

Empoderamiento Económico Femenino a través de Quantum Literacy: Un Modelo de Capital Humano Específico para Inclusión en Tecnologías Emergentes

Elena Patricia Rodríguez

`elena.rodriguez@amlentia.org`

Resumen

Este artículo desarrolla un marco teórico sobre el empoderamiento económico femenino mediante la alfabetización cuántica (quantum literacy), conceptualizada como una forma específica de capital humano en el contexto de tecnologías emergentes. A partir de la teoría del capital humano y los estudios sobre brechas de género en ciencia y tecnología, se propone que la quantum literacy constituye un vector estratégico para la inclusión económica de las mujeres en sectores de alta innovación. El análisis revela que las tecnologías cuánticas presentan una ventana de oportunidad única para reducir las asimetrías de género heredadas de revoluciones tecnológicas previas, pero solo si se implementan políticas proactivas de desarrollo de capacidades específicas. Se identifican las barreras estructurales que perpetúan la exclusión femenina de estos campos, incluyendo sesgos educativos tempranos, déficits en redes de mentoría, y marcos culturales restrictivos. El modelo propuesto integra dimensiones de acceso, competencias técnicas, confianza epistemológica y participación en comunidades de práctica. Los hallazgos sugieren que invertir en quantum literacy femenina genera retornos económicos múltiples: incremento en la diversidad innovadora, ampliación del pool de talento en sectores críticos, y reducción de desigualdades salariales de género en ocupaciones de alta cualificación. Se concluye que la alfabetización cuántica debe ser reconocida como un componente esencial del capital humano del siglo XXI y que su democratización de género constituye tanto un imperativo de justicia como una necesidad económica estratégica.

Palabras clave: Quantum literacy, capital humano, brechas de género, empoderamiento económico, tecnologías emergentes

Clasificación JEL: J16, J24, O33, I25

1. Introducción

La emergencia de las tecnologías cuánticas como campo científico y dominio de innovación industrial ha generado expectativas sin precedentes sobre su potencial transformador en sectores que van desde la computación y las comunicaciones hasta la farmacéutica y la ciencia de materiales (Wang and Song, 2020; Yago Malo et al., 2024). Sin embargo, al mismo tiempo que estas tecnologías prometen revolucionar la estructura productiva global, existe el riesgo de que reproduzcan y amplifiquen las desigualdades de género que han caracterizado históricamente los campos de ciencia, tecnología, ingeniería y matemáticas, conocidos colectivamente como STEM (Ebua, 2023; Wolbring, 2022).

El concepto de quantum literacy, o alfabetización cuántica, ha emergido recientemente como un constructo educativo y epistemológico que busca democratizar el acceso al conocimiento sobre principios cuánticos y sus aplicaciones tecnológicas (Nita et al., 2021; Vermaas, 2017). A diferencia de la formación especializada en física cuántica, la quantum literacy se refiere a la capacidad de comprender, evaluar críticamente y participar en discusiones informadas sobre las implicaciones sociales, económicas y éticas de las tecnologías cuánticas, sin necesariamente dominar el formalismo matemático subyacente (Arrow et al., 2023; Meyer, 2023).

Desde la perspectiva de la teoría del capital humano, la quantum literacy puede conceptualizarse como una forma específica de inversión en capacidades cognitivas que incrementa la productividad potencial de los individuos en contextos laborales cada vez más permeados por innovaciones cuánticas (Lee, 2001; Rosario, 2012). Sin embargo, la literatura existente ha prestado escasa atención a las dimensiones de género en la construcción y distribución de este tipo particular de capital humano. Esta omisión es especialmente problemática dado que las tecnologías emergentes tienden a consolidar estructuras de poder existentes cuando no se interviene proactivamente para garantizar la inclusión (Seskir et al., 2023; Damayanti, 2024).

La brecha de género en STEM ha sido ampliamente documentada, manifestándose en tasas diferenciales de participación educativa, segregación ocupacional, disparidades salariales y subrepresentación en posiciones de liderazgo (Cazzaniga, 2024). Las tecnologías de la información en décadas previas reprodujeron estos patrones, creando una "división digital de género" que limita el acceso económico de las mujeres a sectores de alta remuneración (Pohjola, 2001; ?; Lahiri, 2024). Existe el riesgo fundado de que las tecnologías cuánticas sigan una trayectoria similar, consolidando la exclusión femenina de un sector económico de crecimiento exponencial proyectado (Troyer et al., 2024; Kop, 2023).

No obstante, el carácter naciente del campo cuántico también presenta una ventana de oportunidad única para intervenir tempranamente en la construcción de estructuras más equitativas. A diferencia de campos tecnológicos maduros donde los patrones de exclusión están profundamente institucionalizados, las tecnologías cuánticas se encuentran en una fase formativa donde es posible diseñar trayectorias alternativas que prioricen la diversidad desde su origen (de Jong,

2022; Coenen et al., 2022). Esta potencialidad, sin embargo, requiere de marcos teóricos sólidos que orienten la formulación de políticas y el diseño de intervenciones educativas específicas.

El objetivo central de este artículo es desarrollar un modelo teórico que articule la relación entre quantum literacy y empoderamiento económico femenino, conceptualizando la alfabetización cuántica como una forma estratégica de capital humano específico cuya distribución equitativa de género genera beneficios económicos tanto individuales como sociales. Se argumenta que invertir en quantum literacy femenina no es únicamente una cuestión de justicia distributiva, sino una necesidad económica fundada en la maximización del talento disponible, la diversificación de perspectivas innovadoras y la ampliación de mercados laborales en sectores de alta productividad.

Para desarrollar este argumento, el artículo se estructura de la siguiente manera. En primer lugar, se establece el marco teórico que conecta el concepto de quantum literacy con la teoría del capital humano, identificando sus dimensiones específicas y su relevancia para la participación económica en sectores intensivos en conocimiento cuántico. Posteriormente, se analizan las brechas de género existentes en tecnologías emergentes y los mecanismos estructurales que las perpetúan. La tercera sección presenta un modelo conceptual de capital humano específico para quantum literacy, identificando los componentes críticos y las interdependencias entre acceso, competencias y participación. La cuarta sección explora las implicaciones económicas del empoderamiento femenino en tecnologías cuánticas, tanto a nivel microeconómico como macroeconómico. Finalmente, se examinan las barreras y facilitadores estructurales que condicionan la efectividad de las inversiones en quantum literacy de género, antes de concluir con reflexiones sobre la agenda de investigación y política pública necesaria para materializar el potencial transformador de esta intervención.

2. Marco Teórico: Quantum Literacy y Capital Humano Específico

La teoría del capital humano, desarrollada fundamentalmente por Gary Becker y Theodore Schultz, postula que las inversiones en educación, entrenamiento y desarrollo de habilidades constituyen formas de acumulación de capital que incrementan la productividad laboral y, consecuentemente, los retornos económicos individuales y sociales (Middleton, 1993, 1991). En su formulación clásica, el capital humano se distingue del capital físico por su encarnación en las personas y su carácter intransferible, pero comparte con este la lógica de inversión con retornos diferidos en el tiempo.

Sin embargo, no todo capital humano es genérico o transferible entre contextos. La literatura económica distingue entre capital humano general, que incrementa la productividad en múltiples empleadores o sectores, y capital humano específico, que tiene valor particular en contextos

determinados (Lee, 2001; Sharma and Dutz, 2012). Esta distinción es crucial para entender la naturaleza de la quantum literacy y su papel en el empoderamiento económico femenino en sectores de tecnologías emergentes.

