



Análisis de la implementación en tecnologías 4.0 en las empresas de Boyacá, Colombia

*María Isabel Rojas Triana**
*Julián Yamid Gómez Rojas***

Fecha de recepción: 16 de septiembre de 2024

Fecha de aprobación: 10 de septiembre de 2025


Resumen: Este artículo analiza los factores que determinan la adopción de tecnologías 4.0 en empresas colombianas, con el propósito de comprender su contribución al desempeño productivo y al desarrollo regional. A partir de una encuesta empresarial aplicada a múltiples sectores, se construyen tres dimensiones analíticas: adopción tecnológica avanzada (A), inversión en capital tecnológico (K) y transformación del capital humano y los procesos laborales (L). Estas variables se operacionalizan mediante indicadores proxy agrupados y normalizados mediante umbrales fijos, siguiendo criterios de medición utilizados en estudios de innovación y capacidades tecnológicas. El modelo econométrico empleado —un logit binomial— permite identificar la probabilidad de adopción tecnológica en función de las características organizacionales, la disponibilidad de infraestructura digital, el nivel de automatización y la incorporación de tecnologías asociadas a la industria inteligente. Los resultados evidencian una adopción desigual, con rezagos significativos en IA, *big data* y robótica, así como una mayor penetración de herramientas digitales básicas. Se concluye que la inversión en capital tecnológico y la modernización del capital humano son determinantes centrales para avanzar hacia estructuras productivas más sofisticadas, lo cual plantea implicaciones relevantes para la política industrial, la formación laboral y la competitividad regional.


Palabras clave: innovación tecnológica, transformación digital, productividad industrial, desarrollo del capital humano, adopción tecnológica.

Clasificación JEL: D21; H41; L22; O33; O32; L23; J24; C25.

Como citar:

Rojas-Triana, M. I. & Gómez-Rojas, J. Y. (2026). Análisis de la implementación en tecnologías 4.0 en las empresas de Boyacá, Colombia. *Apuntes del Cenes*, 45 (81) Págs. 225 - 256. <https://doi.org/10.19053/uptc.01203053.v45.n81.2026.18155>

* Doctora en Ciencias Económicas Administrativas. Docente Escuela de Economía de la Facultad de Ciencias Económicas y Administrativas de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, sede Tunja. maria.rojas03@uptc.edu.co  <https://orcid.org/0000-0002-6931-445X>

** Economista. Profesional en enlace de juventud de la política pública "Acción en movimiento Duitama joven 2020-2030" Alcaldía Municipal de Duitama, Boyacá, Colombia. Julian.gomez02@uptc.edu.co  <https://orcid.org/0009-0004-3589-155X>

Analysis of the Implementation of Industry 4.0 Technologies in Companies in Boyacá, Colombia

Abstract

This article examines the factors influencing the adoption of Industry 4.0 technology among Colombian firms, assessing its impact on productivity and regional development. Using data from a multi-sector business survey, the study constructs three analytical dimensions: advanced technology adoption (A), technological capital investment (K), and human-capital and labor-process transformation (L). These constructs are operationalized through grouped proxy indicators and standardized using fixed thresholds consistent with measurement approaches employed in innovation and technological-capability research. A binary logit model is estimated to identify the probability of adopting advanced technologies as a function of organizational characteristics, digital infrastructure, automation intensity, and the incorporation of intelligent manufacturing tools. The findings reveal uneven adoption patterns, with significant gaps in AI, Big Data, and robotics, contrasted with higher penetration of basic digital tools. Results indicate that investments in technological capital and the modernization of human-capital processes are central determinants of technological upgrading. The study highlights critical implications for industrial policy, workforce development, and regional competitiveness in emerging economies.

Keywords: technological innovation, digital transformation, industrial productivity, human capital development, technology adoption.

INTRODUCCIÓN

El desarrollo económico y la competitividad territorial están intrínsecamente ligados a la capacidad de un sistema productivo para absorber, adaptar e implementar nuevas tecnologías. En el contexto global de la Cuarta Revolución Industrial, las economías que logran integrar tecnologías digitales, físicas y biológicas en sus cadenas de valor obtienen ventajas comparativas sostenibles (Schwab, 2016). Sin embargo, este proceso no es homogéneo y genera brechas significativas no solo entre países, sino también dentro de ellos. Colombia muestra marcadas asimetrías regionales, donde territorios como Boyacá enfrentan desafíos estructurales — infraestructura limitada, predominancia de micro y pequeñas empresas (pyme) y un tejido industrial tradicional— que condicionan su transición tecnológica (Becerra et al., 2022).

Si bien la descentralización administrativa y fiscal iniciada con la Constitución de 1991 otorgó a las entidades subnacionales mayor autonomía, la escasez de recursos, especialmente en municipios

de categorías inferiores, limita la inversión en infraestructura habilitante como la conectividad a internet y la promoción de un ecosistema de innovación robusto. Este estudio se centra en el departamento de Boyacá para analizar el estado actual de la adopción tecnológica en su sector empresarial, un actor clave para el desarrollo regional.

El estudio parte de la siguiente hipótesis de investigación: la adopción de tecnologías 4.0 y tecnologías verdes en las pequeñas y medianas empresas (pyme) del departamento de Boyacá es significativamente menor que en las grandes empresas, debido principalmente a barreras de costo, falta de capital humano especializado y un ecosistema de innovación insuficiente, lo que limita su contribución a la competitividad regional y al avance de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

Para validar esta hipótesis, el artículo busca responder a las preguntas: ¿cuál es el nivel real de implementación de tecnologías 3.0 y 4.0 en el sector empresarial de Boyacá? y ¿qué factores explican las brechas de adopción

observadas? El análisis empírico se basa en una encuesta aplicada a 121 empresas y entrevistas a líderes empresariales y académicos, que proporcionan una radiografía detallada de la situación actual. Este diagnóstico es fundamental para el diseño de políticas públicas efectivas que impulsen una transformación digital inclusiva y sostenible en la región.

Teniendo presente los Objetivos de Desarrollo Sostenible en el territorio nacional, estructurados dentro del enlace que hay entre el plan de desarrollo nacional, los planes de desarrollo regional y los planes de desarrollo municipal, en mutua cooperación y de forma descentralizada, muchos municipios, especialmente los clasificados en categorías 5 y 6 (“básicos” de acuerdo con su menor población, ingresos e importancia económica), no pueden alcanzar sus objetivos debido a que los recursos son escasos, y con ellos se deben atender aspectos como el acceso a internet de su población, así como a equipos que faciliten la navegación, y la implementación de tecnologías de la información y la comunicación (TIC). Así, estos límites presupuestales hacen que las coberturas allí suelen ser paupérrimas, comparadas con las que, según algunos estudios de apropiación de la tecnología, como argumentan Bhattacharjya *et al.* (2019), permiten el desarrollo integral de las regiones.

El alcance de este estudio responde al “qué” (qué tecnologías 3.0 y 4.0

se adoptan y cuáles son las barreras) y deja para futuras investigaciones enfocarse en el “por qué”, el “cómo” y el “y qué pasa después”. Se mide la adopción de la tecnología en términos de la inversión en capital tecnológico y la automatización laboral, pero no en si realmente mejora la competitividad.

MARCO CONTEXTUAL

Evolución de las tecnologías en el mundo

La evolución tecnológica humana inició con el lenguaje, que facilitó la comunicación y la transmisión cultural (Urbina, 2020). El fuego, por su parte, mejoró la nutrición y la vida social. Fagan (2018) menciona tecnologías primitivas como herramientas de piedra y hueso, fundamentales para la vida comunitaria y el desarrollo de actividades como la agricultura y la metalurgia.

