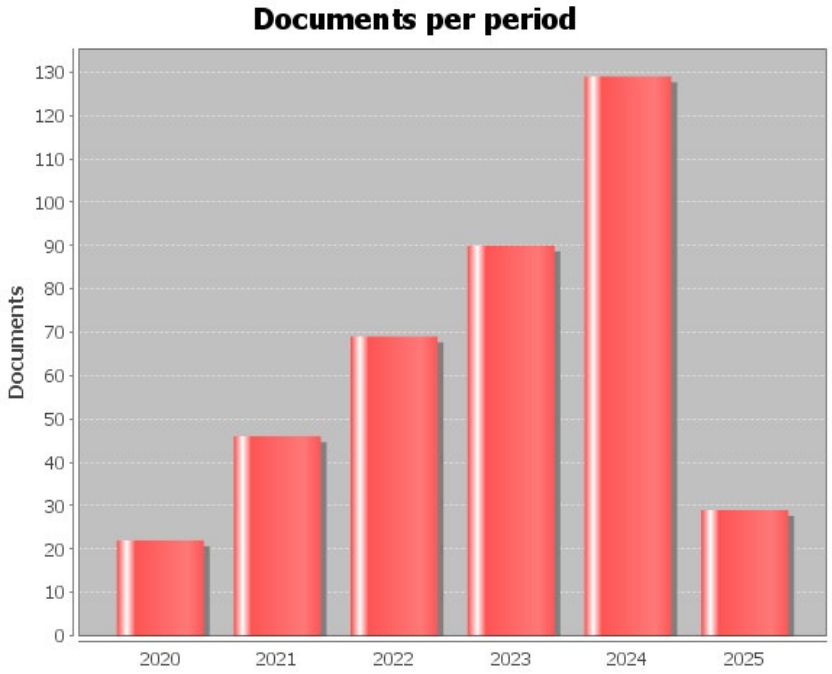


Figura 2. Distribución temporal de documentos del corpus bibliométrico entre 2020 y el primer trimestre de 2025.

Durante el primer trimestre de 2025 se identificaron 29 documentos. Debido al carácter parcial de este periodo, la disminución respecto de 2024 no debe interpretarse como una reducción de la producción científica, ya que ambos valores no corresponden a intervalos temporales equivalentes. Aun así, la cantidad registrada durante los primeros tres meses de 2025 supera los 22 documentos identificados durante todo 2020.

Este crecimiento no permite concluir por sí mismo que el campo haya alcanzado una consolidación plena desde el punto de vista conceptual, metodológico o formativo. Esta lectura debe complementarse con el análisis de la estructura temática y de las redes de colaboración desarrollado en los apartados siguientes.

4.1.3. Estructura temática y evolución del campo

El análisis temático realizado con SciMAT permitió identificar la estructura conceptual del corpus y examinar la evolución de los principales clústeres entre 2020 y el primer trimestre de 2025.

La Figura 3 presenta el mapa de evolución temática del corpus analizado, en el que se observa la continuidad, transformación y relación entre los principales clústeres identificados durante el periodo de estudio.

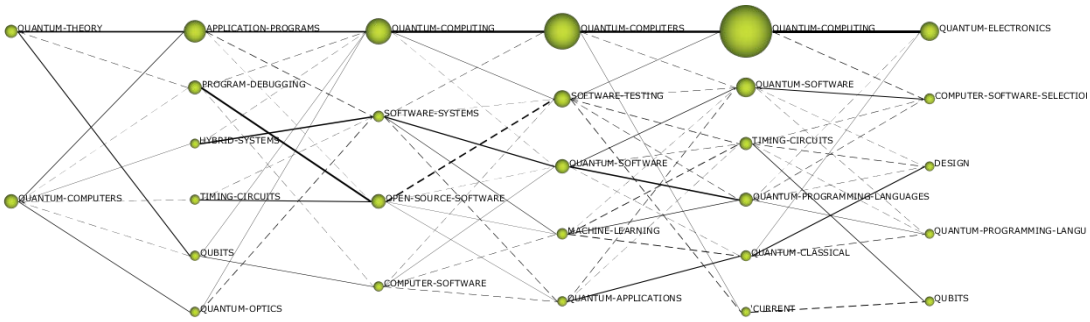


Figura 3. Mapa de evolución temática del corpus bibliométrico durante el periodo 2020-primer trimestre de 2025 basado en documentos.

De manera complementaria, la Tabla 6 sintetiza los principales clústeres identificados por periodo y permite ubicar los temas predominantes en cada etapa del análisis.

Tabla 6. Clústeres temáticos por periodo del análisis bibliométrico.

Periodo	**Clústeres**
2020	QUANTUM-COMPUTERS, QUANTUM-THEORY
2021	APPLICATION-PROGRAMS, HYBRID-SYSTEMS, PROGRAM-DEBUGGING, QUANTUM-OPTICS, QUBITS, TIMING-CIRCUITS
2022	COMPUTER-SOFTWARE, OPEN-SOURCE-SOFTWARE, QUANTUM-COMPUTING, SOFTWARE-SYSTEMS
2023	MACHINE-LEARNING, QUANTUM-APPLICATIONS, QUANTUM-COMPUTERS, QUANTUM-SOFTWARE, SOFTWARE-TESTING
2024	‘CURRENT, QUANTUM-CLASSICAL, QUANTUM-COMPUTING, QUANTUM-PROGRAMMING-LANGUAGES, QUANTUM-SOFTWARE, TIMING-CIRCUITS

Primer trimestre de 2025	COMPUTER-SOFTWARE-SELECTION-AND-EVALUATION, DESIGN, QUANTUM-ELECTRONICS, QUANTUM-PROGRAMMING-LANGUAGES, QUBITS

Algunos clústeres conservan denominaciones amplias derivadas de los metadatos bibliográficos. Por ello, deben interpretarse como indicios temáticos dentro del corpus analizado y no como categorías conceptuales cerradas de la ISQ.

De manera general, los resultados muestran una transición desde clústeres inicialmente centrados en fundamentos cuánticos y computacionales hacia temas más cercanos al desarrollo de software cuántico, lenguajes de programación, pruebas, diseño, evaluación e integración clásico-cuántica. Esta evolución refleja un desplazamiento gradual desde una visión más general del CQ hacia preocupaciones relacionadas con la construcción, evaluación y organización de software cuántico e híbrido.

En 2020, la estructura temática se concentró principalmente en QUANTUM-COMPUTERS y QUANTUM-THEORY. La presencia de estos clústeres indica que, al inicio del periodo, la producción científica estaba asociada principalmente con fundamentos conceptuales, físicos y computacionales del CQ. En esta etapa todavía no se observa una diferenciación clara entre el estudio general del CQ y los problemas específicos del desarrollo de software cuántico.

Durante 2021, la estructura temática comenzó a diversificarse con clústeres como APPLICATION-PROGRAMS, PROGRAM-DEBUGGING e HYBRID-SYSTEMS, relacionados con la aplicación, depuración e interacción entre componentes clásicos y cuánticos. Aunque se mantuvieron temas vinculados con fundamentos físicos y tecnológicos, la aparición de estos clústeres muestra una aproximación más clara hacia problemas propios del desarrollo de software.

En 2022, los clústeres OPEN-SOURCE-SOFTWARE, SOFTWARE-SYSTEMS y COMPUTER-SOFTWARE reflejaron una mayor orientación hacia el ecosistema de desarrollo. En este periodo adquirieron mayor presencia términos relacionados con sistemas, herramientas y recursos de software, lo que evidencia una transición desde el estudio del CQ como tecnología hacia la consideración de elementos vinculados con la construcción, organización y uso de soluciones de software cuántico.

Para 2023, los clústeres QUANTUM-SOFTWARE y SOFTWARE-TESTING evidenciaron una mayor visibilidad del software cuántico como objeto específico de estudio. La presencia de SOFTWARE-TESTING muestra una atención creciente hacia actividades de evaluación, comprobación y aseguramiento de la calidad directamente relacionadas con la IS. Asimismo, la coexistencia con QUANTUM-APPLICATIONS y MACHINE-LEARNING indica que el campo continuaba articulándose con dominios de aplicación y otras tecnologías emergentes.

En 2024, la estructura temática incorporó clústeres como QUANTUM-COMPUTING, QUANTUM-SOFTWARE, QUANTUM-PROGRAMMING-LANGUAGES y QUANTUM-CLASSICAL. Su presencia refleja una mayor atención hacia el software, la programación cuántica y la integración clásico-cuántica. Al mismo tiempo, la permanencia de QUANTUM-COMPUTING muestra que el campo conserva una base asociada con el CQ general, mientras que los clústeres más específicos evidencian una diferenciación progresiva hacia preocupaciones propias de la ISQ.

En el primer trimestre de 2025, los clústeres COMPUTER-SOFTWARE-SELECTION-AND-EVALUATION, DESIGN y QUANTUM-PROGRAMMING-LANGUAGES muestran continuidad en temas relacionados con evaluación, diseño y lenguajes de programación. Estos resultados deben interpretarse con cautela debido al carácter parcial del periodo. Aun así, permiten observar la continuidad de preocupaciones vinculadas con la selección, organización y evaluación de software.

Los mapas de evolución y solapamiento muestran continuidad temática entre periodos consecutivos. Los temas no cambiaron de manera abrupta, sino que se mantuvieron, reorganizaron y especializaron progresivamente. Esta evolución evidencia una presencia cada vez más clara de preocupaciones propias de la ISQ, aunque todavía coexisten temas generales de CQ con líneas más específicas relacionadas con el desarrollo de software.

El desarrollo ampliado del AB se presenta en el Anexo B, correspondiente al artículo académico derivado de este análisis. Los materiales técnicos complementarios, incluidos diagramas estratégicos, redes temáticas, tablas de centralidad y densidad, mapas de solapamiento y visualizaciones adicionales, se concentran en el Anexo C.

4.1.4. Redes de colaboración

Las redes bibliométricas generadas mediante VOSviewer permitieron examinar la configuración social, institucional y geográfica de la producción científica relacionada con la ISQ a partir de las relaciones identificadas entre autores, instituciones y países.

El análisis efectivo de redes se concentró en el periodo 2022–2024, debido a que en este intervalo se identificaron entidades con suficiente productividad y conectividad para generar redes interpretables, por lo que puede considerarse una aproximación a los años con mayor articulación colaborativa dentro del corpus.

En primer lugar, se analizó la red de coautoría entre autores. La Figura 4 permite identificar agrupamientos de colaboración y comunidades académicas con participación reconocible dentro de la producción científica relacionada con la ISQ.

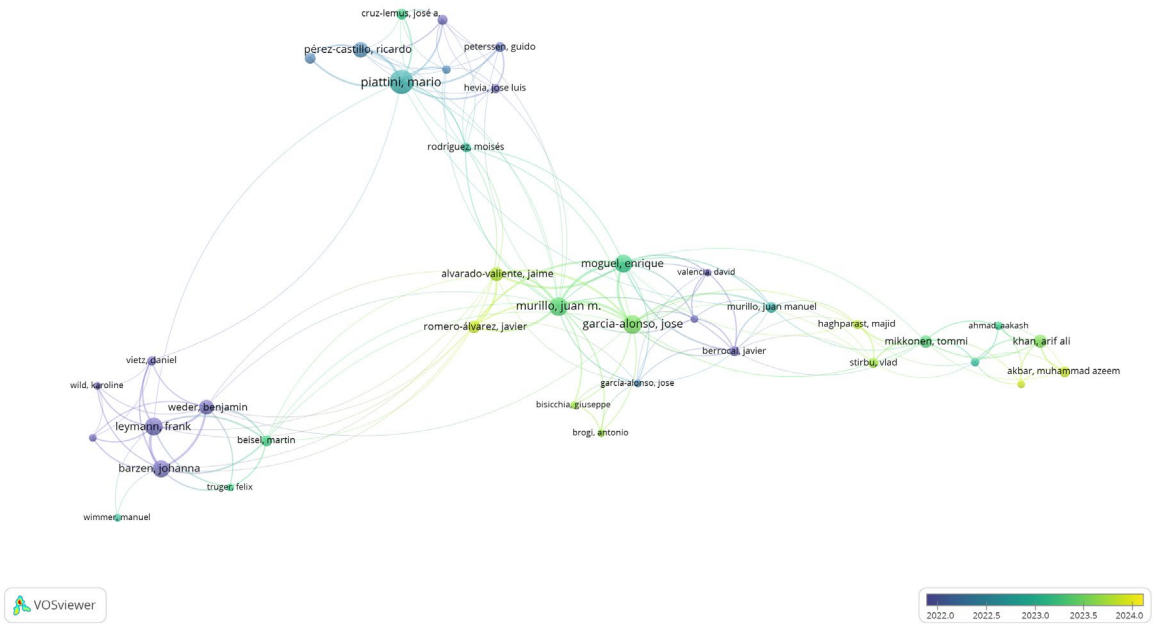


Figura 4. Red de coautoría de autores en el corpus bibliométrico durante el periodo 2022-2024.

En la red de coautoría se observan comunidades académicas organizadas alrededor de núcleos relativamente consolidados. Entre ellos destaca un grupo asociado con Mario Piattini, Ricardo Pérez-Castillo, José A. Cruz-Lemus y José Luis Hevia, así como otro núcleo integrado por Juan M. Murillo, Enrique Moguel y José García-Alonso. También se identifica una subred más especializada conformada por Frank Leymann, Johanna Barzen y Benjamin Weder. Esta configuración muestra que la producción científica analizada no se encuentra completamente dispersa, sino que presenta grupos de colaboración reconocibles con distintos grados de articulación y especialización.

En segundo lugar, se analizó la red de citación entre instituciones. La Figura 5 permite observar instituciones con distintos niveles de visibilidad y conectividad dentro de la producción científica relacionada con la ISQ.



Figura 5. Red de citación entre instituciones en el corpus bibliométrico durante el periodo 2022-2024.

En la red institucional destacan Simula Research Laboratory y National Institute of Informatics por su visibilidad y conectividad dentro del corpus analizado. También aparecen University of Jyväskylä y University of Extremadura, junto con otras instituciones vinculadas mediante relaciones de citación. Esta distribución evidencia diferencias en la centralidad, conectividad y presencia temporal de las instituciones representadas.

En tercer lugar, se analizó la red de citación entre países. La Figura 6 permite observar la distribución geográfica y las relaciones de citación entre los países representados en el corpus.

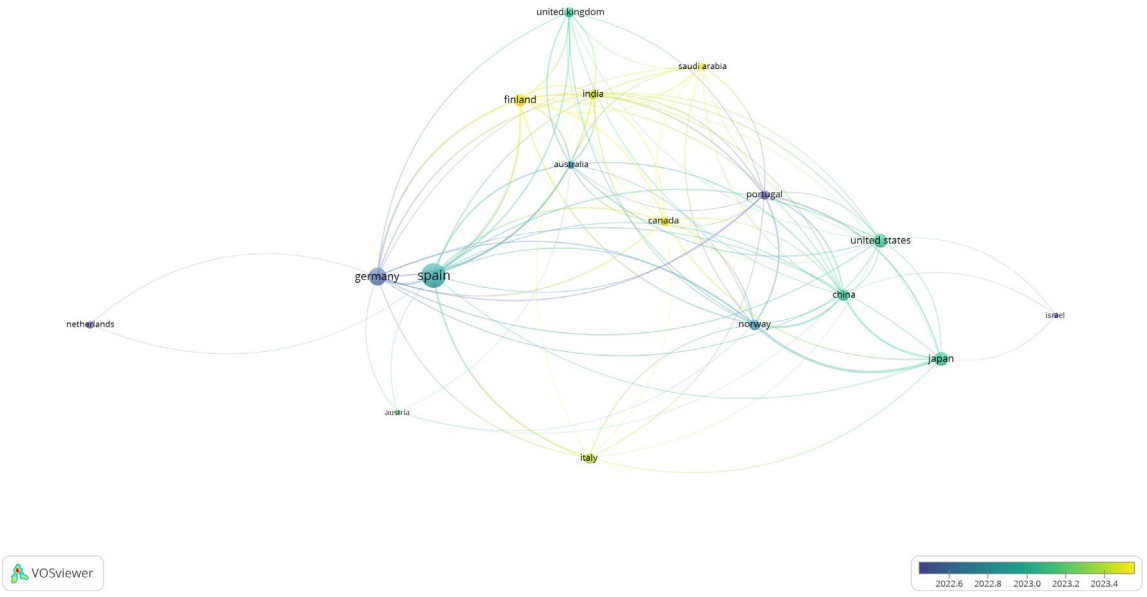


Figura 6. Red de citación entre países en el corpus bibliométrico durante el periodo 2022-2024.

España y Alemania aparecen como nodos destacados por su visibilidad y conectividad. Asimismo, se identifican Reino Unido, Finlandia, India, Japón, China y Estados Unidos, lo que refleja una participación geográfica diversa en la producción científica relacionada con la ISQ. La configuración de la red muestra que esta participación no es homogénea, sino que presenta diferencias en los niveles de centralidad y conectividad entre los países representados.

La Tabla 7 sintetiza las entidades más destacadas en los tres niveles de análisis y su interpretación dentro del AB.

Tabla 7. Entidades destacadas en las redes bibliométricas.

Nivel de análisis	**Entidades destacadas**	**Interpretación**
Autores	Mario Piattini, Ricardo Pérez-Castillo, José A. Cruz-Lemus y José Luis Hevia	Núcleo de coautoría con actividad sostenida y articulación interna visible dentro de la red.
	Juan M. Murillo, Enrique Moguel y José García-Alonso	Grupo ubicado en una zona de conexión entre distintos segmentos de la red, con posible función articuladora.
	Frank Leymann, Johanna Barzen y Benjamin Weder	Subred de coautoría más compacta y delimitada respecto de otros grupos identificados.
Instituciones	Simula Research Laboratory y National Institute of Informatics	Nodos institucionales destacados por su visibilidad y conectividad dentro de la red de citación.
	University of Jyväskylä y University of Extremadura	Instituciones con presencia relativamente reciente y conexiones visibles con otras entidades de la red.
Países	España y Alemania	Nodos nacionales destacados por su visibilidad y conectividad dentro de la red de citación.
	Reino Unido, Finlandia, India, Japón, China y Estados Unidos	Países conectados con distintos segmentos de la red que reflejan una participación geográfica diversa en el corpus analizado.

Las redes analizadas muestran que la producción científica relacionada con la ISQ se articula mediante comunidades de autores, instituciones y países con distintos niveles de visibilidad, conectividad y participación. Aunque se identifican agrupamientos y nodos reconocibles, también se observa cierta concentración alrededor de determinados actores, lo que refleja una configuración académica heterogénea dentro del corpus analizado.

El desarrollo ampliado de las redes bibliométricas se presenta en el Anexo B, correspondiente al artículo académico derivado del AB.

4.1.5. Aporte del análisis bibliométrico a la investigación

El AB aportó una caracterización contextual del campo de la ISQ durante el periodo comprendido entre 2020 y el primer trimestre de 2025. A partir del corpus analizado, permitió reconocer el crecimiento reciente de la producción científica, la evolución de los principales temas abordados y la configuración general de redes académicas asociadas con autores, instituciones y países. Estos hallazgos muestran un campo con actividad científica creciente y una estructura todavía heterogénea en sus dimensiones temáticas y académicas.

Su aporte principal fue interpretativo y delimitador, al permitir identificar temas con mayor visibilidad, líneas de actividad recurrente y aspectos que requerían un análisis documental más especializado. Esta caracterización orientó la delimitación temática de la RSL y proporcionó una base general para profundizar en contenidos técnicos, metodológicos y formativos de la ISQ.

Los resultados del AB no definieron de manera directa los componentes del QSEAK_v0 ni fueron trasladados automáticamente a su estructura. En cambio, funcionaron como un insumo de referencia que se articuló con los hallazgos de la RSL y con literatura complementaria durante la elaboración de la versión inicial del marco.

4.2. Resultados de la revisión sistemática de la literatura

Esta sección presenta los resultados derivados de la RSL, orientada a examinar con mayor profundidad la evidencia especializada sobre enfoques, propuestas, herramientas, desafíos y elementos formativos relacionados con la ISQ.

Los resultados se organizan en ocho apartados. Primero, se presenta la identificación, selección y clasificación temática de los estudios. Después se abordan las metodologías y buenas prácticas, las propuestas de ciclo de vida, la calidad, verificación, validación y pruebas, el desarrollo de software en sistemas híbridos, Qiskit y el ecosistema tecnológico, así como la enseñanza y formación en ISQ. Finalmente, se expone el aporte de la RSL a la investigación.