La quantum literacy puede conceptualizarse como una forma de capital humano con características híbridas. Por un lado, posee componentes de generalidad en tanto que desarrolla capacidades de pensamiento abstracto, razonamiento sobre incertidumbre, comprensión de sistemas complejos y evaluación crítica de información técnica, habilidades transferibles a múltiples dominios (Nita et al., 2021; Vermaas, 2017). Por otro lado, presenta especificidad en relación con sectores económicos particulares que están desarrollando o implementando aplicaciones cuánticas, tales como finanzas cuánticas, farmacéutica computacional, ciberseguridad cuántica, optimización logística y desarrollo de nuevos materiales (Orús et al., 2019; Paudel et al., 2022).

Nita et al. (2021) proponen que la quantum literacy debe ser entendida no como el dominio técnico de la mecánica cuántica, sino como la capacidad de comprender los principios fundamentales que distinguen los sistemas cuánticos de los clásicos y de razonar sobre las implicaciones de estas diferencias para aplicaciones prácticas. Esta conceptualización democratiza el acceso al conocimiento cuántico, separándolo de la barrera de entrada que representa el formalismo matemático avanzado y haciéndolo accesible a poblaciones más amplias, incluyendo a mujeres que históricamente han sido excluidas de trayectorias educativas intensivas en matemáticas por factores estructurales y culturales.

La relevancia económica de este tipo de capital humano emerge del hecho de que las tecnologías cuánticas están generando nuevas categorías ocupacionales y transformando ocupaciones existentes. Estudios de prospectiva laboral identifican la creciente demanda de profesionales capaces de servir como interfaces entre equipos técnicos especializados en física cuántica y stakeholders organizacionales que necesitan comprender implicaciones estratégicas, evaluar inversiones en tecnologías cuánticas, o diseñar productos y servicios que incorporen capacidades cuánticas (Peterssen, 2020; Troyer et al., 2024).

Estas ocupaciones emergentes, frecuentemente denominadas roles de "traducción cuántica" o "gestión de tecnología cuántica", requieren precisamente el tipo de competencias que constituyen la quantum literacy: comprensión conceptual de principios cuánticos, capacidad de comunicación entre comunidades técnicas y no técnicas, evaluación crítica de promesas y limitaciones tecnológicas, y consideración de implicaciones éticas y sociales (Arrow et al., 2023; Kop, 2023). Crucialmente, estas ocupaciones no requieren formación doctoral en física, sino una combinación de alfabetización cuántica con competencias en gestión, comunicación, ética aplicada o diseño de políticas, áreas donde las mujeres han logrado mayor representación que en física pura (Meyer, 2023).

Desde la perspectiva de la teoría del capital humano, la quantum literacy representa una in-

versión de alto retorno potencial porque se posiciona en la intersección entre escasez de oferta y crecimiento acelerado de demanda. Los modelos de supply and demand en mercados laborales sugieren que las ocupaciones emergentes en campos de rápida expansión tecnológica tienden a ofrecer primas salariales significativas durante las fases iniciales de desarrollo del sector (Raja and Christiaensen, 2017; Packard et al., 2018). La evidencia histórica de revoluciones tecnológicas previas, desde la electricidad hasta internet, muestra que los trabajadores que adquieren competencias especializadas en fases tempranas de difusión tecnológica capturan rentas económicas sustanciales (Rodrigues and Costa, 2018; Fieser and Malecki, 1993).

Sin embargo, la captura de estas rentas está condicionada por patrones de acceso diferencial a las oportunidades de desarrollo de capital humano específico. La literatura sobre brechas de género en educación STEM documenta sistemáticamente que las mujeres enfrentan barreras múltiples y acumulativas en el acceso a formación en campos técnicos, que operan desde la educación temprana hasta la formación superior y el desarrollo profesional continuo (Saleem and Higuchi, 2014; Dahlman et al., 2016). Estos patrones de exclusión no son naturales ni inevitables, sino resultado de construcciones sociales sobre aptitudes de género, diseños institucionales excluyentes y dinámicas de discriminación estadística en mercados laborales (Bulatova et al., 2023).

La quantum literacy, por su carácter más accesible que la física cuántica avanzada y su orientación hacia aplicaciones y contextos sociales, presenta potencialmente barreras de entrada más bajas que campos técnicos tradicionales. Nita et al. (2021) demuestran que herramientas pedagógicas basadas en visualización y analogías pueden permitir que personas sin formación avanzada en matemáticas desarrollen comprensión intuitiva pero rigurosa de principios cuánticos. Esta accesibilidad pedagógica es particularmente relevante para población femenina que ha sido socializada en contextos donde las matemáticas avanzadas son presentadas como dominio masculino (Arrow et al., 2023).

No obstante, la mera accesibilidad técnica no garantiza la inclusión si persisten barreras estructurales en el acceso a información, redes de aprendizaje, mentoría y oportunidades de aplicación práctica. La literatura sobre desarrollo de capital humano en contextos de desigualdad muestra que las inversiones en educación son necesarias pero no suficientes; requieren complementarse con intervenciones que aborden los múltiples niveles en que opera la exclusión (Gu, 1999; Juma et al., 2001). Este punto se desarrollará con mayor profundidad en secciones posteriores del artículo.

La conceptualización de quantum literacy como capital humano específico también tiene implicaciones para entender los mecanismos de retorno económico. En mercados laborales segmentados por género, donde las mujeres tienden a concentrarse en ocupaciones de menor remuneración incluso cuando poseen niveles educativos similares a los hombres, la adquisición de capital humano en campos emergentes de alta demanda puede funcionar como mecanismo de

movilidad económica ascendente (Sultana et al., 2024). Las tecnologías cuánticas, al estar en fase de definición de estructuras ocupacionales, ofrecen potencialmente menor segregación de género que campos tecnológicos maduros donde los patrones de exclusión están cristalizados (Seskir et al., 2023).

Finalmente, es importante reconocer que el capital humano no opera en vacío social. La teoría del capital social sugiere que los retornos a inversiones en habilidades están mediados por el acceso a redes de contactos, información y oportunidades (Schiff and Wang, 2010). Para las mujeres, el acceso a redes en campos dominados por hombres ha sido históricamente limitado, creando un "techo de cristal" incluso para aquellas que logran adquirir credenciales formales (Lahiri, 2024). Las comunidades emergentes de práctica en quantum literacy, si se diseñan intencionalmente como espacios inclusivos, podrían evitar la reproducción de estos patrones excluyentes (de Jong, 2022; Coenen et al., 2022).

3. Brechas de Género en Tecnologías Emergentes y sus Mecanismos de Reproducción

La subrepresentación femenina en campos de ciencia y tecnología no es un fenómeno reciente ni accidental, sino el resultado de procesos históricos complejos de construcción social de roles de género, diseño institucional sesgado y dinámicas de discriminación en mercados educativos y laborales. Comprender estos mecanismos es esencial para diseñar intervenciones efectivas que promuevan la inclusión en tecnologías cuánticas.

Las estadísticas sobre participación de género en STEM revelan patrones consistentes a nivel global. Las mujeres están significativamente subrepresentadas en programas de educación superior en física, ingeniería y ciencias de la computación, y esta subrepresentación se acentúa en niveles avanzados de formación y en posiciones de liderazgo académico e industrial (Lee, 2001; Saleem and Higuchi, 2012). En el campo específico de las tecnologías cuánticas, aunque los datos son aún limitados por lo reciente del campo, los estudios preliminares sugieren que los patrones de segregación de género son comparables o incluso más pronunciados que en otros dominios tecnológicos (Wolbring, 2022; Peterssen, 2020).

La investigación educativa ha identificado que las brechas de género en STEM se originan temprano en las trayectorias educativas, con diferencias significativas en actitudes hacia las matemáticas y la física emergiendo ya en la educación primaria y secundaria. Estas diferencias no reflejan capacidades cognitivas intrínsecas, sino efectos de socialización de género, expectativas diferenciales de profesores y padres, falta de modelos a seguir femeninos, y diseño curricular que favorece estilos de aprendizaje masculinos (Rosario, 2012; Middleton, 1993).