Con el surgimiento del mercantilismo, la Revolución Industrial marcó un punto de inflexión. La máquina de vapor transformó la producción y el transporte, lo que sustituyó fuerza humana por mecánica (Chaves, 2004). Desde entonces, el avance tecnológico se ha acelerado. La Edad de Piedra, que duró millones de años, tuvo solo tres etapas tecnológicas, mientras que los últimos 260 años han visto cuatro revoluciones industriales.

La Cuarta Revolución Industrial, o Industria 4.0, se caracteriza por la

convergencia de tecnologías digitales, físicas y biológicas (Schwab, 2016, 2020). Hoy se habla incluso de la Industria 5.0, donde la inteligencia artificial se combina con valores humanos (Mantilla, 2019), lo cual devuelve al ser humano el protagonismo en los procesos productivos.

Durante la Primera Revolución Industrial, países como Inglaterra y Estados Unidos experimentaron aumentos en productividad, pero también fuertes desigualdades sociales. La Segunda Revolución, iniciada a fines del siglo XIX, introdujo nuevos materiales, fuentes de energía y formas organizativas, con lo cual marcó un cambio radical en la industria (Feliu & Sudriá, 2013).

Más tarde, la crisis petrolera de 1973 dio paso a la tercera revolución tecnológica. Según Roel (1998), esta nueva etapa buscó tecnologías más eficientes, con menor consumo energético y mayor impacto social. En este contexto emergieron la robótica, la ingeniería genética y las telecomunicaciones, y se consolidaron los tres grandes grupos tecnológicos contemporáneos: ordenadores, biotecnología y telecomunicaciones (Ford, 2021).

El término Cuarta Revolución Industrial fue introducido por Klaus Schwab en 2016, aludiendo a la integración de tecnologías avanzadas como la inteligencia artificial, el internet de las

cosas, la robótica, la impresión 3D y la computación cuántica (Schwab, 2016, 2020). Alemania impulsó el concepto de Industria 4.0 en 2011, y en 2013 presentó un documento fundacional sobre su implementación.

Joyanes (2017) describe la Industria 4.0 como la digitalización e interconexión de procesos industriales mediante internet, *big data*, computación en la nube y ciberseguridad, en el marco de ciudades inteligentes. Estas transformaciones buscan no solo mayor productividad, sino también una mejor calidad de vida. Actualmente, se promueve la inclusión de estas tecnologías en políticas públicas, con enfoque en zonas urbanas y rurales.

En los últimos años, las tecnologías digitales se han integrado a la vida cotidiana mediante dispositivos móviles y soluciones inteligentes, y han consolidado la relación entre inteligencia artificial y productividad humana. En este contexto global se hace necesario analizar cómo esta evolución tecnológica se manifiesta en países como Colombia y regiones como Boyacá.

Evolución tecnológica en Colombia y en el departamento de Boyacá

Mientras las grandes potencias lideraban la revolución industrial, Colombia mantenía una economía agrícola basada en exportaciones como el café y el tabaco, y en la minería de oro, plata y hierro, sin fuentes energéticas

modernas. Gómez *et al.* (2018) destacan la precariedad en comunicaciones y la ausencia de TIC, como la telefonía celular, que más tarde transformaría la conectividad en zonas marginadas.

En Boyacá, desde 1827 se explotaba el hierro, lo que atrajo a empresarios como Martín Perry y William Wittingham, quienes construyeron en 1855 la primera fábrica de alto horno en Samacá. Aunque esta cerró en 1884, la industria siderúrgica evolucionó en otras regiones (Huérfano, 2021). En el siglo XIX, Boyacá contaba con molinos de trigo y maíz que desde 1909 usaban máquinas de vapor (Melo, 2017).

A inicios del siglo XX, la economía boyacense se caracterizaba por el minifundio, el uso de herramientas rudimentarias y una limitada cobertura eléctrica. La transición energética no siguió el patrón de los países industrializados, y en 1925 el 97 % de la energía nacional ya dependía del petróleo (Huérfano, 2021), sin que esto se tradujera en desarrollo ni en cobertura energética amplia.

La llegada de Bavaria S.A. a Duitama en 1936 impulsó el cultivo de cebada en lugar de maíz y trigo (Díaz, 2013). Durante las décadas de 1920 y 1930, Boyacá avanzó en el uso del motor eléctrico, lo cual promovió la inversión en generación de energía y permitió el funcionamiento de fábricas. Se fundaron empresas de agua, telefonía

e hidroeléctricas como las de Ráquira (1930) y Paipa (1938), mientras que en 1921 se creó la Empresa de Teléfonos de Boyacá en Tunja.

En 1931 llegó a Sogamoso la línea férrea conectada con Bogotá. Camargo (1935) destacó este hecho como un símbolo de progreso regional. La industrialización se consolidó en la década de 1940 con la creación de Acerías Paz del Río, considerada el complejo industrial más avanzado del país hasta ese momento (Huérfano, 2021). A su alrededor surgieron empresas como Cementos Boyacá, Abonos de Oriente e Indumil.

El modelo proteccionista vigente entre 1930 y 1990 impulsó esta industrialización, pero con la apertura económica posterior, Colombia entró en la globalización, lo que trajo la necesidad de adoptar nuevas tecnologías, especialmente las TIC. A partir del año 2000, en el marco de los Objetivos de Desarrollo del Milenio, se empezaron a implementar soluciones como internet, comercio electrónico y banca digital (Fonseca, 2013).

En Boyacá, un estudio realizado en 2013 a 486 pymes de Tunja, Duitama y Sogamoso, reveló que el 100 % tenía internet; 87 %, sitio web; y 39 %, comercio electrónico (Fonseca, 2013). Sin embargo, solo el 9 % utilizaba internet para comercio exterior y el 11 % para pagos en línea. El 89 % desconocía el uso de IP, y muchas no ofrecían

servicios básicos como firma digital o facturación electrónica.

En el ámbito público, el Índice de Gobierno Digital del Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (MinTIC) mostró en 2021 que Boyacá alcanzó una implementación del 66,2 % de la política de Gobierno Digital en entidades estatales, y del 54,5 % en empresas públicas (MinTIC, 2018). Esta política promueve procesos seguros, decisiones basadas en datos y servicios digitales de calidad.

No obstante, Bermúdez *et al.* (2019) advierten que la adopción de tecnologías 4.0 en Colombia sigue siendo limitada, especialmente en infraestructura y TIC. Jakobsen *et al.* (2023) también señalan que las tecnologías inteligentes aún no abordan adecuadamente los retos de las comunidades rurales, debido a factores sociales, económicos y culturales.

Tecnología en el cambio técnico y crecimiento económico

Desde la perspectiva neoclásica, el modelo de crecimiento de Solow (1956) postulaba el progreso tecnológico como un factor exógeno, un *residuo* que explicaba el crecimiento de la productividad que no podía atribuirse a la acumulación de capital y trabajo. Sin embargo, esta visión no explicaba el origen de la tecnología. Las teorías del *crecimiento endógeno*, desarrolladas por Romer (1990) y otros, revolucionaron este enfoque al internalizar el cambio tecnológico. En estos modelos, la inno-

vación no nace de la nada, sino que es el resultado de inversiones deliberadas en investigación y desarrollo (I+D), la acumulación de *capital humano* y la existencia de un entorno institucional que incentiva la creación y difusión de conocimiento.

El cambio técnico, conceptualizado por Schumpeter (1942) como un proceso de “destrucción creativa”, implica la introducción de nuevos productos, procesos, mercados o formas de organización que desplazan a los existentes. La Industria 4.0 representa una de estas olas schumpeterianas, caracterizada por la fusión de tecnologías que desdibujan las fronteras entre lo físico, lo digital y lo biológico (Schwab, 2016).

