

Indicador de Viabilidad de Transición Ocupacional para Especialistas en Criptografía Clásica hacia Estándares Pós-Cuánticos en Fintechs: Un Modelo con Costos Heterogéneos de Aprendizaje

Andrea Camila*

AMLENTIA.org

13 de octubre de 2025

Resumen

La inminente amenaza de las computadoras cuánticas sobre los protocolos criptográficos clásicos plantea desafíos significativos para el mercado laboral de especialistas en seguridad informática, particularmente en el sector fintech. Este artículo desarrolla un Indicador de Viabilidad de Transición Ocupacional (IVTO) que permite evaluar la capacidad de profesionales especializados en protocolos como AES y SHA para migrar hacia estándares pós-cuánticos. El modelo incorpora costos heterogéneos de aprendizaje, depreciación acelerada del capital humano específico y diferencias en dotaciones iniciales de competencias. Mediante un marco analítico que integra teoría del capital humano y modelos de matching ocupacional, se construye un indicador compuesto que captura la viabilidad individual y agregada de transición. Los resultados sugieren que la heterogeneidad en costos de aprendizaje genera segmentación en el mercado laboral, donde trabajadores con mayores competencias transferibles enfrentan umbrales de transición más bajos. El indicador propuesto constituye una herramienta para políticas de reentrenamiento sectorial y estrategias corporativas de gestión de talento en contextos de disrupción tecnológica.

*Correo electrónico: andrea.camila@amlenia.org. Este trabajo fue desarrollado en colaboración con AMLENTIA.org, organización dedicada a la investigación en economía de la tecnología y mercados laborales emergentes.

Palabras clave: criptografía pós-cuántica, transición ocupacional, capital humano específico, fintechs, costos de aprendizaje

Códigos JEL: J24, J62, O33, G23

1. Introducción

El desarrollo acelerado de la computación cuántica representa una amenaza sistémica para los fundamentos de la seguridad informática contemporánea. Los algoritmos criptográficos que sustentan la infraestructura financiera global enfrentan obsolescencia ante la eventual disponibilidad comercial de computadoras cuánticas suficientemente potentes (Wheatley Research Consultancy, 2024). Esta disrupción tecnológica genera presiones sobre el mercado laboral de especialistas en criptografía, especialmente en sectores altamente dependientes de seguridad digital como las fintechs.

La transición desde protocolos criptográficos clásicos como Advanced Encryption Standard (AES) y Secure Hash Algorithm (SHA) hacia estándares pós-cuánticos no constituye meramente una actualización técnica, sino una reconfiguración estructural de competencias profesionales (de Jong, 2022). Sin embargo, la literatura económica sobre transiciones ocupacionales inducidas por cambios tecnológicos cuánticos permanece escasa, particularmente en lo concerniente a modelos que incorporen heterogeneidad en costos de aprendizaje.

Este artículo aborda la siguiente pregunta: ¿cómo pueden las fintechs y los trabajadores evaluar la viabilidad de transición ocupacional de especialistas en criptografía clásica hacia competencias en estándares pós-cuánticos cuando los costos de aprendizaje son heterogéneos? Para responder, se desarrolla un Indicador de Viabilidad de Transición Ocupacional (IVTO) que cuantifica la factibilidad individual y agregada de migración profesional considerando depreciación acelerada de capital humano específico, diferencias en capacidades de absorción de conocimiento y restricciones temporales.

El modelo propuesto se fundamenta en tres pilares analíticos. Primero, caracteriza la estructura de capital humano de especialistas en criptografía clásica, distinguiendo entre competencias transferibles y específicas al paradigma clásico. Segundo, modela los costos de adquisición de conocimientos pós-cuánticos como función de heterogeneidades observables y no observables entre trabajadores. Tercero, construye un indicador compuesto que sintetiza múltiples dimensiones de viabilidad mediante ponderaciones basadas en teoría económica.

La relevancia de este análisis trasciende el ámbito académico. Las fintechs operan bajo regulaciones estrictas de protección de datos y enfrentan ventanas temporales limitadas para adaptarse a nuevos estándares criptográficos. La capacidad de identificar qué

proporción de su fuerza laboral técnica puede transicionar exitosamente determina decisiones estratégicas sobre contratación externa versus reentrenamiento interno (Islam et al., 2024). Desde la perspectiva del trabajador, comprender los determinantes de viabilidad de transición informa decisiones de inversión en educación continua y posicionamiento profesional.

Los hallazgos principales sugieren que la heterogeneidad en costos de aprendizaje genera efectos de segmentación donde trabajadores con mayores dotaciones de competencias matemáticas abstractas y menores costos de oportunidad enfrentan umbrales significativamente más bajos para transición exitosa. El indicador IVTO permite identificar subgrupos poblacionales en riesgo de obsolescencia ocupacional y calibrar intervenciones de política diferenciadas. Adicionalmente, se demuestra que la velocidad de depreciación del capital humano específico clásico interactúa con costos de aprendizaje para generar dinámicas de timing óptimo de transición.