Un mecanismo particularmente perjudicial es el fenómeno de "amenaza de estereotipo" (stereotype threat), donde la conciencia de estereotipos negativos sobre las capacidades de las mujeres

en campos técnicos genera ansiedad que efectivamente reduce el desempeño en evaluaciones, creando una profecía autocumplida que refuerza los estereotipos (?). Este mecanismo opera con particular fuerza en campos como la física cuántica que son percibidos socialmente como extremadamente difíciles y abstractos, activando estereotipos sobre supuestas diferencias de género en habilidades matemáticas abstractas.

La exclusión también opera mediante mecanismos institucionales menos visibles. Los criterios de admisión a programas de estudio avanzados frecuentemente priorizan formas específicas de preparación matemática que son más accesibles a estudiantes de contextos privilegiados, creando barreras indirectas de clase y género (Lee, 2001). Los procesos de mentoría y reclutamiento en laboratorios de investigación tienden a reproducir patrones homofílicos donde investigadores senior (mayoritariamente hombres) seleccionan estudiantes que se les asemejan, perpetuando la subrepresentación femenina (Gu, 1999).

En contextos laborales de tecnologías emergentes, la discriminación adopta formas adicionales. Estudios sobre mercados laborales tecnológicos documentan brechas salariales de género incluso controlando por educación y experiencia, reflejando tanto discriminación directa como segregación ocupacional donde las mujeres son canalizadas hacia roles de menor remuneración dentro de las mismas organizaciones (??). La literatura sobre contratación en startups tecnológicas revela sesgos sistemáticos donde las mujeres son evaluadas más críticamente que los hombres con credenciales equivalentes, particularmente en evaluaciones de "potencial τ .^adecuación cultural"(How and Cheah, 2023).

Las tecnologías emergentes como la inteligencia artificial y la automatización han exacerbado estas dinámicas al transformar rápidamente las estructuras ocupacionales. La evidencia empírica muestra que la automatización tiende a desplazar desproporcionadamente empleos feminizados de calificación media, mientras que los nuevos empleos creados en sectores tecnológicos de vanguardia tienden a ser masculinizados, ampliando las brechas de género en ingresos y oportunidades económicas (Acemoglu and Restrepo, 2018; Ernst et al., 2019; Yolusever, 2025).

Estudios recientes sobre el impacto de la inteligencia artificial en mercados laborales sugieren que las mujeres enfrentan mayores riesgos de desplazamiento tecnológico en ocupaciones administrativas y de servicios, mientras que los beneficios de las nuevas ocupaciones tecnológicas se concentran en hombres con formación técnica avanzada (Cazzaniga, 2024; Sultana et al., 2024). Esta polarización se ve agravada por el hecho de que las mujeres tienen menor acceso a programas de reentrenamiento en tecnologías emergentes, debido a barreras de tiempo relacionadas con responsabilidades de cuidado no remuneradas, costos económicos, y falta de información sobre oportunidades (Kuban State Agrarian University et al., 2025; Mykytas, 2025).

La "división digital de género.^{es} particularmente pronunciada en países en desarrollo, donde

las brechas en acceso a internet, dispositivos digitales y competencias de alfabetización digital se superponen con desigualdades de género preexistentes en educación, movilidad y control de recursos económicos (Pohjola, 2001; Heeks and Bukht, 2018; Bulatova et al., 2023). Esta división no es meramente cuestión de acceso físico a tecnología, sino que refleja patrones más profundos de exclusión de los espacios donde se produce, difunde y aplica el conocimiento tecnológico (Lahiri, 2024).

En el contexto específico de las tecnologías cuánticas, existe el riesgo de que estos patrones de exclusión se reproduzcan e incluso se amplifiquen. El campo cuántico requiere niveles particularmente altos de educación formal en física y matemáticas, precisamente las áreas con mayores brechas de género. Además, la investigación y desarrollo en tecnologías cuánticas está altamente concentrada en países de alto ingreso y en instituciones élite, creando barreras geográficas y de clase que se intersectan con las barreras de género (Troyer et al., 2024; Seskir et al., 2023).

Sin embargo, Wolbring (2022) en su exhaustiva revisión de la literatura técnica sobre tecnologías cuánticas identifica una ausencia casi total de consideraciones sobre equidad, diversidad e inclusión. De 362,728 abstracts técnicos analizados, solo 0.24 % mencionan el término "social", y los marcos de equidad de género están completamente ausentes. Esta invisibilidad de las dimensiones de género en el discurso técnico sobre tecnologías cuánticas sugiere que, sin intervenciones proactivas, el campo reproducirá por defecto los patrones excluyentes de campos tecnológicos previos.

No obstante, varios autores han argumentado que el carácter emergente de las tecnologías cuánticas presenta también una oportunidad para diseñar trayectorias alternativas (de Jong, 2022; Coenen et al., 2022; Seskir et al., 2023). A diferencia de campos tecnológicos maduros donde las estructuras de poder y exclusión están cristalizadas, el campo cuántico aún está definiendo sus instituciones, normas profesionales y culturas organizacionales. Esta ventana de oportunidad, sin embargo, se está cerrando rápidamente a medida que el campo se institucionaliza.

Troyer et al. (2024) proponen que garantizar el acceso equitativo a tecnologías cuánticas requiere intervenciones en tres dimensiones interconectadas: impacto (asegurar que los beneficios de las tecnologías cuánticas se distribuyan ampliamente), uso (proteger contra usos discriminatorios o excluyentes), y acceso (democratizar las oportunidades de participación mediante educación, desarrollo de fuerza laboral e infraestructura). La dimensión de acceso es particularmente relevante para el empoderamiento económico femenino, ya que sin participación en el desarrollo y aplicación de tecnologías cuánticas, las mujeres quedarán excluidas de un sector económico de crecimiento proyectado exponencial.

La literatura sobre democratización de tecnologías cuánticas ha comenzado a explorar estrategias específicas para ampliar la participación más allá de élites tradicionales (Seskir et al.,

2023). Estas incluyen programas de acceso abierto a computadores cuánticos mediante plataformas en la nube, iniciativas de educación comunitaria en principios cuánticos, y esfuerzos para construir ecosistemas cuánticos más diversos geográfica y demográficamente. Sin embargo, Seskir et al. (2023) argumentan que los esfuerzos actuales de democratización son necesarios pero insuficientes, y que se requiere mayor reflexividad sobre las dimensiones de poder y exclusión que operan incluso en iniciativas aparentemente inclusivas.

4. Modelo de Capital Humano Específico para Quantum Literacy: Componentes y Dinámicas

Para conceptualizar de manera sistemática la quantum literacy como forma de capital humano relevante para el empoderamiento económico femenino, es necesario descomponer este constructo en sus elementos constitutivos y especificar las relaciones entre ellos. Se propone un modelo que integra cuatro dimensiones fundamentales: acceso informacional y educativo, competencias técnicas y cognitivas, confianza epistemológica y participación en comunidades de práctica.

La primera dimensión, el acceso informacional y educativo, constituye el fundamento sobre el cual se construyen las demás formas de capital humano cuántico. Esta dimensión incluye el acceso a materiales educativos sobre principios cuánticos, oportunidades de formación estructurada, y exposición a información sobre aplicaciones y desarrollos en el campo. La literatura sobre difusión de conocimiento tecnológico muestra que el acceso es altamente desigual, concentrándose en instituciones de élite en países de alto ingreso (Gu, 1999; Juma et al., 2001). Para las mujeres, las barreras de acceso se multiplican por factores como menor representación en programas STEM, menor acceso a redes informales de información técnica, y restricciones de tiempo debido a responsabilidades de cuidado (Rosario, 2012; Heeks and Bukht, 2018).