Adopción tecnológica en el ámbito de las firmas

La decisión de una empresa al adoptar una nueva tecnología no es automática. La teoría de la *difusión de innovaciones* de Rogers (2003) clasifica a los adoptantes en categorías (innovadores, adoptantes tempranos, mayoría temprana, mayoría tardía y rezagados) y argumenta que la tasa de adopción depende de las características de la innovación (ventaja relativa, compatibilidad, complejidad, entre otros) y de los canales de comunicación.

El marco *Tecnología-Organización-Entorno (TOE)* (Tornatzky & Fleischer, 1990) ofrece un modelo más estructurado para el análisis en el contexto de la

firma. Sostiene que la adopción tecnológica está influenciada por tres contextos: 1) *contexto tecnológico*: la disponibilidad y características de las tecnologías relevantes en el mercado. 2) *Contexto organizacional*: las características de la firma, como su tamaño, estructura, holgura de recursos, y el nivel de habilidades de su capital humano. 3) *Contexto ambiental*: el entorno en el que opera la empresa, incluyendo la estructura de la industria, la presencia de socios tecnológicos, la presión competitiva y el marco regulatorio y de políticas públicas (Gupta et al., 2023).

Para las pymes, que constituyen el 86 % de la muestra de este estudio y la mayoría del tejido empresarial colombiano, las barreras organizacionales (falta de recursos financieros y de personal cualificado) y ambientales (ecosistemas de innovación débiles) suelen ser los obstáculos más significativos para la adopción de tecnologías avanzadas (Durán & Castillo, 2023).

En el contexto de la función de producción tipo Cobb-Douglas, la implementación de tecnologías se convierte en un factor crucial para impulsar la competitividad regional, al permitir una mayor eficiencia en el uso de los insumos productivos —capital y trabajo—, e incrementar así el producto total. Dado que esta función representa rendimientos marginales decrecientes, pero productividades complementarias, la incorporación de tecnologías avanzadas puede aumentar la productividad

total de los factores (PTF), y desplazar la función de producción hacia niveles superiores. Esto es especialmente relevante en regiones rezagadas, donde la digitalización, la automatización y el acceso a tecnologías de información y comunicación (TIC) pueden reducir las brechas de productividad frente a centros más desarrollados. Según Acemoglu y Restrepo (2019), la adopción tecnológica no solo transforma la forma en que se produce, sino que también redefine la estructura del empleo y la especialización regional, lo cual permite a las economías locales insertarse en cadenas de valor más complejas y competitivas.

Además, para analizar la implementación de la *tecnología* en las empresas es preciso tener en cuenta los conceptos de las tecnologías 3.0, 4.0 y verdes:

- *Tecnologías 3.0 (Tercera Revolución Industrial)*: centradas en la automatización de procesos mediante la informática y la electrónica. Incluyen el uso de ordenadores, *software* de gestión (ERP, CRM), internet para comunicación y comercio electrónico básico (Fonseca, 2013).
- *Tecnologías 4.0 (Cuarta Revolución Industrial)*: implican la interconexión inteligente de sistemas. Abarcan el internet de las cosas (IoT), *big data* y analítica, inteligencia artificial (IA), computación en la nube, robótica colaborativa, sistemas ciberfísicos e impresión 3D (Joyanes, 2017).

- *Tecnologías verdes*: abarcan cualquier tecnología o proceso que reduzca el impacto ambiental, mejore la eficiencia de los recursos y contribuya a la sostenibilidad. Incluyen energías renovables, economía circular (reutilización y reciclaje de residuos) y tecnologías de mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI).

METODOLOGÍA

Enfoque y diseño de la investigación. Se empleó un diseño de investigación exploratorio-descriptivo con un enfoque mixto. El componente cuantitativo buscó medir la prevalencia y patrones de adopción tecnológica, mientras que el cualitativo profundizó en las percepciones, barreras y estrategias de actores clave.

Muestra y recolección de datos. La recolección de datos se realizó en tres fases:

- Encuesta telefónica: se aplicó un cuestionario estructurado a una muestra de 109 empresas de Boyacá, seleccionadas de una base de datos de la Cámara de Comercio de Tunja que agrupa aproximadamente a 1155 empresas. La muestra, aunque no probabilística, buscó representatividad sectorial y de tamaño, con un 86 % de las encuestadas que son micro y pequeñas empresas, lo que refleja la estructura empresarial del departamento. El cuestionario con-

tenía 23 preguntas cerradas (Sí/No) divididas en cuatro secciones: información de la empresa, tecnologías 4.0, tecnologías 3.0 y tecnologías verdes (Anexo 1).

- *Entrevistas semiestructuradas*: se realizaron entrevistas a gerentes de empresas líderes (por ejemplo, Homecenter, Licorera de Boyacá) para comprender las motivaciones y desafíos en la implementación de tecnologías avanzadas (Anexo 2).
- *Entrevistas a expertos*: se consultaron profesores universitarios con experiencia en tecnología e innovación, para obtener una perspectiva académica y contextual sobre el fenómeno estudiado (Anexo 3).

Se garantizó el consentimiento informado y la confidencialidad de los datos, que fueron utilizados exclusivamente con fines académicos.

Medición de la incorporación de tecnología y su efecto

En este estudio, la incorporación de tecnología se mide a través de variables proxy obtenidas de la encuesta. Cada pregunta sobre la implementación de una herramienta específica (por ejemplo, «¿Utiliza IA?», «¿Utiliza almacenamiento en la nube?») actúa como un indicador binario de adopción.

En el contexto de una *función de producción* tipo Cobb-Douglas (Acemoglu & Restrepo, 2019) se representa por la ecuación [1]:

$$Y = A * F(K, L) \quad [1]$$

donde Y es la producción, K el capital y L el trabajo; A es un residuo que tiene muchas interpretaciones; puede estar influenciada por los cambios en la automatización y robótica (colaboración robótica) representada en una inversión con un nuevo tipo de capital (K) que incorpora una tecnología superior, lo que eleva la productividad del trabajo. El big data y la IA mejoran la eficiencia en la toma de decisiones y la asignación de recursos, e impactan directamente en el factor “ A ” y las tecnologías 3.0 (internet, software), optimizan procesos de gestión y comunicación, y mejoran la eficiencia operativa general. Sin embargo, surgen muchas críticas heterodoxas a la productividad total de los factores (PTF) e inconsistencias en la función de producción neoclásica, donde se argumenta que la heterogeneidad del capital impide que se mida en términos físicos, como sí se mide el factor productivo trabajo (Montier & Pilkington, 2018; Astarita, 2017). En todo caso, los modelos de productividad y crecimiento convencionales deben ser interpretados con cautela, pues descansan en supuestos fuertes sobre el comportamiento tecnológico, la agregación del capital y la distribución del ingreso, los cuales pueden distorsionar la comprensión de los procesos reales de acumulación y desarrollo.

Análisis de datos

El análisis cuantitativo se basó en estadística descriptiva y econométrica, con datos de corte transversal, y utilizando frecuencias y porcentajes para caracterizar los niveles de adopción de cada tecnología. Se realizaron tabulaciones cruzadas para comparar los patrones de adopción entre diferentes tamaños de empresas y sectores económicos, para corroborar descriptivamente la hipótesis planteada. Se aplicó un modelo de regresión logística log-binario en el contexto de la función de producción tipo Cobb-Douglas (las variables proxy se construyeron a partir de preguntas de la encuesta, con cada pregunta binaria (Sí/No) respondidas con 1 (Sí) y 0 (No) por cada empresa.