El resto del artículo se organiza como sigue. La segunda sección revisa la literatura relevante sobre capital humano específico, transiciones ocupacionales y economía de disrupciones tecnológicas. La tercera sección caracteriza el problema de transición y establece el marco conceptual del indicador. La cuarta sección desarrolla el modelo formal con costos heterogéneos de aprendizaje. La quinta sección discute aplicaciones del indicador IVTO en contextos organizacionales. La sexta sección presenta una discusión sobre limitaciones y extensiones. La última sección concluye.

2. Marco Teórico y Revisión de Literatura

La construcción de un indicador de viabilidad de transición ocupacional requiere integrar múltiples corrientes de literatura económica. Esta sección revisa los fundamentos teóricos en tres áreas: teoría del capital humano y absorción tecnológica, economía de las transiciones ocupacionales, y análisis económico de disrupciones tecnológicas en mercados laborales especializados.

La teoría económica del capital humano ha enfatizado históricamente la distinción entre competencias generales, transferibles entre empleadores y ocupaciones, y competencias específicas, que generan valor únicamente en contextos particulares. Esta distinción resulta fundamental para comprender la depreciación acelerada que enfrentan especialistas en criptografía clásica ante la emergencia de paradigmas pós-cuánticos. El conocimiento profundo de protocolos clásicos constituye capital humano altamente específico cuyo valor de mercado decae conforme aumenta la probabilidad de disponibilidad comercial de computadoras cuánticas.

Sin embargo, no todas las competencias de especialistas en criptografía clásica son

igualmente específicas. Los fundamentos matemáticos subyacentes representan capital humano más general que facilita la transición hacia estándares pós-cuánticos. Esta heterogeneidad interna en la estructura de competencias genera diferencias en costos de aprendizaje entre trabajadores con trayectorias profesionales distintas. La literatura sobre absorción tecnológica ha demostrado que el capital humano desempeña un papel crítico como capacidad de absorción para nuevas tecnologías (Lee, 2001).

La literatura sobre transiciones ocupacionales en contextos de cambio tecnológico acelerado ha crecido significativamente en años recientes. Las tecnologías disruptivas tienen impacto monumental en el mundo del trabajo, exacerbando lacunas de habilidades existentes más rápido de lo que sistemas educacionales pueden adaptarse (Cukier, 2019). Estudios empíricos documentan que tecnologías de automatización afectan de manera desigual a diferentes grupos de trabajadores, con aquellos de baja calificación enfrentando mayor vulnerabilidad al desplazamiento (Katz et al., 2021).

La economía de disrupciones tecnológicas en mercados laborales especializados ha recibido atención creciente. La automatización y digitalización han generado episodios de obsolescencia ocupacional documentados empíricamente (Acemoglu and Restrepo, 2018). La innovación puede destruir pero también crear empleo, aunque los costos se distribuyen desigualmente debido a la naturaleza sesgada hacia habilidades específicas del cambio tecnológico (Dachs, 2017). Trabajadores altamente calificados tienden a beneficiarse de nuevas tecnologías mientras aquellos con menor formación enfrentan mayores riesgos de desplazamiento.

En el contexto de inteligencia artificial y automatización, investigaciones recientes muestran que avances tecnológicos tienen potencial de economizar trabajo y aumentar desigualdad globalmente (Schindler et al., 2021). Dinámicas winner-takes-all favorecen individuos altamente calificados y organizaciones en la vanguardia del progreso tecnológico. Sin embargo, también existen oportunidades significativas en términos de aumentos de productividad (Ernst et al., 2019).

La transición cuántica presenta características distintivas. Primero, la amenaza es prospectiva pero incierta temporalmente; no existe consenso sobre cuándo computadoras cuánticas alcanzarán capacidades suficientes para comprometer sistemas criptográficos actuales (Scholten et al., 2024). Esta incertidumbre afecta decisiones de timing de inversión en reentrenamiento. Segundo, los estándares pós-cuánticos son múltiples y aún en evolución, generando riesgo de inversión en competencias que podrían no ser seleccionadas como estándares definitivos.

Estudios específicos sobre computación cuántica en el sector financiero documentan oportunidades y desafíos. La computación cuántica ofrece ventajas en gestión de riesgo financiero a través de optimización de evaluación de riesgo y mejora significativa en

modelos predictivos (Islam et al., 2024). Quantum annealers pueden optimizar portafolios, encontrar oportunidades de arbitraje y realizar credit scoring (Orús et al., 2019). Sin embargo, las limitaciones tecnológicas actuales y los altos costos de implementación constituyen barreras principales para adopción generalizada (Mudhol, 2024).

Los mercados laborales en tecnología digital enfrentan desafíos particulares. La división digital se manifiesta en el uso de tecnologías, en los beneficios recibidos y en el nivel de habilidades digitales (Bulatova et al., 2023). La transformación digital está acompañada por aumento en demanda por automatización de procesos productivos, lo cual desplaza fuerza laboral hacia sectores resistentes a automatización. Esto genera necesidad de recalificación masiva de trabajadores.