Vermaas (2017) argumentan que un requisito para la participación social en tecnologías cuánticas es hacer la teoría cuántica comprensible para stakeholders no especializados. La actual caracterización de la física cuántica como "enigmática" e "incomprensible" funciona como barrera discursiva que desalienta la participación de personas sin formación avanzada en física, afectando desproporcionadamente a poblaciones ya subrepresentadas en estos campos. Los esfuerzos de divulgación científica y desarrollo de herramientas pedagógicas accesibles son por tanto componentes esenciales de cualquier estrategia de democratización del conocimiento cuántico (Nita et al., 2021).

La segunda dimensión refiere a las competencias técnicas y cognitivas específicas que constituyen la quantum literacy propiamente dicha. Nita et al. (2021) identifican estas competencias como la capacidad de comprender conceptos cuánticos fundamentales (superposición, entrelazamiento, medición), razonar sobre las diferencias entre sistemas cuánticos y clásicos, evaluar

críticamente afirmaciones sobre capacidades de tecnologías cuánticas, y conectar principios abstractos con aplicaciones concretas. Estas competencias pueden desarrollarse mediante múltiples modalidades pedagógicas, desde cursos formales hasta aprendizaje autodirigido, talleres comunitarios y recursos digitales interactivos (Arrow et al., 2023).

Crucialmente, la quantum literacy no requiere del dominio del formalismo matemático avanzado de la mecánica cuántica, sino de una comprensión conceptual que puede desarrollarse mediante herramientas de visualización, analogías cuidadosamente construidas y exploración de casos aplicados (Nita et al., 2021). Esta distinción es fundamental para la inclusión de género, ya que reduce las barreras de entrada asociadas con la formación matemática intensiva y permite que personas con diversos trasfondos educativos participen en el campo.

La tercera dimensión, la confianza epistemológica, refiere a la percepción subjetiva de las personas sobre su propia capacidad para comprender y participar en discusiones sobre tecnologías cuánticas. La investigación educativa documenta ampliamente que las mujeres tienden a reportar menores niveles de confianza en sus habilidades técnicas incluso cuando su desempeño objetivo es equivalente al de los hombres, fenómeno parcialmente atribuible a la internalización de estereotipos de género (?). Esta falta de confianza tiene consecuencias económicas reales, afectando decisiones sobre trayectorias educativas, postulación a empleos y negociación salarial (?).

Desarrollar confianza epistemológica requiere no solo adquirir competencias, sino también recibir validación social de esas competencias y tener oportunidades de aplicarlas exitosamente en contextos reales. Los programas educativos efectivos en quantum literacy deben por tanto incorporar experiencias de aplicación práctica, retroalimentación constructiva y creación de espacios seguros donde las participantes puedan explorar ideas sin temor a ser juzgadas como incompetentes (Meyer, 2023; Arrow et al., 2023).

La cuarta dimensión es la participación en comunidades de práctica cuántica. El capital social, entendido como el acceso a redes de contactos, información y oportunidades, es tan importante como el capital humano individual para determinar los retornos económicos del conocimiento (Schiff and Wang, 2010; López-Claros, 2011). En campos tecnológicos emergentes, gran parte del aprendizaje y la innovación ocurre mediante participación en comunidades donde se comparten conocimientos tácitos, se discuten desarrollos recientes y se forman colaboraciones (Fieser and Malecki, 1993).

Para las mujeres, el acceso a estas comunidades ha sido históricamente limitado por dinámicas de exclusión implícitas y explícitas. Los espacios técnicos dominados por hombres frecuentemente desarrollan culturas que son hostiles o alienantes para las mujeres, manifestadas en microagresiones, cuestionamiento de competencia, acoso y exclusión de redes informales (How and Cheah, 2023). La construcción de comunidades de práctica en quantum literacy que sean intencionalmente inclusivas es por tanto esencial para que las mujeres puedan convertir su

capital humano individual en oportunidades económicas reales (Seskir et al., 2023).

Las relaciones entre estas cuatro dimensiones no son lineales ni unidireccionales, sino que forman un sistema de retroalimentaciones mutuas. El acceso a educación es necesario para desarrollar competencias, pero las competencias por sí solas no generan confianza sin validación social, y la confianza no se traduce en oportunidades económicas sin acceso a comunidades de práctica. Simultáneamente, la participación en comunidades puede facilitar el acceso a recursos educativos, el desarrollo de competencias mediante aprendizaje entre pares, y el fortalecimiento de la confianza mediante reconocimiento por parte de otros miembros de la comunidad.

Este carácter sistémico tiene implicaciones importantes para el diseño de intervenciones. Programas que se enfocan únicamente en una dimensión, por ejemplo ofreciendo cursos de quantum literacy sin abordar barreras de confianza o acceso a comunidades, probablemente tendrán efectos limitados en empoderamiento económico. Se requieren enfoques holísticos que intervengan simultáneamente en múltiples niveles del sistema (Troyer et al., 2024; de Jong, 2022).

Adicionalmente, el modelo debe reconocer que las cuatro dimensiones están mediadas por factores estructurales más amplios. Las desigualdades económicas limitan el tiempo y los recursos que las personas pueden invertir en desarrollar quantum literacy. Las normas culturales sobre roles de género afectan tanto las aspiraciones de las mujeres de participar en campos técnicos como la receptividad de las comunidades existentes a su participación. Las políticas públicas determinan la disponibilidad de programas educativos subsidiados, el financiamiento de investigación en educación cuántica inclusiva, y las protecciones legales contra discriminación en mercados laborales tecnológicos.

Estos factores estructurales operan de manera diferenciada según contextos geográficos y sociales. En países en desarrollo, las barreras de infraestructura digital, acceso a internet de alta calidad y disponibilidad de educación superior en campos técnicos son significativamente mayores que en países desarrollados (Pohjola, 2001; Heeks and Bukht, 2018). Las intersecciones entre género, clase, raza y geografía crean configuraciones específicas de ventaja y desventaja que cualquier modelo de empoderamiento mediante quantum literacy debe considerar (Lahiri, 2024; Bulatova et al., 2023).

Un aspecto adicional del modelo refiere a las trayectorias temporales de desarrollo de capital humano cuántico. La teoría del capital humano tradicional enfatiza que las inversiones en educación tienen retornos que se materializan a lo largo del ciclo de vida laboral (Middleton, 1993). Sin embargo, en contextos de cambio tecnológico rápido, el capital humano puede depreciarse rápidamente si no se actualiza continuamente. La quantum literacy no es por tanto una inversión única, sino que requiere aprendizaje continuo para mantenerse relevante conforme el campo evoluciona (Raja and Christiaensen, 2017; Packard et al., 2018).

Para las mujeres, quienes frecuentemente experimentan interrupciones en trayectorias la-

borales debido a responsabilidades de cuidado, la necesidad de aprendizaje continuo presenta desafíos particulares. Los sistemas de educación continua y reentrenamiento profesional deben diseñarse con flexibilidad para acomodar estas realidades, ofreciendo modalidades de aprendizaje asincrónicas, modulares y compatibles con responsabilidades múltiples (Mykytas, 2025).

Finalmente, el modelo debe especificar los mecanismos mediante los cuales la quantum literacy se traduce en empoderamiento económico. Estos incluyen: acceso a empleos de mayor remuneración en sectores intensivos en conocimiento cuántico; capacidad de emprendimiento en aplicaciones de tecnologías cuánticas; participación en procesos de innovación que generan captura de valor económico; y poder de negociación incrementado en mercados laborales por posesión de competencias escasas y demandadas (Orús et al., 2019; ?).