Los apartados siguientes sintetizan los principales hallazgos de los estudios seleccionados y los organizan de acuerdo con las líneas temáticas y las RQ de la revisión. La síntesis temática se sustenta en los trabajos vinculados con los hallazgos desarrollados, sin que las referencias incorporadas en cada apartado abarquen la totalidad de los estudios clasificados en cada tópico. El desarrollo ampliado del proceso y de los resultados de la RSL se presenta

en el Anexo D, mientras que los instrumentos metodológicos utilizados se integran en el Anexo E.

4.2.1. Identificación, selección y clasificación temática

La aplicación del protocolo de revisión permitió reducir progresivamente el conjunto inicial de registros hasta conformar el corpus final de la RSL. La búsqueda recuperó 1,571 registros en las bases de datos seleccionadas. Después de eliminar 231 duplicados, se obtuvieron 1,340 documentos para cribado. A partir de la aplicación de los criterios definidos, se conservaron 587 estudios para clasificación temática y evaluación posterior. Finalmente, tras la evaluación de calidad y la valoración de pertinencia respecto de las RQ, se conformó un corpus final de 67 artículos académicos para análisis completo.

La Figura 7 presenta el flujo de identificación, cribado y selección de los estudios hasta la conformación del corpus final.

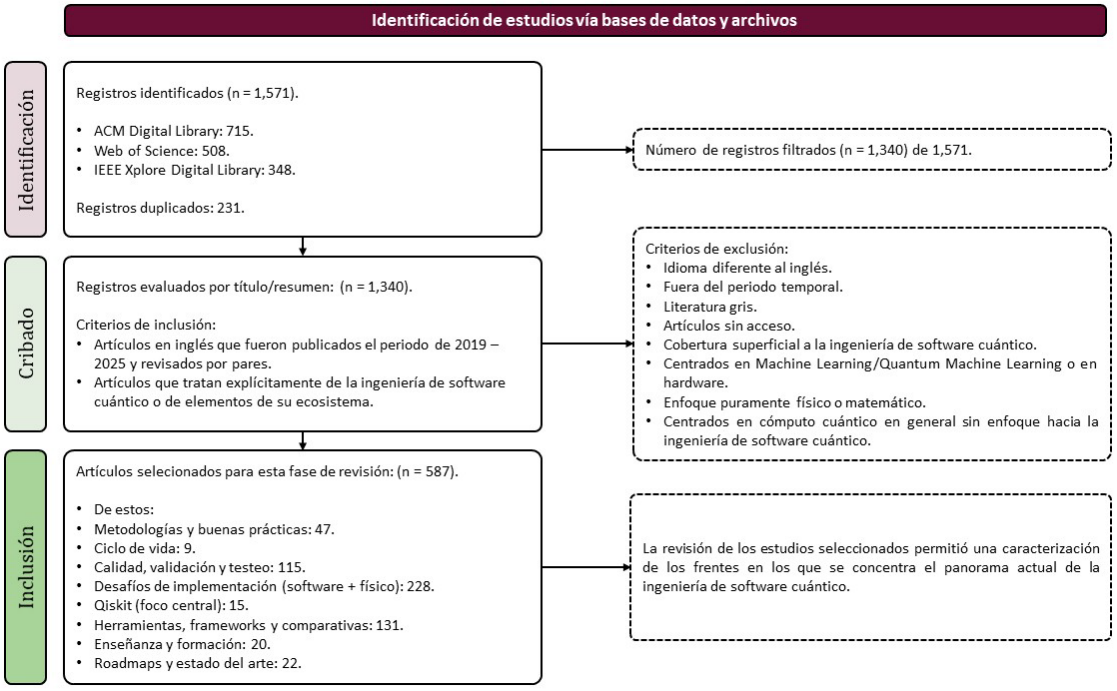


Figura 7. Diagrama PRISMA 2020 para la identificación, cribado y selección de estudios de la revisión sistemática de la literatura.

Los 587 estudios retenidos antes de la evaluación final fueron organizados mediante los tópicos temáticos T1–T8. Esta clasificación permitió ordenar los trabajos de acuerdo con las líneas de interés de la RSL y relacionarlos con las RQ. Aunque algunos estudios podían

vincularse con más de una dimensión de la ISQ, cada uno fue asignado al tópico que representaba mejor su contribución principal. Por tanto, las cantidades presentadas en la Tabla 8 corresponden a los 587 estudios clasificados en esta etapa y no al corpus final de 67 artículos analizados en profundidad.

Tabla 8. Distribución de los estudios clasificados por categoría temática de la revisión sistemática de la literatura.

Identificador	Categoría temática	Relación con las RQ	Cantidad
T1	Metodologías y buenas prácticas	RQ1	47
T2	Propuestas de ciclo de vida	RQ2	9
T3	Calidad, validación y pruebas	RQ3; parcialmente RQ4a	115
T4	Desafíos de implementación asociados con software y restricciones físicas	RQ4; RQ4a	228
T5	Qiskit como foco central	RQ5	15
T6	Herramientas, entornos de desarrollo y comparativas	Parcialmente RQ5; contexto del ecosistema	131
T7	Enseñanza y formación	RQ6	20
T8	Rutas de consolidación del campo y estado del arte	Contexto transversal	22

La distribución muestra una mayor concentración en T4, correspondiente a desafíos de implementación asociados con software y restricciones físicas, con 228 estudios. Le siguen T6, relacionado con herramientas, entornos de desarrollo y comparativas, con 131, y T3, asociado con calidad, validación y pruebas, con 115. Esta distribución evidencia una mayor presencia documental de problemas técnicos, condiciones de ejecución, herramientas de desarrollo y mecanismos de evaluación del software cuántico dentro del conjunto clasificado.

En contraste, T2, correspondiente a propuestas de ciclo de vida, reunió 9 estudios. T5, centrado específicamente en Qiskit, reunió 15 estudios, mientras que T7, relacionado con enseñanza y formación, concentró 20. Estas cantidades muestran una menor presencia relativa de dichas líneas dentro de los 587 estudios clasificados. Esta diferencia no implica ausencia de aportes ni una menor relevancia de estos tópicos, sino una menor presencia documental frente a las categorías vinculadas con desafíos técnicos, herramientas y calidad.

La Figura 8 representa gráficamente la distribución de los 587 estudios entre los ocho tópicos temáticos.

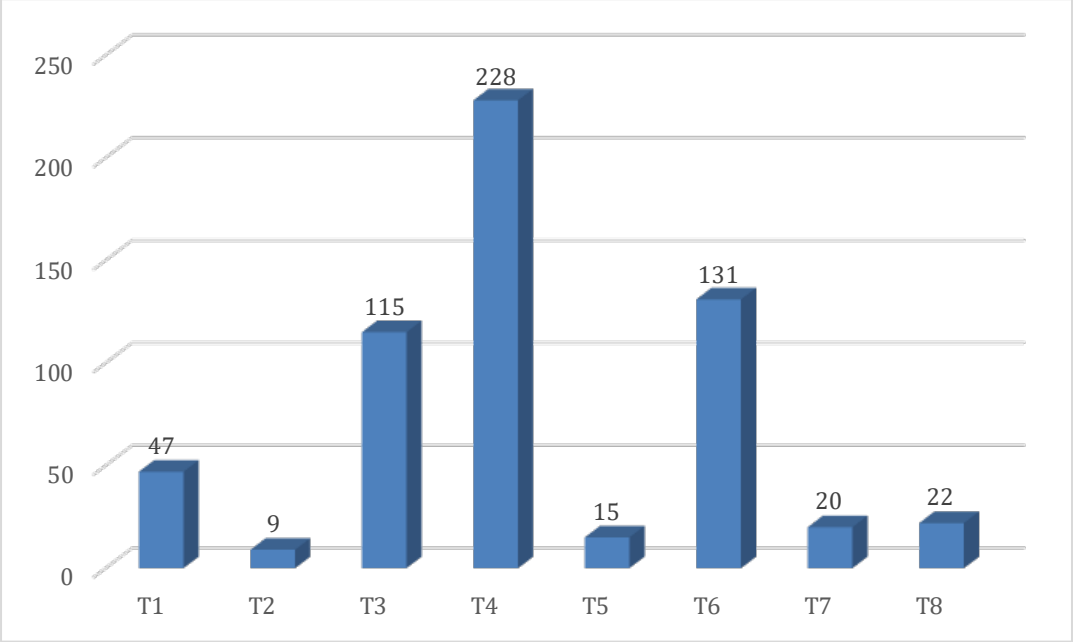


Figura 8. Distribución de los estudios clasificados por categoría temática de la revisión sistemática de la literatura.

La clasificación temática permitió reconocer la presencia relativa de las distintas líneas dentro del conjunto documental y proporcionó una estructura para las etapas posteriores de evaluación y síntesis. Los apartados siguientes profundizan en los hallazgos derivados del corpus final de estudios.

4.2.2. Metodologías y buenas prácticas

Los resultados relacionados con metodologías y buenas prácticas muestran la presencia de enfoques de ingeniería orientados al proceso, diseño, modelado, organización del desarrollo y adecuación técnica a las restricciones del dominio cuántico. Las propuestas identificadas abarcan desde prácticas de diseño y configuración hasta estrategias de compilación, optimización, simulación y mapeo.

En el nivel de proceso y diseño, los estudios revisados enfatizan la necesidad de gestionar variabilidad, restricciones y decisiones de desarrollo asociadas con las condiciones propias del dominio cuántico. Se identifican propuestas de metaprogramación para representar variables de elección, atributos cuantitativos y restricciones relacionadas con aspectos como diafonía, fidelidad, exactitud y profundidad del circuito [56]. También se reportan enfoques basados en líneas de producto de software para gestionar configuraciones híbridas clásico-cuánticas [33], así como propuestas de ingeniería basada en modelos, lenguajes específicos de dominio, generación automática de software cuántico y extensiones del

lenguaje unificado de modelado para representar sistemas con componentes cuánticos [57]–[61].

En el plano organizacional, la literatura incorpora adaptaciones de enfoques ágiles, modelos predictivos para estimar condiciones de éxito o costo en proyectos cuánticos y propuestas de *Quantum DevOps* orientadas a mejorar la confiabilidad en contextos NISQ [34], [62], [63]. Estos aportes amplían las prácticas de desarrollo al considerar incertidumbre tecnológica, variabilidad de ejecución, experimentación continua y coordinación del proceso.

También se identifican prácticas relacionadas con reusabilidad, reproducibilidad, mantenibilidad y documentación técnica. Entre ellas se encuentran trabajos sobre patrones de diseño, detección automática de patrones, empaquetado de experimentos reproducibles, evolución de repositorios y mantenimiento de flujos de trabajo [64]–[67]. De manera complementaria, algunas contribuciones de síntesis y arquitectura presentan guías, procedimientos y prácticas vinculadas con distintas actividades del desarrollo de software cuántico [7], [68]. En el nivel técnico, se documentan estrategias de compilación, mapeo, enrutamiento y reutilización de qubits orientadas a producir circuitos más eficientes o compatibles con restricciones específicas [69], [70].

En respuesta a la RQ1, la evidencia muestra que las metodologías y buenas prácticas en ISQ todavía no conforman un enfoque único plenamente consolidado. En su lugar, se identifican aproximaciones que adaptan principios y prácticas de IS a problemas de modelado, variabilidad, organización del desarrollo, reproducibilidad, mantenimiento y adecuación técnica. Estos hallazgos muestran que el desarrollo de software cuántico requiere prácticas de ingeniería adaptadas a las condiciones particulares del dominio cuántico.

4.2.3. Propuestas de ciclo de vida

Los resultados relacionados con ciclo de vida muestran distintos intentos por estructurar el desarrollo de software cuántico mediante fases, actividades, artefactos y decisiones asociadas con dicho proceso. Las propuestas identificadas presentan diferentes grados de formalización, desde ciclos de vida explícitos hasta descripciones parciales de actividades o componentes.

Entre las aproximaciones más estructuradas se identifica un ciclo con orientación DevOps para contextos NISQ, que articula actividades de planeación, codificación, construcción, pruebas, liberación, evaluación, despliegue, configuración, monitoreo y retroalimentación [34]. En este caso, DevOps se utiliza como estructura para organizar actividades recurrentes del desarrollo de software cuántico.

También se reporta un ciclo de vida de diez fases para software cuántico basado en compuertas, que reconoce problemas abiertos en cada fase y destaca el carácter híbrido del proceso [32]. De manera complementaria, se identifica un modelo iterativo de pila completa para entornos híbridos, orientado a articular diseño, implementación y despliegue sobre infraestructuras clásico-cuánticas [21]. Estas propuestas muestran que la estructuración del ciclo de vida en ISQ se relaciona estrechamente con decisiones de integración, ejecución e infraestructura.

Otros trabajos no formulan un ciclo de vida integral, pero aportan elementos para organizar actividades específicas del proceso. Entre ellos se encuentran propuestas de configuración para desarrollo híbrido, recomendaciones asociadas con adopción ágil y estimación de éxito o costo en proyectos cuánticos, así como revisiones que estructuran la evidencia mediante fases tradicionales de la IS, como requerimientos, diseño, implementación, pruebas y mantenimiento [7], [33], [63]. Asimismo, algunas aproximaciones sitúan la arquitectura de software como un elemento articulador de requisitos, modelado, evaluación y despliegue [68].

La literatura también permite reconocer actividades recurrentes que pueden interpretarse como fases implícitas del desarrollo. En el diseño se reporta el uso de representaciones intermedias para preservar estructura y restricciones antes de adoptar decisiones dependientes del hardware. En la implementación se identifican flujos multietapa relacionados con síntesis, descomposición, mapeo, enrutamiento, preparación del circuito y compilación [71]–[73]. Aunque estas actividades no siempre se presentan como parte de un ciclo de vida completo, muestran la necesidad de coordinar decisiones de análisis, diseño, implementación, pruebas, despliegue, monitoreo y mantenimiento bajo condiciones técnicas particulares.

En respuesta a la RQ2, la evidencia muestra que existen propuestas de ciclo de vida y aproximaciones para estructurar el proceso de desarrollo de software cuántico, aunque con distintos grados de formalización. Dentro de la literatura revisada no se identifica un modelo general ampliamente aceptado, sino aproximaciones que organizan actividades de análisis, diseño, implementación, pruebas, despliegue, monitoreo y mantenimiento de acuerdo con las restricciones del dominio cuántico. Estos hallazgos sitúan el ciclo de vida como una dimensión todavía en consolidación dentro del desarrollo de soluciones cuánticas e híbridas.

4.2.4. Calidad, verificación, validación y pruebas

Los resultados relacionados con calidad, verificación, validación y pruebas muestran que el software cuántico requiere enfoques adaptados a características particulares del dominio. Entre ellas se encuentran el comportamiento probabilístico, la medición destructiva, la sensibilidad al hardware, las transformaciones introducidas durante la

compilación y la dificultad de establecer oráculos de prueba directos. Estas condiciones amplían los aspectos que deben considerarse al evaluar la calidad del software cuántico.

En pruebas y validación se identifican enfoques orientados a comparar comportamientos entre implementaciones, configuraciones o representaciones del software. Entre ellos se encuentran las pruebas diferenciales de pilas de software cuántico, utilizadas para detectar inconsistencias entre distintos entornos o implementaciones [74]. También se reportan propuestas de validación basada en modelos que emplean restricciones formales para verificar condiciones de buena formación en representaciones de circuitos o sistemas cuánticos [75]. Desde la ingeniería dirigida por modelos, algunos estudios señalan además dificultades para probar y depurar modelos cuánticos, especialmente cuando los fallos pueden originarse tanto en la representación del software como en factores externos asociados con la ejecución [58].

La verificación formal y el análisis estático constituyen otra línea de trabajo identificada. Se reportan estudios orientados a verificar equivalencia de circuitos, transformaciones de compilación o propiedades de programas cuánticos mediante técnicas formales, como el cálculo ZX o esquemas especializados para flujos de compilación [76], [77]. De manera complementaria, se identifican herramientas que trasladan prácticas de análisis estático al dominio cuántico mediante la detección de errores en programas o el análisis de propiedades de entrelazamiento [78], [79].

La evaluación de la calidad también incorpora aspectos relacionados con fidelidad, reproducibilidad y evaluación comparativa. Algunos estudios buscan estimar la fidelidad esperada de una ejecución, conservar paquetes reproducibles de experimentos o comparar procesos de transformación mediante criterios de desempeño y compatibilidad [66], [80], [81]. Estos aportes muestran que la calidad del software cuántico depende tanto del código fuente como de las transformaciones aplicadas al circuito, los supuestos experimentales y la posibilidad de repetir o contrastar los resultados.

En respuesta a la RQ3, la evidencia sitúa la calidad en ISQ como una dimensión transversal que involucra programas, modelos, circuitos, procesos de compilación y mecanismos de evaluación. Las pruebas, la validación basada en modelos, la verificación formal, el análisis estático, la estimación de fidelidad, la reproducibilidad y la evaluación comparativa constituyen estrategias complementarias para abordar desafíos asociados con el comportamiento probabilístico, la dependencia del hardware, las transformaciones de compilación y la dificultad de establecer oráculos de prueba directos.

4.2.5. Desarrollo de software en sistemas híbridos clásico-cuánticos

Los resultados relacionados con sistemas híbridos muestran que las soluciones cuánticas actuales dependen de la coordinación entre componentes clásicos, circuitos

cuánticos, infraestructura de ejecución y restricciones del hardware NISQ. La literatura describe estas soluciones como sistemas que articulan recursos clásicos y cuánticos con decisiones de integración e infraestructura [82]. Su comportamiento depende tanto del circuito implementado como de la forma en que la solución se prepara, ejecuta, coordina y evalúa.

En el plano del hardware, los estudios revisados reportan variabilidad entre dispositivos, cambios de calibración, errores en compuertas, errores de lectura y limitaciones de conectividad, factores que afectan la estabilidad de las ejecuciones y la posibilidad de anticipar el comportamiento de una solución [24]. También se identifican restricciones de escalabilidad asociadas con técnicas como el corte de circuitos, la compilación basada en restricciones y el mapeo de qubits. Estas condiciones requieren establecer compromisos entre profundidad, fidelidad, conectividad y uso de recursos [25], [83].

Desde la perspectiva de integración, la literatura documenta dificultades relacionadas con la gestión de múltiples proveedores y plataformas de ejecución, la coordinación entre recursos clásicos y cuánticos, las colas de ejecución, la interoperabilidad, la dependencia de plataforma y la orquestación de flujos híbridos [84], [85]. Algunos trabajos abordan estas dificultades mediante enfoques de pila completa, operación continua, mantenimiento o patrones híbridos orientados a organizar la interacción entre componentes clásicos y cuánticos [7], [21], [67], [86].

Las restricciones identificadas también inciden en el desempeño esperado de las soluciones. Algunos estudios señalan que la profundidad y anchura de los circuitos pueden afectar la calidad de los resultados, mientras que la variación temporal de las condiciones de calibración introduce inestabilidad en el rendimiento [87], [88]. Aunque las estrategias de optimización y mitigación de errores pueden mejorar ciertos resultados, la evidencia revisada muestra que no eliminan por completo las limitaciones físicas y operativas de los dispositivos NISQ.

En respuesta a la RQ4 y la RQ4a, la evidencia muestra que los sistemas híbridos no constituyen únicamente un contexto de despliegue, sino una condición estructural del software cuántico actual. En este entorno se identifican desafíos asociados con las restricciones del hardware, la variabilidad entre dispositivos, los cambios en las condiciones de calibración, la escalabilidad, la interoperabilidad, la dependencia de plataforma, las condiciones de ejecución y la coordinación de flujos híbridos. Estas limitaciones inciden en la calidad, confiabilidad y rendimiento de las soluciones, así como en su operación, al condicionar decisiones de diseño, integración, compilación y ejecución.

4.2.6. Qiskit y ecosistema tecnológico

Los resultados relacionados con Qiskit y el ecosistema tecnológico muestran que el desarrollo de software cuántico se apoya en un conjunto diverso de entornos de desarrollo, lenguajes, simuladores, plataformas y servicios de ejecución. En este ecosistema, Qiskit se identifica como una referencia por su uso en programación, simulación, transpilación, experimentación y acceso a infraestructura cuántica de IBM. Sin embargo, la literatura revisada muestra que Qiskit no constituye una solución única para todos los contextos de desarrollo, ya que la selección de herramientas depende del tipo de problema, del flujo de desarrollo y de las condiciones de ejecución disponibles.

