

¿Están listas las maquiladoras para implementar la Industria 4.0?

Are Maquiladora Localities Ready to Implement Industry 4.0?

Eduardo Arriola Ruiz,¹ Redi Gomis Hernández²
y Jorge Carrillo³

RESUMEN

En este artículo se analiza y compara el conocimiento y la implementación de tecnologías de la Industria 4.0 (I4.0) en maquiladoras de Tijuana y Ciudad Juárez, mediante un enfoque cuantitativo descriptivo. Se realizaron encuestas en línea a trabajadores del sector manufacturero para evaluar su dominio y aplicación de 19 tecnologías específicas. Los resultados muestran que, aunque el conocimiento es moderado, la adopción práctica de estas tecnologías sigue siendo limitada, con un ligero avance en Ciudad Juárez. Los hallazgos destacan la importancia de mejorar la capacitación en la I4.0 para facilitar una implementación más efectiva y apoyar la transformación tecnológica en estas regiones fronterizas. Si bien el alcance geográfico del estudio es limitado, se recomienda que futuras investigaciones abarquen una mayor diversidad de contextos industriales. Esta investigación contribuye al conocimiento sobre la transición hacia la I4.0 y proporciona información útil para el diseño de políticas de capacitación tecnológica en el sector.

Palabras clave: 1. Industria 4.0, 2. maquiladoras, 3. ingenieros, 4. Ciudad Juárez, 5. Tijuana.

ABSTRACT

This article analyzes and compares the knowledge and implementation of Industry 4.0 (I4.0) technologies in maquiladoras in Tijuana and Ciudad Juárez through a descriptive quantitative approach. Online surveys were conducted with manufacturing sector workers to assess their familiarity with and practical application of 19 specific technologies. The results show that, while knowledge levels are moderate, practical adoption of these technologies remains limited, with Ciudad Juárez showing a slight advantage. The findings highlight the importance of improving I4.0 training to enable more effective implementation and support technological transformation in these border regions. Although the study's geographical scope is limited, it is recommended that future research encompass a wider diversity of industrial contexts. This research contributes to the understanding of the transition towards I4.0 and provides valuable insights for designing policies aimed at technological training in the sector.

Keywords: 1. Industry 4.0, 2. maquiladoras, 3. engineers, 4. Ciudad Juárez, 5. Tijuana.

Recepción: 13 de febrero, 2024

Aceptación: 9 de mayo, 2024

Publicación web: 15 de enero, 2025

¹ Universidad Autónoma de Ciudad Juárez (<https://ror.org/05fj8cf83>), eduardo.arriola@uacj.mx, <https://orcid.org/0000-0002-0037-0621>

² El Colegio de la Frontera Norte (<https://ror.org/04hft8h57>), rgomis@colef.mx, <https://orcid.org/0000-0002-1515-3929>

³ El Colegio de la Frontera Norte (<https://ror.org/04hft8h57>), carrillo@colef.mx, <https://orcid.org/0000-0002-8533-2797>



INTRODUCCIÓN

Este artículo tiene como objetivo analizar y comparar el nivel de dominio que poseen las empresas manufactureras y sus proveedores en Tijuana y Ciudad Juárez respecto a las tecnologías de la Industria 4.0 (I4.0), así como el grado de implementación tecnológica alcanzado. Se busca identificar las semejanzas y diferencias en estos aspectos entre dos importantes enclaves industriales, tradicionalmente asociados con la industria maquiladora.

Este estudio también busca ampliar y complementar las investigaciones previas de Carrillo *et al.* (2020) y Arriola Ruiz (2022), las cuales estimaron el grado de dominio y adopción de tecnologías de la I4.0 en empresas manufactureras de Tijuana y Ciudad Juárez, respectivamente. Además, se profundiza en el análisis realizado por Arriola Ruiz y Carrillo (2022), que, aunque ofrecía una comparación sobre la adopción y preparación tecnológica, se centraba específicamente en la industria de autopartes en ambas ciudades.

Este artículo no se limita a comparar los niveles de dominio y preparación para la I4.0 en un sector industrial específico; va más allá al identificar las tendencias actuales en la adopción de tecnologías de la I4.0 en empresas manufactureras de todos los sectores en Tijuana y Ciudad Juárez. Así, contribuye de manera significativa a un entendimiento profundo sobre cómo estas dos importantes ciudades fronterizas se están posicionando –de manera similar o divergente– en la nueva era industrial, destacando los retos y oportunidades que enfrentan en su camino hacia la digitalización y automatización de procesos industriales.

Este estudio también contribuye a explicar los factores involucrados en el proceso de adopción de la I4.0 en las zonas fronterizas, ofreciendo perspectivas valiosas sobre estos dos centros industriales. Al detallar el nivel de conocimiento y la disposición de los trabajadores hacia la integración de la I4.0 en los procesos productivos, la investigación introduce una perspectiva humana esencial en el debate sobre la digitalización y automatización en el sector manufacturero, frecuentemente pasada por alto. Así mismo, al destacar los retos específicos para la incorporación de la I4.0 en las maquiladoras, este estudio establece las bases para desarrollar estrategias que permitan superar dichos obstáculos. Esta información es de gran relevancia para formuladores de políticas, educadores y líderes empresariales interesados en promover la adopción de tecnologías de la I4.0 en el ámbito manufacturero.

Baja California y Chihuahua tienen una sólida tradición industrial en la que las maquiladoras desempeñan un papel fundamental en la economía regional. En Baja California, las empresas contribuyen con el 10 por ciento de la producción manufacturera nacional, con Tijuana aportando más del 70 por ciento de este total (Index Zona Costa BC, 2023). En Chihuahua, las exportaciones manufacturadas representan aproximadamente el 12 por ciento del total nacional, con Ciudad Juárez como el principal motor, al generar cerca del 80 por ciento de esta producción (Asociación de Maquiladoras, A. C. [AMAC]-Index Juárez, 2023). En conjunto, ambas regiones representan más del 20 por ciento de la industria manufacturera nacional.

La industria maquiladora se encuentra actualmente en un proceso de transición hacia el modelo de producción de la I4.0, también conocido como la Cuarta Revolución Industrial. En este contexto, las

empresas están implementando estrategias de tecnificación y digitalización para capitalizar las ventajas competitivas que ofrecen las nuevas tecnologías. Esta transformación resalta el papel crucial que desempeña la I4.0 en el contexto productivo actual.

La I4.0 se caracteriza por la integración de la cadena de valor mediante sistemas ciberfísicos (*cyber-physical systems* [CPS]) en los procesos de fabricación (Arvind, 2016). Este modelo incorpora tecnologías como big data, inteligencia artificial (IA), simulación, digitalización y robotización, y se apoya en las tecnologías de la información y la comunicación (TIC) para conectar a todos los miembros de la red productiva. Esta revolución opera de manera descentralizada, con un alto nivel de autonomía, lo que permite mejorar la eficiencia de los recursos, fomentar economías de escala y facilitar una producción flexible (Wang y Wang, 2016; Kinzel, 2017). Matus (2022) señala que la transición hacia este nuevo paradigma industrial se realiza mediante la digitalización de procesos y la adopción de tecnologías propias de la I4.0.

En México, diversos actores vinculados al desarrollo industrial –como proveedores, empresas locales, académicos e instituciones gubernamentales– han invertido recursos para comprender y adaptarse al modelo de la I4.0 (Carrillo *et al.*, 2020). Sin embargo, se ha investigado poco sobre la transición de las empresas mexicanas hacia este modelo, y la literatura existente muestra resultados contradictorios. Algunos autores sostienen que México está rezagado en la adopción de la I4.0 (Riquelme, 2019; AXIS Centro de Inteligencia Estratégica, 2019), mientras que otros estudios destacan avances significativos (International Data Corporation [IDC], 2017), en algunos casos superiores a los de empresas alemanas, especialmente entre pequeñas y medianas empresas (pymes). Estas discrepancias subrayan la necesidad de profundizar en los procesos de implementación de la I4.0 que están ocurriendo en las empresas mexicanas.

Este artículo se organiza en cuatro secciones principales, además de la introducción. En la primera, se ofrece un contexto sobre los factores clave y se identifican las ventajas y desafíos del proceso de transición hacia la I4.0. En la segunda sección, se detalla la estrategia metodológica adoptada, con un enfoque en la recolección y análisis de los datos. En la tercera se presenta el análisis empírico y la discusión de los datos obtenidos a partir de la metodología descrita. Finalmente, en la última sección, se discute el estudio comparativo y se exponen las conclusiones del trabajo.

DETERMINANTES Y DESAFÍOS DE LA IMPLEMENTACIÓN TECNOLÓGICA EN LAS EMPRESAS

A lo largo de la historia, el avance tecnológico ha brindado beneficios significativos a empresas, trabajadores y a la sociedad en general, manifestados principalmente en el aumento de la productividad y la reducción de costos de producción. En la actualidad, el modelo de la I4.0 introduce innovaciones que superan los cambios incrementales típicamente asociados con la evolución tecnológica. En dicho contexto, en esta sección se exploran los factores que motivan a las empresas a adoptar las tecnologías de la I4.0, y se examinan los principales desafíos y obstáculos que estas enfrentan durante el proceso de transición tecnológica.

Motivaciones para la adopción de la I4.0

Diversos autores han identificado aspectos clave relacionados con la implementación de la I4.0 en las empresas. Sampietro-Saquicela (2020), en un estudio realizado en empresas argentinas, encontró que estas se han beneficiado por su capacidad de adaptarse rápidamente a las fluctuaciones de la demanda, facilitada por la producción flexible y modular. Además, el autor destaca que la reducción significativa de costos y de tiempo no productivo facilita la adopción tecnológica.

Por otro lado, Raso Delgue (2018), en su investigación sobre industrias en México, Chile y Brasil, observó que la adopción de tecnologías de la I4.0 promovió el desarrollo de habilidades cognitivas y mejoró la inclusión laboral, ofreciendo más oportunidades a las mujeres debido a la menor exigencia de esfuerzo físico y a la creciente demanda de habilidades cognitivas avanzadas. Además, la implementación de nuevas tecnologías generó puestos de trabajo en áreas como inteligencia artificial, robótica e industria del *software*.

Diversas investigaciones han demostrado que las tecnologías de la información (TI) actúan como catalizadores que fomentan la digitalización y la automatización de los entornos laborales, estableciendo así bases fundamentales para una adopción exitosa del modelo productivo de la I4.0. Existe un consenso en que las empresas responden a la presión del entorno competitivo global, lo cual las impulsa a adoptar nuevas tecnologías en un esfuerzo por mejorar su posición en el mercado y mantener su competitividad. Este fenómeno ha sido ampliamente documentado en varios estudios (Dasgupta *et al.*, 1999; Gouvêa y Cunha, 2005; Singh *et al.*, 2008; Anaçoğlu, 2018; Nabukhotna y Zhygalkevych, 2022; Mohylna y Makarova, 2023).