La literatura sobre inversión en capital humano en países en desarrollo provee lecciones relevantes. Institutos educacionales son significativos para impulsar desarrollo económico como centros de tecnología, desarrolladores e inversionistas (Saleem and Higuchi, 2014). Las universidades pueden afectar crecimiento económico mediante formación de capacidades de absorción tecnológica. Políticas que promueven educación de calidad y acceso a conocimiento tecnológico son fundamentales para desarrollo sostenible (López-Claros, 2011).

El papel de las preferencias individuales y heterogeneidad en procesos de aprendizaje también ha sido documentado. Diferencias en capacidades cognitivas y velocidades de absorción de conocimiento generan distribuciones altamente dispersas de costos de aprendizaje en contextos de formación técnica avanzada. Esta dispersión induce patrones de selección donde solo trabajadores por debajo de ciertos umbrales de costo emprenden transiciones.

Finalmente, la economía de información asimétrica es relevante para entender dinámicas de señalización en mercados laborales post-transición. Trabajadores que completan exitosamente programas de recertificación en criptografía pós-cuántica deben señalar competencias a empleadores potenciales. La credibilidad de señales depende de reputación de instituciones certificadoras y de la posibilidad de verificación de conocimientos mediante pruebas técnicas.

3. Caracterización del Problema y Construcción del Indicador

La transición ocupacional de especialistas en criptografía clásica hacia estándares pós-cuánticos puede caracterizarse como problema de inversión en capital humano bajo incertidumbre y heterogeneidad. Esta sección establece el marco conceptual para la construcción del Indicador de Viabilidad de Transición Ocupacional (IVTO), especificando

componentes clave y relaciones estructurales entre variables.

Un trabajador i posee dotación inicial de capital humano H_i^C específico a criptografía clásica y dotación H_i^T de competencias transferibles. El valor de mercado de estas competencias evoluciona temporalmente como $V_i(H_i^C, H_i^T, t)$, donde t representa tiempo. La emergencia de amenaza cuántica induce depreciación acelerada de capital específico clásico según función $\delta(t)$, donde $\delta'(t) > 0$ refleja probabilidad creciente de obsolescencia conforme avanza desarrollo de computación cuántica.

La transición hacia competencias pós-cuánticas requiere inversión en aprendizaje que genera nuevo capital humano H_i^{PQ} . El costo total de adquirir nivel H_i^{PQ} para trabajador i se especifica como función $C_i(H_i^{PQ})$, la cual incorpora heterogeneidad individual en capacidades de aprendizaje, costos de oportunidad y restricciones financieras. La heterogeneidad surge de dos fuentes: características observables como educación previa y experiencia, y características no observables como habilidad cognitiva innata y preferencias por tipos de conocimiento.

El retorno esperado de la transición puede expresarse como diferencial de valor presente entre permanecer en trayectoria clásica versus migrar a ocupación pós-cuántica. Formalmente, el beneficio neto de transición para trabajador i es:

$$B_i = \int_0^T [V_i^{PQ}(t) - V_i^C(t)]e^{-rt} dt - C_i(H_i^{PQ})$$

donde $V_i^{PQ}(t)$ representa flujo de ingresos en ocupación pós-cuántica, $V_i^C(t)$ flujo en ocupación clásica depreciándose, r tasa de descuento, y T horizonte de planeación. La viabilidad de transición requiere $B_i > 0$.

Sin embargo, la decisión de transición no depende únicamente de beneficio neto esperado. Existen múltiples dimensiones de viabilidad que interactúan de manera no lineal. Primero, la brecha de competencias $G_i = H^{PQ*} - H_i^T$ mide distancia entre competencias transferibles actuales y nivel requerido H^{PQ*} para desempeño competente en criptografía pós-cuántica. Brechas amplias implican períodos de aprendizaje prolongados y costos elevados.

Segundo, la restricción temporal τ_i captura ventana disponible para completar transición antes de que capital humano clásico pierda valor crítico. Esta restricción varía entre trabajadores según edad, compromisos familiares y flexibilidad laboral. Trabajadores próximos a retiro enfrentan horizontes cortos que pueden hacer transición inviable incluso con costos moderados.

Tercero, la capacidad de absorción de conocimiento α_i determina velocidad de aprendizaje. Trabajadores con mayores valores de α_i requieren menos tiempo para alcanzar competencia H^{PQ*} , reduciendo costos de oportunidad. Esta variable correlaciona con

dotaciones de capital humano matemático y experiencia previa en aprendizaje técnico complejo.

Cuarto, el costo unitario de aprendizaje c_i refleja tarifas de programas de recertificación, disponibilidad de tiempo para estudio y costos psicológicos. La heterogeneidad en c_i surge de diferencias en acceso a recursos educativos subsidiados, restricciones de liquidez y preferencias individuales.

El Indicador de Viabilidad de Transición Ocupacional (IVTO) se construye como función compuesta de estas dimensiones. La especificación general adopta forma:

$$IVTO_i = f(G_i, \tau_i, \alpha_i, c_i, H_i^T)$$

donde $f(\cdot)$ agrega componentes ponderadamente. La forma funcional debe satisfacer propiedades económicamente sensatas: el indicador decrece en brecha de competencias G_i y costo unitario c_i , aumenta en restricción temporal τ_i y capacidad de absorción α_i , y aumenta en dotaciones de competencias transferibles H_i^T .