Qiskit se utiliza con frecuencia como base experimental para comparar propuestas de compilación, transpilación, preparación de estados y optimización de circuitos. En distintos estudios, sus componentes o niveles de optimización funcionan como punto de referencia para evaluar mejoras en desempeño, reducción de compuertas, disminución de errores o adecuación a restricciones de ejecución [89]–[91]. Este uso como entorno de referencia también requiere reportar con claridad las versiones, configuraciones y condiciones experimentales empleadas.

Además de su uso como base experimental, Qiskit se documenta como un entorno que vincula el diseño de circuitos con su procesamiento técnico posterior. Se relaciona con actividades de descomposición, enrutamiento, transpilación, simulación y análisis de resultados [24], [72], [88]. Asimismo, se reporta como un entorno de desarrollo ampliamente utilizado, asociado con su integración con Python, su ecosistema de extensiones y su utilidad para experimentación, síntesis, control y optimización [67], [92], [93].

Los estudios revisados identifican, a su vez, limitaciones asociadas con su uso. Entre ellas se encuentran la heterogeneidad entre versiones, la disponibilidad incompleta de ciertas compuertas, restricciones prácticas relacionadas con el entorno de ejecución de Python, diferencias de rendimiento frente a simuladores o herramientas especializadas y la dependencia de plataformas o proveedores específicos [81], [94], [95]. Estas condiciones hacen necesario considerar criterios de compatibilidad, desempeño, portabilidad, reproducibilidad y adecuación al contexto de uso durante la selección de herramientas.

En respuesta a la RQ5, la evidencia identifica a Qiskit como una herramienta relevante para programación, simulación, transpilación y experimentación, cuyo uso forma parte de un ecosistema tecnológico más amplio. Su función como entorno de referencia convive con limitaciones relacionadas con la variabilidad entre versiones, compatibilidad, desempeño, portabilidad y dependencia de plataforma. Estos hallazgos muestran que la selección de herramientas en ISQ requiere una valoración contextual y comparativa.

4.2.7. Enseñanza y formación en ingeniería de software cuántico

Los resultados relacionados con enseñanza y formación muestran que la literatura educativa se concentra con mayor frecuencia en CQ general y programación cuántica que en propuestas específicamente orientadas a la formación en ISQ. Las iniciativas identificadas abarcan recursos introductorios, entornos de experimentación, desarrollo de competencias y análisis de necesidades formativas.

En el ámbito educativo se identifican experiencias apoyadas en entornos reproducibles, laboratorios, kits de desarrollo de software y herramientas como Qiskit, PennyLane y Ocean SDK [96]. También se reportan comparaciones entre kits de desarrollo como Qiskit, ProjectQ, Cirq y Forest, útiles para reconocer dificultades de instalación, ejecución y visualización en cursos introductorios [97]. Estas experiencias muestran el papel de las herramientas como apoyo para facilitar la experimentación y el acercamiento práctico al desarrollo cuántico.

Desde una perspectiva curricular y de competencias, la literatura señala una brecha entre las capacidades deseables para la ISQ y la oferta formativa disponible. Algunos estudios analizan la educación en cómputo clásico y cuántico desde un enfoque centrado en competencias [38], mientras que otros examinan la relación entre oferta y demanda en la formación de fuerza laboral para ISQ [35]. De manera complementaria, se identifican propuestas orientadas a programación, depuración, estimación de recursos, ejecución y evaluación automatizada, así como experiencias didácticas apoyadas en laboratorios, Python, Qiskit, Jupyter, instrucciones programadas o recursos asistidos por modelos de lenguaje a gran escala [36], [41], [42], [98].

La evidencia revisada permite precisar una diferencia importante: la disponibilidad de recursos, cursos, laboratorios y experiencias educativas sobre CQ o programación cuántica no equivale por sí misma a una formación específica en ISQ. Una trayectoria formativa orientada a la ISQ requiere articular fundamentos cuánticos con aspectos propios de la IS, como procesos de desarrollo, arquitectura, integración, calidad, pruebas, documentación, mantenimiento, trazabilidad, reproducibilidad y evaluación sistemática. Esta articulación permite que la formación trascienda el uso de herramientas o la ejecución de circuitos e incorpore criterios relacionados con la producción, evolución y evaluación de software en entornos cuánticos e híbridos.

En respuesta a la RQ6, los estudios revisados muestran que la formación específicamente orientada a ISQ permanece limitada y dispersa. Aunque se identifican recursos, experiencias y propuestas relacionadas con competencias y desarrollo de software cuántico, la evidencia muestra que todavía existe una oferta formativa fragmentada y con una integración limitada de la perspectiva de IS.

4.2.8. Aporte de la revisión sistemática de la literatura a la investigación

La RSL aportó una base documental especializada para profundizar en el estado actual de la ISQ mediante el análisis de la literatura científica. Su análisis permitió examinar metodologías, propuestas de ciclo de vida, enfoques de calidad, verificación, validación y pruebas, sistemas híbridos, herramientas tecnológicas y aspectos relacionados con la enseñanza y formación.

A partir de esta evidencia se identificaron dimensiones técnicas, metodológicas y formativas relevantes para la elaboración posterior del marco. La RSL permitió reconocer líneas con mayor desarrollo documental, aspectos todavía fragmentados y necesidades recurrentes relacionadas con la formación de perfiles para el desarrollo de software cuántico e híbrido.

Los resultados de esta etapa sirvieron como base para la elaboración del QSEAK_v0, en articulación con la caracterización panorámica obtenida mediante el AB. Los hallazgos y categorías identificados no se incorporaron de manera directa a la estructura del marco, sino que se analizaron y reorganizaron según su pertinencia para integrar fundamentos, conocimientos técnicos especializados y conocimientos transversales y profesionales.

De este modo, ambas fases aportaron perspectivas complementarias. El AB permitió caracterizar la producción científica, la evolución temática y la configuración general del campo, mientras que la RSL permitió profundizar en los contenidos, prácticas, desafíos y necesidades formativas de la ISQ.

4.3. Versión inicial del marco referencial

QSEAK_v0 constituye uno de los resultados centrales de la investigación y corresponde a la primera versión documentada del marco de fundamentos referenciales QSEAK. La propuesta organiza conocimientos relevantes para la formación inicial en ISQ desde una perspectiva de IS, a partir de los insumos obtenidos durante el desarrollo de la investigación.

El marco se estructura en tres áreas de conocimiento: fundamentos, conocimientos técnicos especializados y conocimientos transversales y profesionales. Estas áreas permiten organizar de manera progresiva los conocimientos de base, los aspectos técnicos vinculados con el desarrollo de software cuántico e híbrido y las dimensiones transversales asociadas con su práctica académica y profesional.

Los apartados siguientes desarrollan la versión inicial del marco de forma secuencial. Primero se presentan su propósito y delimitación, después se describe su estructura general mediante áreas, componentes y tópicos, posteriormente se desarrollan las tres áreas principales y, finalmente, se sintetiza su aporte dentro de la investigación.

4.3.1. Propósito y delimitación del marco referencial

El propósito del QSEAK_v0 es organizar un conjunto de conocimientos relevantes para la formación inicial en ISQ mediante una estructura referencial compuesta por distintos niveles de organización del conocimiento. La propuesta surge de la necesidad de articular fundamentos, conocimientos técnicos especializados y dimensiones transversales y profesionales vinculadas con el desarrollo de software cuántico e híbrido. En este sentido, busca contribuir a identificar los elementos que pueden resultar pertinentes para la preparación inicial de perfiles vinculados con este campo, particularmente desde una perspectiva de IS.

El alcance del marco es formativo y referencial. Por ello, no establece una secuencia curricular única, un plan de estudios completo, un estándar profesional ni un cuerpo de conocimiento validado de manera definitiva. Su función consiste en organizar conocimientos que puedan servir como punto de partida para futuras guías, discusiones y adaptaciones formativas en ISQ, sin definir todavía asignaturas, cargas horarias, niveles de dominio, instrumentos de evaluación o resultados de aprendizaje formalmente validados.

Esta delimitación permite situar el aporte de la propuesta dentro del alcance de la investigación. La propuesta no pretende definir de manera exhaustiva la formación de ingenieros de software cuántico, sino ofrecer una primera organización documentada de conocimientos que pueda ser discutida, revisada y refinada posteriormente. Su valor radica en articular contenidos actualmente dispersos en la literatura y organizarlos bajo una lógica formativa.

En esta etapa, el marco se orienta principalmente a contextos de formación inicial en educación superior, particularmente en licenciatura o en cursos introductorios relacionados con ISQ. Sin embargo, la definición de trayectorias curriculares, perfiles de ingreso y egreso, precondiciones, poscondiciones y resultados de aprendizaje queda fuera del alcance inmediato de esta versión y se reconoce como una línea de trabajo posterior.

La denominación QSEAK corresponde a *Quantum Software Engineering Areas of Knowledge*. Por su parte, la designación v0 señala que se trata de una versión inicial, de carácter preliminar y abierta a revisión. Esta precisión permite distinguir la propuesta desarrollada en esta investigación de versiones posteriores que podrían incorporar un contraste académico más amplio, validación empírica, adaptación curricular o mecanismos adicionales de participación comunitaria.

La elección de la denominación QSEAK derivó de una revisión preliminar de alternativas terminológicas. Se consideraron opciones como QSERF, QSERA, QSEBOK y QSEEK, las cuales fueron descartadas por posibles problemas de ambigüedad, uso previo en otros dominios o por sugerir un grado de consolidación mayor que el correspondiente a la

propuesta. En particular, denominaciones asociadas con *Reference Framework*, *Reference Architecture* o *Body of Knowledge* podían interpretarse como una arquitectura de referencia, un marco más consolidado o un cuerpo de conocimiento formalmente establecido. En contraste, QSEAK resultó más adecuado por ser pronunciable, representar de manera clara la organización por áreas de conocimiento y mantener coherencia con el carácter inicial, referencial y revisable de la propuesta.

4.3.2. Estructura general del marco referencial

QSEAK_v0 se estructura mediante tres niveles de organización del conocimiento, correspondientes a áreas, componentes y tópicos. Las áreas representan los grandes bloques de conocimiento del marco, los componentes agrupan contenidos relacionados dentro de cada área y los tópicos constituyen unidades temáticas específicas. Esta organización permite establecer relaciones entre conocimientos de base, conocimientos técnicos especializados y dimensiones transversales vinculadas con la formación inicial en ISQ.

La estructura general comprende las áreas de fundamentos, conocimientos técnicos especializados y conocimientos transversales y profesionales. Su organización sigue una lógica progresiva que parte de una base conceptual inicial, continúa con una dimensión técnica relacionada con la creación, integración y evaluación de software cuántico e híbrido, y se complementa con una dimensión transversal asociada con la gestión, la colaboración, la comunicación, la reproducibilidad, la observabilidad y la actualización continua.

La Figura 9 presenta la estructura general del QSEAK_v0 y sintetiza la relación entre las tres áreas y sus componentes, con el propósito de ofrecer una visión panorámica del marco antes de desarrollar cada una de ellas.

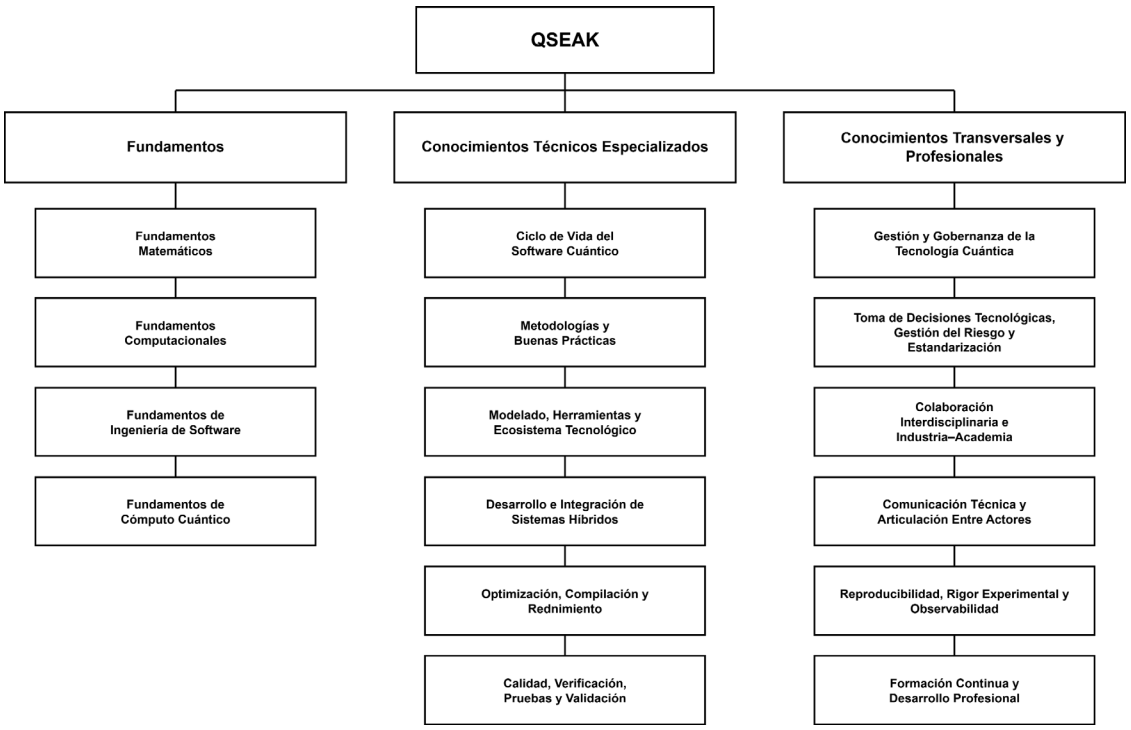


Figura 9. Estructura general de la versión inicial del marco referencial.

En el nivel de componentes, el Área 1 reúne los fundamentos matemáticos, computacionales, de IS y de CQ. El Área 2 agrupa los conocimientos técnicos especializados relacionados con ciclo de vida, metodologías y buenas prácticas, modelado, herramientas, ecosistema tecnológico, desarrollo e integración de sistemas híbridos, optimización, compilación, rendimiento, calidad, verificación, pruebas y validación. Por su parte, el Área 3 integra los conocimientos transversales y profesionales vinculados con gestión, gobernanza, toma de decisiones, riesgo, estandarización, colaboración, comunicación técnica, reproducibilidad, rigor experimental, observabilidad y formación continua.

Además de las tres áreas, la propuesta reconoce un panorama educativo y formativo complementario. Este elemento no constituye una cuarta área del marco, sino que funciona como un criterio de contextualización que permite relacionar la propuesta con cursos, laboratorios, tutoriales, plataformas, recursos educativos y experiencias de enseñanza vinculadas con CQ, programación cuántica e ISQ.

Este panorama contextualiza la propuesta frente a la brecha formativa identificada en la RSL y evita equiparar la formación específica en ISQ con el uso de herramientas o la ejecución de circuitos.

La estructura general del marco permite organizar conocimientos interdependientes bajo una lógica común, sin tratarlos como compartimentos aislados ni establecer una trayectoria

curricular rígida. Las áreas, componentes y tópicos proporcionan una organización de referencia para presentar y desarrollar los contenidos que conforman QSEAK_v0.

4.3.3. Área 1: Fundamentos

El Área 1 reúne los fundamentos necesarios para establecer una base común de comprensión en ISQ. Su propósito no es desarrollar de manera exhaustiva todos los contenidos de matemáticas, computación, IS o CQ, sino identificar conocimientos iniciales que permitan comprender los conceptos, restricciones y formas de razonamiento involucrados en el desarrollo de software cuántico y de sistemas híbridos. Por ello, se ubica como punto de partida del marco y cumple una función de soporte para las áreas posteriores.

Esta área se organiza en cuatro componentes: fundamentos matemáticos, fundamentos computacionales, fundamentos de IS y fundamentos de CQ. Su inclusión responde al carácter interdisciplinario de la ISQ, en el que convergen conocimientos que suelen abordarse de manera separada, pero que requieren articularse al analizar problemas relacionados con el software cuántico. En este sentido, el Área 1 busca integrar el lenguaje formal necesario para el CQ, las bases computacionales, los principios de la IS y los conceptos propios del dominio cuántico.

La Figura 10 sintetiza los cuatro componentes del Área 1 y muestra su ubicación dentro del QSEAK_v0.

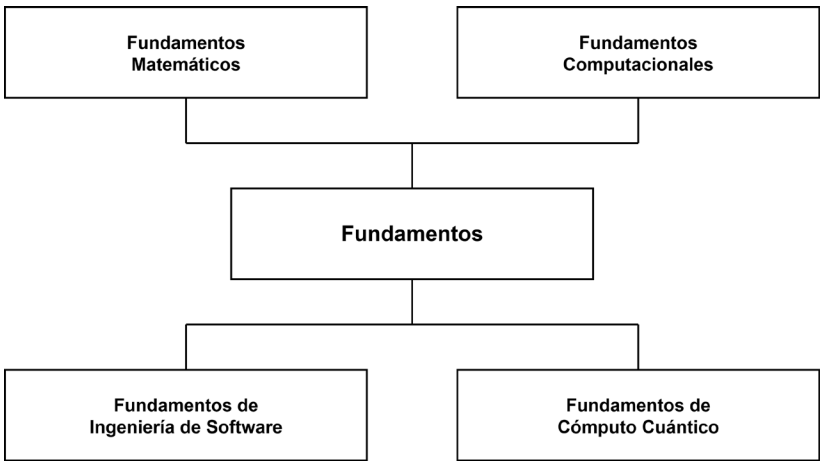


Figura 10. Componentes del Área 1: Fundamentos en la versión inicial del marco referencial.

Los fundamentos matemáticos proporcionan el lenguaje formal necesario para representar y manipular información cuántica. Este componente incluye conocimientos relacionados con

lógica, *notación formal*, *álgebra lineal*, *números complejos*, *espacios vectoriales*, *operaciones matriciales*, *producto interno y tensorial*, *operadores*, *valores y vectores propios*, así como nociones de *probabilidad*. Estos conocimientos permiten comprender la representación de estados cuánticos, la acción de las compuertas, la composición de sistemas y la naturaleza probabilística de la medición.

Los fundamentos computacionales complementan esta base formal al aportar conocimientos para analizar problemas, formular soluciones y comprender modelos de cómputo. Este componente considera *pensamiento algorítmico*, *fundamentos de programación*, *estructuras de datos*, *lenguajes de programación*, *arquitectura de computadoras*, *modelos de computación*, *análisis de algoritmos*, *complejidad* y paradigmas como la *programación funcional* y la *programación orientada a objetos*. Su incorporación permite reconocer que la formación en ISQ no depende únicamente del conocimiento cuántico, sino también de capacidades computacionales necesarias para comprender las similitudes y diferencias entre el cómputo clásico y el cuántico.

Desde la perspectiva disciplinar de la IS, el Área 1 incorpora conocimientos relacionados con *procesos de software*, *gestión de proyectos*, *requerimientos*, *análisis del dominio*, *diseño*, *arquitectura*, *documentación*, *calidad*, *pruebas*, *métricas*, *mantenimiento*, *control de versiones* y *gestión de configuración*. Estos contenidos permiten situar la ISQ más allá de la programación de circuitos o del uso de herramientas cuánticas, al entenderla como una actividad de ingeniería que requiere *organizar*, *evaluar*, *documentar*, *mantener* y *evolucionar* soluciones de software.

Por su parte, los fundamentos de CQ introducen los conceptos necesarios para comprender el dominio tecnológico en el que se desarrolla la ISQ. Entre ellos se consideran *qubits*, *superposición*, *medición*, *sistemas compuestos*, *interferencia*, *entrelazamiento*, *reversibilidad*, *compuertas*, *circuitos*, *algoritmos introductorios*, *hardware cuántico*, *ruido* y *decoherencia*. Su propósito no es sustituir una formación especializada en CQ, sino proporcionar una base conceptual que permita comprender por qué el software cuántico presenta características y restricciones distintas de las del software clásico.

De esta manera, el Área 1 establece una base común para articular IS y CQ dentro del marco referencial. Su función es integrar fundamentos matemáticos, computacionales, de IS y de CQ, evitando que la formación inicial en ISQ se reduzca únicamente al aprendizaje del paradigma cuántico o, en sentido contrario, a la aplicación directa de principios de IS sin considerar las particularidades del dominio cuántico.

4.3.4. Área 2: Conocimientos técnicos especializados

El Área 2 se orienta a los conocimientos técnicos especializados necesarios para avanzar desde la comprensión conceptual del dominio cuántico hacia la *construcción*,

integración y *evaluación* de soluciones de software cuántico e híbrido. Su inclusión responde a que la formación en ISQ no puede limitarse al aprendizaje de compuertas, circuitos o plataformas de programación, sino que requiere comprender cómo estos elementos se incorporan en *procesos de desarrollo*, *decisiones de diseño*, *restricciones tecnológicas* y *criterios de calidad* propios de la IS.