En este sentido, Anaçoğlu (2018) realizó una investigación en Turquía con el objetivo de estimar el impacto de las TI en el rendimiento empresarial. Los resultados indican que la intensificación de la competencia global y la necesidad urgente de innovación son factores clave que impulsan a las empresas a adoptar nuevas tecnologías. En este contexto, Anaçoğlu afirma que la adopción de TI es esencial para sostener la competitividad y la productividad en los mercados contemporáneos. De manera similar, Singh *et al.* (2008) encontraron que las pymes en India enfrentan presiones para adoptar TI a fin de mantenerse competitivas en los mercados globales. Además, destacaron que estas tecnologías son fundamentales no solo por mejorar la eficiencia y productividad, sino también por optimizar la calidad y consistencia del rendimiento en los procesos de manufactura.

Por su parte, Stoyanov (2013), en su estudio realizado en Bulgaria, analiza la influencia de las TI en la gestión del cambio organizacional y en la optimización de los procesos empresariales. El estudio concluye que las TI son herramientas esenciales para facilitar cambios en los procesos de negocio, ya que promueven la adopción de prácticas de alta tecnología más eficientes. En este contexto, Mohylna y Makarova (2023) encontraron que, en el caso de las empresas de Ucrania, las TI ayudan a mejorar las condiciones de trabajo y la calidad de vida, además de aumentar significativamente la eficiencia productiva de las empresas. Así mismo, las autoras subrayan que la adopción tecnológica mejora la competitividad y la rentabilidad en el mercado.

En un estudio relevante realizado en Ucrania, Nabukhotna y Zhygalkevych (2022) examinan el impacto y la importancia de las TI en las actividades empresariales, con un enfoque particular en cómo estas tecnologías pueden mejorar la gestión y la eficiencia operativa de las empresas. Los autores destacan que las TI no solo aceleran la disponibilidad de información económica crucial para la toma de decisiones, sino que también facilitan su procesamiento, promoviendo así el desarrollo económico y fortaleciendo la competitividad en el contexto global. Así mismo, identificaron que las empresas implementan las TI con el objetivo de mejorar sus indicadores económicos y actualizar sistemas obsoletos.

Determinantes de la adopción tecnológica en las empresas

En cuanto a los factores determinantes de la adopción tecnológica, estudios realizados por autores como Dasgupta *et al.* (1999), Gouvêa y Cunha (2005) y Mohylna y Makarova (2023) han resaltado que la capacidad de las empresas para adoptar nuevas tecnologías con éxito está estrechamente vinculada a su tamaño. Esta observación es confirmada por Müller *et al.* (2018) en su estudio sobre la adopción de tecnologías de la I4.0. La razón subyacente es que las grandes empresas suelen contar con más recursos y una estructura organizacional más sólida, lo que facilita la integración y el aprovechamiento de las nuevas tecnologías.

Además, la cultura organizacional desempeña un papel fundamental en el proceso de adopción tecnológica. Esta cultura está intrínsecamente ligada a la disposición de la alta dirección para asumir riesgos y promover un entorno propicio para la innovación y la capacitación continua, elementos clave que facilitan la integración de nuevas tecnologías. Por otro lado, las investigaciones de Gouvêa y Cunha (2005) y Mohylna y Makarova (2023) han encontrado que las regulaciones gubernamentales que favorecen el desarrollo industrial actúan como habilitadores que incentivan a las empresas a adoptar ciertas tecnologías.

Gouvêa y Cunha (2005) señalan que la capacidad de innovación de las empresas es otro factor clave en la adopción tecnológica. En este sentido, las organizaciones con mayor capacidad organizativa tienden a adoptar nuevas tecnologías con mayor éxito. Así mismo, Dasgupta *et al.* (1999), en su estudio realizado en India, identificaron que la estructura del mercado influye significativamente en la capacidad de adopción tecnológica de las empresas. Observaron que las fluctuaciones en el tipo de cambio y en los precios de las computadoras impactan directamente en las decisiones empresariales relacionadas con el gasto en tecnología.

Por otro lado, Lee y Kim (2007) identifican y sintetizan los factores críticos que contribuyen al éxito en la adopción de sistemas de información basados en Internet. Entre los más significativos destacan la compatibilidad con los sistemas existentes y la infraestructura de sistemas de información. Según los autores, estos elementos son esenciales para facilitar una integración efectiva y eficiente de nuevas tecnologías en el entorno organizacional.

Explorando los desafíos de la adopción de la I4.0

Diversos autores han identificado una serie de desafíos que surgen al inicio de la transición hacia la I4.0, poniendo especial énfasis en el conocimiento necesario para alcanzar el éxito en esta transformación tecnológica. Según Gabriel y Pessl (2016), en el caso alemán sobresale la dificultad de atraer y retener trabajadores cualificados en las medianas empresas. En este contexto, Hecklau *et al.* (2016) señalan que la creación de oportunidades para que los trabajadores adquieran la formación adecuada y se garantice su empleabilidad representa uno de los desafíos fundamentales.

Por otro lado, tanto Carrillo *et al.* (2020) como Arredondo-Hidalgo y Caldera-González (2023) sugieren que los retrasos en la capacitación tanto de las empresas como de los trabajadores poco cualificados representan un desafío importante para la adopción exitosa de la I4.0. Así mismo, Ynzunza Cortés *et al.* (2017) advierten que la falta de dominio en áreas como programación, simulación y mantenimiento puede afectar los planes de implementación. Además, Safar *et al.* (2020) sostienen que el desconocimiento de los conceptos relacionados con la I4.0 por parte de la mano de obra potencial constituye uno de los principales obstáculos para el éxito de la transición hacia la Cuarta Revolución Industrial.

En relación con lo anterior, Benešová y Tupa (2017) destacan que la transición al modelo de producción de la I4.0 no podrá realizarse rápidamente, ya que la escasez de trabajadores cualificados y los elevados costos de implementación dificultan que las empresas puedan llevar a cabo esta transformación con facilidad. En este sentido, se anticipa que la adopción de la I4.0 se dará de forma gradual en la mayoría de las empresas. Computerworld España (2018) comparte una perspectiva similar al señalar que las pymes enfrentan mayores riesgos al adoptar las tecnologías de la I4.0. Aunque suelen ser más ágiles y flexibles que las grandes empresas, también se enfrentan a un importante riesgo económico al innovar, lo cual puede llevar a grandes pérdidas si no se gestiona adecuadamente. En este contexto, Singh *et al.* (2008) señalan que las pymes frecuentemente carecen de un enfoque estructurado para la gestión tecnológica. Es común que estas empresas no cuenten con planes estratégicos bien definidos para la adopción de tecnología, por lo que sus inversiones tienden a depender más de las decisiones de los propietarios que de análisis formales de costo-beneficio.

En cuanto a la adopción tecnológica en regiones en desarrollo, Chin (2004), a partir de un estudio realizado en tres empresas caribeñas, destaca que dicha adopción enfrenta obstáculos significativos debido a condiciones económicas inestables y a la escasez de recursos tecnológicos, financieros y de trabajadores calificados. Estos factores representan desafíos críticos que dificultan la transición tecnológica de las empresas en estas regiones.

Mohylna y Makarova (2023) identifican que, aunque la adopción inicial de tecnologías puede ser costosa, los costos operativos posteriores se limitan principalmente a los salarios de los especialistas y al costo de las actualizaciones de *software*. Esta significativa reducción en los costos operativos hace que la inversión en implementación sea más atractiva, especialmente en términos del tiempo necesario para alcanzar la rentabilidad. En muchos casos, esta eficiencia en la gestión de costos acelera el punto de equilibrio financiero, aumentando así el atractivo de adoptar nuevas tecnologías.

Por otro lado, Kinzel (2017) advierte que, en la mayoría de los casos, la planificación de nuevos sistemas de producción omite el factor humano en su diseño. Los sistemas tienden a enfocarse en procesos, algoritmos y análisis, con una motivación centrada en la tecnología por sí misma, mientras que el factor humano suele estar ausente en las especificaciones de los sistemas de la I4.0. Kinzel destaca que una considerable proporción de trabajadores está siendo excluida de los procesos productivos o, al menos, perciben esta exclusión. Por lo tanto, el autor subraya la importancia de la participación activa de los trabajadores en todos los procesos productivos, ya que ignorar el elemento humano en un sistema tan complejo como el de la I4.0 podría llevar al fracaso total del paradigma.

La importancia del conocimiento en la transición exitosa a la I4.0

Esta sección se enfoca en destacar la importancia de evaluar el grado de adopción de la I4.0 por parte de las empresas, así como la capacitación de los trabajadores en relación con este nuevo modelo industrial. En esta línea, autores como Albarrán Trujillo *et al.* (2020) sostienen que la utilidad y el dominio del conocimiento tecnológico deben evaluarse en función de las decisiones que este permite tomar, las cuales serán más acertadas si se cuenta con un entendimiento profundo. Por ello, en un entorno económico global competitivo, se enfatiza la importancia de adquirir destrezas y habilidades relacionadas con la I4.0. En este contexto, la transición hacia la fábrica inteligente subraya la relevancia fundamental del conocimiento y la competencia en las nuevas tecnologías, dado que el éxito empresarial está intrínsecamente ligado a ellas.

Ynzunza Cortés *et al.* (2017) resaltan la importancia del conocimiento en la I4.0, indicando que los trabajadores lo adquieren principalmente a través de la práctica. En esta línea, Sony y Naik (2019) encontraron que en la Unión Europea algunos altos directivos carecían de conocimiento sobre la I4.0 y, aunque ciertos líderes del sector tenían nociones al respecto, desconocían los métodos de implementación. De manera similar, al analizar empresas turcas, Sari *et al.* (2020) hallaron que, aunque los trabajadores conocían la I4.0, carecían de claridad en torno a las tecnologías asociadas. Los autores sugieren que disponer de un conocimiento exhaustivo podría ayudar a las empresas a elegir las tecnologías más adecuadas. Además, enfatizan que no basta con invertir en capital; es necesario también destinar recursos a la formación y contratación de personal cualificado, así como a la gestión estratégica para aprovechar plenamente los beneficios de la I4.0.