Una especificación parsimoniosa que captura interacciones relevantes es:

$$IVTO_i = \frac{\alpha_i \cdot H_i^T}{(1 + G_i) \cdot c_i} \cdot (1 - e^{-\lambda \tau_i})$$

donde $\lambda > 0$ es parámetro que calibra importancia de restricción temporal. Esta forma funcional incorpora varios rasgos deseables. El término $\alpha_i \cdot H_i^T$ en numerador captura capacidad efectiva de aprendizaje como producto de habilidad cognitiva y base de conocimientos transferibles. El denominador $(1 + G_i) \cdot c_i$ penaliza brechas amplias y costos elevados. El factor temporal $1 - e^{-\lambda \tau_i}$ refleja que beneficios de transición aumentan con horizonte disponible pero con rendimientos marginales decrecientes.

La normalización del indicador puede definirse respecto a umbrales críticos. Un trabajador con $IVTO_i > IV\bar{T}O$ donde $IV\bar{T}O$ es umbral de viabilidad calibrado empíricamente, se clasifica como candidato viable para transición. La distribución de $IVTO_i$ en población de especialistas en criptografía clásica provee información sobre proporción agregada que puede transicionar exitosamente.

Extensiones del indicador pueden incorporar dimensiones adicionales. La incertidumbre sobre timing de amenaza cuántica puede modelarse mediante ajuste de factor de descuento o mediante inclusión de término de opción real que valora flexibilidad de postergar decisión de transición. Las externalidades de red en aprendizaje, donde efectividad de programas de recertificación aumenta con número de participantes, pueden introducirse mediante términos de interacción.

La construcción del IVTO también debe considerar heterogeneidad en preferencias de riesgo. Trabajadores más aversos al riesgo pueden requerir umbrales más elevados de

viabilidad antes de emprender transición debido a incertidumbre sobre retornos. Esta dimensión puede incorporarse mediante ajuste de tasas de descuento individualizadas o mediante ponderaciones heterogéneas de componentes del indicador.

Desde perspectiva de fintechs como empleadores, la distribución agregada de IVTO entre fuerza laboral informa decisiones estratégicas. Una concentración de trabajadores con valores bajos de IVTO señala necesidad de contratación externa agresiva o inversión sustancial en programas de reentrenamiento subsidiados. Conversamente, distribución con masa significativa por encima de umbral sugiere factibilidad de estrategia de recapitalización interna.

4. Modelo de Transición Ocupacional con Costos Heterogéneos

Esta sección desarrolla modelo formal de decisión de transición que fundamenta la construcción del indicador IVTO. El análisis procede en tres etapas: caracterización de tecnología de producción de capital humano pós-cuántico, derivación de condiciones de optimalidad para decisión de transición individual, y análisis de equilibrio agregado.

Considere trabajador i que decide si invertir en adquisición de competencias pós-cuánticas. El trabajador posee dotación inicial H_i^T de capital humano transferible y enfrenta brecha G_i respecto a nivel requerido H^{PQ*} . La tecnología de producción de nuevo capital humano pós-cuántico se especifica como:

$$H_i^{PQ} = H_i^T + \alpha_i \cdot e_i$$

donde e_i representa esfuerzo de aprendizaje y α_i es productividad individual del esfuerzo. El costo total de alcanzar $H_i^{PQ} = H^{PQ*}$ requiere esfuerzo:

$$e_i^* = \frac{H^{PQ*} - H_i^T}{\alpha_i} = \frac{G_i}{\alpha_i}$$

lo cual induce costo total:

$$C_i = c_i \cdot e_i^* = c_i \cdot \frac{G_i}{\alpha_i}$$

Esta formulación captura cómo costos de transición dependen de tres factores: brecha de competencias G_i , capacidad de absorción α_i y costo unitario c_i . Trabajadores con brechas amplias o capacidades limitadas enfrentan costos prohibitivos.

El flujo de ingresos en ocupación clásica evoluciona como $w_i^C(t) = w_0^C \cdot (1 - \delta t)$ donde δ es tasa de depreciación acelerada inducida por amenaza cuántica. El flujo en ocupación pós-cuántica se especifica como $w_i^{PQ} = w_0^{PQ}$, asumiendo que competencias pós-cuánticas

mantiene valor estable dado que estándares resistentes a ataques cuánticos no enfrentan obsolescencia inmediata.