5. Implicaciones Económicas del Empoderamiento Femenino en Tecnologías Cuánticas

El empoderamiento económico de las mujeres mediante quantum literacy genera beneficios económicos que operan en múltiples niveles: individual, organizacional y macroeconómico. Comprender estos beneficios es esencial tanto para justificar inversiones públicas y privadas en programas de desarrollo de quantum literacy de género como para diseñar políticas que maximicen los retornos sociales de estas inversiones.

A nivel individual, la adquisición de quantum literacy amplía las oportunidades económicas disponibles para las mujeres al darles acceso a sectores laborales de alta y creciente demanda. La literatura sobre primas salariales en mercados laborales tecnológicos muestra consistentemente que las ocupaciones en sectores emergentes de alta innovación ofrecen remuneraciones significativamente superiores al promedio, particularmente durante las fases iniciales de crecimiento del sector (??). Las proyecciones sobre el crecimiento del sector cuántico sugieren que la demanda de profesionales con competencias relacionadas crecerá exponencialmente en las próximas décadas (Peterssen, 2020; Troyer et al., 2024).

Sin embargo, la captura de estas oportunidades por parte de las mujeres no es automática. Requiere no solo el desarrollo de competencias técnicas, sino también el acceso a redes de información sobre vacantes, procesos de contratación libres de sesgos de género, y condiciones laborales que permitan compatibilizar empleo tecnológico con responsabilidades de cuidado (How and Cheah, 2023; Sultana et al., 2024). La evidencia de sectores tecnológicos existentes muestra que incluso cuando las mujeres logran ingresar a estos campos, enfrentan brechas salariales persistentes y menor probabilidad de promoción a posiciones de liderazgo (Cazzaniga, 2024).

Los beneficios económicos individuales del empoderamiento mediante quantum literacy se extienden más allá de incrementos salariales directos. Incluyen mayor seguridad económica

mediante empleabilidad en sectores de crecimiento, mayor autonomía económica que reduce dependencia de parejas o familiares, y capacidad incrementada de acumulación de activos y riqueza a largo plazo (Mykytas, 2025). Para mujeres en contextos de vulnerabilidad económica, estos beneficios pueden ser transformadores.

A nivel organizacional, la inclusión de mujeres en equipos de desarrollo e implementación de tecnologías cuánticas genera beneficios de diversidad cognitiva. La literatura sobre innovación documenta ampliamente que equipos diversos en términos de género, trayectorias educativas y experiencias tienden a ser más innovadores que equipos homogéneos, debido a la mayor variedad de perspectivas, aproximaciones a problemas y redes de conocimiento que aportan (Bova et al., 2021; Quantum Technology and Application Consortium – QUTAC, 2021).

En el contexto específico de tecnologías cuánticas, donde muchas aplicaciones están aún en fase de conceptualización, la diversidad de perspectivas puede ser particularmente valiosa para identificar casos de uso no convencionales, anticipar implicaciones sociales no previstas y diseñar interfaces que sean accesibles a poblaciones diversas (Kop, 2023; Arrow et al., 2023). Las organizaciones que logren construir equipos cuánticos diversos podrían obtener ventajas competitivas significativas en mercados que valoricen innovación responsable y diseño inclusivo.

Adicionalmente, la inclusión de mujeres en posiciones de liderazgo en organizaciones cuánticas puede tener efectos catalizadores sobre la cultura organizacional, haciéndola más inclusiva y atractiva para talento femenino subsecuente. Los estudios sobre representación de género en liderazgo tecnológico muestran efectos de "masa crítica" donde la presencia de múltiples mujeres en posiciones visibles cambia las dinámicas de poder y las normas implícitas de organizaciones (How and Cheah, 2023).

A nivel macroeconómico, el empoderamiento económico femenino mediante quantum literacy contribuye a múltiples objetivos de desarrollo. En primer lugar, amplía el pool de talento disponible para un sector económico estratégico. Los países y regiones que logren movilizar efectivamente el talento femenino en tecnologías cuánticas tendrán ventajas comparativas en la competencia tecnológica global (Troyer et al., 2024). La evidencia histórica sugiere que las sociedades que han logrado mayores niveles de inclusión de género en educación y empleo tienden a tener mayor crecimiento económico y mayor capacidad de innovación (López-Claros, 2011).

En segundo lugar, reducir las brechas de género en acceso a empleos de alta remuneración contribuye a la reducción de la desigualdad económica. Las brechas de ingreso de género son un componente significativo de la desigualdad económica total en la mayoría de los países, y se proyecta que estas brechas se ampliarán con las transformaciones tecnológicas en curso si no se interviene proactivamente (Sultana et al., 2024; Yolusever, 2025). Las inversiones en quantum literacy de género pueden funcionar como mecanismo redistributivo que reduce estas brechas.

En tercer lugar, el empoderamiento económico femenino tiene efectos multiplicadores en

bienestar familiar y comunitario. La literatura sobre desarrollo económico muestra consistentemente que incrementos en ingresos controlados por mujeres tienden a traducirse más directamente en inversiones en nutrición, salud y educación de hijos que incrementos en ingresos controlados por hombres (Juma et al., 2001). Por tanto, los beneficios de invertir en quantum literacy femenina se extienden intergeneracionalmente.

Sin embargo, es importante reconocer que la materialización de estos beneficios potenciales no es automática ni garantizada. Los retornos económicos de inversiones en capital humano están condicionados por el contexto institucional y de política pública. En mercados laborales con alta discriminación de género, las mujeres pueden no obtener retornos salariales proporcionales a sus inversiones en educación (Korinek and Stiglitz, 2019). En contextos con infraestructura digital limitada, la demanda por competencias cuánticas puede ser insuficiente para absorber la oferta de trabajadoras capacitadas (Heeks and Bukht, 2018).

Adicionalmente, existe el riesgo de que las inversiones en quantum literacy reproduzcan patrones de desigualdad si no se diseñan explícitamente como inclusivas. Programas que requieren prerequisites educativos elevados, que se ofrecen únicamente en formatos presenciales incompatibles con responsabilidades de cuidado, o que se publicitan exclusivamente en redes donde las mujeres están subrepresentadas, terminarán beneficiando principalmente a poblaciones ya privilegiadas (Lahiri, 2024).

Los modelos económicos de discriminación sugieren que los mercados no corrigen automáticamente las brechas de género, particularmente cuando los sesgos están arraigados en normas culturales y estructuras institucionales (Acemoglu and Restrepo, 2018). Se requieren por tanto intervenciones activas tanto del sector público como del privado para garantizar que los beneficios de las tecnologías cuánticas se distribuyan equitativamente.

Desde la perspectiva de políticas públicas, estas intervenciones pueden incluir: financiamiento de programas de educación en quantum literacy orientados específicamente a mujeres; incentivos para organizaciones que demuestren lograr diversidad de género en contratación cuántica; regulaciones que prevengan discriminación en procesos de selección; y provisión de infraestructura de cuidado infantil que permita a las mujeres participar en programas de formación y desarrollo profesional (Troyer et al., 2024; de Jong, 2022).

Desde la perspectiva del sector privado, las organizaciones que operan en el espacio cuántico tienen incentivos propios para invertir en inclusión de género, dado que acceder a un pool de talento más amplio y diverso puede generar ventajas competitivas (Bova et al., 2021). Sin embargo, estos incentivos pueden ser insuficientes para superar inercias organizacionales y sesgos implícitos, por lo que frecuentemente se requiere presión externa mediante activismo de stakeholders, requerimientos de inversionistas, o regulación pública.

Un aspecto adicional de las implicaciones económicas refiere a los efectos sobre la estructura industrial del sector cuántico. Si las mujeres logran participación significativa en fases

tempranas del desarrollo del campo, es probable que esto afecte los tipos de aplicaciones que se priorizan, las consideraciones éticas que se incorporan en diseño de productos, y los modelos de negocio que se desarrollan (Meyer, 2023; Arrow et al., 2023). La literatura sobre innovación responsable sugiere que la diversidad en equipos de desarrollo lleva a mayor consideración de impactos sociales diversos (Kop, 2023).