En relación con la adopción de la I4.0, Carrillo *et al.* (2020) indican que, dada su complejidad multifacética, las empresas adoptan sus tecnologías de forma diversa. Es importante destacar que la implementación se realiza en la práctica y requiere una inversión continua de todos los participantes. Por tanto, la planificación debe considerar las particularidades de cada caso, incluyendo el entorno organizativo, los recursos y los objetivos estratégicos (Martínez Martínez, 2020). En este sentido, Johny y Bhasi (2015) señalan que la adopción tecnológica puede enfrentar obstáculos debido a su inherente complejidad. Los autores describen la implementación tecnológica como un proceso multifacético que incluye diversas etapas, en el cual cualquier omisión puede generar ineficiencias e incertidumbre. Esto subraya la necesidad de que las

organizaciones sean meticulosas en la planificación y ejecución, asegurándose de que cada etapa se lleve a cabo con precisión para evitar contratiempos que comprometan la efectividad del proceso en su conjunto.

En este sentido, aunque para las pymes la transición hacia la I4.0 puede presentar complicaciones y generar gastos significativos, es esencial que adapten sus sistemas de producción existentes. Estos desafíos son particularmente complejos para las pequeñas empresas debido a su escala y recursos limitados (Buenrostro Mercado, 2022). Además de las limitaciones financieras, la adopción de la I4.0 también puede verse obstaculizada por otros factores. Por ejemplo, Martínez Martínez (2020) señala que la limitada capacidad de las empresas para adquirir infraestructuras tecnológicas específicas y emplear trabajadores con habilidades multidisciplinarias puede representar barreras importantes. Así mismo, Ynzunza Cortés *et al.* (2017) sostienen que el progreso en la adopción de la I4.0 está vinculado a la capacidad de las empresas para fomentar la interconexión mediante redes que permitan establecer sistemas de producción adaptables, integren las cadenas de valor y optimicen los procedimientos internos. Estos autores también destacan la importancia de abordar la seguridad, realizar una inversión tecnológica considerable y adquirir habilidades para gestionar y analizar la información. Gökalp *et al.* (2017) complementan estos planteamientos al subrayar la necesidad de especificar de manera clara y concisa las directrices, métodos y estructuras a seguir durante la etapa de desarrollo de la I4.0.

Dado el papel crucial que desempeña el dominio tecnológico para avanzar hacia una adopción completa de la I4.0, y considerando la escasez de investigaciones en este campo, resulta esencial realizar estudios que permitan profundizar en la comprensión de su adopción.

METODOLOGÍA

La estrategia metodológica propuesta para la investigación es de naturaleza cuantitativa. Desde un enfoque comparativo, se estima y analiza el nivel de adopción y dominio de las tecnologías asociadas a la I4.0 en empresas manufactureras y sus proveedores en las localidades de Tijuana y Ciudad Juárez. Para ello, se emplearon los resultados de la encuesta I4.0 desarrollada por el Instituto AXIS (AXIS Centro de Inteligencia Estratégica, 2019), la cual fue aplicada inicialmente en Tijuana y, posteriormente, en Ciudad Juárez, utilizando el instrumento de medición de Arriola Ruiz (2024).

El análisis se realizó considerando tres variables: 1) el nivel de conocimiento sobre las tecnologías relacionadas con la I4.0 por parte de los trabajadores de las empresas manufactureras; 2) el nivel de implementación de las tecnologías de la I4.0 en las empresas donde laboran los trabajadores encuestados; y 3) la intención de implementar dichas tecnologías. La empresa fue la unidad de análisis, y los trabajadores calificados fueron la fuente de información, a quienes se preguntó sobre la empresa en la que trabajan y su conocimiento acerca de las tecnologías. En el cuadro 1 se detallan las variables para las que se recolectaron datos, incluyendo el número de ítems por cada variable y el tipo de escala de medición empleada. En el cuadro 2 se presentan las tecnologías consideradas, junto con su categorización según el tipo, nivel de complejidad para el usuario y grado de novedad industrial.

Cuadro 1. Variables, número de ítems y escalas

Variable	Ítems	Escala de medición
Nivel de conocimiento de las tecnologías de la I4.0	19	Desde 1 = desconozco totalmente hasta 5 = soy experto en el tema
Nivel de implementación de las tecnologías de la I4.0	19	Desde 1 = no se implementa hasta 5 = se implementa totalmente
Intención de implementar las tecnologías de la I4.0 por área de la empresa	9	1 = sí lo considero conveniente 0 = no lo considero conveniente

Fuente: Elaboración propia con base en AXIS Centro de Inteligencia Estratégica (2019) y Arriola Ruiz (2024).

Para las variables relacionadas con el dominio y la adopción de las tecnologías de la I4.0, se utilizó una escala Likert de cinco puntos. Respecto a la variable que mide la disposición para adoptar estas tecnologías en distintas áreas de la empresa, se empleó una escala dicotómica que identifica las áreas específicas donde los empleados consideran apropiada su incorporación.

Cuadro 2. Categorización de tecnologías por tipo, complejidad para el usuario y novedad industrial

Tecnología	Tipo de tecnología	Nivel de complejidad para el usuario	Nivel de novedad industrial
Manufactura aditiva (impresión 3D)	Tangible	Bajo	Bajo
Aprendizaje de máquina	Intangible	Alto	Alto
Realidad aumentada	Intangible	Medio	Medio
Realidad virtual	Intangible	Medio	Bajo
Robots autónomos	Tangible	Medio	Medio
Robots colaborativos	Tangible	Medio	Medio
Análisis de datos masivos	Intangible	Alto	Medio
Vehículos autoguiados	Tangible	Bajo	Bajo
Computación en la nube	Intangible	Bajo	Medio
Cadena de bloques	Intangible	Alto	Alto
Esquemas de ciberseguridad	Intangible	Medio	Medio
Internet de las cosas	Intangible	Bajo	Medio
Visión computacional	Tangible	Alto	Medio
Detección (<i>sensing</i>) y colección digital de datos	Tangible	Bajo	Bajo
Simulación avanzada / modelado digital	Intangible	Bajo	Bajo
Integración horizontal y vertical de <i>software</i>	Intangible	Medio	Medio
Gemelo digital	Intangible	Alto	Alto
Monitoreo de procesos en tiempo real	Tangible	Medio	Bajo
Manejo inteligente de energía	Intangible	Medio	Medio

Fuente: Elaboración propia con base en AXIS Centro de Inteligencia Estratégica (2019, p. 55) y Arriola Ruiz (2024).

Recolección de datos

En Tijuana, el cuestionario fue enviado a 4 500 trabajadores calificados de empresas manufactureras, de los cuales respondieron 164; tras una depuración, se aceptaron 124 como respuestas válidas.⁴ Este cuestionario fue administrado en línea durante junio de 2019. En Ciudad Juárez, la encuesta se aplicó durante la pandemia de COVID-19, entre agosto de 2020 y febrero de 2021, obteniendo 192 respuestas, de las cuales 92 fueron consideradas válidas. En el cuadro 3 se detalla el perfil de los encuestados según su posición laboral y el sector industrial de las empresas.

La muestra obtenida se compone de respuestas de trabajadores que desempeñan roles organizacionales específicos, como ingenieros, gerentes, directores, jefes de departamento y técnicos, en departamentos de producción, ingeniería, calidad y cadena de suministros. Es importante hacer esta precisión, ya que las respuestas corresponden exclusivamente a empleados calificados que están en contacto con las tecnologías de la I4.0, y no a la totalidad de los trabajadores. Para el caso de Tijuana, los resultados generales de la encuesta pueden encontrarse en el sitio web del Instituto AXIS (AXIS Centro de Inteligencia Estratégica, 2019), y los resultados específicos en Carrillo *et al.* (2020, 2022). En cuanto a Ciudad Juárez, los resultados están disponibles en Arriola Ruiz (2022).

En el cuadro 3 se presentan algunas diferencias importantes entre las regiones estudiadas. Por ejemplo, mientras que en Tijuana una tercera parte de los encuestados correspondía a gerentes, en la muestra de Ciudad Juárez los trabajadores con este puesto apenas representaban el siete por ciento. Ocurría lo contrario en el caso de los técnicos, quienes constituían el 32 por ciento en Juárez frente a un escaso dos por ciento en Tijuana. En cuanto a los sectores, también se observan composiciones contrastantes: en Juárez, un tercio de los encuestados pertenecía a empresas del sector automotriz, mientras que en Tijuana una proporción similar trabajaba en el sector de dispositivos médicos. Aunque resulta difícil determinarlo con precisión, es probable que estas diferencias tengan alguna incidencia en los resultados obtenidos.

Cuadro 3. Muestra de trabajadores por puesto y sector industrial

Perfiles		Ciudad		Total
		Tijuana (frecuencia)	Ciudad Juárez (frecuencia)	
Puesto organizacional	Técnico	3	29	32
	Ingeniero	44	25	69
	Jefe de departamento	24	8	32
	Gerente	38	6	44
	Directivo	9	4	13
	Otro	6	18	24
	No contestó	0	2	2
Total		124	92	216

(continúa)

⁴ Se consideraron válidas aquellas respuestas que no presentaron inconsistencias estadísticas, como la selección de la misma opción en todos los ítems, cuestionarios duplicados o con información incompleta.

Perfiles	Ciudad		Total	
	Tijuana (frecuencia)	Ciudad Juárez (frecuencia)		
<i>(continuación)</i>				
Sector industrial	Eléctrico / electrónico	21	17	38
	Automotriz	12	30	42
	Aeroespacial	6	0	6
	Dispositivos médicos	38	15	53
	Plásticos	17	7	24
	Metalmecánica	12	4	16
	Servicios técnicos y tecnológicos	9	9	18
	Otro	9	9	18
	No contestó	0	1	1
	Total	124	92	216

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados de las encuestas realizadas en Tijuana y Ciudad Juárez (AXIS Centro de Inteligencia Estratégica, 2019; Carrillo *et al.*, 2020, 2022; Arriola Ruiz, 2022, 2024).