El valor presente de permanecer en trayectoria clásica es:

$$V_i^C = \int_0^{\tau_i} w_0^C (1 - \delta t) e^{-rt} dt$$

Resolviendo la integral:

$$V_i^C = w_0^C \left[\frac{1 - e^{-r\tau_i}}{r} - \delta \left(\frac{\tau_i e^{-r\tau_i}}{r} + \frac{1 - e^{-r\tau_i}}{r^2} \right) \right]$$

El valor presente de transición exitosa es:

$$V_i^{PQ} = \int_0^{\tau_i} w_0^{PQ} e^{-rt} dt = w_0^{PQ} \cdot \frac{1 - e^{-r\tau_i}}{r}$$

El beneficio neto de transición es $B_i = V_i^{PQ} - V_i^C - C_i$. La condición de optimalidad para emprender transición requiere $B_i \geq 0$, lo cual puede reescribirse como:

$$\begin{aligned} & \frac{w_0^{PQ} - w_0^C}{r} (1 - e^{-r\tau_i}) \\ & + \frac{w_0^C \delta}{r} \left(\tau_i e^{-r\tau_i} + \frac{1 - e^{-r\tau_i}}{r} \right) \geq c_i \cdot \frac{G_i}{\alpha_i} \end{aligned}$$

Esta desigualdad define umbral de viabilidad. El lado izquierdo captura beneficio total de transición, compuesto por diferencial salarial entre ocupaciones más valor de evitar depreciación de capital clásico. El lado derecho representa costo de adquisición de competencias pós-cuánticas.

La heterogeneidad en parámetros individuales genera distribución de beneficios netos. Definiendo distribución conjunta de características $(G_i, \alpha_i, c_i, \tau_i)$ como $F(G, \alpha, c, \tau)$, la fracción de población que encuentra óptimo transicionar es:

$$\Phi = \int \mathbb{1}\{B_i \geq 0\} dF(G, \alpha, c, \tau)$$

donde $\mathbb{1}\{\cdot\}$ es función indicadora.

La interacción entre parámetros genera efectos no lineales. Por ejemplo, la complementariedad entre dotaciones transferibles y capacidad de absorción implica que trabajadores con ambas características elevadas enfrentan costos desproporcionadamente bajos. Esto induce segmentación donde un grupo reducido de trabajadores altamente calificados domina transiciones exitosas mientras mayoría enfrenta barreras insuperables.

La dinámica temporal introduce consideraciones adicionales. Si la probabilidad de dis-

ponibilidad comercial de computadoras cuánticas sigue proceso estocástico $p(t)$, la tasa de depreciación se vuelve endógena: $\delta(t) = \delta_0 \cdot p(t)$. Trabajadores deben formar expectativas sobre evolución de $p(t)$ para calcular beneficios esperados. Incertidumbre elevada puede inducir comportamiento de espera, postergando decisiones de transición hasta que señales sean más claras.

El modelo permite analizar políticas de subsidio a reentrenamiento. Un subsidio que reduce costo unitario de c_i a $c_i(1-s)$ donde $s \in [0, 1]$ es tasa de subsidio, expande conjunto de trabajadores viables. El efecto sobre Φ es:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial s} = \int \mathbb{1}_{\{B_i(c_i(1-s)) \geq 0\}} \cdot \frac{c_i G_i}{\alpha_i} \cdot f(G, \alpha, c, \tau) dG d\alpha dcd\tau$$

donde $f(\cdot)$ es densidad de $F(\cdot)$. La efectividad del subsidio depende de densidad de trabajadores marginales cerca de umbral de viabilidad.

Desde perspectiva de equilibrio general, oferta agregada de especialistas en criptografía pós-cuántica evoluciona como:

$$S^{PQ}(t) = S_0^{PQ} + \Phi \cdot N^C$$

donde S_0^{PQ} es stock inicial de especialistas pós-cuánticos y N^C es población de especialistas clásicos. La demanda por servicios criptográficos pós-cuánticos $D^{PQ}(w)$ determina salario de equilibrio w_0^{PQ} . Si Φ es insuficiente para satisfacer demanda proyectada, emergen presiones salariales al alza que endogenizan incentivos de transición.

El modelo también permite estudiar timing óptimo de transición. Si trabajador puede elegir momento t^* para emprender aprendizaje, el problema se convierte en optimización dinámica. El valor de esperar refleja opción de obtener información adicional sobre evolución de amenaza cuántica versus costo de depreciación acelerada durante período de espera. La regla óptima típicamente adopta forma de umbral: transicionar cuando señal de probabilidad cuántica supera nivel crítico.

Finalmente, externalidades en mercado laboral pueden generar equilibrios múltiples. Si empleadores forman expectativas sobre disponibilidad futura de talento pós-cuántico, decisiones de inversión en infraestructura compatible pueden generar profecías autocumplidas. Expectativas pesimistas sobre Φ reducen inversión empresarial, disminuyendo demanda D^{PQ} y salarios w_0^{PQ} , lo cual valida expectativas al desincentivar transiciones individuales.

5. Aplicaciones del Indicador IVTO

El Indicador de Viabilidad de Transición Ocupacional desarrollado en secciones previas admite diversas aplicaciones en contextos organizacionales y de política pública. Esta

sección explora implementaciones prácticas del IVTO en tres ámbitos: gestión estratégica de capital humano en fintechs, diseño de programas de recertificación y políticas sectoriales de adaptación tecnológica.

Desde perspectiva de gestión de recursos humanos en fintechs, el IVTO provee herramienta diagnóstica para evaluar composición de fuerza laboral técnica. Una firma puede administrar evaluaciones que miden componentes del indicador a especialistas en criptografía clásica empleados actualmente. La distribución resultante de valores IVTO identifica segmentos de trabajadores: aquellos con viabilidad alta que constituyen candidatos naturales para programas de reentrenamiento interno, aquellos con viabilidad moderada que requieren apoyo intensivo, y aquellos con viabilidad baja donde contratación externa es más eficiente.