Desde esta perspectiva, el área articula conocimientos relacionados con el *ciclo de vida*, las *metodologías* y *buenas prácticas*, el *modelado*, las *herramientas*, el *ecosistema tecnológico*, la *integración híbrida*, la *optimización*, la *compilación*, el *rendimiento*, la *verificación*, las *pruebas* y la *validación*. Estos contenidos no conforman una secuencia rígida de actividades, sino dimensiones técnicas interdependientes que permiten comprender el desarrollo de software cuántico como una práctica de ingeniería. Esta organización desplaza la atención desde la programación aislada de circuitos hacia una visión más amplia del software cuántico como un artefacto que debe ser diseñado, documentado, ejecutado, evaluado, mantenido e integrado en sistemas de mayor alcance.

La Figura 11 sintetiza los componentes del Área 2 y muestra su ubicación dentro del QSEAK_v0.

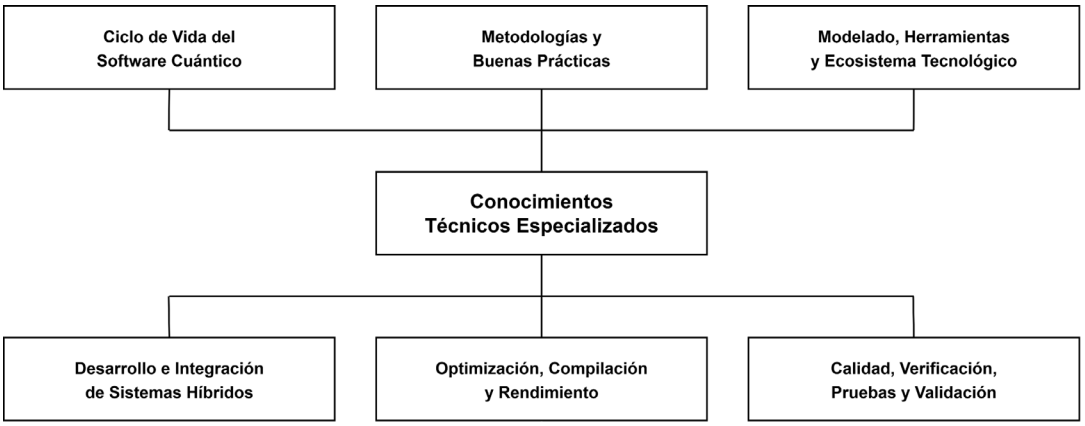


Figura 11. Componentes del Área 2: Conocimientos técnicos especializados en la versión inicial del marco referencial.

Uno de los aspectos centrales de esta área es reconocer que el software cuántico se desarrolla bajo condiciones distintas de las del software clásico, sin dejar de estar sujeto a principios de ingeniería. Las actividades de análisis, diseño, implementación, ejecución y evaluación continúan siendo relevantes, pero deben reinterpretarse frente a factores como la dependencia de plataformas, la disponibilidad limitada de hardware, la presencia de ruido, la variabilidad de los resultados, las restricciones de conectividad, la profundidad de los circuitos y la interacción entre procesamiento clásico y cuántico. Por ello, el área incorpora

conocimientos que permiten *razonar sobre la viabilidad de una solución y no únicamente sobre su formulación algorítmica*.

Las herramientas, lenguajes, bibliotecas, simuladores, servicios en la nube y plataformas de ejecución tampoco se entienden únicamente como medios de implementación, sino como elementos que pueden condicionar el diseño y la evaluación de las soluciones. La selección de una plataforma, la representación de un circuito, la forma de ejecutar un experimento o la manera de comparar sus resultados pueden influir en la interpretación técnica de una solución. Por esta razón, la formación en ISQ requiere comprender tanto el uso de estas tecnologías como sus limitaciones, supuestos y efectos sobre el desarrollo de software cuántico.

La integración híbrida constituye otro componente relevante, debido a que muchas soluciones cuánticas actuales no operan como sistemas autónomos, sino como parte de flujos computacionales más amplios. Esto requiere analizar cómo se distribuyen las responsabilidades entre componentes clásicos y cuánticos, cómo se comunican, qué tareas pueden asignarse al procesamiento cuántico y cómo se evalúan los resultados dentro de una arquitectura completa. De este modo, el componente cuántico deja de considerarse como un circuito aislado y se entiende como parte de una solución de software que interactúa con datos, servicios, infraestructura y procesos clásicos.

El área también considera la optimización, la compilación y el rendimiento, debido a que la ejecución de soluciones cuánticas se encuentra condicionada por recursos tecnológicos todavía limitados. La *profundidad de los circuitos*, el *número de compuertas*, la *conectividad del dispositivo*, la *selección de la plataforma de ejecución*, los *tiempos de ejecución* y la *sensibilidad al ruido* pueden influir en la viabilidad de una solución. En consecuencia, la formación técnica en ISQ requiere criterios para analizar no sólo si una solución es conceptualmente correcta, sino también si puede ejecutarse de manera razonable bajo las condiciones disponibles.

Finalmente, el Área 2 incorpora la *calidad*, la *verificación*, las *pruebas* y la *validación* como dimensiones necesarias para el desarrollo de software cuántico. La naturaleza probabilística de los resultados, la presencia de ruido y la dificultad para observar directamente determinados estados hacen que la evaluación de estas soluciones requiera estrategias de comparación, depuración, control experimental y análisis de resultados. En este contexto, la ISQ requiere adaptar prácticas procedentes de la IS a un dominio en el que la corrección, la reproducibilidad y la confiabilidad no siempre pueden evaluarse mediante los mismos criterios utilizados en sistemas clásicos.

De este modo, el Área 2 organiza conocimientos técnicos necesarios para el desarrollo de soluciones de software en entornos cuánticos e híbridos. Su función dentro del marco es articular procesos, herramientas, restricciones de ejecución, integración arquitectónica y criterios de calidad, evitando que la formación inicial en ISQ se reduzca al aprendizaje operativo de plataformas o a la implementación aislada de algoritmos cuánticos.

4.3.5. Área 3: Conocimientos transversales y profesionales

El Área 3 incorpora conocimientos transversales y profesionales que complementan los fundamentos conceptuales y los conocimientos técnicos de la ISQ. Su inclusión responde a que el desarrollo de software cuántico e híbrido no ocurre de manera aislada, sino dentro de contextos académicos, científicos, tecnológicos y organizacionales que influyen en la manera en que las soluciones se justifican, comunican, evalúan, adoptan y sostienen. Por ello, esta área reconoce que la formación inicial en ISQ también requiere criterios para desenvolverse en escenarios caracterizados por incertidumbre tecnológica, colaboración interdisciplinaria y evolución constante del campo.

Desde esta perspectiva, el Área 3 articula conocimientos relacionados con *gestión y gobernanza*, *toma de decisiones* tecnológicas, *gestión del riesgo*, *estandarización*, *colaboración entre industria y academia*, *comunicación técnica*, *reproducibilidad*, *rigor experimental*, *observabilidad*, *formación continua* y *desarrollo profesional*. Estos contenidos no se consideran elementos externos al desarrollo de software, sino dimensiones que pueden influir en la viabilidad, confiabilidad y transferencia de las soluciones cuánticas e híbridas. En un campo emergente, donde las plataformas, herramientas y prácticas todavía se encuentran en consolidación, la capacidad de documentar decisiones, justificar elecciones técnicas y comunicar limitaciones resulta tan importante como la capacidad de implementar soluciones.

La Figura 12 sintetiza los componentes del Área 3 y muestra su ubicación dentro del QSEAK_v0.

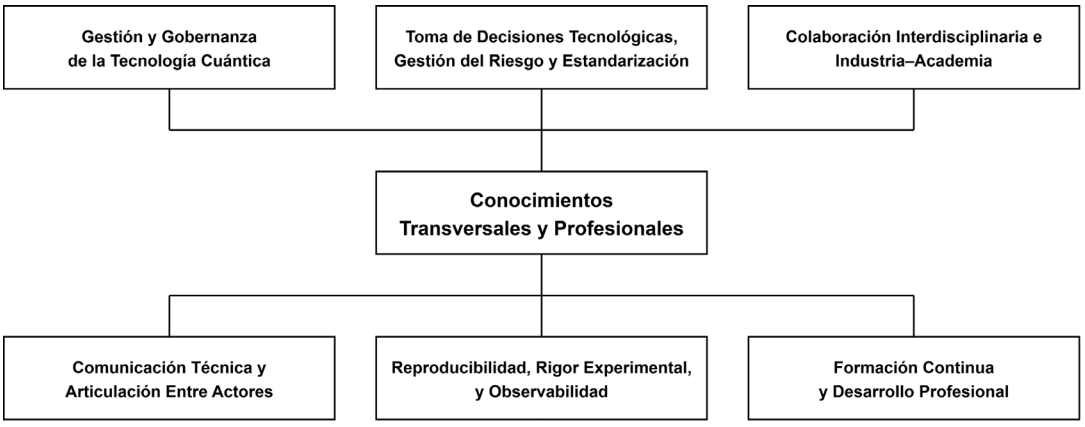


Figura 12. Componentes del Área 3: Conocimientos transversales y profesionales en la versión inicial del marco referencial.

Uno de los aspectos centrales de esta área es reconocer que la adopción de tecnologías cuánticas requiere procesos de gestión, coordinación y toma de decisiones que permitan valorar su pertinencia en función de los problemas, los recursos, las capacidades disponibles y los riesgos asociados. La selección de plataformas, herramientas, proveedores, enfoques de desarrollo o estrategias de integración no puede realizarse únicamente con base en criterios técnicos inmediatos, ya que también intervienen factores como la madurez tecnológica, la dependencia del ecosistema, la sostenibilidad de las soluciones, los costos de experimentación, la disponibilidad de talento y los posibles cambios en estándares o prácticas del campo.

Asimismo, el Área 3 destaca la importancia de la colaboración interdisciplinaria. La ISQ se desarrolla en la intersección de la computación, la física, las matemáticas, la IS y distintos dominios de aplicación, por lo que requiere perfiles capaces de interactuar con actores que poseen lenguajes, prioridades y formas de validación diferentes. Esta colaboración tiene relevancia tanto académica como práctica, debido a que muchas soluciones cuánticas e híbridas requieren la participación de especialistas en algoritmos, infraestructura, dominio del problema, IS, análisis de datos y evaluación experimental.

En este contexto, la comunicación técnica adquiere una función relevante. La documentación de alcances, restricciones, configuraciones, supuestos, resultados y condiciones de ejecución permite hacer explícitas las decisiones tomadas durante el desarrollo y facilita la revisión del trabajo por parte de otros actores. Esta dimensión adquiere especial importancia en ISQ, debido a que las expectativas asociadas con el potencial del CQ pueden propiciar interpretaciones imprecisas o exageradas. Comunicar con claridad qué se realizó, bajo qué condiciones, con qué limitaciones y con qué nivel de evidencia contribuye a una práctica más responsable y verificable.

La reproducibilidad, el rigor experimental y la observabilidad también resultan fundamentales para fortalecer la confiabilidad de las soluciones. El desarrollo de software cuántico puede depender de simuladores, plataformas de ejecución, versiones de herramientas, parámetros de ejecución, semillas, métricas, condiciones de ruido y configuraciones que pueden modificar los resultados obtenidos. Por ello, la formación en ISQ debe considerar la necesidad de registrar condiciones experimentales, controlar configuraciones, documentar decisiones y establecer mecanismos que permitan analizar el comportamiento de las soluciones durante su ejecución y evaluación.

Finalmente, el área incorpora la formación continua y el desarrollo profesional como respuesta al carácter dinámico de la ISQ. Debido a la rapidez de la evolución del campo, los conocimientos, herramientas, plataformas, prácticas y estándares asociados pueden modificarse conforme maduren las tecnologías cuánticas y sus aplicaciones. En consecuencia, la formación inicial no debería limitarse a la transmisión de contenidos estáticos, sino también promover capacidades de actualización, seguimiento crítico de avances, aprendizaje autónomo y adaptación profesional.

De este modo, el Área 3 amplía la comprensión de la ISQ al incorporar conocimientos y criterios transversales y profesionales necesarios para el desarrollo responsable, comunicable y sostenible de software cuántico e híbrido. Su función dentro del marco es mostrar que la formación inicial no sólo requiere fundamentos y conocimientos técnicos, sino también capacidades para gestionar decisiones, colaborar con otros actores, documentar evidencia, evaluar resultados y mantener un proceso de aprendizaje continuo en un campo todavía emergente.

4.3.6. Síntesis del aporte del marco referencial

QSEAK_v0 constituye el resultado integrador de la investigación al articular los hallazgos del AB, la RSL y la literatura complementaria en una organización referencial orientada a la formación inicial en ISQ. Su aporte no reside en cerrar el campo ni en establecer una trayectoria curricular definitiva, sino en organizar conocimientos identificados en fuentes conceptuales, técnicas, metodológicas y formativas bajo una estructura común.

El marco vincula conocimientos del dominio cuántico con dimensiones propias de la IS. La propuesta reconoce la importancia de comprender qubits, circuitos, medición, algoritmos, hardware, ruido y herramientas, pero sitúa estos elementos en relación con procesos de desarrollo, arquitectura, integración, calidad, pruebas, validación, reproducibilidad, documentación, gestión y colaboración interdisciplinaria.

Esta organización permite diferenciar entre formación general en CQ, aprendizaje de programación cuántica y formación inicial en ISQ. La formación general en CQ introduce principios y fenómenos del paradigma cuántico. El aprendizaje de programación cuántica desarrolla capacidades para construir circuitos y utilizar plataformas de programación cuántica. Por su parte, la formación inicial en ISQ requiere comprender cómo desarrollar, integrar, evaluar, documentar, mantener y evolucionar software cuántico e híbrido desde una perspectiva de ingeniería.

En este sentido, QSEAK_v0 contribuye a la discusión sobre la formación inicial en ISQ desde una perspectiva de IS. Su carácter inicial, referencial y revisable permite reconocerlo como un punto de partida para futuros contrastes académicos, adaptaciones formativas, refinamientos conceptuales y procesos de validación que contribuyan a la evolución del marco.

4.4. Resultados de la revisión académica inicial

Una vez elaborada QSEAK_v0, se realizó una revisión académica inicial con especialistas externos vinculados con ISQ, CQ, IS y áreas afines, con el propósito de

obtener retroalimentación sobre su claridad, alcance, profundidad, secuenciación y pertinencia para la formación inicial en ISQ.

Los resultados de esta revisión deben interpretarse como un contraste académico preliminar y no como una validación definitiva del marco. Su valor radica en identificar fortalezas, observaciones críticas, posibles vacíos y oportunidades de mejora que puedan orientar su refinamiento posterior.

Esta sección presenta el alcance efectivo de la revisión, la retroalimentación recibida por los especialistas y las oportunidades de mejora derivadas del proceso. A diferencia del Capítulo 3, centrado en el procedimiento seguido para realizar la revisión académica inicial, aquí se exponen los resultados obtenidos y cómo contribuyen a interpretar el estado actual del QSEAK_v0 como una propuesta inicial, referencial y revisable.

4.4.1. Alcance y desarrollo de la revisión académica inicial

Con corte al 5 de junio de 2026, se consideraron 78 investigadores para participar en la revisión académica inicial del QSEAK_v0. Cinco invitaciones no pudieron entregarse, por lo que sólo 73 llegaron a sus destinatarios. De estas, 49 no obtuvieron respuesta, seis investigadores declinaron participar, cinco manifestaron interés inicial o solicitaron aclaraciones y 13 recibieron el documento para revisión. De este último grupo se recibieron cinco retroalimentaciones académicas.

La Tabla 9 sintetiza el seguimiento del contacto con especialistas y el alcance efectivo de la revisión académica inicial.

Tabla 9. Seguimiento del contacto con especialistas para la revisión académica inicial.

Etapa	Categoría	Cantidad	Descripción
Base de contacto	Investigadores considerados	78	Investigadores identificados por su relación con ISQ, CQ, IS o áreas afines.
Depuración del contacto	Correos no entregados	5	Invitaciones que no pudieron entregarse correctamente.
Resultado del contacto	Sin respuesta	49	Invitaciones sin respuesta al corte del 5 de junio de 2026.

Resultado del contacto	Declinación	6	Respuestas negativas asociadas con disponibilidad, compromisos académicos, falta de correspondencia temática o posibles conflictos de interés.
Resultado del contacto	Interés inicial o solicitud de aclaraciones	5	Investigadores que solicitaron precisiones o manifestaron interés inicial, sin concretar revisión dentro del periodo establecido.
Revisión académica	Documento enviado para revisión	13	Investigadores que recibieron la versión inicial del marco para revisión académica inicial.
Revisión académica	Retroalimentación recibida	5 de 13	Comentarios académicos recibidos por parte de los investigadores a quienes se envió el documento.

Las cinco retroalimentaciones recibidas permitieron obtener un contraste especializado sobre la claridad, pertinencia y posibles mejoras del QSEAK_v0. Dado el alcance de la participación obtenida, estos resultados deben interpretarse como observaciones cualitativas iniciales y no como evidencia de consenso académico ni como una validación formal del marco.

4.4.2. Retroalimentación recibida por revisor

La revisión académica inicial permitió identificar valoraciones favorables, observaciones críticas y recomendaciones de mejora sobre el QSEAK_v0. Debido al carácter interdisciplinario de la ISQ, cada especialista aportó una perspectiva particular de acuerdo con su trayectoria y área de especialización. Los comentarios abordaron aspectos relacionados con arquitectura y diseño de software, trazabilidad metodológica, evolución comunitaria, orientación formativa, precisión conceptual de los fundamentos y presentación visual del documento.

Peng Liang, profesor de IS en la Escuela de Ciencias de la Computación de la Universidad de Wuhan y especialista en arquitectura de software e IS empírica, centró su revisión en la dimensión arquitectónica del marco. Reconoció el valor de la propuesta como un esfuerzo amplio de organización de conocimientos para la ISQ y señaló la conveniencia de fortalecer los contenidos relacionados con arquitectura de software, diseño arquitectónico y patrones arquitectónicos aplicables a sistemas de software cuántico. Aunque QSEAK_v0 ya contempla elementos asociados con diseño, arquitectura e integración de sistemas híbridos, sus observaciones sugieren que estos contenidos podrían diferenciarse y desarrollarse con mayor precisión. Asimismo, recomendó mejorar la legibilidad de algunas figuras, especialmente aquellas que concentran una cantidad amplia de información.

Ricardo Pérez del Castillo, profesor titular de la Facultad de Ciencias Sociales y Tecnologías de la Información de Talavera de la Reina de la Universidad de Castilla-La Mancha y especialista en ISQ, modernización de software y reingeniería de sistemas híbridos, centró sus observaciones en la fundamentación metodológica y la trazabilidad de la propuesta. Reconoció que el marco refleja una comprensión amplia del estado del arte y constituye un esfuerzo por construir un mapa conceptual de la ISQ. No obstante, advirtió que su estructura podría percibirse como arbitraria si no se explicita con suficiente claridad cómo se derivaron sus bloques, agrupaciones y contenidos específicos a partir de la literatura y de referentes disciplinares. En este sentido, recomendó fortalecer la relación entre los resultados de la RSL, los fundamentos de la IS y la estructura final del marco, así como hacer más visible su alineación con referentes de IS, planes curriculares, procesos de ciclo de vida y estándares relacionados. En cuanto al contenido, sugirió revisar la presencia de arquitectura de software para sistemas híbridos, ingeniería de servicios, operación de software cuántico o híbrido, fundamentos de hardware con impacto en el desarrollo de software y algoritmos híbridos como el solucionador cuántico variacional de valores propios (VQE, por sus siglas en inglés) y el algoritmo cuántico aproximado de optimización (QAOA, por sus siglas en inglés).

Samuel Eduardo Sepúlveda Cuevas, profesor asociado del Departamento de Ciencias de la Computación e Informática de la Universidad de La Frontera, con líneas de trabajo relacionadas con ingeniería de requisitos, líneas de productos de software e ISQ, orientó su retroalimentación hacia la evolución comunitaria y la evaluación posterior del marco. Sus comentarios destacaron la importancia de establecer mecanismos que permitan discutir, refinar y ampliar la propuesta de manera colaborativa. En particular, sugirió habilitar un repositorio o espacio compartido en el que investigadores interesados puedan revisar el marco, aportar observaciones y documentar las decisiones adoptadas durante su evolución. También propuso considerar mecanismos de retroalimentación más amplios, como encuestas u otros instrumentos diseñados con mayor rigor. Estas observaciones plantean la conveniencia de que futuras versiones del marco incorporen procesos participativos, trazables y abiertos a la comunidad académica.