Luego, se crean las variables binarias proxy finales: Y , L y K .

Donde Y representa la producción en empresas con alta tecnología avanzada $Y=1$, y $Y=0$ representa una empresa con producción tecnológicamente rezagada. L : representa las empresas con alto nivel de trabajo automatizado ($L=1$) y con bajo automatizado ($L=0$). K : representa a empresas con alta inversión tecnológica ($K=1$) y con baja inversión tecnológica ($K=0$).

A partir de las respuestas, se codifica usando la regla del umbral común, de lo que resulta una base de 109 datos.

Los resultados descriptivos se visualizaron mediante gráficos generados en Excel. Y los econométricos mediante tablas de salida de datos procesados en STATA con su respectiva interpretación. El análisis cualitativo de las entrevistas se utilizó para enriquecer la discusión e interpretar los hallazgos cuantitativos. De igual manera, se entrevistaron expertos en la materia, como fueron los profesores de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, que contribuyeron a la representación¹ de la situación tecnológica en el departamento, entre otros (Bautista, 2024).

DESARROLLO EMPÍRICO Y RESULTADOS

Los datos recopilados ofrecen una visión detallada de la dualidad tecnológica en el tejido empresarial de Boyacá. Las 109 empresas encuestadas operan principalmente en los centros

urbanos de Tunja, Duitama y Sogamoso, aunque tienen presencia en un total de 35 municipios, con una distribución según su tamaño como se muestra en la Figura 1 y la Tabla 1.

Como se observa, el 86 % de la muestra está compuesta por micro y pequeñas empresas, lo que es coherente con la estructura empresarial nacional y regional. En comparación con los datos del DANE (2024), las microempresas pesan más del 90 % del total de las empresas en Colombia, con diferencia solo del 4 % de la muestra.

La mayor parte de las empresas corresponden al sector comercio al por mayor, seguido por el de la agricultura, ganadería, caza y silvicultura e industrias manufactureras. En contraposición se encuentran empresas de energía, y entidades de organizaciones territoriales.

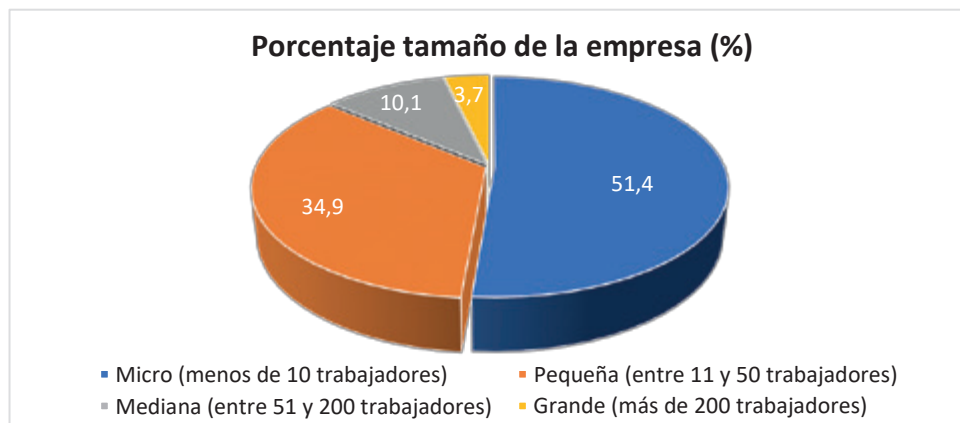


Figura 1. Tamaño de las empresas encuestadas

Fuente: elaboración propia

¹ Video disponible en https://drive.google.com/drive/u/2/folders/1pWijb9HUEJZ4HgmgE1-E_Z_UbswSgH7X

Tabla 1. Porcentaje de empresas encuestadas por sector económico

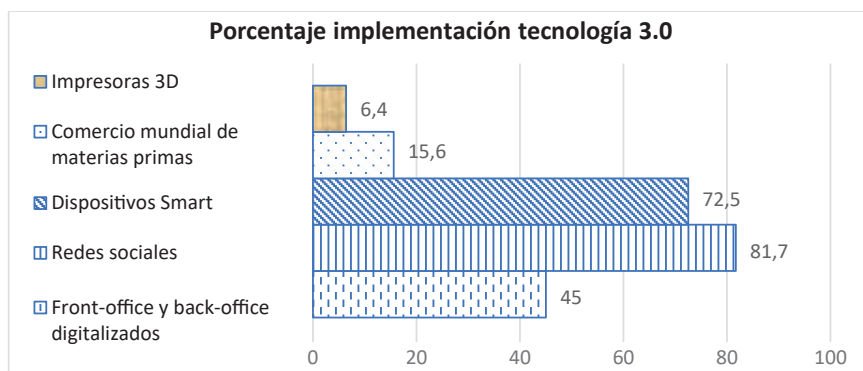
Sector económico	Número de empresas	Porcentaje (%)
Comercio al por mayor y al por menor	16	13 %
Agricultura, ganadería, caza, silvicultura y pesca	13	11 %
Industrias manufactureras	12	10 %
Artísticas, de entretenimiento y recreación.	10	8 %
Construcción	10	8 %
Otras actividades de servicios	10	8 %
Información y comunicaciones	7	6 %
Transporte y almacenamiento	7	6 %
Financieras y de seguros	6	5 %
Explotación de minas y canteras	5	4 %
Educación	4	3 %
Profesionales, científicas y técnicas.	4	3 %
Inmobiliarias	3	2 %
Alojamiento y servicios de comida	3	2 %
Distribución de agua. saneamiento ambiental	3	2 %
De atención de la salud humana y de asistencia social	3	2 %
De los hogares individuales en calidad de empleadores	2	2 %
Suministro de energía, gas, vapor y aire acondicionado	1	1 %
A ninguna de las anteriores.	1	1 %
De organizaciones y entidades extraterritoriales	1	1 %
Total, empresas encuestadas	121	100 %

Fuente: elaboración propia.

Adopción de tecnologías 3.0: una base digital sólida pero incompleta

Tercera Revolución Industrial, consideradas hoy herramientas básicas para la operación empresarial.

Los resultados (Figura 2) muestran una alta penetración de las tecnologías de la

**Figura 2.** Implementación de tecnologías 3.0 en las empresas de Boyacá

Fuente: elaboración propia

Lo anterior muestra resultados de alto impacto en cuanto a conectividad generalizada: un alto porcentaje de las empresas utiliza internet en sus procesos productivos y/o de gestión. Además, emplean redes sociales para comunicación y marketing. En menor intensidad utiliza dispositivos inteligentes. Esto confirma que la digitalización básica es una realidad extendida.

Se observa una brecha globalizada a pesar de la alta conectividad, pocas empresas participan en cadenas de valor globales a través de la importación o exportación. Esto sugiere que el uso de

internet es más operativo e informativo que transaccional a nivel internacional. Del total de empresas encuestadas, la fabricación aditiva es incipiente: el uso de impresión 3D es casi nulo, hecho que indica una baja sofisticación en los procesos manufactureros y de prototipado.

Adopción de tecnologías 4.0: una frontera lejana

La implementación de tecnologías avanzadas, que definen la Industria 4.0, es marcadamente baja; en otras palabras, revela una brecha tecnológica crítica.