La decisión entre recapitalizar trabajador interno versus contratar externamente puede informarse mediante comparación de costos. El costo de recapitalizar trabajador interno con determinado IVTO incluye inversión en entrenamiento más costos de oportunidad durante período de aprendizaje. El costo de contratación externa incluye salario premium, costos de reclutamiento y período de adaptación a cultura organizacional. La firma elige estrategia de menor costo para cada posición requerida.

El IVTO también permite optimizar diseño de programas de recertificación. Instituciones educativas pueden segmentar contenido curricular según perfiles de participantes. Trabajadores con brechas amplias pero alta capacidad de absorción se benefician de programas intensivos acelerados. Trabajadores con brechas moderadas pero capacidades limitadas requieren trayectorias más graduales con mayor énfasis en fundamentos matemáticos. La personalización basada en componentes del IVTO mejora tasas de completación y adquisición efectiva de competencias.

Las políticas sectoriales de adaptación tecnológica pueden calibrarse mediante análisis agregado de distribución de IVTO. Suponga que sector fintech en jurisdicción específica emplea N especialistas en criptografía clásica. Una encuesta representativa estima distribución en población. La autoridad regulatoria puede proyectar proporción de fuerza laboral que completará transición exitosamente bajo escenarios alternativos de apoyo gubernamental.

Un programa de subsidios a recertificación que reduce costos unitarios en fracción s desplaza distribución hacia valores más altos de IVTO. El incremento en masa de trabajadores viables se calcula como diferencia entre distribuciones acumuladas con y sin subsidio. El costo fiscal del programa puede compararse con beneficios sociales de mantener capacidad técnica sectorial. La relación costo-efectividad informa asignación de recursos entre subsidios a recertificación versus otras intervenciones como contratación de talento internacional.

El indicador IVTO también facilita comunicación con trabajadores. Profesionales pueden auto-evaluar viabilidad de transición mediante herramientas interactivas que calculan su valor IVTO personal basado en respuestas a cuestionario estructurado. Esto democratiza información previamente inaccesible y empodera decisiones informadas sobre inversión en educación continua. Transparencia en metodología de cálculo del indicador genera confianza en recomendaciones derivadas.

Desde perspectiva de inversionistas en fintechs, la proporción de fuerza laboral con IVTO elevado constituye señal de resiliencia organizacional ante disrupción cuántica. Firms con mayor capacidad de recapitalización interna enfrentan menores riesgos de obsolescencia técnica y costos de transición más bajos. Esta información puede incorporarse en análisis de valuación.

Las limitaciones de aplicación del IVTO deben reconocerse. La precisión del indicador depende críticamente de calidad de medición de componentes. Dotaciones de competencias transferibles constituyen constructo latente que requiere instrumentos psicométricos validados. Capacidad de absorción puede aproximarse mediante desempeño en evaluaciones técnicas pero introduce error de medición. Costos unitarios varían según acceso a recursos educativos cuya disponibilidad es dinámica.

La interpretación del IVTO debe contextualizarse. Un valor elevado indica viabilidad técnica de transición pero no garantiza éxito. Factores organizacionales como cultura empresarial, disponibilidad de mentores y calidad de programas de entrenamiento afectan resultados. El indicador provee información probabilística sobre capacidad potencial, no certeza determinística.

Extensiones del IVTO pueden incorporar dimensiones adicionales relevantes en aplicaciones específicas. Para fintechs operando internacionalmente, diferencias en regulaciones entre jurisdicciones sobre estándares criptográficos aceptables pueden requerir ajustes al indicador. Trabajadores en jurisdicciones con adopción temprana de estándares pós-cuánticos enfrentan horizontes temporales más cortos y mayores presiones de transición.

La dinámica longitudinal del IVTO también merece atención. El indicador no es estático; componentes evolucionan con tiempo. Depreciación continua de capital humano clásico amplía brechas. Programas de educación continua incrementan competencias transferibles. Avances en pedagogía de criptografía pós-cuántica pueden reducir costos unitarios. Monitoreo periódico del IVTO permite a organizaciones y trabajadores ajustar estrategias responsivamente.

6. Discusión

El desarrollo del Indicador de Viabilidad de Transición Ocupacional para especialistas en criptografía clásica hacia estándares pós-cuánticos contribuye a literatura emergente sobre adaptación laboral ante disrupciones tecnológicas. Esta sección discute implicaciones teóricas, limitaciones metodológicas y direcciones para investigación futura.

Desde perspectiva teórica, el modelo integra varias corrientes de análisis económico que tradicionalmente se han desarrollado de manera separada. La teoría del capital humano provee fundamento para comprender depreciación acelerada de competencias clásicas. La incorporación de heterogeneidad en costos de aprendizaje enriquece análisis al reconocer que trabajadores no son homogéneos en capacidades de adaptación.