Luis Mariano Bibbó, investigador del Laboratorio de Investigación y Formación en Informática Avanzada de la Facultad de Informática de la Universidad Nacional de La Plata, especializado en IS, modelado, métodos formales y CQ, valoró positivamente el esfuerzo de síntesis y estructuración de la propuesta. Destacó la organización del área de fundamentos en componentes matemáticos, computacionales, de IS y de CQ, al considerar que esta división contribuye a construir una base multidisciplinaria y evita reducir la ISQ a una visión centrada únicamente en circuitos. También reconoció la orientación del marco hacia una comprensión integral del ciclo de vida del software cuántico, que comprende requerimientos, partición clásico-cuántica, arquitectura, implementación, integración, validación, despliegue y mejora iterativa. Su principal observación se relacionó con la necesidad de precisar el propósito explícito de la propuesta y el tipo de uso académico o

formativo al que pretende contribuir. Además, sugirió considerar referentes complementarios, recursos educativos y marcos prácticos, así como valorar el impacto de la inteligencia artificial generativa y los modelos de lenguaje a gran escala en la formación en ISQ. Finalmente, recomendó revisar aspectos editoriales relacionados con la consistencia en el uso de siglas y la comunicación visual del documento.

GuoHua Sun, investigadora del Centro de Investigación en Computación del Instituto Politécnico Nacional y jefa del Laboratorio de Ciencias de la Información Cuántica, especializada en CQ, información cuántica, matemáticas aplicadas y computación científica, enfocó su revisión en la precisión conceptual de los fundamentos matemáticos y cuánticos. En los fundamentos matemáticos, sugirió incorporar explícitamente la noción de transformación unitaria por su importancia para comprender la evolución de los estados cuánticos y la acción de las compuertas. También recomendó distinguir entre probabilidad clásica y probabilidad cuántica para evitar un tratamiento demasiado general del componente probabilístico. En los fundamentos de CQ, observó que el teorema de no clonación podría corresponder con mayor precisión al ámbito de la comunicación cuántica, por lo que recomendó reconsiderar su ubicación o tratamiento dentro del marco. Sus comentarios también permitieron identificar ajustes relacionados con la secuencia de algunos tópicos y la claridad de determinadas descripciones.

Las cinco revisiones permiten reconocer una valoración favorable del QSEAK_v0 como esfuerzo inicial de organización de conocimientos para la ISQ, al mismo tiempo que evidencian aspectos que requieren refinamiento. Los comentarios identifican necesidades relacionadas con la trazabilidad de la estructura, la precisión y organización de determinados contenidos, la delimitación del propósito formativo, la participación de la comunidad académica y la comunicación de la propuesta. El apartado siguiente reorganiza estas observaciones como oportunidades de mejora para una versión posterior del marco referencial.

4.4.3. Oportunidades de mejora para una versión posterior del marco referencial

La retroalimentación recibida permitió identificar oportunidades de mejora relacionadas con la delimitación del propósito y uso académico del marco, la trazabilidad metodológica, la revisión de determinados contenidos y la comunicación de la propuesta. Estas oportunidades derivan del contraste académico inicial y representan líneas de refinamiento para una versión posterior, sin constituir una agenda completa de trabajo futuro.

En primer lugar, los comentarios muestran la conveniencia de precisar con mayor claridad el propósito y el uso académico esperado del marco. Una versión posterior podría delimitar con mayor precisión su posible función como referencia para diseñar asignaturas,

estructurar cursos introductorios, orientar trayectorias de autoaprendizaje, revisar la cobertura temática o apoyar adaptaciones institucionales. Esta delimitación contribuiría a evitar interpretaciones excesivamente amplias de la propuesta y a establecer con mayor claridad su utilidad dentro de distintos contextos formativos.

Otra oportunidad de mejora se relaciona con la trazabilidad metodológica. Las observaciones recibidas señalan la conveniencia de hacer más explícita la relación entre los resultados de la RSL, los referentes de IS, la literatura complementaria y la organización del marco en áreas, componentes y tópicos. Fortalecer esta conexión permitiría justificar con mayor claridad la inclusión, agrupación y ubicación de los contenidos dentro del QSEAK_v0, así como hacer más explícito el sustento de su estructura.

La revisión también permitió identificar contenidos cuya presencia, ubicación o desarrollo convendría valorar en una versión posterior. Entre ellos se encuentran la arquitectura de software para sistemas híbridos, el diseño y los patrones arquitectónicos, la operación de software cuántico o híbrido, los fundamentos de hardware con impacto en el desarrollo, los algoritmos híbridos como VQE y QAOA, la transformación unitaria, la distinción entre probabilidad clásica y probabilidad cuántica y la ubicación del teorema de no clonación. Estas observaciones no implican incorporar de manera automática nuevos contenidos, sino revisar su pertinencia, visibilidad y progresión conceptual dentro de la estructura existente.

Finalmente, las observaciones señalan oportunidades relacionadas con la comunicación y evolución del marco. Entre ellas se encuentran mejorar la legibilidad de algunas figuras, homogeneizar el uso de siglas y términos, mantener la correspondencia entre las versiones en español e inglés y considerar mecanismos de participación académica más amplios. Estos mecanismos podrían incluir repositorios colaborativos, encuestas estructuradas o procesos estructurados de juicio de expertos que permitan ampliar el contraste académico y documentar de manera más sistemática la evolución de la propuesta.

4.5. Discusión de los resultados

Los resultados permiten interpretar la ISQ como un campo emergente cuyo desarrollo no avanza de manera uniforme entre sus distintas dimensiones. El AB muestra crecimiento de la producción científica, diversificación temática y presencia de comunidades académicas activas. Sin embargo, este aumento de visibilidad no constituye por sí mismo evidencia de madurez disciplinar. La RSL complementa esta lectura al mostrar que algunas líneas presentan mayor desarrollo documental, como herramientas, sistemas híbridos, calidad y pruebas, mientras que otras, como formación especializada, ciclo de vida y metodologías integrales, permanecen menos formalizadas. Por ello, el crecimiento bibliométrico puede entenderse como una señal de actividad científica creciente, pero no como evidencia suficiente de estabilización conceptual, metodológica o educativa.

Esta diferencia entre crecimiento y madurez permite reconocer una tensión relevante para la investigación. El avance técnico del CQ no se traduce automáticamente en una organización formativa para la ISQ. La literatura revisada documenta herramientas, plataformas, estrategias de compilación, mecanismos de prueba, entornos como Qiskit, sistemas híbridos y propuestas de evaluación. No obstante, estos elementos aparecen distribuidos en estudios con objetivos y alcances distintos y no siempre se articulan como parte de una preparación integral. El problema identificado no radica en la ausencia de conocimiento, sino en su dispersión y en la dificultad de relacionarlo desde una perspectiva de IS orientada a procesos, calidad, mantenimiento, integración y toma de decisiones técnicas. Esta condición sustenta la necesidad de una organización que permita analizar dichos conocimientos desde criterios formativos comunes.

Desde esta perspectiva, la ISQ no puede reducirse únicamente a la programación cuántica ni entenderse como una extensión directa de la IS tradicional. El dominio cuántico introduce condiciones relacionadas con medición, ruido, dependencia del hardware, compilación, variabilidad de resultados e interacción con infraestructura especializada. Al mismo tiempo, el desarrollo de software requiere prácticas sistemáticas de análisis, diseño, arquitectura, documentación, trazabilidad, pruebas, operación y evolución. Los resultados muestran que una formación inicial en ISQ requiere articular ambos planos y comprender cómo las particularidades del dominio cuántico condicionan la aplicación de principios y prácticas de IS en el desarrollo de soluciones cuánticas e híbridas.

Bajo esta lectura, QSEAK_v0 cumple una función referencial al organizar conocimientos relevantes para la formación inicial en ISQ. Su aporte radica en articular fundamentos, conocimientos técnicos especializados y dimensiones transversales y profesionales dentro de una estructura común, sin pretender establecer una solución definitiva para la formación en el campo. Esta organización busca hacer explícitas las relaciones entre conocimientos que aparecen dispersos en la literatura y situarlos desde una lógica de IS, evitando reducir la formación al uso instrumental de tecnologías o plataformas cuánticas.

La revisión académica inicial permite interpretar QSEAK_v0 desde una perspectiva complementaria a la evidencia documental utilizada para su construcción. Aunque las observaciones recibidas no constituyen una validación formal del marco, sí muestran una valoración favorable de la propuesta como esfuerzo inicial de organización de conocimientos, junto con aspectos que requieren refinamiento. Los señalamientos relacionados con arquitectura, trazabilidad, fundamentos, propósito formativo, evolución comunitaria y comunicación evidencian que la estructura propuesta todavía puede fortalecerse en precisión, justificación y alcance. Al mismo tiempo, la retroalimentación recibida sugiere que la articulación entre literatura científica, referentes de IS y formación inicial constituye una base pertinente para continuar el desarrollo y contraste del QSEAK_v0.

De esta manera, la investigación articula tres aportes complementarios. El AB permitió caracterizar la actividad científica, la evolución temática y la configuración general del campo. La RSL profundizó en sus contenidos técnicos, metodológicos y formativos. Finalmente, QSEAK_v0 reorganizó estos insumos, junto con literatura complementaria, en una propuesta inicial de fundamentos referenciales para la formación en ISQ. Esta secuencia permite situar la aportación de la investigación como una organización inicial, referencial y revisable, cuyo alcance debe interpretarse de acuerdo con los periodos, fuentes y decisiones metodológicas considerados, así como con la necesidad de actualización conforme evolucione la ISQ.

4.6. Amenazas a la validez

Los resultados de esta investigación deben interpretarse considerando las condiciones metodológicas y contextuales que delimitaron el desarrollo del estudio. Dado que la investigación articuló un AB, una RSL, la construcción del QSEAK_v0 y una revisión académica inicial, su alcance estuvo condicionado por las fuentes y periodos analizados, así como por las decisiones adoptadas durante la selección, tratamiento, interpretación e integración de la evidencia. Considerar estas condiciones permite precisar el alcance de los resultados y el contexto en el que deben ser comprendidos.

Para organizar esta reflexión, las amenazas a la validez se agrupan en internas y externas. Las amenazas internas se relacionan con decisiones tomadas durante el proceso de investigación que pudieron influir en la obtención e interpretación de los resultados y en la configuración de la propuesta. Las amenazas externas corresponden a condiciones que pueden limitar su transferencia, generalización o vigencia en otros contextos. Esta distinción permite examinar de manera diferenciada los factores asociados con el desarrollo del estudio y aquellos relacionados con la aplicación e interpretación de sus resultados en otros contextos.

4.6.1. Amenazas internas

Las decisiones adoptadas durante la conformación de los corpus, el tratamiento de la información y la estructuración del QSEAK_v0 pudieron influir en la representación de los hallazgos y en la configuración final de la propuesta, aún cuando los procedimientos correspondientes fueron documentados en la metodología.

En relación con los corpus documentales, la cobertura del estudio dependió de las bases de datos consultadas, las cadenas de búsqueda, los periodos definidos y las condiciones de indexación de cada fuente. En el AB, el uso de Scopus y Web of Science permitió conformar una base documental para caracterizar el campo, aunque la recuperación quedó condicionada por los registros disponibles en ambas bases. En la RSL, la pérdida de acceso

a Scopus impidió incorporar esta base de datos a la búsqueda, lo que pudo afectar la cobertura de estudios disponibles para la revisión. Por ello, la composición de ambos corpus debe interpretarse de acuerdo con las fuentes y criterios de búsqueda empleados.

También deben considerarse las decisiones asociadas con la depuración, normalización y clasificación de la información. En el AB, la eliminación de duplicados, la normalización de autores, la depuración de palabras clave y la configuración de herramientas como SciMAT y VOSviewer pudieron influir en la visibilidad de temas, autores, redes de colaboración y clústeres temáticos. En la RSL, la clasificación de los estudios y la selección de los documentos para análisis completo requirieron aplicar QA, pertinencia temática y relación con las RQ. Aunque estos criterios permitieron mantener la consistencia del proceso, su aplicación implicó juicio académico, particularmente al valorar la contribución de cada estudio a la comprensión del campo y a la elaboración posterior del marco referencial.

La elaboración del QSEAK_v0 constituye otra fuente de amenaza interna, debido a que su estructura no surgió como una transposición directa de las categorías obtenidas en el AB o la RSL. Su construcción implicó interpretar y reorganizar los hallazgos en áreas, componentes y tópicos con sentido formativo, incorporando además literatura base sobre CQ e IS y referentes disciplinares. Este proceso requirió tomar decisiones sobre la inclusión, agrupación, ubicación y priorización de los contenidos. La matriz de trazabilidad integrada en el Anexo F documenta la correspondencia entre los insumos utilizados y las decisiones de organización del marco, aunque esta documentación no elimina el componente interpretativo inherente a la clasificación y estructuración de la propuesta.

El alcance formativo del QSEAK_v0 también delimita la interpretación de sus resultados. El marco organiza conocimientos mediante áreas, componentes y tópicos, pero no establece todavía una secuencia curricular sustentada en precondiciones y poscondiciones, perfiles de ingreso y egreso, resultados de aprendizaje o una progresión didáctica validada. Por ello, debe entenderse como una base referencial para la formación inicial en ISQ y no como un plan curricular completo.

Finalmente, la revisión académica inicial permitió contrastar la propuesta e identificar fortalezas y oportunidades de mejora, pero su alcance estuvo condicionado por la participación obtenida. El número de retroalimentaciones recibidas fue reducido en comparación con la cantidad de investigadores contactados, y el proceso no tuvo como propósito realizar una validación formal ni establecer consenso académico sobre la propuesta. En consecuencia, sus resultados permiten orientar el refinamiento posterior del marco, pero no establecer su completitud, secuenciación o validez general. Estas condiciones deben considerarse al interpretar QSEAK_v0 como una propuesta inicial, referencial y abierta a revisión.

4.6.2. Amenazas externas

El carácter dinámico de la ISQ condiciona la vigencia temporal de los resultados. Los avances en hardware cuántico, herramientas y plataformas de desarrollo, servicios en la nube, lenguajes, metodologías, estrategias de mitigación de errores, enfoques de integración híbrida y propuestas formativas pueden modificar progresivamente la comprensión del campo. Por ello, los resultados del AB, la RSL y QSEAK_v0 deben interpretarse de acuerdo con los periodos y condiciones considerados, y no como una representación definitiva o universal de la ISQ. Los hallazgos permiten caracterizar el panorama correspondiente a los periodos estudiados, pero requieren actualización conforme evolucionen la tecnología cuántica, las prácticas de desarrollo y la literatura especializada.

También debe considerarse que la investigación se apoyó principalmente en literatura académica indexada. Esta decisión contribuye a fortalecer el rigor documental del estudio, al permitir trabajar con fuentes académicas con trazabilidad bibliográfica, pero también delimita el tipo de evidencia incorporada al análisis. En un campo emergente como el CQ y la ISQ, parte del conocimiento aplicado puede circular inicialmente en repositorios de software, documentación técnica, informes industriales, tutoriales, cursos, comunidades de desarrollo o experiencias profesionales antes de consolidarse como literatura científica indexada. Estudios empíricos sobre la adopción de la programación cuántica muestran que el uso de entornos de desarrollo también se manifiesta en repositorios orientados a ejercicios, enseñanza, investigación, herramientas, librerías y proyectos exploratorios [99]. Asimismo, herramientas, flujos de trabajo, buenas prácticas, arquitecturas híbridas y soluciones técnicas pueden desarrollarse en la práctica antes de ser documentadas formalmente en publicaciones académicas [100]. Por ello, los resultados ofrecen una lectura académica del campo, pero no abarcan necesariamente todas sus expresiones técnicas, educativas, comunitarias o industriales.

La transferencia del QSEAK_v0 a contextos formativos concretos constituye otra amenaza externa. Aunque la propuesta se orienta a la formación inicial en educación superior, su aplicación en programas, cursos o instituciones específicas requiere considerar el nivel académico, el perfil de los estudiantes, la duración del trayecto formativo, la infraestructura disponible, las competencias docentes y los objetivos curriculares. Además, QSEAK_v0 todavía no ha sido aplicado empíricamente en contextos educativos, por lo que su utilización en escenarios específicos requiere procesos posteriores de contextualización, adaptación y evaluación.

Finalmente, la diversidad disciplinar de la ISQ limita la generalización de una misma organización formativa a todos los contextos. El campo articula conocimientos provenientes del CQ, la IS, las ciencias computacionales, la arquitectura de software, las pruebas, la compilación, los sistemas híbridos, la educación y la gestión tecnológica. Por ello, distintos programas, instituciones o comunidades académicas pueden priorizar componentes diferentes de acuerdo con sus necesidades, recursos y objetivos formativos.

Asimismo, QSEAK_v0 todavía no ha sido contrastado con una comunidad académica amplia, lo que limita la posibilidad de generalizar la estructura propuesta más allá del alcance de esta investigación. Estas amenazas externas muestran que los resultados de esta investigación son útiles para caracterizar y organizar el panorama actual de la ISQ desde una perspectiva académica, siempre que se reconozca su dependencia de los periodos analizados, de las fuentes consultadas y de los contextos en los que eventualmente pudieran aplicarse.

4.7. Productos obtenidos

A partir del desarrollo de la investigación se obtuvieron productos académicos, metodológicos y documentales asociados con las distintas etapas del estudio. Esta sección sintetiza dichos productos y su función dentro del proceso de investigación. Los anexos reúnen y amplían la evidencia documental correspondiente a cada uno de ellos.

Un primer producto corresponde al trabajo *"Exploring the Current State of Quantum Computing Towards Quantum Software Engineering"*, derivado de la etapa inicial de exploración temática. Este documento, aceptado para su inclusión en el libro *Advances in Software Engineering* de la serie *Studies in Computational Intelligence* de Springer, funcionó como antecedente para reconocer la fragmentación del campo y justificar la necesidad de avanzar hacia una organización más estructurada de conocimientos relacionados con la ISQ. El documento se integra como Anexo A.

Como resultado del AB, se obtuvo un artículo académico centrado en la caracterización de la evolución científica del campo durante el periodo comprendido entre 2020 y el primer trimestre de 2025. Este producto desarrolla con mayor amplitud el procedimiento de búsqueda, depuración, normalización y análisis del corpus, así como los resultados relacionados con producción científica, evolución temática y redes de colaboración. El artículo se presenta en el Anexo B, mientras que el material complementario del AB, compuesto por tablas, diagramas, mapas temáticos y redes, se integra en el Anexo C.

La RSL generó un borrador de artículo académico y un conjunto de instrumentos metodológicos de apoyo. El borrador, incluido como Anexo D, desarrolla de forma más amplia el proceso y los resultados de la revisión. Los instrumentos asociados, integrados en el Anexo E, incluyen elementos del protocolo, CI y CE, QA, extracción de datos y clasificación temática. Estos materiales respaldan la trazabilidad de la revisión y documentan las decisiones empleadas para conformar el corpus final de estudios analizados.

Otro producto corresponde a la matriz de trazabilidad asociada con el QSEAK_v0, integrada en el Anexo F. Esta matriz documenta la correspondencia entre los componentes del marco y los insumos derivados del AB, la RSL y la literatura base. Su función es hacer

explícita la relación entre la evidencia utilizada y las decisiones de organización del marco, fortaleciendo la trazabilidad de su estructura y de los elementos considerados durante su elaboración.

También se obtuvieron las versiones documentadas del marco de fundamentos referenciales en español e inglés. La versión en español se integra como Anexo G y funcionó como documento principal de trabajo dentro de esta investigación. La versión en inglés, presentada en el Anexo H, permitió ampliar la comunicación académica de la propuesta y facilitar su revisión por especialistas no hispanohablantes. Ambas versiones conservan la misma estructura general y constituyen productos derivados de la tercera fase de la investigación.

Finalmente, se obtuvo evidencia documental de la revisión académica inicial, presentada en el Anexo I y en el archivo digital correspondiente. Esta evidencia reúne registros asociados con el contacto de especialistas, el envío de la propuesta y la recepción de retroalimentación sobre claridad, alcance, profundidad, secuenciación y pertinencia. Aunque este proceso no constituye una validación amplia o definitiva, representa un primer contraste especializado que permitió reconocer fortalezas, límites y oportunidades de mejora para una versión posterior del marco.