Limitaciones de la investigación

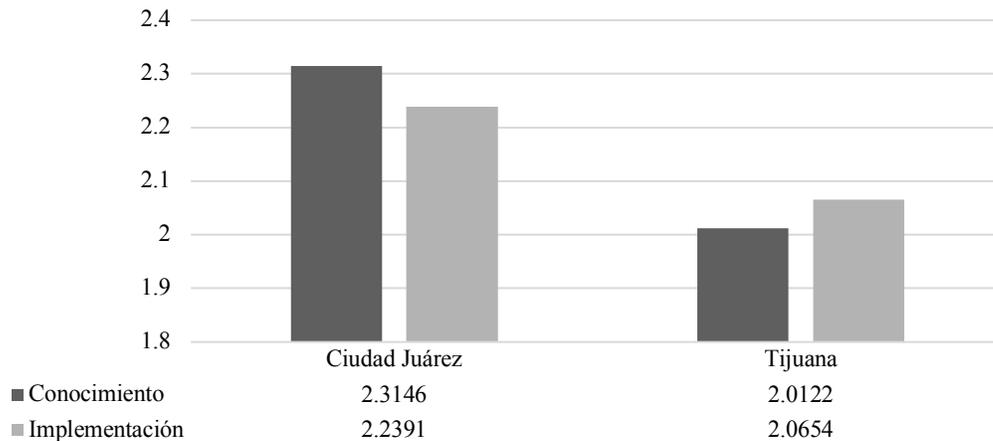
Aunque esta investigación se centra en Tijuana y Ciudad Juárez por ser dos importantes enclaves industriales, estas ciudades representan solo una parte de la industria manufacturera de México, por lo que los hallazgos podrían no ser generalizables. Además, dado que el enfoque del instrumento de medición es estimar la percepción de los trabajadores respecto a la adopción y el dominio de las tecnologías de la I4.0, es importante reconocer que las respuestas reflejan las opiniones de los participantes, lo cual introduce una dimensión subjetiva en esta investigación.

RESULTADOS

Los resultados generales muestran que tanto los trabajadores como las empresas en ambas localidades presentan niveles limitados de dominio y adopción de las tecnologías de la I4.0. No obstante, los trabajadores de Ciudad Juárez exhiben un mayor nivel de dominio tecnológico, y sus empresas muestran niveles ligeramente superiores en la adopción de estas tecnologías.

En la gráfica 1 se muestran puntuaciones modestas en el grado de adopción de las tecnologías de la I4.0 en las empresas de Ciudad Juárez (promedio de 2.01) y de Tijuana (promedio de 2.06), acompañadas de valoraciones bajas en la capacitación de sus empleados (2.31 en Ciudad Juárez y 2.24 en Tijuana). Esta clasificación cumple con el siguiente criterio: un promedio inferior a 2.33 se considera bajo; entre 2.33 y 3.66, medio; y superior a 3.66, alto.

Gráfica 1. Niveles de conocimiento e implementación de las tecnologías de la I4.0



Nota: Este dato refleja el promedio de las respuestas de los entrevistados respecto a su nivel de dominio, así como el grado de adopción de las tecnologías de la I4.0 en las empresas. Aquí, uno indica el nivel más bajo tanto de dominio como de adopción, mientras que cinco representa el nivel más alto en ambas categorías.

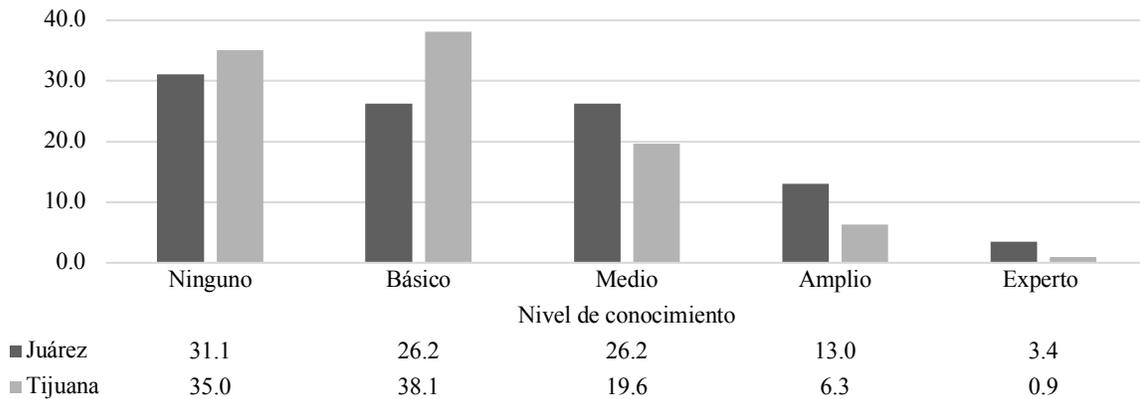
Fuente: Elaboración propia con base en los resultados de las encuestas realizadas en Tijuana y Ciudad Juárez (AXIS Centro de Inteligencia Estratégica, 2019; Carrillo *et al.*, 2020, 2022; Arriola Ruiz, 2022, 2024).

Nivel de conocimiento acerca de las tecnologías de la I4.0

A pesar de que el conocimiento sobre la I4.0 es limitado en ambas ciudades, los trabajadores de las empresas en Ciudad Juárez demostraron estar mejor capacitados para manejar estas tecnologías en comparación con sus pares en Tijuana. Aunque en Ciudad Juárez se observa una menor proporción de trabajadores con niveles de conocimiento básico o nulo sobre la I4.0, también presenta una mayor proporción de empleados con un grado de conocimiento medio o superior. Además, Ciudad Juárez cuenta con más del triple de trabajadores que han reportado el nivel más alto de preparación en las tecnologías de la I4.0.

Según lo que se muestra en la gráfica 2, la mayoría de los empleados (57.3 % en Ciudad Juárez y 73.1 % en Tijuana) reportan tener un nivel de conocimiento básico o nulo sobre las tecnologías asociadas a la I4.0. Aproximadamente uno de cada cuatro trabajadores en Juárez considera tener un conocimiento medio sobre la I4.0, mientras que en Tijuana esta proporción equivale a uno de cada cinco. Por otro lado, en ambas ciudades, solo una pequeña proporción de trabajadores (16.4 % en Juárez y 10.2 % en Tijuana) se consideran con amplio conocimiento o expertos en la I4.0.

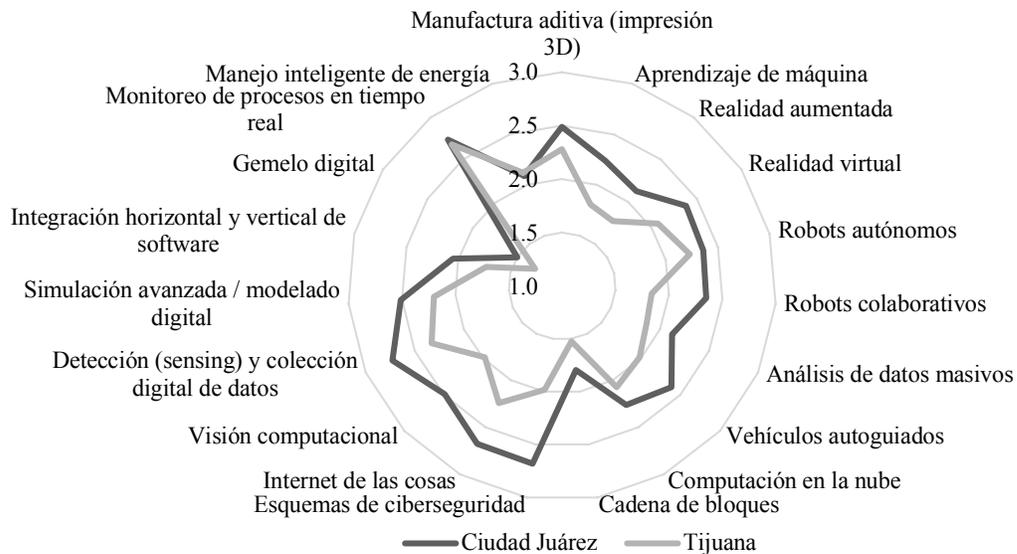
Gráfica 2. Nivel de conocimiento de las tecnologías de la I4.0 (porcentajes)



Fuente: Elaboración propia con base en los resultados de las encuestas realizadas en Tijuana y Ciudad Juárez (AXIS Centro de Inteligencia Estratégica, 2019; Carrillo *et al.*, 2020, 2022; Arriola Ruiz, 2022, 2024).

Si el análisis se enfocara en el conocimiento específico de cada tecnología de la I4.0, en lugar de considerar el conocimiento general y agregado, podrían observarse tendencias marcadas. En la gráfica 3 se muestra la distribución del conocimiento sobre las 19 tecnologías evaluadas. Aunque el comportamiento es similar en ambas regiones, Ciudad Juárez presenta puntajes de conocimiento más altos en todas las tecnologías, excepto en la gestión inteligente de energía, donde Tijuana supera ligeramente a Juárez.

Gráfica 3. Promedio de conocimiento de la I4.0 por tecnología, Ciudad Juárez vs. Tijuana



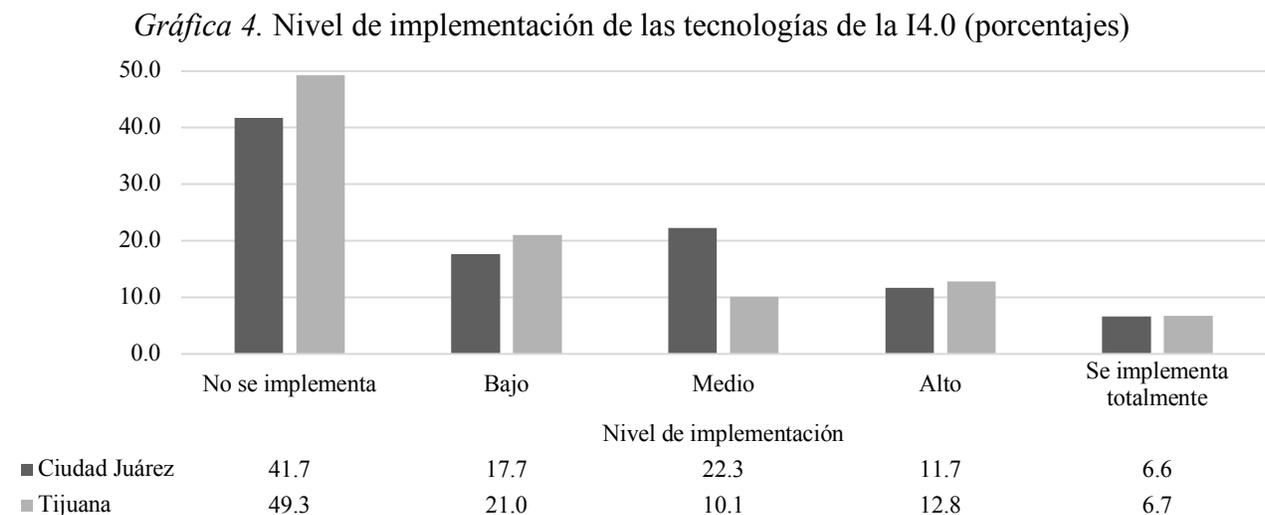
Fuente: Elaboración propia con base en los resultados de las encuestas realizadas en Tijuana y Ciudad Juárez (AXIS Centro de Inteligencia Estratégica, 2019; Carrillo *et al.*, 2020, 2022; Arriola Ruiz, 2022, 2024).