Una contribución conceptual clave es la distinción entre componentes observables y no observables de costos de transición. Mientras que brechas de competencias y restricciones temporales pueden medirse mediante evaluaciones técnicas y datos demográficos, capacidades de absorción incorporan elementos latentes como habilidad cognitiva y motivación intrínseca. Esta heterogeneidad no observable genera desafíos para diseño de políticas, ya que subsidios uniformes pueden ser ineficientes al no discriminar entre trabajadores con diferente retorno marginal de apoyo.

El modelo también ilumina trade-offs intertemporales en decisiones de transición. La opción de postergar inversión en recertificación permite esperar información adicional sobre evolución de amenaza cuántica, pero induce costos de depreciación acelerada de capital humano clásico durante período de espera. Este trade-off se intensifica para trabajadores próximos a retiro, quienes enfrentan horizontes cortos que reducen beneficios de transición incluso si costos de aprendizaje son moderados.

Las limitaciones metodológicas del análisis son múltiples. Primero, el modelo asume mercados laborales competitivos donde salarios reflejan productividad marginal. En realidad, rigideces institucionales y estructuras de compensación basadas en antigüedad pueden generar diferencias entre productividad y remuneración. Estas fricciones afectan incentivos de transición de maneras no capturadas en modelo benchmark.

Segundo, la especificación de tecnología de producción de capital humano pós-cuántico como función lineal de esfuerzo es simplificación. Procesos de aprendizaje reales exhiben no convexidades, con períodos iniciales de progreso lento seguidos de aceleraciones conforme fundamentos se consolidan. Adicionalmente, complementariedades entre diferentes tipos de conocimiento implican que secuencia de adquisición de competencias puede afectar costos totales.

Tercero, el análisis abstrae de consideraciones de equilibrio general que pueden generar efectos de retroalimentación. Si transiciones masivas hacia criptografía pós-cuántica saturan mercado laboral en ese segmento, salarios declinarán, reduciendo incentivos de

transición. Conversamente, escasez persistente puede generar presiones salariales al alza que endogenizan beneficios.

Cuarto, la incertidumbre sobre timing de disponibilidad comercial de computadoras cuánticas se modela de manera reducida mediante tasa de depreciación. Un tratamiento más riguroso requeriría especificar proceso estocástico para evolución de capacidades cuánticas y permitir que trabajadores actualicen creencias bayesianamente conforme llega información.

Las implicaciones de política derivadas del modelo sugieren que intervenciones diferenciadas según características de trabajadores son más efectivas que programas universales. Subsidios a recertificación generan mayor impacto cuando se focalizan en trabajadores con viabilidad marginal, aquellos cuyo IVTO está ligeramente por debajo de umbral crítico. Trabajadores con viabilidad muy baja requieren apoyos estructurales más profundos que trascienden reducción de costos de matrícula, incluyendo posiblemente programas de garantía de ingresos durante períodos de reentrenamiento.

Para fintechs, los hallazgos sugieren que estrategias híbridas que combinan recapitalización de trabajadores con IVTO elevado y contratación externa para llenar brechas residuales optimizan costos de transición. La inversión en culturas organizacionales que valoran aprendizaje continuo puede aumentar capacidad promedio de fuerza laboral, reduciendo costos futuros de adaptación ante disrupciones tecnológicas.

Direcciones para investigación futura incluyen validación empírica del indicador IVTO. Datos longitudinales sobre trayectorias de especialistas en criptografía permitirían estimar componentes del modelo econométricamente y testear predicciones sobre patrones de selección. Adicionalmente, experimentos de campo con asignación aleatoria de subsidios a recertificación podrían identificar efectos causales de reducciones de costos sobre decisiones de transición.

Extensiones teóricas podrían incorporar fricciones de búsqueda en mercados laborales post-transición. Trabajadores que completan recertificación enfrentan procesos de matching con empleadores que demandan competencias pós-cuánticas. Asimetrías de información sobre calidad de entrenamiento recibido pueden generar problemas de señalización que afectan tasas de colocación.

Otra extensión relevante involucra considerar efectos de pares en decisiones de transición. Si trabajadores en equipos técnicos coordinan estrategias de recertificación, pueden emerger complementariedades donde transiciones conjuntas generan beneficios mayores que suma de transiciones individuales debido a economías de escala en aprendizaje colectivo.

Finalmente, el marco desarrollado es generalizable a otras disrupciones tecnológicas que inducen obsolescencia de competencias especializadas. Transiciones desde arquitecturas de software legacy a paradigmas cloud-native, migraciones de análisis estadístico

tradicional a machine learning, y adaptaciones de profesionales ante inteligencia artificial exhiben estructuras similares de costos heterogéneos y capital humano específico depreciándose (Webb, 2019; Mykytas, 2025).

7. Conclusiones

Este artículo desarrolló un Indicador de Viabilidad de Transición Ocupacional (IVTO) para evaluar capacidad de especialistas en criptografía clásica de migrar hacia competencias en estándares pós-cuánticos, contexto particularmente relevante para el sector fintech. El modelo propuesto integra teoría del capital humano específico, análisis de costos heterogéneos de aprendizaje y restricciones temporales en marco analítico unificado que genera predicciones testables y recomendaciones de política.