Estos productos documentan la trayectoria seguida desde la exploración inicial del campo hasta la elaboración y el contraste preliminar del QSEAK_v0. Asimismo, constituyen evidencia académica, metodológica y documental del proceso desarrollado, proporcionan una base para la difusión de los resultados, el refinamiento posterior del marco y la continuidad de la investigación, y respaldan el cumplimiento de los objetivos planteados.

4.8. Cumplimiento de los objetivos de la investigación

Como cierre del capítulo de resultados, esta sección sintetiza el cumplimiento de los objetivos de la investigación y los relaciona con la evidencia generada durante el desarrollo del estudio. Para ello, se consideran los resultados del AB, la RSL, la elaboración del QSEAK_v0, la revisión académica inicial y los productos documentales integrados en los anexos.

La Tabla 10 presenta la relación entre los objetivos planteados, su cumplimiento y la evidencia principal que lo sustenta, permitiendo observar cómo fueron atendidos mediante los resultados y productos desarrollados en las distintas fases del estudio.

Tabla 10. Síntesis del cumplimiento de los objetivos de la investigación.

Objetivo evaluado	Cumplimiento	Evidencia de cumplimiento
Objetivo general	Cumplido dentro del alcance definido	Se contribuyó al establecimiento de una organización inicial de conocimientos sobre el panorama actual del CQ en las propuestas de ISQ mediante la articulación del AB, la RSL y la elaboración del QSEAK_v0 como primera versión del marco de fundamentos referenciales. La evidencia se desarrolla principalmente en los capítulos 3 y 4 y en los anexos correspondientes.
Objetivo específico 1. Realizar un AB	Cumplido	Se realizó un AB a partir de un corpus final de 385 documentos. El análisis permitió caracterizar la evolución reciente del campo, sus tendencias temáticas y las redes bibliométricas asociadas con autores, instituciones y países. La evidencia se presenta en la sección 4.1 y en los productos derivados de esta fase.
Objetivo específico 2. Realizar una RSL	Cumplido	Se desarrolló una RSL a partir de 1,571 registros iniciales. Después de las etapas de depuración, selección, clasificación y evaluación de calidad, se conformó un corpus final de 67 artículos académicos para análisis completo. La revisión permitió identificar enfoques, metodologías, herramientas, desafíos y elementos formativos relacionados con la ISQ. La evidencia se presenta en la sección 4.2 y en los productos derivados de esta fase.
Objetivo específico 3. Elaborar una propuesta de marco de fundamentos referenciales	Cumplido	Se elaboró QSEAK_v0 como primera versión documentada del marco de fundamentos referenciales, organizada en tres áreas: fundamentos, conocimientos técnicos especializados y conocimientos transversales y profesionales. La propuesta fue documentada y sometida a una revisión académica inicial orientada a identificar fortalezas y oportunidades de mejora. La evidencia se presenta en las secciones 4.3, 4.4 y 4.7, así como en los anexos correspondientes.

La evidencia sintetizada muestra que los objetivos fueron atendidos conforme al alcance definido para la investigación. El AB permitió caracterizar el campo desde una perspectiva bibliométrica, mientras que la RSL profundizó en la literatura especializada relacionada con la ISQ. A partir de estos resultados y de literatura complementaria, QSEAK_v0 articuló los conocimientos identificados en una propuesta inicial, referencial y revisable orientada a la formación inicial en ISQ.

Capítulo 5. Conclusiones y trabajos futuros

Este capítulo presenta las conclusiones derivadas de la investigación y las principales líneas de trabajo futuro. En primer lugar, se sintetizan los hallazgos obtenidos mediante el AB y la RSL, así como la contribución del QSEAK_v0 y los resultados de su revisión académica inicial. Posteriormente, se plantean líneas de continuidad orientadas al refinamiento del marco, al fortalecimiento de su trazabilidad y contraste académico, a su posible adaptación formativa y a su actualización conforme evolucione la ISQ.

5.1. Conclusiones

Este trabajo permite concluir que la ISQ ha avanzado como campo de investigación, aunque todavía presenta una organización formativa fragmentada para orientar la preparación inicial de perfiles vinculados con el desarrollo de software cuántico. La literatura revisada muestra aportes relevantes en metodologías, ciclo de vida, herramientas, calidad, pruebas, integración híbrida, entornos tecnológicos y formación, pero estos se distribuyen entre líneas con distintos niveles de desarrollo, profundidad y articulación.

La combinación del AB y la RSL permitió examinar esta situación desde perspectivas complementarias. El AB proporcionó una caracterización panorámica de la producción científica, la evolución temática y las redes académicas del campo, mientras que la RSL permitió profundizar en sus contenidos técnicos, metodológicos y formativos. Esta articulación hizo posible pasar de una visión general de la actividad científica a una comprensión más específica de los conocimientos, prácticas, desafíos y necesidades documentados en la literatura especializada.

A partir de estos resultados y de literatura complementaria, QSEAK_v0 constituye una propuesta inicial ante la dispersión identificada. Su contribución consiste en organizar conocimientos relevantes para la formación inicial en ISQ desde una perspectiva de IS mediante tres áreas: fundamentos, conocimientos técnicos especializados y conocimientos transversales y profesionales. Esta estructura permite relacionar contenidos que la literatura aborda de manera distribuida y situarlos dentro de una organización común orientada al desarrollo de software cuántico e híbrido.

El alcance de esta contribución debe interpretarse de acuerdo con el carácter inicial, referencial y revisable del QSEAK_v0. La propuesta no constituye un currículo cerrado, un estándar profesional ni un cuerpo de conocimiento validado de manera definitiva. Su valor radica en documentar una primera organización de conocimientos, hacer explícitas las relaciones entre sus componentes y ofrecer un punto de partida para posteriores discusiones, contrastes y adaptaciones formativas.

Una conclusión relevante de la investigación es que la formación inicial en ISQ requiere una articulación que trascienda la enseñanza general de CQ o el aprendizaje de programación cuántica. La preparación de perfiles vinculados con el desarrollo de software cuántico requiere relacionar fundamentos del dominio cuántico con procesos y prácticas de IS, arquitectura, ciclo de vida, integración, calidad, pruebas, reproducibilidad, mantenimiento, comunicación técnica y criterios profesionales de decisión. La limitada integración de estas dimensiones constituye una de las brechas formativas identificadas en la literatura revisada.

La revisión académica inicial aportó un contraste especializado sobre el QSEAK_v0 y permitió reconocer una valoración favorable de la propuesta como esfuerzo inicial de organización, junto con aspectos susceptibles de refinamiento. Entre estos se encuentran la necesidad de fortalecer la trazabilidad entre la evidencia y la estructura del marco, revisar la ubicación o desarrollo de determinados contenidos, precisar su posible uso formativo y ampliar los mecanismos de contraste académico. Debido al alcance de esta revisión, sus resultados deben entenderse como retroalimentación cualitativa inicial y no como evidencia de consenso o validación definitiva.

La investigación atendió los objetivos planteados dentro del alcance definido al caracterizar el campo mediante el AB, profundizar en la literatura especializada a través de la RSL y articular los conocimientos identificados en el QSEAK_v0. El resultado es una propuesta inicial y documentada que contribuye a organizar conocimientos relevantes para la formación inicial en ISQ y establece una base para su refinamiento, contraste y posible adaptación posterior.

5.2. Trabajos futuros

Los trabajos futuros se derivan de las oportunidades de mejora identificadas durante la revisión académica inicial, de las amenazas a la validez y del carácter inicial, referencial y revisable del QSEAK_v0. En este sentido, el trabajo posterior se orienta a fortalecer el sustento del marco, ampliar su contraste académico y avanzar gradualmente hacia posibles adaptaciones formativas, sin asumir que la versión actual constituye un currículo cerrado o un estándar profesional. Por ello, estas líneas se plantean como una continuidad académica de los resultados alcanzados y como posibles vías para el desarrollo posterior del marco.

Como línea inmediata, se plantea el refinamiento del QSEAK_v0 hacia una versión posterior, identificada preliminarmente como QSEAK_v0.1. Esta etapa deberá valorar de manera justificada las observaciones recibidas, fortalecer la trazabilidad entre los resultados de la RSL, los referentes de IS, la literatura complementaria y la estructura del marco, y revisar la pertinencia, ubicación, visibilidad y progresión de los contenidos señalados durante el contraste académico. El propósito será obtener una versión más clara, mejor

sustentada y más explícita en las decisiones que justifican la inclusión y organización de sus componentes.

Una línea complementaria consiste en ampliar el contraste académico mediante mecanismos más sistemáticos de evaluación. Entre ellos podrían considerarse procesos estructurados de juicio de expertos, encuestas estructuradas, rondas Delphi o espacios colaborativos de discusión. Su aplicación permitiría reunir evidencia más amplia sobre la claridad, pertinencia, completitud y utilidad del marco, además de documentar desacuerdos, prioridades y criterios de mejora con mayor rigor metodológico.

También resulta pertinente contrastar QSEAK con referentes externos relacionados con la IS y la formación en computación, como el cuerpo de conocimientos de ingeniería de software (SWEBOK, por sus siglas en inglés), currículos de computación, estándares de ciclo de vida, modelos de calidad y propuestas educativas en tecnologías cuánticas. Este análisis permitiría identificar correspondencias, vacíos, solapamientos y posibles ajustes para fortalecer la estructura del marco, así como delimitar con mayor precisión qué elementos proceden de la IS, cuáles corresponden al CQ y cuáles adquieren características particulares al articularse dentro de la ISQ.

En el plano formativo, una etapa posterior podría orientarse a delimitar perfiles y niveles de profundidad para los conocimientos organizados en el marco. Esto implicaría precisar precondiciones, poscondiciones, perfiles de ingreso y egreso y posibles resultados de aprendizaje, además de valorar la profundidad requerida para cada área de conocimiento. A partir de esta delimitación podría explorarse su adaptación a contextos específicos, como programas de licenciatura o cursos introductorios.

En una etapa de mayor desarrollo, podría explorarse la construcción de una arquitectura de referencia académica para trayectorias formativas en ISQ. Esta posibilidad requeriría un nivel de formalización superior al alcanzado en el QSEAK_v0 e implicaría integrar perfiles, niveles de profundidad, secuencias de aprendizaje, recursos educativos, mecanismos de evaluación y criterios de adaptación institucional, además de un contraste más amplio con especialistas y contextos formativos reales.

Finalmente, debido al carácter dinámico de la ISQ, la actualización periódica del marco constituye una línea transversal de continuidad. La evolución del hardware, las herramientas, las plataformas, las metodologías, los enfoques de integración y las propuestas formativas puede modificar progresivamente los conocimientos relevantes para el campo, por lo que futuras versiones deberán considerar nueva evidencia científica y técnica. Esta actualización puede complementarse con la preparación, actualización y difusión de publicaciones derivadas del AB y la RSL, así como con la comunicación de nuevas versiones del marco para favorecer su revisión y discusión dentro de la comunidad académica.

Bibliografía

[1] G. Bisicchia, J. Garcia-Alonso, J. M. Murillo, y A. Brogi, "From Quantum Mechanics to Quantum Software Engineering: A Historical Review", el 8 de mayo de 2024, *arXiv*: arXiv:2404.19428. doi: 10.48550/arXiv.2404.19428.

[2] S. S. Gill *et al.*, "Quantum computing: A taxonomy, systematic review and future directions", *Softw. Pract. Exp.*, vol. 52, núm. 1, pp. 66–114, ene. 2022, doi: 10.1002/spe.3039.

[3] H. A. Bhat, F. A. Khanday, B. K. Kaushik, F. Bashir, y K. A. Shah, "Quantum Computing: Fundamentals, Implementations and Applications", *IEEE Open J. Nanotechnol.*, vol. 3, pp. 61–77, 2022, doi: 10.1109/OJNANO.2022.3178545.

[4] S. Ali, T. Yue, y R. Abreu, "When software engineering meets quantum computing", *Commun. ACM*, vol. 65, núm. 4, pp. 84–88, abr. 2022, doi: 10.1145/3512340.

[5] J. M. Murillo *et al.*, "Challenges of Quantum Software Engineering for the Next Decade: The Road Ahead", el 10 de abril de 2024, *arXiv*: arXiv:2404.06825. doi: 10.48550/arXiv.2404.06825.

[6] M. De Stefano, F. Pecorelli, F. Palomba, D. Taibi, D. Di Nucci, y A. De Lucia, "Quantum Software Engineering Issues and Challenges: Insights from Practitioners", en *Quantum Software*, I. Exman, R. Pérez-Castillo, M. Piattini, y M. Felderer, Eds., Cham: Springer Nature Switzerland, 2024, pp. 337–355. doi: 10.1007/978-3-031-64136-7_13.

[7] K. Dwivedi, M. Haghparast, y T. Mikkonen, "Quantum software engineering and quantum software development lifecycle: a survey", *Clust. Comput.*, vol. 27, núm. 6, pp. 7127–7145, sep. 2024, doi: 10.1007/s10586-024-04362-1.

[8] J. Zhao, "Quantum Software Engineering: Landscapes and Horizons", el 31 de diciembre de 2021, *arXiv*: arXiv:2007.07047. doi: 10.48550/arXiv.2007.07047.

[9] M. Piattini *et al.*, "The Talavera Manifesto for Quantum Software Engineering and Programming", presentado en First International Workshop on Quantum Software Engineering & Programming (QuANSWER), Talavera de la Reina, España: Publicado por los autores bajo licencia Creative Commons Attribution 4.0 (CC BY 4.0), 2020.

[10] R. Juárez-Ramírez *et al.*, "A Taxonomic View of the Fundamental Concepts of Quantum Computing–A Software Engineering Perspective", *Program. Comput. Softw.*, vol. 49, núm. 8, pp. 682–704, dic. 2023, doi: 10.1134/S0361768823080108.

[11] M. De Stefano, F. Pecorelli, D. Di Nucci, F. Palomba, y A. De Lucia, "The quantum frontier of software engineering: A systematic mapping study", *Inf. Softw. Technol.*, vol. 175, p. 107525, nov. 2024, doi: 10.1016/j.infsof.2024.107525.

[12] R. Juárez-Ramírez *et al.*, "The Foundations of Quantum Computing and Their Relation to Software Engineering", *Proc. Inst. Syst. Program. RAS*, vol. 36, núm. 1, pp. 73–104, 2024, doi: 10.15514/ISPRAS-2024-36(1)-6.

[13] A. A. Khan *et al.*, "Software architecture for quantum computing systems — A systematic review", *J. Syst. Softw.*, vol. 201, p. 111682, mar. 2023, doi: 10.1016/j.jss.2023.111682.

[14] A. Arismendi y S. Pombo Mott, "Retos a los que se enfrenta la Ingeniería del Software Cuántico", *Mem. Investig. En Ing.*, núm. 25, pp. 90–106, dic. 2023, doi: 10.36561/ING.25.7.

[15] M. Haghparast, T. Mikkonen, J. K. Nurminen, y V. Stirbu, "Quantum Software Engineering Challenges from Developers' Perspective: Mapping Research Challenges to the Proposed Workflow Model", en *2023 IEEE International Conference on Quantum Computing and Engineering (QCE)*, Jyväskylä, Finlandia, sep. 2023, pp. 173–176. doi: 10.1109/QCE57702.2023.10204.

[16] M. Fingerhuth, T. Babej, y P. Wittek, "Open source software in quantum computing", *PLOS ONE*, vol. 13, núm. 12, p. e0208561, dic. 2018, doi: 10.1371/journal.pone.0208561.

[17] C. R. Cartiere, "Formal Quantum Software Engineering: Introducing the Formal Methods of Software Engineering to Quantum Computing.", 2020, doi: 10.13140/RG.2.2.26157.10725/2.

[18] S. Sepúlveda, A. Cravero, G. Fonseca, y L. Antonelli, "Systematic Review on Requirements Engineering in Quantum Computing: Insights and Future Directions", *Electronics*, vol. 13, núm. 15, p. 2989, jul. 2024, doi: 10.3390/electronics13152989.

[19] E. Moguel, J. Berrocal, J. García-Alonso, y J. M. Murillo, "A Roadmap for Quantum Software Engineering: applying the lessons learned from the classics", *Q-SETQCE*, 2020.

[20] Á. M. Aparicio-Morales, E. Moguel, L. M. Bibbo, A. Fernandez, J. Garcia-Alonso, y J. M. Murillo, "An overview of quantum software engineering in Latin America", *Quantum Inf. Process.*, vol. 23, núm. 11, p. 380, nov. 2024, doi: 10.1007/s11128-024-04586-5.

[21] A. Khan, D. Taibi, C. M. Perrault, y M. A. Akbar, "Advancing Quantum Software Engineering: A Vision of Hybrid Full-Stack Iterative Model", en *Proceedings of the 40th ACM/SIGAPP Symposium on Applied Computing*, Catania International Airport Catania Italy: ACM, mar. 2025, pp. 1444–1448. doi: 10.1145/3672608.3707725.

[22] M. A. Nielsen y I. L. Chuang, *Quantum computation and quantum information*, 10th anniversary edition. Cambridge: Cambridge university press, 2010.

[23] J. D. Hidary, *Quantum Computing: An Applied Approach*. Cham, Switzerland: Springer Nature Switzerland AG, 2019. [En línea]. Disponible en: https://doi.org/10.1007/978-3-030-23922-0

[24] T. Patel, A. Potharaju, B. Li, R. B. Roy, y D. Tiwari, "Experimental Evaluation of NISQ Quantum Computers: Error Measurement, Characterization, and Implications", en *SC20: International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis*, Atlanta, GA, USA: IEEE, nov. 2020, pp. 1–15. doi: 10.1109/SC41405.2020.00050.

[25] P. Murali, J. M. Baker, A. Javadi-Abhari, F. T. Chong, y M. Martonosi, "Noise-Adaptive Compiler Mappings for Noisy Intermediate-Scale Quantum Computers", en *Proceedings of the Twenty-Fourth International Conference on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems*, Providence RI USA: ACM, abr. 2019, pp. 1015–1029. doi: 10.1145/3297858.3304075.

[26] R. S. Pressman, *Ingeniería del software: Un enfoque práctico*, Séptima edición. México; Bogotá; Buenos Aires; Caracas; Guatemala; Madrid: McGraw-Hill Education, 2010.

[27] H. Washizaki, Ed., *Guide to the Software Engineering Body of Knowledge v4.0*, Version 4.0. Piscataway, NJ, EE. UU.: IEEE Computer Society, 2024.

[28] M. Piattini, G. Peterssen, y R. Pérez-Castillo, "Quantum Computing: A New Software Engineering Golden Age", *ACM SIGSOFT Softw. Eng. Notes*, vol. 45, núm. 3, pp. 12–14, jul. 2020, doi: 10.1145/3402127.3402131.

[29] M. Piattini, M. Serrano, R. Perez-Castillo, G. Petersen, y J. L. Hevia, "Toward a Quantum Software Engineering", *IT Prof.*, vol. 23, núm. 1, pp. 62–66, ene. 2021, doi: 10.1109/MITP.2020.3019522.

[30] M. A. Serrano, R. Pérez-Castillo, y M. Piattini, Eds., *Quantum Software Engineering*. Cham: Springer International Publishing, 2022. doi: 10.1007/978-3-031-05324-5.

[31] M. A. Akbar, A. A. Khan, S. Mahmood, y S. Rafi, "Quantum Software Engineering: A New Genre of Computing", en *Proceedings of the 1st ACM International Workshop on Quantum Software Engineering: The Next Evolution*, Porto de Galinhas Brazil: ACM, jul. 2024, pp. 1–6. doi: 10.1145/3663531.3664750.

[32] B. Weder, J. Barzen, F. Leymann, M. Salm, y D. Vietz, "The Quantum software lifecycle", en *Proceedings of the 1st ACM SIGSOFT International Workshop on Architectures and Paradigms for Engineering Quantum Software*, Virtual USA: ACM, nov. 2020, pp. 2–9. doi: 10.1145/3412451.3428497.

[33] S. Sepúlveda, M. Piattini, y R. Pérez Del Castillo, "Developing hybrid quantum-classical software: a software product line approach", en *Proceedings of the 5th ACM/IEEE International Workshop on Quantum Software Engineering*, Lisbon Portugal: ACM, abr. 2024, pp. 37–40. doi: 10.1145/3643667.3648224.

[34] I.-D. Gheorghe-Pop, N. Tcholtchev, T. Ritter, y M. Hauswirth, "Quantum DevOps: Towards Reliable and Applicable NISQ Quantum Computing", en *2020 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps*, Taipei, Taiwan: IEEE, dic. 2020, pp. 1–6. doi: 10.1109/GCWkshps50303.2020.9367411.