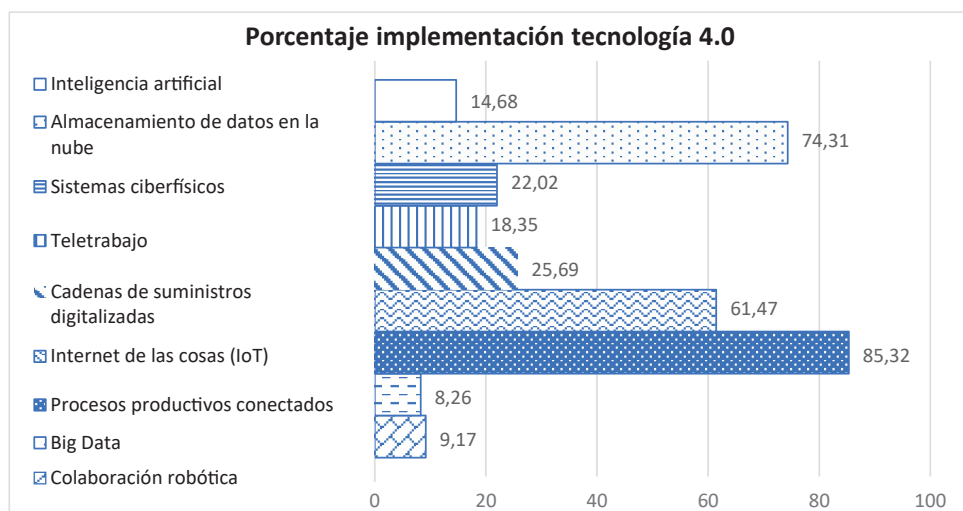


Figura 3. Implementación de tecnologías 4.0 en las empresas de Boyacá

Fuente: elaboración propia

Resultados de alto impacto

- Dominio de la nube: las tecnologías 4.0 más adoptadas son las más accesibles y de menor costo de entrada: almacenamiento en la

nube (74,3 %) e internet de las cosas (61,5 %); este último probablemente asociado a sistemas de seguridad o control básico más que a procesos productivos complejos.

- Rezagos críticos en tecnologías transformadoras: la adopción de herramientas con alto potencial para revolucionar la productividad y la toma de decisiones es mínima. La inteligencia artificial (IA) es utilizada solo por el 9,17 % de las empresas y la inteligencia de datos (*big data*) por un 8,3 %. La colaboración robótica² es igualmente escasa (9,17 %).
- El teletrabajo, impulsado por la pandemia, se ha consolidado en un 35,8 % de las empresas, lo que muestra una adaptación organizacional más que una inversión tecnológica profunda.

Adopción de tecnologías verdes: la sostenibilidad como asignatura pendiente

La transición hacia un modelo productivo sostenible es aún una aspiración lejana para la mayoría de las empresas boyacenses, como se muestra en la Figura 4.

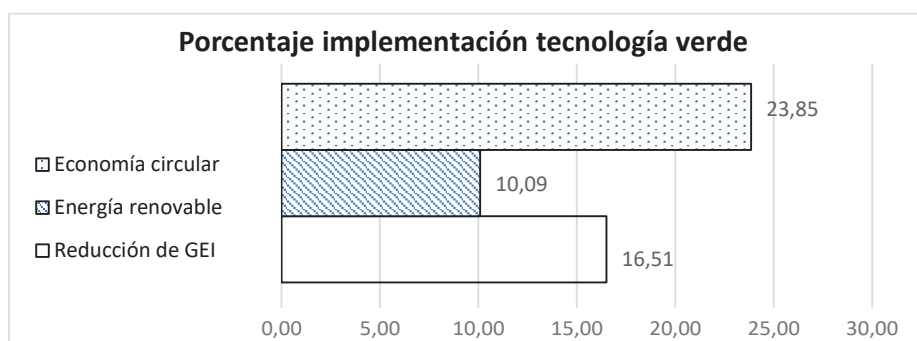


Figura 4. Implementación de tecnologías verdes por empresas del departamento de Boyacá

Fuente: elaboración propia

El 23,8 % de las empresas implementan prácticas de economía circular, probablemente motivadas por la optimización de costos o regulaciones básicas de manejo de residuos. Sin embargo, la

inversión en tecnologías más estructurales como las energías renovables es muy baja (10 %); esto evidencia que la sostenibilidad aún no es un eje estratégico de competitividad para la mayoría.

² La colaboración robótica se refiere al uso de robots diseñados para trabajar de manera conjunta y segura con los trabajadores humanos en un mismo espacio de trabajo. A diferencia de la robótica tradicional, que opera aislada en celdas cerradas, los robots colaborativos (cobots) pueden ejecutar tareas repetitivas, de precisión o de asistencia mientras interactúan directamente con las personas, de modo que mejoran la eficiencia operativa y reducen cargas físicas o riesgos laborales.

Derivación modelo Logit desde el marco Cobb-Douglas

- Función de producción (ecuación 1): $Producción = A * F(K, L)$ Donde A es la productividad total de los factores (PTF), o el “factor tecnológico”.
- Hipótesis central: la adopción de tecnología avanzada (IA, *big data*, robótica, etc.) es lo que impulsa un aumento en A . Por lo tanto, nuestra variable dependiente $Y_{Adopcion}$ es un proxy observable del estado de A .
- $Y = 1$ representa una empresa con un factor A alto (tecnológicamente avanzada).
- $Y = 0$ representa una empresa con un factor A bajo (tecnológicamente rezagada).
- El modelo Logit: modela la probabilidad de que una empresa tenga una alta adopción tecnológica ($Y=1$) en función de la naturaleza de su capital (K) y su trabajo (L).

La probabilidad de que $Y=1$ se modela como:

$$P(Y=1 | L, K) = \beta_0 + \beta_1 * K_Inversion + \beta_2 * L_Automatizacion + \varepsilon \quad [2]$$

Donde F es la función de distribución logística acumulada.

$$\ln(P / (1-P)) = \beta_0 + \beta_1 * K_Inversion + \beta_2 * L_Automatizacion \quad [3]$$

- P : probabilidad de que $Y=1$ (alta adopción).
- $1-P$: probabilidad de que $Y=0$ (baja adopción).
- β_0 (intercepto): el log-odds base de tener alta adopción cuando tanto $L_Automatizacion$ como $K_Inversion$ son 0.
- β_2 : mide cómo cambia el log-odds de tener alta adopción cuando $K_Inversion$ cambia de 0 a 1, manteniendo constante $L_Automatizacion$. Esperamos que $\beta_2 > 0$.
- β_1 : Mide cómo cambia el log-odds de tener alta adopción cuando $L_Automatizacion$ cambia de 0 a 1, manteniendo constante $K_Inversion$. Esperamos que $\beta_1 > 0$.

Para estimar el modelo se usa la base de datos creada con las variables proxy con base en las preguntas de la encuesta. Las 3 variables se clasifican en tres grupos: A , K y L (Anexo 4).

Grupo A: adopción de la tecnología (la variable dependiente)

Este grupo representa el resultado final o el estado de ser una empresa tecnológicamente avanzada. Estas tecnologías son «transversales» y no solo mejoran un insumo, sino que elevan la eficiencia general de la empresa (la productividad total de los factores, A).

- IA ($P13$), *big data* ($P9$) y *nube* ($P11$): tal como se definen, estas son tecnologías que mejoran la toma de decisiones, optimizan la asignación de recursos y habilitan nuevos mo-

delos de negocio. Son el cerebro del sistema e impactan directamente en A. La nube es la infraestructura fundamental que permite el despliegue de IA y *big data*.

- *Tecnologías verdes (P21, P22, P23)*: la adopción de estas tecnologías (mitigación de GEI, economía circular, renovables) refleja un alto grado de sofisticación y optimización de procesos. Indica una gestión eficiente de los recursos que va más allá de la producción tradicional, lo cual es una manifestación directa de una PTF elevada. Una empresa que optimiza su uso de energía y materiales es, por definición, más productiva.