En este contexto, los trabajadores encuestados en Juárez se destacaron por demostrar un mayor dominio en las tecnologías de monitoreo de procesos en tiempo real; detección (*sensing*) y colección digital de datos; esquemas de ciberseguridad; Internet de las cosas; simulación avanzada/modelado digital; y manufactura aditiva (impresión 3D). Por el contrario, las tecnologías que mostraron los puntajes más bajos de conocimiento fueron gemelo digital; cadena de bloques; integración horizontal y vertical de *software*, y manejo inteligente de energía.

En lo que respecta a los trabajadores de Tijuana, estos manifestaron un mayor dominio en tecnologías como monitoreo de procesos en tiempo real; detección (*sensing*) y colección digital de datos; manufactura aditiva (impresión 3D); Internet de las cosas, y robots autónomos. Por otro lado, las tecnologías que exhibieron los puntajes más bajos de conocimiento fueron gemelo digital; cadena de bloques; integración horizontal y vertical de *software*, y realidad aumentada.

Nivel de implementación de tecnologías de la I4.0

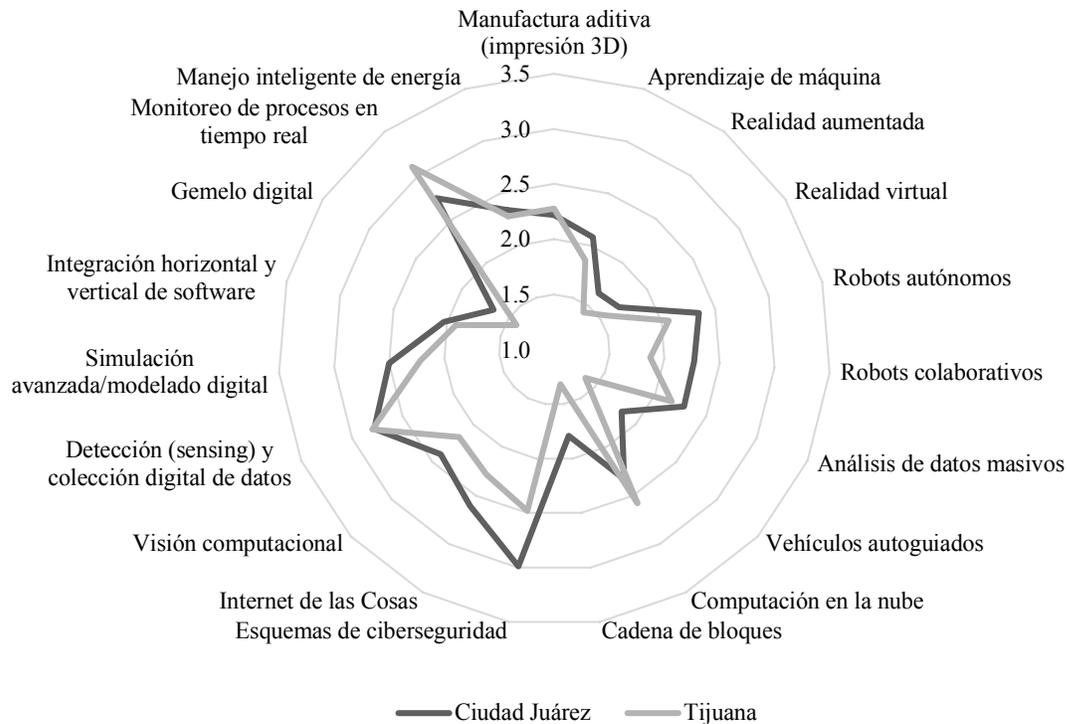
Consistente con los bajos puntajes en el dominio de las tecnologías asociadas a la I4.0, las empresas también muestran niveles bajos de adopción de estas tecnologías. La gráfica 4 revela que casi la mitad de las tecnologías de la I4.0 (41.7 % en Juárez y 49.3 % en Tijuana) no están siendo implementadas en ninguna de las dos regiones, mientras que solo una proporción marginal de estas tecnologías (6.6 % en Juárez y 6.7 % en Tijuana) se implementa de manera completa. Una proporción significativa (51.7 % en Juárez y 43.9 % en Tijuana) corresponde a tecnologías que se encuentran en alguna etapa temprana de adopción o que están en proceso de ser implementadas por completo.



Fuente: Elaboración propia con base en los resultados de las encuestas realizadas en Tijuana y Ciudad Juárez (AXIS Centro de Inteligencia Estratégica, 2019; Carrillo *et al.*, 2020, 2022; Arriola Ruiz, 2022, 2024).

En la gráfica 5 se aprecia que las empresas de Juárez y Tijuana presentan patrones similares de adopción tecnológica relacionada con la I4.0. Ciudad Juárez lidera en la adopción de la mayoría de las tecnologías, excepto en las de monitoreo de procesos en tiempo real; manufactura aditiva (impresión 3D); detección (*sensing*) y colección digital de datos, y computación en la nube.

Gráfica 5. Promedio de implementación de la I4.0 por tecnología, Ciudad Juárez vs. Tijuana



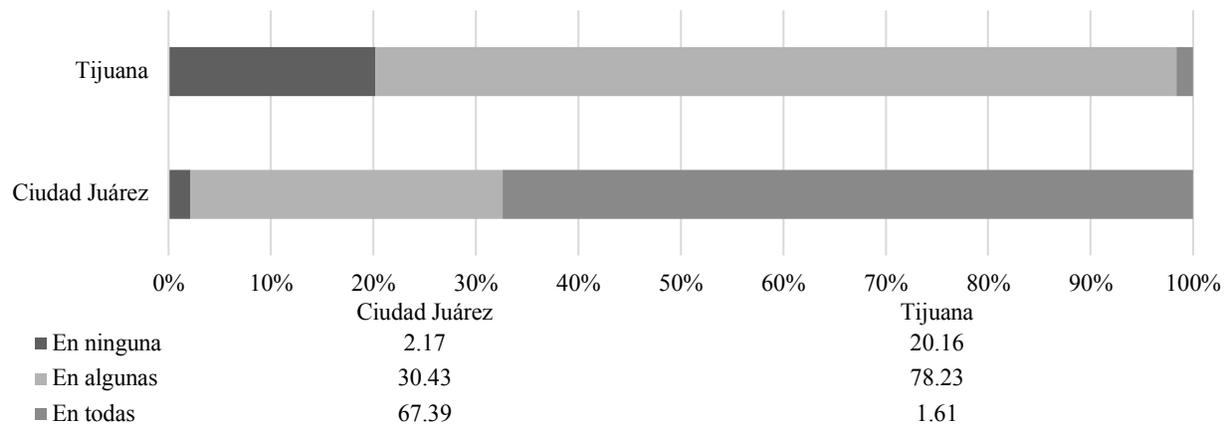
Fuente: Elaboración propia con base en los resultados de las encuestas realizadas en Tijuana y Ciudad Juárez (AXIS Centro de Inteligencia Estratégica, 2019; Carrillo *et al.*, 2020, 2022; Arriola Ruiz, 2022, 2024).

En cuanto a la medida de la adopción por tecnología, las que registraron el mayor índice de adopción en ambas localidades fueron monitoreo de procesos en tiempo real; detección (*sensing*) y colección digital de datos; esquemas de ciberseguridad, y computación en la nube. Por otro lado, las que mostraron el menor índice de adopción fueron gemelo digital; realidad aumentada; cadena de bloques; vehículos autoguiados, y realidad virtual. A diferencia de las disparidades en los índices de conocimiento entre Juárez y Tijuana, las diferencias en los niveles de implementación entre ambas ciudades no son tan pronunciadas.

Nivel de disposición en torno a la adopción tecnológica por área de la empresa

Otra dimensión relevante para la cual se recopilaron datos fue el nivel de disposición de los trabajadores hacia la incorporación de tecnologías relacionadas con la I4.0, no de manera general, sino en áreas específicas de la empresa. En la gráfica 6 se observan diferencias en la percepción de los empleados de empresas en Ciudad Juárez y Tijuana. Para determinar una posible asociación entre las muestras de ambas localidades, se aplicó la prueba de Chi-cuadrado de Pearson. En este estudio, un valor-p menor a 0.001 indica una asociación estadísticamente significativa entre las muestras de Ciudad Juárez y Tijuana. Esto sugiere que la disposición hacia la implementación de tecnologías de la I4.0 en distintas áreas está significativamente influida por la ubicación geográfica de los trabajadores.

Gráfica 6. Porcentaje de las áreas en las que se estima conveniente la implementación de las tecnologías de la I4.0



Nota: Estas diferencias son estadísticamente significativas en 99.9 por ciento (valor-p=0.000 en la prueba de Chi-cuadrado).

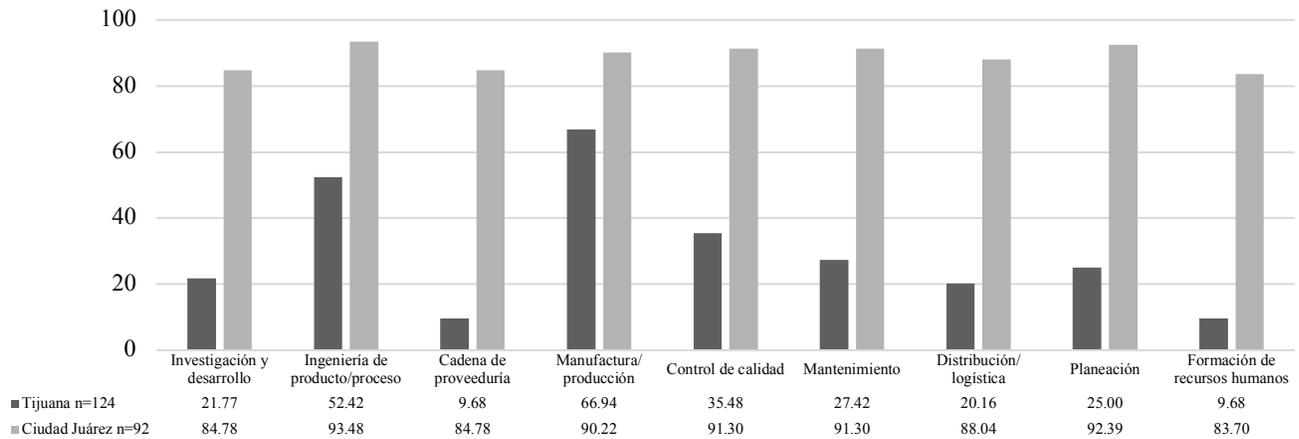
Fuente: Elaboración propia con base en los resultados de las encuestas realizadas en Tijuana y Ciudad Juárez (AXIS Centro de Inteligencia Estratégica, 2019; Carrillo *et al.*, 2020, 2022; Arriola Ruiz, 2022, 2024).