[35] Á. M. Aparicio-Morales, E. Moguel, J. Garcia-Alonso, A. Fernandez, L. M. Bibbo, y J. M. Murillo, "Supply and Demand in the Training of Quantum Software Engineering Workforce", *Mem. Investig. En Ing.*, núm. 27, pp. 248–256, dic. 2024, doi: 10.36561/ING.27.16.

[36] F. Galetto, H. H. López, M. Rahmati, J. Sang, y C. Yu, "Experience in teaching quantum computing with hands-on programming labs", *J. Supercomput.*, vol. 80, núm. 10, pp. 14029–14056, jul. 2024, doi: 10.1007/s11227-024-06001-3.

[37] M. Mykhailova y K. M. Svore, "Teaching Quantum Computing through a Practical Software-driven Approach: Experience Report", en *Proceedings of the 51st ACM Technical Symposium on Computer Science Education*, Portland OR USA: ACM, feb. 2020, pp. 1019–1025. doi: 10.1145/3328778.3366952.

[38] N. Kiefl y G. Hagel, "Software Engineering Education of Classical Computing vs. Quantum Computing: A Competency-Centric Approach", en *Proceedings of the 4th European Conference on Software Engineering Education*, Seeon/Bavaria Germany: ACM, jun. 2020, pp. 27–31. doi: 10.1145/3396802.3396816.

[39] Z. Liang y H. Wang, "QuCS: A Lecture Series on Quantum Computer Software and System", en *2023 IEEE International Conference on Quantum Computing and Engineering (QCE)*, Bellevue, WA, USA: IEEE, sep. 2023, pp. 40–48. doi: 10.1109/QCE57702.2023.20323.

[40] J. T. Guerin, "Creating a Quantum Programming Course from Scratch: A Computer Science Professor's Journey", en *Proceedings of the 56th ACM Technical Symposium on Computer Science Education V. 1*, Pittsburgh PA USA: ACM, feb. 2025, pp. 409–415. doi: 10.1145/3641554.3701876.

[41] M. Mykhailova, "Developing Programming Assignments for Teaching Quantum Computing and Quantum Programming", en *2022 IEEE International Conference on Quantum Computing and Engineering (QCE)*, sep. 2022, pp. 688–692. doi: 10.1109/QCE53715.2022.00092.

[42] R. A. Wolf y S. Araiba, "A brief overview of programmed instructions for quantum software education", en *2023 IEEE International Conference on Quantum Computing and Engineering (QCE)*, sep. 2023, pp. 78–86. doi: 10.1109/QCE57702.2023.20327.

[43] E. Dimitrov *et al.*, "QPCC: A Quantum Programming Course for Inhomogeneous Cohorts of Professional Learners", en *2023 IEEE International Conference on Quantum Computing and Engineering (QCE)*, Bellevue, WA, USA: IEEE, sep. 2023, pp. 101–111. doi: 10.1109/QCE57702.2023.20330.

[44] N. Donthu, S. Kumar, D. Mukherjee, N. Pandey, y W. M. Lim, "How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines", *J. Bus. Res.*, vol. 133, pp. 285–296, sep. 2021, doi: 10.1016/j.jbusres.2021.04.070.

[45] R. Pranckutė, "Web of Science (WoS) and Scopus: The Titans of Bibliographic Information in Today's Academic World", *Publications*, vol. 9, núm. 1, p. 12, mar. 2021, doi: 10.3390/publications9010012.

[46] M. Visser, N. J. Van Eck, y L. Waltman, "Large-scale comparison of bibliographic data sources: Scopus, Web of Science, Dimensions, Crossref, and Microsoft Academic", *Quant. Sci. Stud.*, vol. 2, núm. 1, pp. 20–41, abr. 2021, doi: 10.1162/qss_a_00112.

[47] J. Baas, M. Schotten, A. Plume, G. Côté, y R. Karimi, "Scopus as a curated, high-quality bibliometric data source for academic research in quantitative science studies", *Quant. Sci. Stud.*, vol. 1, núm. 1, pp. 377–386, feb. 2020, doi: 10.1162/qss_a_00019.

[48] M. J. Cobo, A. G. López-Herrera, E. Herrera-Viedma, y F. Herrera, "SCIMAT: A new science mapping analysis software tool", *J. Am. Soc. Inf. Sci. Technol.*, vol. 63, núm. 8, pp. 1609–1630, ago. 2012, doi: 10.1002/asi.22688.

[49] N. J. Van Eck y L. Waltman, "Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping", *Scientometrics*, vol. 84, núm. 2, pp. 523–538, ago. 2010, doi: 10.1007/s11192-009-0146-3.

[50] B. Kitchenham y S. Charters, "Guidelines for performing Systematic Literature Reviews in Software Engineering", vol. 2, ene. 2007.

[51] M. J. Page *et al.*, "The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews", *BMJ*, p. n71, mar. 2021, doi: 10.1136/bmj.n71.

[52] P. B. Upama *et al.*, "Evolution of Quantum Computing: A Systematic Survey on the Use of Quantum Computing Tools", en *2022 IEEE 46th Annual Computers, Software, and Applications Conference (COMPSAC)*, Los Alamitos, CA, USA: IEEE, jun. 2022, pp. 520–529. doi: 10.1109/COMPSAC54236.2022.00096.

[53] R. Juárez-Ramírez *et al.*, "Skills Required for Quantum Computing: A Comprehensive Review of Recent Studies", *Program. Comput. Softw.*, vol. 50, núm. 8, pp. 844–874, dic. 2024, doi: 10.1134/S0361768824700804.

[54] L. S. Woody, *Essential Mathematics for Quantum Computing: A Beginner's Guide to Just the Math You Need Without Needless Complexities*. Birmingham: Packt Publishing, Limited, 2022.

[55] R. S. Sutor, *Dancing with qubits: from qubits to algorithms, embark on the quantum computing journey shaping our future*, Second edition. Birmingham Mumbai: Packt, 2024.

[56] H. Deng, Y. Peng, M. Hicks, y X. Wu, "Automating NISQ Application Design with Meta Quantum Circuits with Constraints (MQCC)", *ACM Trans. Quantum Comput.*, vol. 4, núm. 3, pp. 1–29, sep. 2023, doi: 10.1145/3579369.

[57] S. Ali y T. Yue, "Modeling Quantum programs: challenges, initial results, and research directions", en *Proceedings of the 1st ACM SIGSOFT International Workshop on Architectures and Paradigms for Engineering Quantum Software*, Virtual USA: ACM, nov. 2020, pp. 14–21. doi: 10.1145/3412451.3428499.

[58] F. Gemeinhardt, A. Garmendia, y M. Wimmer, "Towards Model-Driven Quantum Software Engineering", en *2021 IEEE/ACM 2nd International Workshop on Quantum Software Engineering (Q-SE)*, Madrid, Spain: IEEE, jun. 2021, pp. 13–15. doi: 10.1109/Q-SE52541.2021.00010.

[59] M. Polo, I. García-Rodríguez, M. Serrano, y M. Piattini, "Generation of Quantum Software From Truth Tables", *Softw. Pract. Exp.*, vol. 55, núm. 8, pp. 1389–1407, ago. 2025, doi: 10.1002/spe.3426.

[60] R. Perez-Castillo, L. Jimenez-Navajas, y M. Piattini, "Modelling Quantum Circuits with UML", en *2021 IEEE/ACM 2nd International Workshop on Quantum Software Engineering (Q-SE)*, Madrid, Spain: IEEE, jun. 2021, pp. 7–12. doi: 10.1109/Q-SE52541.2021.00009.

[61] X. Guo, S. Saito, y J. Zhao, "QuanUML: Towards A Modeling Language for Model-Driven Quantum Software Development", en *2025 IEEE 49th Annual Computers, Software, and Applications Conference (COMPSAC)*, Toronto, ON, Canada: IEEE, jul. 2025, pp. 1344–1349. doi: 10.1109/COMPSAC65507.2025.00168.

[62] A. A. Khan *et al.*, "Agile Practices for Quantum Software Development: Practitioners' Perspectives", en *2023 IEEE International Conference on Quantum Software (QSW)*, Chicago, IL, USA: IEEE, jul. 2023, pp. 9–20. doi: 10.1109/QSW59989.2023.00012.

[63] A. A. Khan *et al.*, "Agile meets quantum: a novel genetic algorithm model for predicting the success of quantum software development project", *Autom. Softw. Eng.*, vol. 31, núm. 1, p. 34, may 2024, doi: 10.1007/s10515-024-00434-z.

[64] M. Fernández-Osuna, R. Pérez-Castillo, J. A. Cruz-Lemus, M. Baczyk, y M. Piattini, "Exploring design patterns in quantum software: a case study", *Computing*, vol. 107, núm. 5, p. 111, may 2025, doi: 10.1007/s00607-025-01467-2.

[65] J. Shen, J. Ammermann, C. König, y I. Schaefer, "Quantum Pattern Detection: Accurate State- and Circuit-Based Analyses", en *2025 IEEE/ACM International Workshop on Quantum Software Engineering (Q-SE)*, Ottawa, ON, Canada: IEEE, may 2025, pp. 9–16. doi: 10.1109/Q-SE66736.2025.00008.

[66] W. Mauerer y S. Scherzinger, "1-2-3 Reproducibility for Quantum Software Experiments", en *2022 IEEE International Conference on Software Analysis, Evolution and Reengineering (SANER)*, Honolulu, HI, USA: IEEE, mar. 2022, pp. 1247–1248. doi: 10.1109/SANER53432.2022.00148.

[67] K. Upadhyay, V. Chhetri, A. B. Siddique, y U. Farooq, "Analyzing the Evolution and Maintenance of Quantum Software Repositories", en *2025 IEEE International Conference on Quantum Software (QSW)*, jul. 2025, pp. 173–184. doi: 10.1109/QSW67625.2025.00029.

[68] A. Ahmad, A. A. Khan, M. Waseem, M. Fahmideh, y T. Mikkonen, "Towards Process Centered Architecting for Quantum Software Systems", en *2022 IEEE International Conference on Quantum Software (QSW)*, Barcelona, Spain: IEEE, jul. 2022, pp. 26–31. doi: 10.1109/QSW55613.2022.00019.

[69] Y. Huang, X. Zhou, F. Meng, y S. Li, "Qubit mapping: the adaptive divide-and-conquer approach", *Quantum Inf. Process.*, vol. 24, núm. 7, p. 202, jul. 2025, doi: 10.1007/s11128-025-04815-5.

[70] G. Uchehara, T. M. Aamodt, y O. Di Matteo, "Graph-Based Identification of Qubit Network (GidNET) for Qubit Reuse", en *2024 IEEE International Conference on Quantum Computing and Engineering (QCE)*, Montreal, QC, Canada: IEEE, sep. 2024, pp. 1120–1131. doi: 10.1109/QCE60285.2024.00131.

[71] Y. Jin *et al.*, "Tetris: A Compilation Framework for VQA Applications in Quantum Computing", en *2024 ACM/IEEE 51st Annual International Symposium on Computer Architecture (ISCA)*, Buenos Aires, Argentina: IEEE, jun. 2024, pp. 277–292. doi: 10.1109/ISCA59077.2024.00029.

[72] L. Lao y D. E. Browne, "2QAN: a quantum compiler for 2-local qubit hamiltonian simulation algorithms", en *Proceedings of the 49th Annual International Symposium on Computer Architecture*, New York New York: ACM, jun. 2022, pp. 351–365. doi: 10.1145/3470496.3527394.

[73] A. Neri, R. S. Barbosa, y J. N. Oliveira, "Compiling Quantamorphisms for the IBM Q Experience", *IEEE Trans. Softw. Eng.*, vol. 48, núm. 11, pp. 4339–4356, nov. 2022, doi: 10.1109/TSE.2021.3117515.

[74] J. Wang, Q. Zhang, G. H. Xu, y M. Kim, "QDiff: Differential Testing of Quantum Software Stacks", en *2021 36th IEEE/ACM International Conference on Automated Software Engineering (ASE)*, Melbourne, Australia: IEEE, nov. 2021, pp. 692–704. doi: 10.1109/ASE51524.2021.9678792.

[75] D. Alonso, P. Sánchez, y B. Álvarez, "A Graph-Based Approach for Modelling Quantum Circuits", *Appl. Sci.*, vol. 13, núm. 21, p. 11794, oct. 2023, doi: 10.3390/app132111794.

[76] T. Peham, L. Burgholzer, y R. Wille, "Equivalence Checking of Parameterized Quantum Circuits: Verifying the Compilation of Variational Quantum Algorithms", en *Proceedings of the 28th Asia and South Pacific Design Automation Conference*, Tokyo Japan: ACM, ene. 2023, pp. 702–708. doi: 10.1145/3566097.3567932.

[77] L. Burgholzer, R. Raymond, y R. Wille, "Verifying Results of the IBM Qiskit Quantum Circuit Compilation Flow", en *2020 IEEE International Conference on Quantum Computing and Engineering (QCE)*, Denver, CO, USA: IEEE, oct. 2020, pp. 356–365. doi: 10.1109/QCE49297.2020.00051.

[78] M. Paltenghi y M. Pradel, "Analyzing Quantum Programs with LintQ: A Static Analysis Framework for Qiskit", *Proc. ACM Softw. Eng.*, vol. 1, núm. FSE, pp. 2144–2166, jul. 2024, doi: 10.1145/3660802.

[79] S. Xia y J. Zhao, "Static Entanglement Analysis of Quantum Programs", en *2023 IEEE/ACM 4th International Workshop on Quantum Software Engineering (Q-SE)*, Melbourne, Australia: IEEE, may 2023, pp. 42–49. doi: 10.1109/Q-SE59154.2023.00013.

[80] Y. Mao, S. Shresthamali, y M. Kondo, "Q-fid: Quantum Circuit Fidelity Improvement with LSTM Networks", *Adv. Quantum Technol.*, vol. 8, núm. 10, p. 2500022, oct. 2025, doi: 10.1002/qute.202500022.

[81] M. M. Louamri, N. E. Belaloui, A. Tounsi, y M. T. Rouabah, "Comparative Study of Quantum Transpilers: Evaluating the Performance of qiskit-braket-provider, qBraid-SDK, and Pytket Extensions", en *2024 1st International Conference on Innovative*

and Intelligent Information Technologies (IC3IT), dic. 2024, pp. 1–6. doi: 10.1109/IC3IT63743.2024.10869429.

[82] V. De Maio, I. Brandic, E. Deelman, y J. Cito, "The Road to Hybrid Quantum Programs: Characterizing the Evolution from Classical to Hybrid Quantum Software", en *Proceedings of the 33rd ACM International Conference on the Foundations of Software Engineering*, Clarion Hotel Trondheim Trondheim Norway: ACM, jun. 2025, pp. 1721–1731. doi: 10.1145/3696630.3731623.

[83] V. Gheorghiu, J. Huang, S. M. Li, M. Mosca, y P. Mukhopadhyay, "Reducing the CNOT count for Clifford+T circuits on NISQ architectures", *IEEE Trans. Comput.-Aided Des. Integr. Circuits Syst.*, vol. 42, núm. 6, pp. 1873–1884, jun. 2023, doi: 10.1109/TCAD.2022.3213210.

[84] N. Tornow, E. Giortamis, y P. Bhatotia, "QVM: Quantum Gate Virtualization Machine", *Proc. ACM Program. Lang.*, vol. 9, núm. PLDI, pp. 993–1018, jun. 2025, doi: 10.1145/3729290.

[85] J. Alvarado-Valiente, J. Romero-Álvarez, E. Moguel, J. García-Alonso, y J. M. Murillo, "Orchestration for quantum services: The power of load balancing across multiple service providers", *Sci. Comput. Program.*, vol. 237, p. 103139, oct. 2024, doi: 10.1016/j.scico.2024.103139.

[86] M. Weigold, J. Barzen, F. Leymann, y D. Vietz, "Patterns for Hybrid Quantum Algorithms", en *Service-Oriented Computing*, vol. 1429, J. Barzen, Ed., en Communications in Computer and Information Science, vol. 1429. , Cham: Springer International Publishing, 2021, pp. 34–51. doi: 10.1007/978-3-030-87568-8_2.

[87] A. Li, S. Stein, S. Krishnamoorthy, y J. Ang, "QASMBench: A Low-Level Quantum Benchmark Suite for NISQ Evaluation and Simulation", *ACM Trans. Quantum Comput.*, vol. 4, núm. 2, pp. 1–26, jun. 2023, doi: 10.1145/3550488.

[88] S. Nishio, Y. Pan, T. Satoh, H. Amano, y R. V. Meter, "Extracting Success from IBM's 20-Qubit Machines Using Error-Aware Compilation", *ACM J. Emerg. Technol. Comput. Syst.*, vol. 16, núm. 3, pp. 1–25, jul. 2020, doi: 10.1145/3386162.

[89] S. Brandhofer, I. Polian, S. Barz, y D. Bhatti, "Hardware-efficient preparation of architecture-specific graph states on near-term quantum computers", *Sci. Rep.*, vol. 15, núm. 1, p. 2095, ene. 2025, doi: 10.1038/s41598-024-82715-x.

[90] F. M. Creevey, C. D. Hill, y L. C. L. Hollenberg, "GASP: a genetic algorithm for state preparation on quantum computers", *Sci. Rep.*, vol. 13, núm. 1, p. 11956, jul. 2023, doi: 10.1038/s41598-023-37767-w.

[91] R. Iten, R. Moyard, T. Metger, D. Sutter, y S. Woerner, "Exact and practical pattern matching for quantum circuit optimization", *ACM Trans. Quantum Comput.*, vol. 3, núm. 1, pp. 1–41, mar. 2022, doi: 10.1145/3498325.

[92] A. S. Roy, K. Pack, N. Wittler, y S. Machnes, "Software tool-set for automated quantum system identification and device bring up", en *2025 17th International Conference on COMmunication Systems and NETworks (COMSNETS)*, ene. 2025, pp. 1062–1067. doi: 10.1109/COMSNETS63942.2025.10885595.

[93] J. Doi y H. Horii, "Cache Blocking Technique to Large Scale Quantum Computing Simulation on Supercomputers", en *2020 IEEE International Conference on Quantum Computing and Engineering (QCE)*, Denver, CO, USA: IEEE, oct. 2020, pp. 212–222. doi: 10.1109/QCE49297.2020.00035.

[94] Y. Lu, S. Liang, H. Fan, C. Guo, W. Luk, y P. H. J. Kelly, "Versatile Cross-platform Compilation Toolchain for Schrödinger-style Quantum Circuit Simulation", en *2025*

62nd ACM/IEEE Design Automation Conference (DAC), San Francisco, CA, USA: IEEE, jun. 2025, pp. 1–7. doi: 10.1109/DAC63849.2025.11132539.

[95] J. Ammermann, T. Bittner, D. Eichhorn, I. Schaefer, y C. Seidl, "Can Quantum Computing Improve Uniform Random Sampling of Large Configuration Spaces?", en *2023 IEEE/ACM 4th International Workshop on Quantum Software Engineering (Q-SE)*, Melbourne, Australia: IEEE, may 2023, pp. 34–41. doi: 10.1109/Q-SE59154.2023.00012.

[96] M. Haghparast, E. Moguel, J. Garcia-Alonso, T. Mikkonen, y J. M. Murillo, "Innovative Approaches to Teaching Quantum Computer Programming and Quantum Software Engineering", en *2024 IEEE International Conference on Quantum Computing and Engineering (QCE)*, Montreal, QC, Canada: IEEE, sep. 2024, pp. 251–255. doi: 10.1109/QCE60285.2024.10287.

[97] M. Šćekić y A. Yakaryilmaz, "Comparing Quantum Software Development Kits for Introductory Level Education", *Balt. J. Mod. Comput.*, vol. 10, núm. 1, 2022, doi: 10.22364/bjmc.2022.10.1.06.

[98] G. d'Aloisio *et al.*, "Exploring LLM-Driven Explanations for Quantum Algorithms", en *Proceedings of the 18th ACM/IEEE International Symposium on Empirical Software Engineering and Measurement*, Barcelona Spain: ACM, oct. 2024, pp. 475–481. doi: 10.1145/3674805.3690753.

[99] M. De Stefano, "An empirical study on the current adoption of quantum programming", en *Proceedings of the ACM/IEEE 44th International Conference on Software Engineering: Companion Proceedings*, Pittsburgh Pennsylvania: ACM, may 2022, pp. 310–312. doi: 10.1145/3510454.3522679.

[100] M. Salam y M. Ilyas, "Quantum computing challenges and solutions in software industry—A multivocal literature review", *IET Quantum Commun.*, vol. 5, núm. 4, pp. 462–485, dic. 2024, doi: 10.1049/qtc2.12096.