Grupo K: inversión en capital tecnológico (variable independiente)

Este grupo representa las inversiones en activos físicos y digitales que forman la base del capital moderno. Son los «ladrillos» o las herramientas que la empresa adquiere.

- *Sensores (P10), IoT (P14), sistemas ciberfísicos (P12)*: son la infraestructura física de la Industria 4.0. Representan inversiones en *hardware* y sistemas integrados que modernizan el capital fijo de la empresa.
- *Impresiones 3D (P20)*: es una inversión directa en un nuevo tipo de capital de producción (fabricación aditiva).
- *Dispositivos Smart (P17)*: son herramientas de capital (*hardware*) que la empresa adquiere para sus operaciones.

- *Globalización (P18)*: aunque no es una tecnología per se, la capacidad de importar/exportar requiere una inversión significativa en capital logístico, de conocimiento y de procesos. Se puede considerar un proxy de una estrategia de capital sofisticada.

Grupo L: capital humano y automatización (variable independiente)

Este grupo captura cómo la tecnología transforma la forma en que el trabajo se realiza, ya sea automatizando tareas humanas o habilitando nuevas formas de colaboración. Se enfoca en los procesos y la interacción humano-máquina.

- *Automatización/Robótica (P7)*: representa la clásica definición de cómo la tecnología afecta el factor trabajo, cuando la empresa cuenta con procesos productivos automatizados. Es decir, son reemplazados por humanos en tareas productivas.
- *Teletrabajo (P8)*: es un cambio fundamental en la organización del trabajo, habilitado por la tecnología. Refleja una modernización del capital humano y sus procesos.
- *Uso de internet en procesos (P15), redes sociales (P16), digitalización del front/back-office (P19)*: todas estas preguntas se refieren a la aplicación de tecnologías digitales para cambiar o mejorar los flujos de trabajo, la comunicación y las tareas diarias de los empleados. Afectan directamente la productividad del trabajo (L).

Con esta clasificación se construyen las tres variables finales para el modelo Logit binario, siguiendo el método discutido anteriormente:

- Para cada empresa, se suman las respuestas afirmativas sí=1 dentro de cada grupo (A, K, L), para obtener el puntaje total.
- Se establece un umbral para cada grupo, lo cual representa fronteras constantes entre niveles de incorporación de tecnologías avanzadas: “no adopta”, “adopción incipiente”, “adopción parcial”, “adopción avanzada”, lo que permite reducir el riesgo de variabilidad arbitraria y mejora la estabilidad de los estimadores (Cameron & Trivedi, 2005; Wooldridge, 2010).
- Cuando se comparan empresas heterogéneas por tamaño, sector o nivel de capital humano, se recomienda la fijación de umbrales fijos, dado que contribuye a preservar la *invarianza métrica*, una propiedad fundamental especial y relevante para identificar brechas tecnológicas vinculando los resultados de la encuesta con políticas de innovación o transición productiva (OECD, 2019; Treviño et al., 2020).

Por ejemplo:

- *Adopcion_Tecnologica* (Y): será 1 si la empresa responde «Sí» a 4 o más preguntas del Grupo A, y será 0 en caso contrario.
- *Inversion_Capital* (K): será 1 si la empresa responde «Sí» a 4 o más preguntas del Grupo K, y 0 en caso contrario.
- *Automatizacion_Laboral* (L): será 1 si la empresa responde «Sí» a 3 o más preguntas del Grupo L, y 0 en caso contrario.

Los valores seleccionados pueden justificarse estadísticamente en modelos Logit analizando la distribución de la suma de los ítems; percentiles y puntos de inflexión; si el umbral aproxima el percentil 50 o 60, se obtiene un proxy robusto y con variabilidad adecuada. Teóricamente: el grupo A tiene mayor número de ítems (IA, *big data*, nube, GEI, circularidad, renovables). Requerir 4 o más, asegura que la empresa adopta tecnologías realmente avanzadas, no basta con una adopción aislada y la adopción es coherente y sistemática. Para grupos con menos ítems (K, L), el umbral 3 o más es adecuado porque garantiza masa crítica, evita clasificar como avanzada a una empresa con solo una señal tenue de modernización.

La estimación del modelo se observa en la Tabla 2: el p-valor del estadístico chi-cuadrado $prob > Chi2$ igual a 0.0043 indica que este es estadísticamente significativo comparado con un nivel de significancia del 5 %.

Tabla 2. Estimación e interpretación del modelo [ecuación 2]

Parámetro	Valor
Tipo de regresión	Logistic
Log likelihood	-2.053.643
Number of obs	109
LR chi2(2)	10.90
Prob > chi2	0.0043
Pseudo R2	0.2098

Tabla de coeficientes:						
Y	Coef.	Std. Err.	z	P> z	[95% Conf. Interval]	
K	2.031.806	.8559496	2.37	0.018	.3541757	3.709437
L	1.696.411	1.133.517	1.50	0.134	-.5252419	3.918064
_cons	-4.422.293	1.054.474	-4.19	0.000	-6.489024	-2.355563

Fuente: cálculos propios.

Análisis e interpretación:

1. Coeficientes (Log-Odds):

- $K_Inversion$ ($\beta_1 = 2.03$): las empresas con alta inversión en capital tecnológico ($K=1$) tienen 2.03 unidades más en el log-odds de ser adoptantes tecnológicos avanzados en comparación con las empresas de baja inversión ($K=0$), y mantienen constante el nivel de automatización. El p-valor (0.018) es marginalmente significativo; con un nivel de confianza del 5 % sugiere que ha sido significativa la inversión en capital tecnológico. Es un predictor fuerte para la adopción de tecnología.

- $L_Automatizacion$ ($\beta_2 = 1.69$): las empresas con alta automatización ($L=1$) tienen 1.69 unidades más en el log-odds de alta adopción tecnológica que las de baja automatización ($L=0$), y mantienen constante la inversión. El p-valor de $z = (0.134)$ no es estadísticamente significativo, lo que podría indicar que, en esta muestra, la automatización y colaboración robótica es un predictor menos fuerte que la inversión en capital.

Para la interpretación se usa por facilidad el logaritmo de la razón de momios (log-odds), como se indica en la Tabla 3.

Tabla 3. Razón de momios (Odds Ratios), la forma más intuitiva [Ecuación 3]

Parámetro	Valor
Tipo de regresión	Logistic
Log likelihood	-2.053.643
Number of obs	109
LR chi2(2)	10.90
Prob > chi2	0.0043
Pseudo R2	0.2098

Tabla de coeficientes:						
Y	Odds Ratio	Std. Err.	z	P> z	[95% Conf. Interval]	
K	7.627.851	6.529.056	2.37	0.018	1.425006	40.8308
L	5.454.336	6.182.583	1.50	0.134	.5914123	50.30295
_cons	.0120067	.0126607	-4.19	0.000	.00152	.0948401

Fuente: cálculos propios.

- $K_Inversion$ ($OR = 7.62$): los *odds* (la razón de probabilidad de éxito a fracaso) son 7.62 veces mayores para una empresa con alta inversión en capital ($K=1$) que para una con baja inversión ($K=0$), *ceteris paribus*.
- $L_Automatizacion$ ($OR = 5.45$): son 5.45 veces mayores para una empresa con alta automatización ($L=1$), de ser un adoptante tecnológico avanzado, que para una con baja automatización ($L=0$), *ceteris paribus*.
- Causalidad vs. correlación: el modelo muestra una fuerte asociación, pero no puede probar causalidad. ¿La inversión causa la adopción, o las empresas que ya son innovadoras deciden invertir más? Probablemente, la relación es bidireccional.
- Sesgo de variable omitida: no se han incluido otras variables importantes que podrían afectar la adopción tecnológica, como el tamaño de la empresa, el sector industrial, la calidad de la gerencia o la competencia en el mercado.