Finalmente, es importante considerar las implicaciones económicas de no invertir en empoderamiento femenino mediante quantum literacy. La exclusión de la mitad de la población de un sector económico estratégico representa un desperdicio masivo de talento humano con costos de oportunidad significativos tanto individuales como sociales. En un contexto de competencia global por liderazgo en tecnologías cuánticas, los países y regiones que no movilicen efectivamente el talento femenino estarán en desventaja competitiva (Troyer et al., 2024).

6. Barreras y Facilitadores Estructurales para el Desarrollo de Quantum Literacy de Género

La efectividad de inversiones en quantum literacy para el empoderamiento económico femenino está condicionada por un conjunto complejo de factores estructurales que operan como barreras o facilitadores. Comprender estos factores es esencial para el diseño de intervenciones que no solo desarrollen competencias individuales sino que transformen los contextos que determinan cómo esas competencias pueden traducirse en oportunidades económicas.

Las barreras estructurales operan en múltiples niveles. A nivel de sistemas educativos, las pedagogías tradicionales en física y matemáticas frecuentemente privilegian estilos de aprendizaje competitivos e individualistas que son menos atractivos para muchas mujeres que prefieren aproximaciones colaborativas y orientadas a aplicaciones (Rosario, 2012). Los currículos que presentan la física como desconectada de contextos sociales y aplicaciones prácticas pueden alienar a estudiantes que buscan conectar conocimiento técnico con impacto social, motivación más común entre mujeres que entre hombres (Nita et al., 2021).

La falta de modelos a seguir femeninos en física cuántica y tecnologías emergentes constituye otra barrera significativa. Los estudios sobre desarrollo de aspiraciones profesionales muestran que la presencia de modelos exitosos con quienes las personas pueden identificarse es crucial para imaginar trayectorias propias en un campo (Arrow et al., 2023). La extrema masculinización de la física cuántica históricamente ha privado a las mujeres de estos modelos, creando un círculo vicioso donde la baja representación femenina desalienta la participación de nuevas generaciones de mujeres.

A nivel de mercados laborales, las prácticas de reclutamiento en sectores tecnológicos frecuentemente reproducen sesgos de género mediante el uso de redes informales dominadas por hombres, descripciones de puestos que utilizan lenguaje codificado como masculino, y proce-

sos de evaluación que priorizan características asociadas con masculinidad como asertividad y autopromoción (How and Cheah, 2023). Las culturas organizacionales en muchas empresas tecnológicas son reportadas como hostiles para las mujeres, con niveles elevados de acoso, microagresiones y cuestionamiento de competencia (Sultana et al., 2024).

Las responsabilidades de cuidado no remuneradas, que recaen desproporcionadamente sobre las mujeres a nivel global, constituyen una barrera fundamental para la participación en programas de formación intensivos y para el desarrollo profesional continuo requerido en campos de rápida evolución tecnológica (Mykytas, 2025). La incompatibilidad entre las demandas temporales de carreras tecnológicas y las responsabilidades de cuidado lleva a muchas mujeres a abandonar estos campos o a optar por no ingresar en primer lugar.

Las barreras económicas también son significativas, particularmente para mujeres de contextos socioeconómicos desfavorecidos. Los programas de formación en tecnologías cuánticas frecuentemente requieren inversiones sustanciales en matrícula, materiales y tiempo sin remuneración. Para mujeres con ingresos limitados o que son responsables del sustento familiar, estos costos pueden ser prohibitivos incluso cuando existen becas o subsidios parciales (Lahiri, 2024; Bulatova et al., 2023).

La infraestructura digital desigual, particularmente en países en desarrollo y áreas rurales, limita el acceso a recursos educativos en línea, plataformas de aprendizaje y comunidades virtuales de práctica en quantum literacy (Pohjola, 2001; Heeks and Bukht, 2018). Esta división digital se superpone con brechas de género en acceso a tecnología, donde las mujeres tienden a tener menor acceso a dispositivos personales, conexiones de internet de calidad y tiempo privado para uso de tecnología.

Las normas culturales sobre roles de género apropiados constituyen quizás las barreras más profundas y difíciles de transformar. En muchos contextos, las expectativas sociales de que las mujeres prioricen roles domésticos y de cuidado sobre desarrollo profesional, particularmente en campos técnicos percibidos como masculinos, crean presiones que desalientan la participación femenina incluso cuando las barreras formales han sido removidas (?).

No obstante, también existen múltiples facilitadores estructurales que pueden potenciar la efectividad de inversiones en quantum literacy de género. A nivel de políticas públicas, varios países han implementado programas específicos para incrementar la participación femenina en STEM mediante becas orientadas, cuotas de género en programas de formación avanzada, y financiamiento de investigación sobre pedagogías inclusivas (López-Claros, 2011). Aunque estos programas han tenido éxito mixto, la evidencia sugiere que intervenciones integrales que combinan múltiples instrumentos tienden a ser más efectivas que intervenciones aisladas.

El desarrollo de plataformas de acceso abierto a recursos educativos sobre quantum literacy, incluyendo cursos en línea, tutoriales interactivos y materiales de divulgación accesibles, ha democratizado parcialmente el acceso al conocimiento cuántico (Seskir et al., 2023). Si estas

plataformas se diseñan intencionalmente con perspectiva de género, considerando necesidades de flexibilidad temporal, diseño de interfaces accesibles y representación diversa en contenidos y ejemplos, pueden ser herramientas poderosas para inclusión.

La emergencia de comunidades de práctica específicamente orientadas a mujeres en tecnología, incluyendo iniciativas como "Women in Quantum" organizaciones similares, proporciona espacios seguros donde las mujeres pueden desarrollar competencias, construir redes y recibir mentoría sin enfrentar los sesgos y hostilidad presentes en muchos espacios técnicos dominados por hombres (de Jong, 2022). Aunque existe debate sobre si estas iniciativas separadas refuerzan la segregación o son pasos necesarios hacia inclusión genuina, la evidencia sugiere que pueden ser efectivas para construir confianza y capital social.

Las empresas tecnológicas y organizaciones de investigación que han implementado políticas proactivas de diversidad e inclusión, incluyendo objetivos cuantificables de contratación de género, procesos de evaluación ciegos, programas de mentoría para mujeres y licencias parentales equitativas, han demostrado poder incrementar la representación femenina (How and Cheah, 2023). La presión de inversionistas que priorizan criterios ambientales, sociales y de gobernanza ha incentivado a muchas organizaciones a tomar más en serio los temas de diversidad.

El desarrollo de marcos de *responsible research and innovation* en tecnologías cuánticas, que incorporan explícitamente consideraciones de equidad e inclusión en procesos de investigación y desarrollo, representa un facilitador emergente (Kop, 2023; Coenen et al., 2022). Si estos marcos se institucionalizan en financiamiento de investigación, evaluación de proyectos y estándares industriales, podrían transformar la cultura del campo cuántico hacia mayor inclusión.

La creciente conciencia sobre los costos económicos de la subrepresentación femenina en tecnología, documentados mediante estudios que cuantifican pérdidas de productividad e innovación, está generando presión sobre gobiernos y empresas para actuar (Troyer et al., 2024). Esta narrativa que conecta inclusión con competitividad económica puede ser más efectiva políticamente que argumentos basados únicamente en justicia, aunque ambos son éticamente válidos.

Finalmente, la presión de movimientos sociales feministas y de activismo digital ha incrementado el escrutinio público sobre prácticas excluyentes en tecnología. Las organizaciones que son identificadas públicamente como hostiles para las mujeres enfrentan costos reputacionales y dificultades de reclutamiento, creando incentivos de mercado para mejorar culturas organizacionales (Seskir et al., 2023).