En términos generales, la mayoría de los trabajadores de Tijuana (78.23 %) sostiene que la I4.0 debería adoptarse solo en algunas áreas de la empresa; una pequeña proporción (1.61 %) considera que debería implementarse en todas las áreas, mientras que uno de cada cinco trabajadores opina que las tecnologías de la I4.0 no deberían adoptarse en ninguna área de la empresa.

En contraste, la mayoría de los trabajadores de Ciudad Juárez (67.39 %) considera que las tecnologías de la I4.0 deberían adoptarse en todas las áreas de la empresa. Una proporción significativa (30.43 %) opina que estas tecnologías solo deberían implementarse en algunas áreas de la empresa, mientras que una pequeña minoría (2.17 %) cree que no deberían adoptarse en ninguna área.

En la gráfica 7 se muestra la proporción de empleados que estuvieron de acuerdo con la implementación de tecnologías de la I4.0 en diversas áreas de la empresa. Para evaluar la existencia de una asociación entre las muestras de Juárez y Tijuana, se aplicó la prueba de Chi-cuadrado de Pearson y la prueba exacta de Fisher. Según Hae-Young (2017), esta última es recomendable cuando más del 20 por ciento de las celdas presentan frecuencias esperadas inferiores a cinco, ya que en estos casos la aproximación del Chi-cuadrado puede ser inadecuada. Ambas pruebas se aplicaron en todas las áreas de la empresa, encontrando en todos los casos evidencia de una asociación estadísticamente significativa entre las muestras de Juárez y Tijuana, con un nivel de confianza del 99.9 por ciento. Esto indica que la decisión de adoptar tecnologías de la I4.0 en áreas específicas de la empresa no es independiente de la ubicación geográfica de los trabajadores. En otras palabras, las diferencias geográficas entre Juárez y Tijuana parecen influir significativamente en cómo y dónde se adoptan estas tecnologías dentro de las empresas.

Gráfica 7. Porcentaje de áreas donde se estima conveniente implementar las tecnologías de I4.0



Nota: Se encontraron diferencias (asociación) estadísticamente significativas en todas las áreas en el nivel de 99.9 por ciento (valor-p=0.000 en la prueba de Chi-cuadrado y prueba exacta de Fisher).

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados de las encuestas realizadas en Tijuana y Ciudad Juárez (AXIS Centro de Inteligencia Estratégica, 2019; Carrillo *et al.*, 2020, 2022; Arriola Ruiz, 2022, 2024).

Estos resultados revelan diferencias entre las opiniones de los trabajadores de Juárez y Tijuana. En términos generales, los trabajadores de Ciudad Juárez muestran un alto nivel de acuerdo, que oscila entre el 83.7 por ciento y el 93.5 por ciento, respecto a la adopción de tecnologías de la I4.0 en diversas áreas de la empresa. En cambio, los trabajadores de Tijuana tienden a oponerse a esta adopción en la mayoría de las áreas. Es destacable que las áreas de manufactura y producción (66.94 %) e ingeniería de producto (52.48 %) son las que más apoyo reciben entre los trabajadores de Tijuana para la adopción de tecnologías de la I4.0. Así mismo, los trabajadores de Tijuana opinan que las áreas en las que no deberían implementarse estas tecnologías son la cadena de proveeduría (9.68 %) y la formación de recursos humanos (9.68 %).

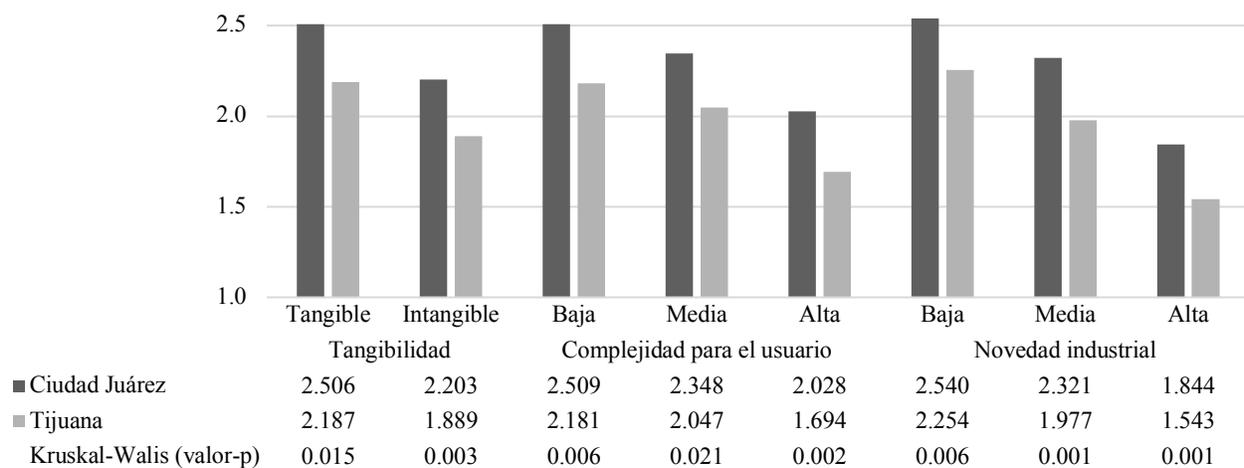
En síntesis, es importante destacar la marcada disparidad en las perspectivas de los trabajadores de ambas regiones. Mientras que en Juárez se favorece una transformación industrial integral, en Tijuana, en cambio, los trabajadores adoptan una postura más moderada y selectiva respecto al proceso de adopción tecnológica de la I4.0.

Niveles de conocimiento e implementación por tipo de tecnología

En relación con la medida del conocimiento y la implementación de tecnologías de la I4.0 según su tipo, complejidad para el usuario y nivel de novedad industrial (cuadro 2), se observa que las tecnologías con mayores índices de conocimiento y adopción tienden a ser tangibles, con una complejidad moderada-baja para el usuario y un nivel de novedad industrial también moderado-bajo. En contraste, las tecnologías con los índices más bajos en dominio y adopción suelen ser intangibles, con un grado de complejidad medio-alto para el usuario y un nivel de novedad industrial medio-alto.

En la gráfica 8 se muestran los puntajes de dominio tecnológico declarados por los trabajadores según el tipo de tecnología para ambas ciudades. Se encontró que los trabajadores de Ciudad Juárez presentan niveles más altos de competencia para ambos tipos de tecnología, así como en todos los niveles de complejidad para el usuario y en todos los niveles de novedad industrial. Para detectar diferencias entre las muestras de Ciudad Juárez y Tijuana, se aplicó la prueba Kruskal-Wallis. Según Ostertagová *et al.* (2014), esta prueba es útil como una evaluación no paramétrica general para comparar muestras independientes, permitiendo determinar si dichas muestras provienen de la misma distribución. Cabe destacar que se identificaron diferencias estadísticamente significativas en todos los rubros analizados, lo cual sugiere que los trabajadores de Juárez están mejor preparados para manejar las tecnologías asociadas con la I4.0 en comparación con los trabajadores de Tijuana.

Gráfica 8. Puntaje promedio de respuestas acerca del conocimiento sobre las tecnologías de la I4.0 por tipo, nivel de complejidad para el usuario y nivel de novedad industrial

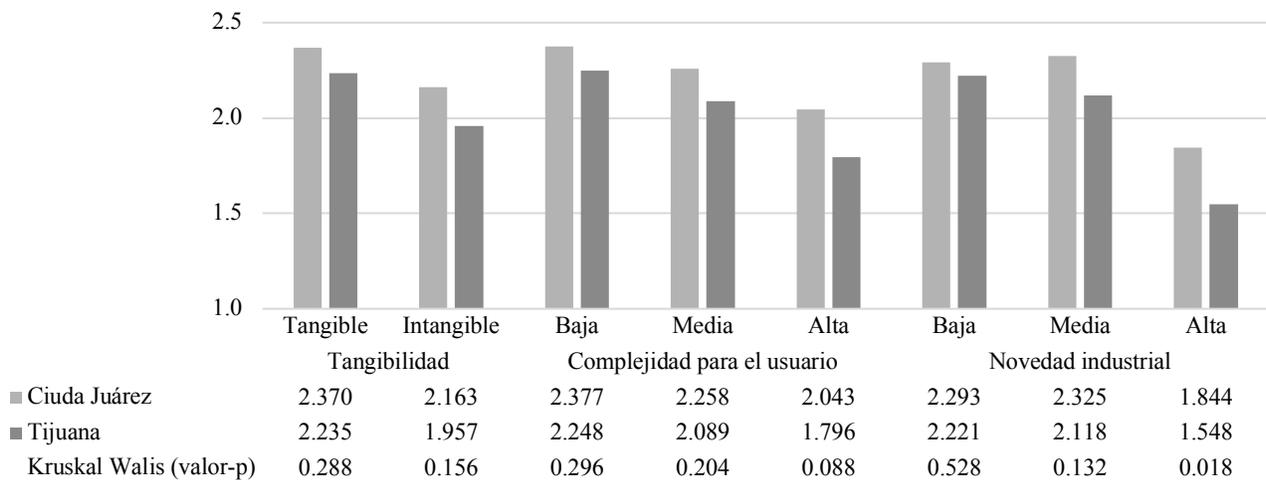


Fuente: Elaboración propia con base en los resultados de las encuestas realizadas en Tijuana y Ciudad Juárez (AXIS Centro de Inteligencia Estratégica, 2019; Carrillo *et al.*, 2020, 2022; Arriola Ruiz, 2022, 2024).

Desde otra perspectiva, la adopción de tecnologías vinculadas a la I4.0 en las empresas sigue, en general, un patrón diferente al del dominio tecnológico. En la gráfica 9 se muestra el índice de adopción tecnológica según el tipo de tecnología, nivel de complejidad para el usuario y nivel de novedad industrial. Aunque los datos indican que las empresas en Juárez presentan un índice de adopción tecnológica superior en todos los aspectos considerados, mediante la prueba de Kruskal-Wallis solo se identificaron diferencias estadísticamente significativas en las tecnologías con un alto nivel de complejidad para el usuario⁵ y en aquellas con un alto nivel de novedad industrial.⁶

A partir de los resultados obtenidos, se puede concluir que los trabajadores en Juárez están mejor preparados para abordar las tecnologías de la I4.0. Sin embargo, en cuanto a la adopción tecnológica, las empresas de ambas regiones no presentan diferencias significativas. Aunque Juárez se destaca en la adopción de tecnologías de alta complejidad para el usuario y de gran novedad industrial, esta ventaja parece ser marginal, ya que no se observa una diferencia notable en la adopción del resto de las tecnologías.