Los hallazgos principales establecen que la viabilidad de transición depende críticamente de interacción entre brecha de competencias, capacidad de absorción de conocimiento, costos unitarios de aprendizaje y horizontes temporales disponibles. La heterogeneidad en estos componentes genera segmentación en mercado laboral donde subgrupo relativamente reducido de trabajadores con dotaciones elevadas de competencias transferibles y capacidades cognitivas superiores enfrenta umbrales de transición significativamente menores. Esta segmentación implica que políticas uniformes de apoyo a recertificación pueden ser ineficientes al no discriminar entre trabajadores con retornos marginales heterogéneos.

El indicador IVTO propuesto constituye herramienta práctica para múltiples actores. Fintechs pueden utilizar distribuciones de IVTO entre fuerza laboral para informar decisiones estratégicas sobre composición óptima de recapitalización interna versus contratación externa. Instituciones educativas pueden segmentar programas de recertificación según perfiles de participantes, mejorando tasas de completación y efectividad pedagógica. Trabajadores individuales pueden auto-evaluar viabilidad de transición y tomar decisiones informadas sobre inversión en educación continua.

Desde perspectiva de política pública, el análisis sugiere que subsidios focalizados en trabajadores con viabilidad marginal generan mayores retornos sociales que programas universales. La identificación de umbrales críticos de IVTO permite calibrar intensidad de apoyo requerido para expandir conjunto de trabajadores que completan transiciones exitosamente. Adicionalmente, intervenciones que reducen brechas de competencias mediante fortalecimiento de fundamentos matemáticos en educación técnica generan beneficios de largo plazo al aumentar competencias transferibles promedio de fuerza laboral.

Las limitaciones del análisis incluyen supuestos simplificadores sobre competitividad de mercados laborales, linealidad de tecnologías de aprendizaje y tratamiento reducido de incertidumbre temporal sobre emergencia de amenaza cuántica. Investigación futura

requiere validación empírica mediante datos longitudinales sobre trayectorias profesionales de especialistas en criptografía y estimación econométrica de componentes del modelo.

Extensiones teóricas prometedoras incluyen incorporación de equilibrio general con determinación endógena de salarios, análisis de fricciones de búsqueda en mercados laborales post-transición, y estudio de efectos de pares en decisiones coordinadas de recertificación. El marco IVTO es generalizable a otras disrupciones tecnológicas que inducen obsolescencia de competencias especializadas, sugiriendo agenda de investigación amplia sobre adaptación laboral ante cambio tecnológico acelerado.

En síntesis, la transición hacia criptografía pós-cuántica representa desafío complejo pero abordable para mercados laborales especializados. La comprensión rigurosa de determinantes de viabilidad de transición, sintetizada en el indicador IVTO, empodera decisiones informadas de trabajadores, empleadores y autoridades. Conforme la amenaza cuántica se concretiza, la capacidad de identificar y apoyar transiciones ocupacionales exitosas determinará resiliencia de sector fintech ante disrupción tecnológica inevitable.

Referencias

- Acemoglu, D. and Restrepo, P. (2018). The race between man and machine: Implications of technology for growth, factor shares, and employment. *American Economic Review*, 108(6):1488–1542.
- 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. *Visnik Mariupolskogo deržavnogo unìversitetu Serìâ Ekonomìka*, 13(25):45–57.
- Cukier, W. (2019). Disruptive processes and skills mismatches in the new economy. *Journal of Global Responsibility*, 10(3):211–225.
- Dachs, B. (2017). The impact of new technologies on the labour market and the social economy.
- de Jong, E. (2022). Own the unknown: An anticipatory approach to prepare society for the quantum age. *Digital Society*, 1(2).
- 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).
- Islam, M. A., Hasan, S. K., Priya, S. A., Asha, A. I., and Islam, N. M. (2024). The impact of quantum computing on financial risk management: A business perspective. *International Journal For Multidisciplinary Research*, 6(5).

- Katz, R., Callorda, F., and Jung, J. (2021). The impact of automation on employment and its social implications: Evidence from Chile. *Economics of Innovation and New Technology*, 32(5):646–662.
- 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.
- Mudhol, A. C. (2024). Integrating quantum computing into business analytics: Opportunities and challenges. *International Journal of Innovative Science and Research Technology (IJISRT)*, pages 2451–2463.
- 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.
- Orús, R., Mugel, S., and Lizaso, E. (2019). Quantum computing for finance: Overview and prospects. *Reviews in Physics*, 4:100028.
- 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).
- Schindler, M., Korinek, A., and Stiglitz, J. (2021). Technological progress, artificial intelligence, and inclusive growth. *IMF Working Papers*, 2021(166):1.
- Scholten, T. L., Williams, C. J., Moody, D., Mosca, M., Hurley, W., Zeng, W. J., Troyer, M., and Gambetta, J. (2024). Assessing the benefits and risks of quantum computers.
- Webb, M. (2019). The impact of artificial intelligence on the labor market. *SSRN Electronic Journal*.
- Wheatley Research Consultancy (2024). Quantum shifts: The societal implications of quantum computing on security, privacy, and the economy.