Con base en este análisis, se puede concluir que tanto la inversión en capital tecnológico (entendido y explicado anteriormente en el grupo K) como la automatización de la fuerza laboral (L) están positivamente asociadas con una mayor probabilidad de adopción tecnológica general. El modelo clasifica correctamente para su predicción en un 93,5 % (Anexo 5), y sugiere que la inversión en capital humano con conocimientos en automatización actualmente es aún más fuerte que la inversión en *software*, *hardware*, entre otros. Este resultado apoya empíricamente el marco teórico de Cobb-Douglas: para mejorar la productividad total de los factores (A), las empresas deben invertir en la calidad y modernización de sus insumos de capital y trabajo.

Limitaciones por considerar:

- Variables proxy: son simplificaciones. El nivel real de “inversión” o “automatización” es más complejo que un 1 o un 0.

DISCUSIÓN

Los resultados empíricos confirman la hipótesis de una adopción tecnológica dual y desigual en Boyacá. Mientras las tecnologías 3.0 de conectividad básica están masificadas, existe un abismo hacia la adopción de herramientas 4.0 y verdes, especialmente en el segmento pyme.

Estos hallazgos son consistentes con estudios a nivel nacional. La Encuesta de Desarrollo e Innovación Tecnológica (EDIT) del DANE históricamente ha mostrado que las actividades de innovación y la adopción de tecnologías sofisticadas se concentran en grandes empresas y en regiones como Bogotá, Antioquia y Valle del Cauca. Boyacá, según nuestros datos, se alinea con las regiones de menor dinamismo innovador.

El panorama observado puede interpretarse a la luz del marco TOE. En el contexto *tecnológico*: aunque las tecnologías 4.0 están globalmente disponibles, su complejidad y costo las hacen menos accesibles para las pymes de la región. En el contexto *organizacional*: el predominio de micro y pequeñas empresas (86 % de la muestra) con recursos financieros y humanos limitados es el principal factor explicativo del rezago. Como señalan Durán y Castillo (2023), la falta de personal con competencias digitales avanzadas (IA, ciencia de datos) es una barrera crítica. En el contexto *ambiental*: la ausencia de un ecosistema de innovación denso en Boyacá —con pocas incubadoras, aceleradoras y fondos de capital de riesgo— limita el apoyo externo que las pymes necesitan para innovar. Las entrevistas a expertos confirmaron esta percepción, lo cual señala una débil articulación entre universidad, empresa y Estado.

Desde la perspectiva del crecimiento endógeno (Romer, 1990), el bajo nivel de inversión en tecnologías avanzadas sugiere un círculo vicioso: la baja productividad limita la capacidad de inversión en I+D y capital humano especializado, lo que a su vez perpetúa la baja productividad.

El Gobierno colombiano ha lanzado iniciativas como los programas de Transformación Digital de MinTIC y las políticas de innovación de Minciencias. Sin embargo, los resultados sugieren

que su impacto en regiones como Boyacá ha sido limitado, donde el enfoque se ha dado más en la «digitalización» (uso de internet) que en la «transformación digital» (adopción de tecnologías 4.0), que promueve la generación de empleo y la reducción de la pobreza a través de iniciativas tecnológicas (Munar, 2018).

El rezago tecnológico tiene implicaciones directas para el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS):

- *ODS 8 (Trabajo Decente y Crecimiento Económico)*: la baja productividad asociada a la escasa tecnología limita la creación de empleos de alta calidad y el crecimiento económico sostenible.
- *ODS 9 (Industria, Innovación e Infraestructura)*: los datos son un indicador directo de las debilidades de Boyacá en este objetivo. La brecha en innovación amenaza con ampliar la disparidad regional.
- *ODS 12 (Producción y Consumo Responsables)* y *ODS 13 (Acción por el Clima)*: la incipiente adopción de economía circular (23,8 %) y energías renovables (10 %) demuestra que el sector empresarial de Boyacá aún no contribuye de manera significativa a la sostenibilidad ambiental.

Se requiere una política pública regional que vaya más allá de la conectividad. Es necesario crear incentivos fiscales

para la adquisición de tecnología 4.0 por parte de las pymes, cofinanciar programas de formación avanzada en competencias digitales y fortalecer los centros de desarrollo tecnológico que actúen como puente entre la oferta de conocimiento de las universidades y la demanda del sector productivo.

Adicionalmente, no debe desatenderse la promoción de tecnologías que se han implementado con éxito y que presentan una tendencia al crecimiento, como el uso de internet a través de las redes sociales, el uso de dispositivos inteligentes de la Industria 3.0 y el uso de internet en los procesos productivos, como en el caso del almacenamiento en la nube de la Industria 4.0. De esta manera, como argumentan Cabezas *et al.*, (2023), se garantiza una evolución y mayor cobertura de las empresas respecto al uso de tecnologías, para así contribuir a un mayor acceso de la población a bienes y servicios sofisticados y competitivos, que aporten a la consolidación de ciudades inteligentes e incluso, según Tiwasing *et al.* (2023), en los sectores rurales.

Por otra parte, el componente de sostenibilidad permite orientar el análisis y la discusión hacia la necesidad de que las empresas adopten tecnologías o procesos amigables con el ambiente, que propendan a comunidades y ciudades sostenibles, para aportar así al logro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible y mejorar la resiliencia de las empresas en su adaptación frente a eventuales

fenómenos del cambio climático que puedan afectar u obstaculizar sus procesos productivos.

Otra de las estrategias que pueden examinarse a partir del presente estudio es la formulación de incentivos a los sectores económicos en los que, de acuerdo con los datos analizados, menos se aplican estas tecnologías. Por su parte, la implementación de tecnologías plantea desafíos y oportunidades en cuanto a los contenidos y prácticas educativas en colegios y universidades (Gutiérrez *et al.*, 2014). La automatización y el uso de inteligencia artificial cuestionan el papel del talento humano que interviene en los procesos productivos, y hace temer por su prescindencia y las consecuencias que esto tendría en el empleo, lo que subraya la importancia de una educación y formación profesional que preparen a los individuos para adaptarse a este nuevo entorno.

Durán y Castillo (2023), expertos en el tema, sugieren que este cambio tecnológico exige una transformación en el enfoque de la educación, pues se debe formar capital humano que se adapte a estas nuevas disposiciones tecnológicas, complementando las labores operacionales con habilidades de pensamiento complejo y competencias digitales. Por lo tanto, es importante revisar, en tal sentido, los programas académicos del departamento y del país. Alderete y Gutiérrez (2014) ya destacaban la importancia de herramientas como computadores e internet, funda-

mentales para acceder ágilmente al conocimiento global; pero, hoy en día, conocimientos en inteligencia artificial, inteligencia de datos y programación son fundamentales en el desarrollo de procesos empresariales.

De acuerdo con Gallego *et al.* (2015), es necesario incentivar estos conocimientos para que los profesionales sean más competitivos en los ámbitos local, nacional e internacional. Sin embargo, otro desafío radica en la incapacidad de las micro, pequeñas y medianas empresas del departamento para adoptar estas tecnologías, pues la existencia de un capital humano altamente capacitado en la Industria 4.0 no garantiza un impacto regional, si el sector empresarial no está preparado para absorberlo, lo que provoca la migración de talentos a otra parte del país o del mundo.

Para abordar esta problemática, Gupta *et al.* (2023) proponen incentivar a las pequeñas empresas desde la institucionalidad con estímulos o políticas del Gobierno departamental que vinculen la implementación de tecnologías con reducciones impositivas, teniendo en cuenta factores que influyen en la adopción de las tecnologías, como el capital extranjero, la edad de la empresa, la edad y el sexo del propietario, edad de los empleados y la educación de estos.