Gráfica 9. Puntaje promedio de respuestas sobre la adopción de tecnologías de la I4.0 por tipo, nivel de complejidad para el usuario y nivel de novedad industrial



Fuente: Elaboración propia con base en los resultados de las encuestas realizadas en Tijuana y Ciudad Juárez (AXIS Centro de Inteligencia Estratégica, 2019; Carrillo *et al.*, 2020, 2022; Arriola Ruiz, 2022, 2024).

⁵ Las tecnologías identificadas con un nivel alto de complejidad para el usuario son: aprendizaje de máquina, análisis de datos masivos, cadena de bloques, visión computacional y gemelo digital (cuadro 2).

⁶ Las tecnologías consideradas con un alto nivel de novedad industrial son: aprendizaje de máquina, cadena de bloques y gemelo digital (cuadro 2).

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En México, Juárez y Tijuana son ciudades a la vanguardia en la tecnificación de su producción; sin embargo, aún queda un largo camino para lograr una transición completa al modelo de producción de la I4.0. Además, los trabajadores todavía carecen de las competencias necesarias para dominar plenamente las tecnologías asociadas con la Cuarta Revolución Industrial.

Las disparidades en la adopción de tecnologías asociadas a la I4.0 se deben principalmente a varios factores críticos: el sector industrial específico al que pertenece cada empresa, las características particulares de los productos que fabrica y su capacidad financiera para incorporar innovaciones tecnológicas (Müller *et al.*, 2018; Carrillo *et al.*, 2020; Martínez Martínez, 2020). En este sentido, es raro encontrar empresas que adopten de manera integral todo el espectro de tecnologías disponibles. Más bien, la tendencia observada es que las empresas implementan selectivamente aquellas tecnologías que mejor se alinean con sus objetivos de productividad, flexibilidad y reducción de costos.

Desde esta perspectiva, se puede argumentar que el éxito de las empresas en el proceso de adopción de la I4.0 radica en su capacidad para seleccionar tecnologías que les permitan alcanzar la autonomía en su producción. En otras palabras, la adopción exitosa del modelo productivo de la I4.0 no se basa en la implementación de un gran número de tecnologías, sino en la adopción estratégica de un conjunto selecto que contribuya a la autonomía en uno o varios procesos de manufactura, ya sea para resolver problemas específicos o para hacer más eficientes los procesos.

Los hallazgos generales de la investigación indican que los trabajadores en ambas ciudades tienen un dominio limitado de las tecnologías vinculadas a la I4.0; del mismo modo, las empresas manufactureras de ambas regiones muestran niveles igualmente limitados de adopción de estas tecnologías. En este contexto, otros estudios centrados en México (Riquelme, 2019; AXIS Vantage Point, 2019) han revelado que el país se encuentra rezagado en la adopción de la I4.0. Según Ynzunza Cortés *et al.* (2017), esta situación se debe principalmente a las significativas brechas tecnológicas y de conectividad que aún persisten. Un argumento similar se presenta en el reporte del Network Readiness Index (Dutta y Lanvin, 2021), que señala que los niveles de inclusión y confianza tecnológica del país son deficientes. Además, el mismo reporte en 2023 subraya que México necesita ampliar la adopción e inversión en tecnologías emergentes, mejorar el acceso y la asequibilidad de la infraestructura de Internet. También enfatiza la importancia de fortalecer las competencias digitales tanto de la población en general como del sector empresarial para incrementar su integración y participación en la economía digital (Dutta y Lanvin, 2023).

En cuanto a las diferencias encontradas entre Tijuana y Ciudad Juárez, destaca que los trabajadores de Ciudad Juárez muestran un grado superior de dominio tecnológico en comparación con los empleados de Tijuana. De manera similar, aunque las empresas de ambas ciudades presentan bajos índices de adopción de tecnologías de la I4.0, es notable el desempeño de las empresas de Juárez en la adopción de tecnologías de alta complejidad para el usuario y alta novedad industrial. Sin embargo, la ventaja de las empresas de Juárez frente a las de Tijuana resulta marginal.

En consonancia con este resultado, un estudio realizado por Martínez Martínez *et al.* (2023) en empresas manufactureras de Guanajuato reveló una marcada heterogeneidad en la adopción de tecnologías avanzadas y en las políticas de recursos humanos en el sector manufacturero mexicano. Las autoras señalan que, mientras algunas empresas están invirtiendo fuertemente en talento tecnológico, otras siguen operando con modelos de negocio más tradicionales.

Por otro lado, se destaca que, en el caso de Juárez, existe un gran interés por adoptar las tecnologías de la I4.0 en todas las áreas de la empresa, lo que sugiere que las empresas de esta región podrían acelerar su transición hacia la I4.0 en el corto plazo.

Por último, se concluye que el conocimiento de las tecnologías relacionadas con la I4.0 desempeña un papel crucial en su implementación dentro de las empresas. Esta conclusión se hace evidente al analizar las diferencias en el dominio tecnológico entre los trabajadores de Juárez y los de Tijuana. En comparación con sus contrapartes de Juárez, los trabajadores de Tijuana muestran un nivel inferior de conocimiento en todas las tecnologías evaluadas. Además, estos trabajadores sostienen que las tecnologías de la I4.0 no deberían implementarse en todas las áreas de la empresa, abogando por una focalización selectiva, principalmente en áreas de producción, como manufactura e ingeniería del producto.

En contraste, los trabajadores de Ciudad Juárez demuestran un mayor dominio relativo en todas las tecnologías analizadas y abogan por la adopción de tecnologías de la I4.0 en todas las áreas de la empresa. Este hallazgo sugiere que el conocimiento avanzado de estas tecnologías impulsa su adopción, ya que proporciona a los trabajadores una comprensión clara de cómo pueden mejorar la productividad y facilitar las tareas laborales. Esto refuerza la idea de que la adopción tecnológica complementa y potencia el trabajo humano en lugar de reemplazarlo. Autores como Rajnai y Kocsis (2017) y Raso Delgue (2018) han encontrado resultados en la misma línea y cuestionan la visión de que la tecnología sustituye el trabajo humano mediante la automatización y la computarización, sostenida por autores como Frey y Osborne (2017).

En este contexto, Arredondo-Hidalgo y Caldera-González (2023), en su estudio sobre la IA en pymes mexicanas, encontraron que, si bien esta tecnología puede aumentar la eficiencia y competitividad de las empresas, también podría llevar a la reducción de la plantilla laboral. Los autores subrayan que cualquier dinámica de sustitución laboral debe abordarse de forma ética y responsable, implicando la reasignación y actualización de habilidades, en lugar de reducir costos a través del despido de empleados.

Por otro lado, Arriola Ruiz (2022) observa que, en el caso de las empresas de Ciudad Juárez, la estrecha relación entre el dominio de las tecnologías de la I4.0 por parte de los trabajadores y el nivel de adopción de estas tecnologías podría explicarse por los esfuerzos conscientes de estas empresas para contratar personal capacitado en su manejo. Así, la conexión entre el dominio y la adopción de la I4.0 en estas empresas puede atribuirse a sus estrategias de tecnificación y contratación.

Varios autores han explorado el fenómeno del rechazo tecnológico por parte de los trabajadores, cuyos argumentos ayudan a comprender mejor la variabilidad en los niveles de aceptación tecnológica entre los empleados de Tijuana y Ciudad Juárez. Azizah y Susanto (2016), a través de una extensa revisión de la literatura, identificaron diversos factores que influyen en la aceptación de la tecnología por parte de los trabajadores, incluyendo aspectos relacionados con el conocimiento y el dominio de las tecnologías. Además, destacaron que el diseño de la tecnología, específicamente el aspecto visual de las páginas de inicio de los sitios web, puede influir significativamente en la percepción y aceptación de los usuarios.

Dasgupta *et al.* (1999), en su investigación en India, identificaron que la resistencia al cambio tecnológico puede atribuirse a la falta de habilidades necesarias para implementar nuevas tecnologías. Por otro lado, Nabukhotna y Zhygalkevych (2022) encontraron en Ucrania que tanto la resistencia al cambio como la dependencia de prácticas obsoletas constituyen obstáculos significativos para una transición exitosa hacia la I4.0.

En este contexto, sería particularmente valioso expandir esta investigación a otras regiones para abarcar una gama más amplia de contextos industriales. Esto no solo enriquecería la comprensión de los desafíos asociados a la adopción de la I4.0, sino que también facilitaría la comparación entre diversos entornos.

REFERENCIAS

- Albarrán Trujillo, S. E., Salgado Gallegos, M. y Pérez Merlos, J. C. (2020). Integración de la gestión del conocimiento y la Industria 4.0, una guía para su aplicación en una organización. *Revista de Desarrollo Sustentable, Negocios, Emprendimiento y Educación RILCO DS*, 6(7), 1-13. <https://bit.ly/3NVDIyk>
- Anaçoğlu, E. (2018). Effects of information technology usage on business performance. *Pamukkale Journal of Business and Information Management*, 5(1), 22-29. <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/621931>
- Arredondo-Hidalgo, M. G. y Caldera-González, D. del C. (2023). La Industria 4.0 como una alternativa de economía inclusiva. Un estudio en pymes guanajuatenses. En L. Porto Pedroza y V. Sanagustín-Fons (Coords.), *Vulnerabilidades y nuevas demandas sociales: un enfoque interdisciplinar desde las organizaciones* (pp. 185-198). Editorial Dykinson. <https://doi.org/10.2307/jj.5076210>
- Arriola Ruiz, E. (2022). *La adopción de la Industria 4.0 en Ciudad Juárez y su impacto sobre las empresas de manufactura y sus trabajadores* [Tesis doctoral, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez]. <https://erecursos.uacj.mx/items/9f84c818-ac09-4595-a1ef-a234362a4548>
- Arriola, Ruiz, E. (2024). *Conocimiento e implementación de la Industria 4.0 en el sector de manufactura. Instrumento de medición* (10.13140/RG.2.2.33113.70242). AXIS Centro de Inteligencia Estratégica. <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.33113.70242>
- Arriola Ruiz, E. y Carrillo, J. (2022). La Industria 4.0 en México: análisis regional sobre el conocimiento y la implementación de 19 tecnologías. En A. Martínez Martínez y M. J. Santos Corral (Eds.), *Oportunidades y retos para la adopción de la Industria 4.0 en México* (pp. 191-206). Plaza y Valdés. https://www.researchgate.net/publication/364091856_Oportunidades_y_retos_para_la_adopcion_de_la_industria_40_en_Mexico
- Arvind, A. (2016). *Architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems* [Tesis de maestría, Carnegie Mellon University]. <https://bit.ly/3tIEGXR>
- Asociación de Maquiladoras, A. C. (AMAC)-Index Juárez. (2023, 1 de septiembre). Importaciones y exportaciones. *Información Estadística Mensual*. <https://indexjuarez.com/wp-content/uploads/2023/09/1-de-Septiembre-2023.pdf>
- AXIS Centro de Inteligencia Estratégica. (2019). BAJA i4.0. Industria 4.0 en Baja California. *AXIS Vantage Point*. <https://vp.inteliaxis.com/PDF/Bajai40.pdf>
- Azizah, A. F. y Susanto, T. D. (2016). Conceptual model cognitive, affective, physical, and external factor for individual information technology acceptance. *IPTEK Journal of Proceedings Series*, 2(1), 171-172. <https://iptek.its.ac.id/index.php/jps/article/view/1169/988>
- Benešová, A. y Tupa, J. (2017). Requirements for education and qualification of people in Industry 4.0. *Procedia Manufacturing*, 11, 2195-2202. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.366>