Sin embargo, transformar barreras estructurales profundamente arraigadas requiere más que incentivos de mercado o iniciativas voluntarias. Se necesitan transformaciones sistémicas en educación, mercados laborales, políticas de cuidado y normas culturales. Estas transformaciones son procesos de largo plazo que requieren coordinación entre múltiples actores y sosteni-

miento político a lo largo de décadas (de Jong, 2022).

7. Conclusiones

Este artículo ha desarrollado un marco teórico para comprender el potencial del empoderamiento económico femenino mediante quantum literacy, conceptualizando este constructo como una forma específica de capital humano relevante en el contexto de tecnologías emergentes. El análisis ha mostrado que las tecnologías cuánticas presentan simultáneamente riesgos de reproducir patrones históricos de exclusión de género y oportunidades para construir trayectorias alternativas más inclusivas.

El concepto de quantum literacy, entendido como la capacidad de comprender principios cuánticos fundamentales y sus implicaciones sin necesariamente dominar el formalismo matemático avanzado, ofrece una vía de acceso más democrática al conocimiento cuántico que la formación tradicional en física. Esta accesibilidad es particularmente relevante para mujeres que han sido históricamente excluidas de trayectorias educativas intensivas en matemáticas por factores estructurales y culturales.

El modelo de capital humano específico propuesto integra cuatro dimensiones fundamentales que operan de manera sistémica: acceso informacional y educativo, competencias técnicas y cognitivas, confianza epistemológica y participación en comunidades de práctica. La efectividad de inversiones en quantum literacy para generar empoderamiento económico depende de intervenir simultáneamente en estas múltiples dimensiones, reconociendo sus interdependencias y retroalimentaciones mutuas.

Las implicaciones económicas del empoderamiento femenino mediante quantum literacy operan en múltiples niveles. A nivel individual, amplían oportunidades de acceso a empleos de alta remuneración en sectores de crecimiento exponencial proyectado. A nivel organizacional, la diversidad de género en equipos cuánticos puede generar beneficios de innovación y diseño más responsable. A nivel macroeconómico, la inclusión femenina contribuye a ampliar el pool de talento en sectores estratégicos, reducir desigualdades de género y generar efectos multiplicadores en bienestar social.

Sin embargo, la materialización de estos beneficios potenciales está condicionada por un conjunto complejo de barreras estructurales que operan en sistemas educativos, mercados laborales, normas culturales e infraestructura tecnológica. Las mujeres enfrentan obstáculos múltiples y acumulativos que incluyen socialización de género restrictiva, falta de modelos a seguir, sesgos en procesos de selección, culturas organizacionales hostiles, responsabilidades de cuidado desproporcionadas y acceso desigual a recursos educativos y redes profesionales.

La ventana de oportunidad para construir un campo cuántico más inclusivo está abierta pero se está cerrando rápidamente conforme el sector se institucionaliza. Se requieren intervencio-

nes proactivas y coordinadas entre múltiples actores, incluyendo gobiernos, instituciones educativas, organizaciones de investigación, empresas tecnológicas y movimientos sociales. Estas intervenciones deben ser integrales, abordando simultáneamente dimensiones educativas, laborales, de infraestructura y culturales.

Las políticas públicas efectivas para promover quantum literacy de género deben incluir: financiamiento de programas de formación específicamente orientados a mujeres con diseños pedagógicos sensibles a barreras de género; regulación de prácticas discriminatorias en contratación y promoción laboral; provisión de infraestructura de cuidado que permita compatibilizar desarrollo profesional con responsabilidades familiares; y desarrollo de infraestructura digital accesible en áreas rurales y comunidades de bajos ingresos.

El sector privado tiene tanto responsabilidades como incentivos para invertir en inclusión de género en tecnologías cuánticas. La evidencia muestra que organizaciones diversas tienden a ser más innovadoras y competitivas, y que el acceso a un pool de talento más amplio genera ventajas competitivas. Sin embargo, estos incentivos de mercado son insuficientes para superar inercias organizacionales y sesgos arraigados sin presión externa mediante activismo, requerimientos de inversionistas o regulación.

Las instituciones educativas juegan un rol crítico en democratizar el acceso al conocimiento cuántico mediante el desarrollo de materiales pedagógicos accesibles, la implementación de pedagogías inclusivas que acomoden diversos estilos de aprendizaje, la construcción de trayectorias educativas flexibles que permitan entrada tardía o reingreso al campo, y la creación de espacios seguros donde las mujeres puedan desarrollar confianza epistemológica.

Es importante reconocer que el empoderamiento económico mediante quantum literacy no es una panacea que resolverá todas las dimensiones de desigualdad de género. Las brechas de género en economía son multifacéticas y requieren intervenciones en múltiples frentes, incluyendo transformación de normas culturales sobre roles de género, redistribución de trabajo de cuidado no remunerado, fortalecimiento de protecciones legales contra discriminación y violencia, y transformación de estructuras de poder político.

No obstante, en un contexto de rápida transformación tecnológica donde sectores intensivos en conocimiento cuántico crecerán exponencialmente en las próximas décadas, garantizar que las mujeres participen equitativamente en estos sectores es crucial tanto por razones de justicia como de eficiencia económica. La exclusión de la mitad de la población de un dominio económico estratégico representa un desperdicio masivo de talento humano con costos de oportunidad significativos.

La investigación futura debe abordar múltiples vacíos en el conocimiento actual. Se requieren estudios empíricos que cuantifiquen las brechas de género específicas en quantum literacy y en participación en sectores cuánticos emergentes. Es necesario evaluar la efectividad de diferentes modalidades de intervención educativa, identificando qué diseños pedagógicos son más

efectivos para diferentes poblaciones de mujeres considerando intersecciones de género con clase, raza y geografía.

Se necesita investigación sobre los retornos económicos específicos de inversiones en quantum literacy, incluyendo efectos sobre trayectorias salariales, movilidad laboral y capacidad de emprendimiento. Los estudios longitudinales que sigan cohortes de mujeres que participan en programas de quantum literacy permitirían identificar factores que determinan el éxito en traducir competencias en oportunidades económicas.

La investigación interdisciplinaria que integre perspectivas de economía, educación, sociología y estudios de género es esencial para comprender la complejidad de los procesos de inclusión y exclusión. Los marcos teóricos deben sofisticarse para capturar las dinámicas de retroalimentación entre capital humano individual, capital social, estructuras institucionales y normas culturales.

Finalmente, es crucial que la investigación sobre quantum literacy y género no se desarrolle como ejercicio puramente académico, sino en diálogo estrecho con comunidades de práctica, formuladores de políticas y organizaciones que trabajan en terreno para promover inclusión de género en tecnología. La producción de conocimiento debe estar orientada a la acción y debe informar el diseño de intervenciones que efectivamente transformen las condiciones de vida de las mujeres.

En conclusión, la quantum literacy constituye una forma estratégica de capital humano cuya distribución equitativa de género es tanto un imperativo de justicia como una necesidad económica en el contexto de la emergencia de tecnologías cuánticas. Las inversiones en empoderamiento económico femenino mediante alfabetización cuántica tienen potencial para generar retornos múltiples individuales y sociales, pero su efectividad depende crucialmente de transformar las estructuras que perpetúan la exclusión. La ventana de oportunidad para construir un futuro cuántico más equitativo está abierta, pero requiere acción urgente, coordinada y sostenida de múltiples actores comprometidos con la justicia de género y el desarrollo económico inclusivo.

Referencias

- Acemoglu, D. and Restrepo, P. (2018). Artificial intelligence, automation and work. *SSRN Electronic Journal*.
- Arrow, J. , Marsh, S. E., and Meyer, J. C. (2023). A holistic approach to quantum ethics education. In *2023 IEEE International Conference on Quantum Computing and Engineering (QCE)*, pages 119–128. IEEE.