Anexos

Los anexos reúnen productos académicos, instrumentos metodológicos, materiales de soporte y evidencias complementarias derivados del desarrollo de la investigación. Su propósito es documentar con mayor detalle los insumos y productos utilizados durante la elaboración del QSEAK_v0, sin duplicar en el cuerpo principal de la tesis información que ya fue sintetizada en los capítulos correspondientes.

Algunos anexos se integran directamente en este documento por su relevancia metodológica y extensión manejable. Otros se entregan como archivos digitales independientes debido a su extensión, densidad visual o naturaleza documental.

Tabla A. Organización de anexos y modalidad de entrega.

Identificador	Título	Modalidad de entrega
Anexo A	Artículo académico derivado de la fase inicial de la investigación	Archivo digital independiente
Anexo B	Artículo académico derivado del análisis bibliométrico	Archivo digital independiente
Anexo C	Material complementario del análisis bibliométrico	Archivo digital independiente
Anexo D	Borrador del artículo académico derivado de la revisión sistemática de la literatura	Archivo digital independiente
Anexo E	Instrumentos de la revisión sistemática de la literatura	Integrado en la tesis
Anexo F	Matriz de trazabilidad para la elaboración del QSEAK_v0	Archivo digital independiente
Anexo G	QSEAK_v0 en español	Archivo digital independiente
Anexo H	QSEAK_v0 en inglés	Archivo digital independiente
Anexo I	Evidencia de la revisión académica inicial del QSEAK_v0	Mensajes base integrados en la tesis y evidencia documental en archivo digital independiente

Anexo A. Artículo académico derivado de la fase inicial de la investigación

Por su extensión, este anexo se entrega como archivo digital independiente. El documento corresponde al artículo académico derivado de la etapa exploratoria inicial de la investigación y funciona como antecedente del estudio, ya que contribuyó a reconocer el estado general del campo, delimitar el problema de investigación y orientar la necesidad de

una organización referencial de conocimientos vinculada con la ingeniería de software cuántico.

Archivo asociado: Anexo_A_Articulo_Fase_Inicial.pdf.

Anexo B. Artículo académico derivado del análisis bibliométrico

Por su extensión, este anexo se entrega como archivo digital independiente. El documento presenta el producto académico asociado con el análisis bibliométrico, incluyendo la caracterización del campo, la identificación de tendencias recientes, la evolución temática y las redes bibliométricas consideradas durante la investigación.

Archivo asociado: Anexo_B_Articulo_AB.pdf.

Anexo C. Material complementario del análisis bibliométrico

Por su naturaleza documental y visual, este anexo se entrega como archivo digital independiente. Reúne material de soporte asociado con el análisis bibliométrico, incluyendo información metodológica, técnica o documental relacionada con la configuración del análisis y los resultados obtenidos.

Archivo asociado: Anexo_C_Material_Complementario_AB.pdf.

Anexo D. Borrador del artículo académico derivado de la revisión sistemática de la literatura

Por su extensión, este anexo se entrega como archivo digital independiente. El documento corresponde al borrador del artículo académico derivado de la revisión sistemática de la literatura y desarrolla con mayor detalle el proceso de identificación, selección, evaluación y análisis de estudios.

Archivo asociado: Anexo_D_Borrador_Articulo_RSL.pdf.

Anexo E. Instrumentos de la revisión sistemática de la literatura

Este anexo reúne los instrumentos utilizados para la ejecución de la revisión sistemática de la literatura. Incluye la cadena de búsqueda, los criterios de inclusión y exclusión, las notas metodológicas aplicadas durante el cribado, las categorías temáticas de clasificación y los criterios de calidad empleados para valorar los estudios seleccionados. Su propósito es documentar de forma trazable las decisiones metodológicas que sustentaron la selección, clasificación y análisis de la literatura.

Tabla B. Criterios de inclusión de la revisión sistemática de la literatura.

Identificador	Criterio	Descripción
CI1	Idioma	Artículos académicos escritos en inglés.
CI2	Periodo	Artículos académicos publicados entre 2019 y 2025 (incluyendo ambos años).
CI3	Revisión por pares	Artículos académicos publicados en conferencias, workshops o revistas académicas que cuenten con revisión por pares.
CI4	Enfoque explícito	Artículos académicos que indiquen una relación con la ISQ o el desarrollo de software cuántico.
CI5	Propuestas del ciclo de vida / flujos de trabajo	Artículos académicos que propongan, cubran o desarrollen completamente propuestas de ciclo de vida, flujos o secuencias de trabajo para el desarrollo del software cuántico, así como artículos que aborden únicamente una sección o etapa que aporte a organizar el proceso completo del desarrollo de software cuántico.
CI6	Procesos, calidad, pruebas y buenas prácticas	Artículos académicos relacionados con modelos de proceso del desarrollo de software cuántico, como pueden ser verificación, validación, pruebas, métricas, aseguramiento de calidad, buenas prácticas o actividades propuestas que formulen o aporten al ciclo de vida.
CI7	Desafíos de hardware con impacto en software	Artículos académicos que discutan problemas, restricciones o limitaciones físicas del hardware cuántico cuando estos afecten la implementación, ejecución, rendimiento o calidad del software cuántico.
CI8	Modelo del software cuántico	Artículos académicos que indiquen que fueron desarrollados en sistemas híbridos basados en el modelo de circuitos cuánticos, teniendo en cuenta la nota metodológica 1 (NM1).
CI9	Tecnología física de implementación	Artículos académicos que indiquen que fueron desarrollados en sistemas híbridos basados en la tecnología física de superconductores, teniendo en cuenta la nota metodológica 1 (NM1).

CI10	Qiskit como enfoque central	Artículos académicos cuyo enfoque principal sea Qiskit, así como trabajos comparativos donde Qiskit constituya uno de los elementos centrales respecto a otros entornos de desarrollo o lenguajes de programación cuánticos, considerando lo mencionado en la nota metodológica 2 (NM2).
CI11	Herramientas y entornos de desarrollo para software cuántico	Artículos académicos que presenten, evalúen o analicen herramientas, plataformas o entornos orientados al diseño, desarrollo, depuración, simulación, optimización o pruebas de software cuántico, siempre que no se trate de entornos de desarrollo ni lenguajes de programación, considerando la nota metodológica 2 (NM2).
CI12	Desafíos técnicos en entornos de desarrollo y ejecución del software cuántico	Artículos académicos que aborden limitaciones, problemas técnicos o desafíos derivados de entornos de desarrollo, kits de desarrollo de software, compiladores, transpiladores, entornos de ejecución, simuladores, cadenas de herramientas o pipelines que influyan en el desarrollo, ejecución o reproducibilidad del software cuántico.
CI13	Propuestas educativas o formativas	Artículos académicos que presenten propuestas educativas, enfoques pedagógicos, cursos, estrategias didácticas o contenidos formativos orientados a la enseñanza o aprendizaje de la ISQ o del desarrollo de software cuántico.
CI14	Enfoques formales o matemáticos aplicados	Artículos académicos teóricos o formales únicamente cuando indiquen explícitamente en su título o resumen su aplicación al diseño, análisis, validación, optimización, implementación o formación conceptual relevante para el desarrollo de software cuántico.
CI15	Desarrollos introductorios o panorámicos	Artículos académicos introductorios, panorámicos o de carácter conceptual siempre que contribuyan explícitamente a la comprensión, formación o fundamentación metodológica de la ISQ.

Tabla C. Criterios de exclusión de la revisión sistemática de la literatura.

Identificador	**Criterio**	**Descripción**
CE1	Idioma distinto al inglés	Artículos académicos escritos en idiomas distintos al inglés.

CE2	Fuera del periodo	Artículos académicos publicados antes de 2019 o después de 2025, salvo que representen antecedentes históricos esenciales.
CE3	Sin revisión por pares	Artículos académicos que no cuenten con arbitraje académico formal, tales como documentos técnicos no arbitrados, blogs, reportes industriales no validados, material divulgativo, presentaciones o literatura gris.
CE4	Sin acceso al texto completo	Artículos académicos cuyo contenido completo no esté disponible para su lectura.
CE5	Mención superficial de software cuántico	Artículos académicos que mencionen el software cuántico únicamente como ilustración, caso secundario o de manera superficial, sin aportar contenido metodológico, conceptual, técnico o formativo relevante para la ISQ.
CE6	Enfoque exclusivo en aprendizaje automático/aprendizaje automático cuántico	Artículos académicos cuyo aporte principal se limite al análisis, diseño o aplicación de técnicas de aprendizaje automático o aprendizaje automático cuántico sin una conexión explícita con actividades, procesos o herramientas del desarrollo de software cuántico.
CE7	Hardware sin relación con software cuántico	Artículos académicos dedicados exclusivamente a la caracterización, fabricación o medición de dispositivos cuánticos sin conexión explícita con actividades del desarrollo de software cuántico.
CE8	Desafíos físicos sin impacto en el software cuántico	Artículos académicos que analicen ruido, decoherencia, fidelidad, variabilidad u otros fenómenos físicos sin vincularlos explícitamente con la programación, validación, depuración, optimización, portabilidad o rendimiento del software cuántico.
CE9	Entornos de desarrollo/lenguajes sin Qiskit ni aporte comparativo	Artículos académicos cuyo foco principal sea Cirq, Braket, Q#, tket u otros entornos de desarrollo o lenguajes cuánticos sin incluir comparativas, análisis o aportaciones donde Qiskit desempeñe un papel central.
CE10	Entornos, herramientas o simuladores sin vínculo a ISQ	Artículos académicos que describan entornos, entornos de ejecución, cadenas de herramientas o simuladores sin conectarlos con actividades del desarrollo de software cuántico como depuración, transpilación, portabilidad, reproducibilidad, pruebas u optimización.

CE11	Enfoques puramente matemáticos, físicos o teóricos sin conexión ingenieril	Artículos académicos cuyo objetivo sea exclusivamente describir propiedades abstractas, estructuras matemáticas, fenómenos físicos o análisis teóricos sin implicaciones prácticas o formativas para la ISQ o el desarrollo de software cuántico.
CE12	Introducciones generales del QC sin aporte formativo relevante para ISQ	Artículos académicos cuyo contenido se limite a una introducción general, superficial o divulgativa al CQ sin aportar fundamentos conceptuales, técnicos o formativos necesarios para la práctica o formación en ISQ.

Tabla D. Notas metodológicas aplicadas durante el cribado.

Identificador	**Criterio**	**Descripción**
NM1	Ambigüedad en contexto de implementación técnica	Dado que muchos estudios sobre ISQ no especifican explícitamente si emplean sistemas híbridos, el modelo de circuitos cuánticos o una tecnología física particular, durante el proceso de cribado no se excluirán artículos académicos por la ausencia de esta información en el título o resumen. Sólo se excluirán aquellos que indiquen de manera clara un paradigma o una tecnología física distinta y no pertinente al objetivo de la revisión. En casos de ambigüedad, los estudios serán retenidos provisionalmente y su clasificación final se determinará durante la lectura completa y la evaluación de calidad.
NM2	Distinción entre entornos de desarrollo/lenguajes y herramientas	Los entornos de desarrollo y lenguajes cuánticos (Qiskit, Cirq, Braket, Q#, tket, entre otros) se considerarán exclusivamente bajo el criterio CI10. Por su parte, CI11 se reserva a herramientas, plataformas y entornos que no constituyen entornos de desarrollo y/o lenguajes. La aparición incidental de un entorno de desarrollo en un estudio orientado a herramientas no implica su clasificación bajo CI10.

NM3	Ambigüedad en terminología técnica	Debido a que en la literatura científica se suelen usar términos de manera indistinta, no se excluirán artículos académicos que utilicen el término *"quantum circuit"* cuando exista una posibilidad razonable de que el contexto se refiera al modelo computacional basado en circuitos cuánticos como equivalente funcional a un *"quantum program"*. La decisión de exclusión sólo deberá tomarse cuando el título y el resumen evidencien claramente un enfoque puramente formal o matemático sin conexión con actividades del desarrollo de software cuántico.

Consideraciones para clasificación temática:

No se excluye ningún artículo en la sección de cribado por no mencionar el tipo de modelo cuántico ni tecnología física utilizada, o si es una implementación híbrida, a menos que se mencione explícitamente que se centrará exclusivamente en algo diferente a sistemas híbridos basados en el modelo de circuitos cuánticos con la tecnología física de superconductores.

Solo se asigna tópico si hay contribución sustantiva, no por menciones superficiales.

Qiskit como enfoque central se clasifica en T5; comparativas o análisis donde Qiskit participa parcialmente se clasifican en T6.

Sólo se excluye cuando hay evidencia clara de no pertenecer a ISQ o cuando cumple CE.

Tabla E. Criterios de calidad aplicados a los estudios seleccionados.

Identificador	Criterio	Descripción
QA1	Contribución sustantiva	Evalúa si el artículo presenta una contribución clara, sustantiva y directamente relevante para la ISQ, ya sea en metodología, ciclo de vida, validación, pruebas, herramientas, implementación híbrida, desafíos técnicos, entornos de desarrollo o enseñanza.

QA2	Objetivo claro	Evalúa si el artículo declara explícitamente su propósito, pregunta de investigación u objetivo, y si estos son comprensibles, coherentes y verificables a lo largo del documento.
QA3	Definición del contexto cuántico	Evalúa si el estudio especifica claramente el paradigma cuántico utilizado, incluyendo tanto el modelo computacional como la implementación física empleada.
QA4	Adecuación del contexto cuántico	Evalúa si el enfoque del artículo es compatible y aplicable al desarrollo de software cuántico en sistemas basados en el modelo de circuitos cuánticos con implementación física de superconductores, ya sea de forma explícita o inferible tras la lectura completa.
QA5	Metodología	Evalúa si la metodología empleada está claramente descrita, es apropiada para el problema abordado y permite comprender con precisión cómo se obtuvo el conocimiento presentado.
QA6	Evidencia / validación	Evalúa si el artículo presenta evidencia verificable acorde al tipo de contribución (experimental, metodológica o conceptual), como experimentos, simulaciones, casos de estudio, validación conceptual, ejemplos ilustrativos o análisis razonados que respalden sus conclusiones.
QA7	Reproducibilidad	Evalúa si el artículo proporciona suficiente información para replicar o aproximar sus resultados, mediante descripciones técnicas, parámetros experimentales, modelos, pseudocódigo, configuraciones, repositorios, bases de datos, criterios de selección o documentación detallada.
QA8	Delimitación y claridad de la contribución	Evalúa si el artículo define de manera explícita y comprensible su contribución principal (por ejemplo: método, herramienta, modelo, artefacto o taxonomía) y delimita su alcance, supuestos, condiciones de aplicación y limitaciones, incluyendo amenazas a la validez cuando corresponda.
QA9	Calidad formal	Evalúa si el documento presenta redacción clara, estructura formal adecuada, terminología correcta y argumentación coherente desde la perspectiva tanto cuántica como ingenieril.

Anexo F. Matriz de trazabilidad para la elaboración del QSEAK_v0

Por su extensión y densidad tabular, este anexo se entrega como archivo digital independiente. La matriz de trazabilidad relaciona los componentes del QSEAK_v0 con los insumos derivados del análisis bibliométrico, la revisión sistemática de la literatura y la

literatura base utilizados durante la elaboración de la propuesta. Su propósito es documentar la correspondencia entre dichas evidencias y las decisiones de organización del marco referencial.

Archivo asociado: Anexo_F_Matriz_Trazabilidad_QSEAK_v0.pdf.

Anexo G. QSEAK_v0 en español

Por su extensión, este anexo se entrega como archivo digital independiente. El documento presenta QSEAK_v0 en español, correspondiente a la primera versión del marco de fundamentos referenciales propuesto en esta investigación. Su estructura organiza los conocimientos en áreas vinculadas con fundamentos, conocimientos técnicos especializados y conocimientos transversales y profesionales.

Archivo asociado: Anexo_G_QSEAK_v0_ES.pdf.

Anexo H. QSEAK_v0 en inglés

Por su extensión, este anexo se entrega como archivo digital independiente. El documento presenta la versión en inglés del QSEAK_v0, elaborada para apoyar la comunicación académica, la revisión por especialistas externos y la posible difusión del marco en contextos internacionales.

Archivo asociado: Anexo_H_QSEAK_v0_EN.pdf.

Anexo I. Evidencia de la revisión académica inicial del QSEAK_v0

Este anexo documenta la evidencia asociada con el proceso de revisión académica inicial del QSEAK_v0. La tabla de seguimiento del contacto con especialistas se presenta en el capítulo de resultados, por lo que no se duplica en este apartado. En este anexo se incluyen los mensajes base utilizados para la invitación inicial y para el envío posterior de la propuesta; la evidencia documental completa se entrega como archivo digital independiente.

El archivo asociado reúne registros documentales de correos vinculados con la invitación a especialistas, el envío del QSEAK_v0, respuestas recibidas y retroalimentación académica. Su propósito es respaldar el proceso reportado en la tesis sin incorporar capturas extensas dentro del documento principal.

Archivo asociado: Anexo_I_Evidencia_Revision_Academica_QSEAK_v0.pdf.

Mensaje base de invitación:

Estimado/a Dr./Dra.:

Espero que se encuentre muy bien.

Mi nombre es Jesús Alfonso Ocampo Mújica, estudiante de maestría en Ciencias de la Computación en el Tecnológico Nacional de México / Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (TecNM/CENIDET), Campus Cuernavaca.

Mi línea de investigación se ubica en el área de Ingeniería de Software y, dentro de ella, mi tesis se centra en la Ingeniería de Software Cuántico. Actualmente desarrollo una propuesta denominada QSEAK: Quantum Software Engineering Areas of Knowledge, orientada a organizar conocimientos relevantes para la formación de ingenieros de software cuántico. Esta propuesta se sustenta en un análisis bibliométrico y una revisión sistemática de la literatura, y busca contribuir a futuras guías formativas en el área.

Mi directora de tesis es la Dra. Blanca Dina Valenzuela Robles, doctora en Ciencias de la Computación y profesora-investigadora en el TecNM/CENIDET, Campus Cuernavaca. En conjunto, consideramos que su perfil, trayectoria y experiencia académica resultan especialmente relevantes para valorar la propuesta y aportar observaciones críticas desde una perspectiva especializada.

Por ello, me permito consultarle si estaría dispuesto/a a revisar la propuesta y compartir retroalimentación sobre su contenido y estructura general.

Quedo atento a su respuesta. Le agradecemos mucho el tiempo y la atención que pueda brindar a esta solicitud.

Atentamente,
Ing. Jesús Alfonso Ocampo Mújica
Estudiante de Maestría en Ciencias de la Computación
TecNM/CENIDET, Campus Cuernavaca

Mensaje base tras aceptación de invitación:

Estimado/a Dr./Dra.:

Muchas gracias por su respuesta y por su disposición para revisar la propuesta QSEAK.

Adjunto la versión preliminar de la propuesta QSEAK para revisión académica.

En términos generales, el documento se organiza en cuatro secciones: fundamentos, conocimientos técnicos especializados, conocimientos transversales y profesionales, y un panorama de propuestas educativas y formativas en Ingeniería de Software Cuántico.

Para facilitar la revisión, los tópicos propuestos para la formación de ingenieros de software cuántico se encuentran destacados en negritas al inicio de los apartados correspondientes. Posteriormente, cada sección desarrolla su justificación e incluye diagramas jerárquicos de síntesis destinados a apoyar la comprensión de la estructura propuesta.

La revisión puede realizarse libremente; no obstante, agradeceríamos especialmente comentarios sobre el enfoque y la estructura de la propuesta. En la medida de lo posible, también serían de gran valor observaciones sobre la profundidad del contenido, la secuenciación de los apartados, el alcance, la claridad conceptual, la pertinencia general y cualquier elemento que considere faltante, sobredimensionado o susceptible de reorganización.

Si le resulta posible, agradeceríamos mucho recibir su retroalimentación a más tardar el 3 de junio de 2026. No obstante, comprendemos plenamente sus compromisos de agenda, por lo que cualquier comentario que pudiera compartirnos después de esa fecha también será de gran valor para nuestra investigación.

Puede compartir sus observaciones en el formato que le resulte más conveniente, ya sea mediante comentarios directamente en el documento, un archivo aparte o una respuesta por correo electrónico.

Dado que aún se trata de un documento preliminar y no publicado, agradeceríamos mucho que pudiera utilizarse únicamente para fines de revisión y retroalimentación.

Nuevamente, muchas gracias por su disposición y por el tiempo que pueda dedicar a esta revisión.