- Buenrostro Mercado, E. (2022). Propuesta de adopción de tecnologías asociadas a la Industria 4.0 en las pymes mexicanas. *Entreciencias: Diálogos en la Sociedad del Conocimiento*, 10(24), 1-19. <https://doi.org/10.22201/enesl.20078064e.2022.24.81347>
- Carrillo, J., Gomis, R., De los Santos, S., Covarrubias, L. y Matus, M. (2020). ¿Podrán transitar los ingenieros a la Industria 4.0? Análisis industrial en Baja California. *Entreciencias: Diálogos en la Sociedad del Conocimiento*, 8(22), 1-22. <https://doi.org/10.22201/enesl.20078064e.2020.22.76089>
- Carrillo, J., Vallejo, B. y Gomis, R. (2022). COVID-19 and industrial resilience in the Global South. A case study on the auto parts sector in Mexico. *International Journal of Automotive Technology and Management*, 22(1), 82-105. <http://doi.org/10.1504/IJATM.2022.122115>
- Chin, P. (2004). An examination of factors that affect the management of information technology in organizations. *AMCIS 2004 Proceedings*, 75, 521-528. <https://aisel.aisnet.org/cgi/viewcontent.cgi?article=1651&context=amcis2004>
- Computerworld España. (2018, 12 de febrero). *El impacto de la Industria 4.0 en las pymes. Computerworld*. <https://www.computerworld.es/article/2135297/el-impacto-de-la-industria-4-0-en-las-pymes.html>
- Dasgupta, S., Agarwal, D., Ioannidis, A. y Gopalakrishnan, S. (1999). Determinants of information technology adoption: An extension of existing models to firms in a developing country. *Journal of Global Information Management*, 7(3), 30-40. <https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/69520125/6c4379e184c055e93a0a4bbdf6861ea843e2-libre.pdf>
- Dutta, S. y Lanvin, B. (Eds.). (2021). *The network readiness index 2021. Shaping the global recovery*. Portulans Institute. <https://networkreadinessindex.org>
- Dutta, S. y Lanvin, B. (Eds.). (2023). *Network readiness index 2023. Trust in a network society: A crisis of the digital age?* Portulans Institute. <https://networkreadinessindex.org>
- Frey, C. B. y Osborne, M. A. (2017). The future of employment: How susceptible are jobs to computerisation? *Technological Forecasting and Social Change*, 114, 254-280. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2016.08.019>
- Gabriel, M. y Pessl, E. (2016). Industry 4.0 and sustainability impacts: Critical discussion of sustainability aspects with a special focus on future of work and ecological consequences. *International Journal of Engineering*, 14, 131-136. <https://bit.ly/48NdTZi>
- Gökalp, E., Şener, U. y Eren, P. E. (2017). Development of an assessment model for Industry 4.0: Industry 4.0-MM. En A. Mas, A. Mesquida, R. V. O'Connor, T. Rout y A. Dorling (Eds.), *Software process improvement and capability determination* (pp. 128-142). Springer. <http://bit.ly/48NBMj8>
- Gouvêa, M. A. y Cunha, R. D. (2005). The implementation of technology and its association with organizational profiles. *Revista Eletrônica de Administração*, 11(5). <https://seer.ufrgs.br/read/article/download/40624/25836>

- Hae-Young, K. (2017). Statistical notes for clinical researchers: Chi-squared test and Fisher's exact test. *Restorative Dentistry & Endodontics*, 42(2), 152-155. <https://doi.org/10.5395/rde.2017.42.2.152>
- Hecklau, F., Galeitzke, M., Flachs, S. y Kohl, H. (2016). Holistic approach for human resource management in Industry 4.0. *Procedia CIRP*, 54, 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.05.102>
- Index Zona Costa BC. (2023, 2ª. quincena de enero). *Boletín Analítico Quincenal*. <https://bit.ly/3Yx8jXy>
- International Data Corporation (IDC). (2017, enero). *The next steps in digital transformation. How small and midsize companies are applying technology to meet key business goals*. Insights for Professionals. <https://bit.ly/48LJ5YL>
- Johny, A. y Bhasi, M. (2015). An integrated model of factors affecting information technology implementation success in organizations. *International Journal of Engineering and Management Research*, 5(2), 81-89. <https://www.indianjournals.com/ijor.aspx?target=ijor:ijemr&volume=5&issue=2&article=017>
- Kinzel, H. (2017). Industry 4.0: Where does this leave the human factor? *Journal of Urban Culture Research*, 15, 70-83. <https://doi.org/10.14456/jucr.2017.14>
- Lee, S. y Kim, K.-J. (2007). Factors affecting the implementation success of Internet-based information systems. *Computers in Human Behavior*, 23(4), 1853-1880. <https://bit.ly/485tCDE>
- Martínez Martínez, A. (2020). Retos en la implementación de Industria 4.0: el caso de GKN Driveline. En A. Martínez Martínez, M. de L. Álvarez Medina y A. García Garnica (Coords.), *Industria 4.0. Elementos diagnósticos y puesta en práctica en sectores y empresas* (pp. 133-152). Universidad Nacional Autónoma de México; Plaza y Valdés. https://www.researchgate.net/publication/346006091_Capitulo_6_Retos_en_la_implementacion_de_Industria_40_el_caso_de_GKN_Driveline_fullTextFileContent
- Martínez Martínez, A., Hernández Sangabriel, A. y Cervantes Fuentes, L. R. (2023). Transformación digital y desafíos laborales en la industria manufacturera de Guanajuato. Una primera aproximación sobre GPI. *Entretextos*, 15(39), 1-20. <https://doi.org/10.59057/iberoleon.20075316.202339683>
- Matus, M. (2022). Respuestas socio-tecnológicas frente a la COVID-19 en México: spin-offs, repositorios e impresión 3D. *Nóesis. Revista de Ciencias Sociales y Humanidades*, 31(61), 68-88. <https://doi.org/10.20983/noesis.2022.1.4>
- Mohylna, L. y Makarova, V. (2023). Впровадження інформаційних технологій на вітчизняних підприємствах [Implementation of information technologies in domestic enterprises]. *Прийзовський економічний вісник [Pryazovskyi Economic Herald]*, 1(33), 65-69. http://pev.kpu.zp.ua/journals/2023/1_33_ukr/13.pdf
- Müller, J. M., Kiel, D. y Voigt, K.-I. (2018). What drives the implementation of Industry 4.0? The role of opportunities and challenges in the context of sustainability. *Sustainability*, 10(1), 1-24. <https://doi.org/10.3390/su10010247>

- Nabukhotna, Y. y Zhygalkevych, Z. (2022). Вплив інформаційних технологій на діяльність підприємства [The impact of information technology on the activities of the enterprise]. *International Scientific Journal "Internauka"*. <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2022-14>
- Ostertagová, E., Ostertag, O. y Kováč, J. (2014). Methodology and application of the Kruskal-Wallis Test. *Applied Mechanics and Materials*, 611, 115-120. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.611.115>
- Rajnai, Z. y Kocsis, I. (2017). Labor market risks of Industry 4.0, digitization, robots and AI. En *2017 IEEE 15th international symposium on intelligent systems and informatics (SISY)* (pp. 343-346). Institute of Electrical and Electronics Engineers. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8080580>
- Raso Delgue, J. (2018). América latina: el impacto de las tecnologías en el empleo y las reformas laborales. *Revista Internacional y Comparada de Relaciones Laborales y Derecho del Empleo*, 6(1). https://ejcls.adapt.it/index.php/rlde_adapt/article/view/549/750
- Riquelme, R. (2019, 9 de octubre). México llega con retraso a la Cuarta Revolución Industrial. *El Economista*. <https://bit.ly/3Y0Rynm>
- Safar, L., Sopko, J., Dancakova, D. y Woschank, M. (2020). Industry 4.0: Awareness in South India. *Sustainability*, 12(8), 1-18. <https://doi.org/10.3390/su12083207>
- Sampietro-Saquicela, J. L. (2020). Transformación digital de la Industria 4.0. *Polo del Conocimiento*, 5(8), 1344-1356. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/7554338.pdf>
- Sarı, T., Güleş, H. K. y Yiğitöl, B. (2020). Awareness and readiness of Industry 4.0: The case of Turkish manufacturing industry. *Advances in Production Engineering & Management*, 15(1), 57-68. <https://doi.org/10.14743/apem2020.1.349>
- Singh, R. K., Garg, S. K. y Deshmukh, S. G. (2008). Implementation of information technology: Evidence from Indian SMEs. *International Journal of Enterprise Network Management*, 2(3), 248-267. <https://www.inderscience.com/info/inarticle.php?artid=18780>
- Sony, M. y Naik, S. (2019). Key ingredients for evaluating Industry 4.0 readiness for organizations: A literature review. *Benchmarking: An International Journal*. 27(7), 2213-2232. <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/BIJ-09-2018-0284/full/html>
- Stoyanov, I. (2013). Information technology and managing organizational change. *KSI Transactions on Knowledge Society*, 6(1), 10-13. https://web.archive.org/web/20180409222740id_/http://www.tksi.org/JOURNAL-KSI/PAPER-PDF-2013/KSI-2013-1.pdf#page=10
- Wang, L. y Wang, G. (2016). Big data in cyber-physical systems, digital manufacturing and Industry 4.0. *International Journal of Engineering and Manufacturing*, 6(4), 1-8. <https://doi.org/10.5815/ijem.2016.04.01>
- Ynzunza Cortés, C. B., Izar Landeta, J. M., Bocarando Chacón, J. G., Aguilar Pereyra, F. y Larios Osorio, M. (2017). El entorno de la Industria 4.0: implicaciones y perspectivas futuras. *Conciencia Tecnológica*, (54), 33-45. <https://www.redalyc.org/journal/944/94454631006/94454631006.pdf>