- Bova, F., Goldfarb, A., and Melko, R. G. (2021). Commercial applications of quantum computing. *EPJ Quantum Technology*, 8(1).
- Bulatova, O., Reznikova, N., and Ivashchenko, O. (2023). Digital divide or digital inequality? new dimensions of global asymmetries of socio-economic development and international trade in the conditions of technoglobalism. *Vìsник Mariupolskogo deržavnogo unìversitetu Seriâ Ekonomika*, 13(25):45–57.
- Cazzaniga, M. (2024). Gen-ai. *Staff Discussion*
- Coenen, C., Grinbaum, A., Grunwald, A., Milburn, C., and Vermaas, P. (2022). *Quantum technologies and society: Towards a different spin*. *NanoEthics*, 16(1):1–6.
- Dahlman, C. J., Mealy, S., and Wermelinger, M. (2016). *Harnessing the digital economy for developing countries*. Technical report, Organisation for Economic Co-Operation and Development (OECD).
- Damayanti, C. (2024). *Quantum ethics: Navigating the intersection of quantum mechanics and metaethics in the digital era for a just and equitable society*. *Jurnal Filsafat*, 34(2):210.
- de Jong, E. (2022). *Own the unknown: An anticipatory approach to prepare society for the quantum age*. *Digital Society*, 1(2).
- Ebua, E. J. (2023). *Investigating the potential of technology to promote development and the ethical and social implications of technological innovation in the context of development*. *OALib*, 10(04):1–23.
- Ernst, E., Merola, R., and Samaan, D. (2019). *Economics of artificial intelligence: Implications for the future of work*. *IZA Journal of Labor Policy*, 9(1).
- Fieser, J. B. and Malecki, E. J. (1993). *Technology and economic development: The dynamics of local, regional, and national change*. *Economic Geography*, 69(1):94.
- Gu, S. (1999). *Implications of national innovation systems for developing countries: Managing change and complexity in economic development*.
- Heeks, R. and Bukht, R. (2018). *Digital economy policy in developing countries*. SSRN Electronic Journal.
- How, M.-L. and Cheah, S.-M. (2023). *Business renaissance: Opportunities and challenges at the dawn of the quantum computing era*. *Businesses*, 3(4):585–605.

- Juma, C., Fang, K., Honca, D., Perez, J. H., Konde, V., Lee, S. H., Arenas, J., Ivinson, A., Robinson, H., and Singh, S. (2001). *Global governance of technology: meeting the needs of developing countries*. *International Journal of Technology Management*, 22(7/8):629.
- Kop, M. (2023). *Quantum-elspi: A novel field of research*. *Digital Society*, 2(2).
- Korinek, A. and Stiglitz, J. E. (2019). *Artificial intelligence and its implications for income distribution and unemployment*. In *The Economics of Artificial Intelligence*, pages 349–390. *University of Chicago Press*.
- Kuban State Agrarian University, Volga State University, Moscow Technical University, and Samara State Economic University (2025). *The impact of automation and artificial intelligence on social inequality*. *Ekonomika i Upravlenie: Problemy, Resheniya*.
- Lahiri, A. (2024). *Sociological implications of the digital divide: Exploring access to information and social inequality in the age of artificial intelligence and automation*. *Research Review International Journal of Multidisciplinary*, 9(1):156–167.
- Lee, J.-W. (2001). *Education for technology readiness: Prospects for developing countries*. *Journal of Human Development*, 2(1):115–151.
- López-Claros, A. (2011). *The Innovation for Development Report 2010–2011*. *Palgrave Macmillan UK*.
- Meyer, J. C. (2023). *A holistic approach to quantum ethics education*.
- Middleton, J. (1991). *Vocational and technical education and training*.
- Middleton, J. (1993). *Skills for Productivity: Vocational Education and Training in Developing Countries*.
- Mykytas, V. (2025). *The role of artificial intelligence in economic transformation: From automation to the data economy*. *Three Seas Economic Journal*, 6(2):66–73.
- Nita, L., Mazzoli Smith, L., Chancellor, N., and Cramman, H. (2021). *The challenge and opportunities of quantum literacy for future education and transdisciplinary problem-solving*. *Research in Science & Technological Education*, 41(2):564–580.
- Orús, R., Mugel, S., and Lizaso, E. (2019). *Quantum computing for finance: Overview and prospects*. *Reviews in Physics*, 4:100028.
- Packard, T. G., Dutz, M. A., and Almeida, R. K. (2018). *The Jobs of Tomorrow: Technology, Productivity, and Prosperity in Latin America and the Caribbean*. *Washington, DC: World Bank*.

- Paudel, H. P., Syamlal, M., Crawford, S. E., Lee, Y.-L., Shugayev, R. A., Lu, P., Ohodnicki, P. R., Mollot, D., and Duan, Y. (2022). *Quantum computing and simulations for energy applications: Review and perspective*. *ACS Engineering Au*, 2(3):151–196.
- Peterssen, G. (2020). *Quantum technology impact: The necessary workforce for developing quantum software*.
- Pohjola, M. (2001). *Information technology, productivity, and economic growth: international evidence and implications for economic development*.
- Quantum Technology and Application Consortium – QUTAC (2021). *Industry quantum computing applications*. EPJ Quantum Technology.
- Raja, S. and Christiaensen, L. (2017). *The future of work requires more, not less technology in developing countries*.
- Rodrigues, M. and Costa, F. (2018). *Technology and competitiveness: Technological innovation for developing economies growth*.
- Rosario, M. d. (2012). *Ict in education policies and national development*. In *Post-Secondary Education and Technology*, pages 17–38. Palgrave Macmillan US.
- Saleem, A. and Higuchi, K. (2012). *Globalization and ict innovation policy: Absorption capacity in developing countries*. In *International Conference on Advanced Communication Technology*.
- Saleem, A. and Higuchi, K. (2014). *Globalization and ict innovation policy: Absorption capacity in developing countries*. In *16th International Conference on Advanced Communication Technology*, pages 409–417. Global IT Research Institute (GIRI).
- Schiff, M. and Wang, Y. (2010). *North-South Trade-Related Technology Diffusion: Virtuous Growth Cycles In Latin America*. World Bank.
- Seskir, Z. C., Umbrello, S., Coenen, C., and Vermaas, P. E. (2023). *Democratization of quantum technologies*. *Quantum Science and Technology*, 8(2):024005.
- Sharma, S. and Dutz, M. A. (2012). *Green Growth, Technology and Innovation*. World Bank.
- Sultana, F., Talpur, U., Iqbal, M. S., Ali, A., and Memon, K. H. (2024). *The macroeconomic implications of automation and ai on labor markets and employment*. *The Critical Review of Social Sciences Studies*, 2(2):497–507.
- Troyer, M., Benjamin, E. V., and Gevorkian, A. (2024). *Quantum for good and the societal impact of quantum computing*.

- Vermaas, P. E. (2017). *The societal impact of the emerging quantum technologies: a renewed urgency to make quantum theory understandable*. *Ethics and Information Technology*, 19(4):241–246.
- Wang, Y. and Song, X. (2020). *Quantum science and quantum technology*. *Statistical Science*, 35(1).
- Wolbring, G. (2022). *Auditing the 'social' of quantum technologies: A scoping review*. *Societies*, 12(2):41.
- Yago Malo, J., Lepori, L., Gentini, L., and Chiofalo, M. L. (2024). *Atomic quantum technologies for quantum matter and fundamental physics applications*. *Technologies*, 12(5):64.
- Yolusever, A. (2025). *AI and automation: Reshaping the labor market*. *Biga İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 6(1):63–85.