CONCLUSIONES

Este estudio ofrece una radiografía de la adopción tecnológica en el departa-

mento de Boyacá, que permite extraer conclusiones relevantes para la academia y los hacedores de política.

Conclusión empírica principal: el análisis de los datos de la encuesta confirma la existencia de un *paisaje tecnológico de doble velocidad* en Boyacá. Se observa una adopción casi universal de herramientas digitales básicas (propias de la Industria 3.0), como el uso de internet y redes sociales. Sin embargo, esta base coexiste con una adopción fragmentada y en etapa muy temprana de tecnologías avanzadas (Industria 4.0) como la IA, el *big data* y la robótica, así como de tecnologías verdes. Esta dualidad es la característica central del estado de la transformación digital en la región.

El *rezago tecnológico* en las pymes de Boyacá, interpretado a través de las teorías de crecimiento endógeno y el marco TOE, representa el principal cuello de botella para la competitividad regional. La falta de inversión en tecnologías transformadoras no es solo un problema de infraestructura, sino el resultado de barreras estructurales de financiamiento, escasez de capital humano avanzado y un ecosistema de innovación poco desarrollado.

El desafío para Boyacá trasciende la simple digitalización. Para cerrar la brecha de productividad y competitividad, se necesita una *estrategia integral y focalizada*. Esto implica un giro en las

políticas públicas, pasando de subsidiar el acceso a internet a crear incentivos directos para la inversión en tecnologías 4.0, fomentar la colaboración universidad-empresa para la transferencia de conocimiento y, fundamentalmente, alinear la oferta educativa de colegios y universidades con las competencias que demanda la economía del siglo XXI. Sin esta alineación, cualquier esfuerzo de modernización tecnológica será insostenible.

Finalmente, la escasa adopción de tecnologías verdes evidencia una desconexión entre las operaciones empresariales y los imperativos de la sostenibilidad. Impulsar estas tecnologías no solo es vital para cumplir con los ODS, sino que representa una oportunidad para generar nuevas ventajas competitivas en una economía global cada vez más consciente del impacto ambiental.

Al analizar la evolución de la implementación de tecnologías en el departamento de Boyacá, en comparación con el resto del país y con países desarrollados, debe señalarse que, a diferencia de estos últimos, que experimentaron una transición energética gradual, en Boyacá y en el país, si bien se explotaban recursos como el carbón (que movió al primer mundo a finales del siglo XIX y principios del XX), este mineral solo fue incluido parcialmente en el desarrollo local e industrial, lo que llevó a una apresurada utilización de combustibles derivados

del petróleo, que generó un rezago tecnológico en la región.

Mientras se desarrollaba la revolución industrial en países como Inglaterra, Alemania, y Francia, Colombia, especialmente Boyacá, mantenía una economía predominantemente agrícola. Esta disparidad histórica influyó significativamente en la posterior adopción de tecnologías en la región.

Un análisis de la puesta en marcha de tecnologías 3.0 y 4.0 en el departamento de Boyacá revela una falta de información al respecto a nivel local. Para subsanar esta carencia, se llevó a cabo una encuesta entre las empresas más grandes del departamento. Los resultados indican un nivel relativamente alto de implementación de tecnologías 3.0, especialmente en el uso de redes sociales y de dispositivos inteligentes en los procesos productivos. Sin embargo, se identificó un rezago en tecnologías como la impresión 3D y el comercio electrónico, principalmente en la importación o exportación de materias primas.

De acuerdo con resultados del modelo experimental desde el marco de Cobb-Douglas, es importante resaltar que la adopción de tecnologías 4.0 en Boyacá se encuentra aún en una etapa inicial. Si bien se observan avances en áreas como el uso de internet en los procesos productivos, el internet de las cosas y el almacenamiento en la

nube, existe un déficit en capacitación laboral para la cobertura de tecnologías más avanzadas como la colaboración robótica, la inteligencia de datos y la inteligencia artificial.

Además de las políticas públicas propuestas, se recomienda para una etapa posterior evaluar si realmente funcionan las políticas existentes o las nuevas que se apliquen, mediante una investigación concreta de Evaluación de Impacto del Programa ‘X’ de Fomento a la Innovación en las PYMES de Boyacá”. Y, finalmente, contextualizar los hallazgos mediante comparaciones con otras regiones y sectores.

De igual manera, el estudio identifica barreras como “costo” y “falta de inversión tecnológica”. Una investigación cualitativa o estudio de caso en pymes en Boyacá podría ayudar a identificar qué significan realmente estas barreras. Esto también podría llevarse a cabo mediante una investigación que demuestre las barreras y facilitadores organizacionales para la transformación digital, comparando con otras empresas avanzadas en tecnologías 4.0.

El estudio se centró en la demanda de tecnología (las empresas que adoptan); pero otra línea de investigación puede consistir en el «análisis de la oferta de soluciones tecnológicas y servicios de soporte para la Industria 4.0 en Boyacá», y, a través del mapeado y las entrevistas a los proveedores de tecnología locales,

consultores, empresas de *software* y centros de I+D, evaluar si falta una oferta local, asequible y adaptada a las necesidades de las pymes. Otra línea también puede ser medir el “impacto de la adopción de tecnologías en la productividad y rentabilidad de las pymes en Boyacá”, o efectuar una investigación donde se identifiquen las trayectorias de adopción tecnológica en el sector empresarial de Boyacá, mediante un estudio longitudinal, puesto que el alcance del actual se presenta solamente para un tiempo determinado.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a los evaluadores del presente artículo, al grupo de investigación La Sociedad Económica en Colombia (SOECOL), adscrito a la Facultad de Ciencias Económicas y Administrativas de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, sede Tunja, por apoyar el estudio en el marco del proyecto “Estrategias de desarrollo regional en el departamento de Boyacá Economía 4.0”, código SGI 3411.

FINANCIAMIENTO

Apoyo de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, sede Tunja, por el suministro de recursos técnicos: Software STATA ver.15, operativos y financieros derivados del rubro 5 % posgrados.

DECLARACIÓN DE CONFLICTO DE INTERESES

Los autores expresan que el trabajo sometido no representa ningún conflicto de intereses con ellos, la revista, la entidad editora ni las entidades financiadoras.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

María Isabel Rojas Triana y Julián Yamid Gómez concibieron el estudio: conceptualización metodológica, recopilación de los datos y revisión y edición del manuscrito. María Isabel Rojas Triana realizó curación de datos, mode-

lación y análisis formal; los dos autores revisaron y aprobaron la versión final.

DECLARACIÓN SOBRE EL USO DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL

En la elaboración de este artículo se utilizaron herramientas de inteligencia artificial generativa como apoyo en tareas de edición, revisión de estilo y mejora de la claridad del texto. Los autores asumen plena responsabilidad por el contenido, los análisis, la interpretación de los resultados y las conclusiones presentadas.

REFERENCIAS

- [1] Acemoglu, D., & Restrepo, P. (2019). The Wrong Kind of AI? Artificial Intelligence and the Future of Labor Demand. *Cambridge Journal of Regions, Economy and Society*, 13(1), 25-35. <https://doi.org/10.1093/cjres/rsz022>
- [2] Alderete, M. V., & Gutiérrez, L. H. (2014). Drivers of Information and Communication Technologies Adoption in Colombian Services Firms. *International Journal of Business Information Systems*, 17(4), 373-397. <https://doi.org/10.1504/IJBIS.2014.065553>
- [3] Astarita, R. (2017, 15 de abril). Funciones de producción y capital. *Blog de Rolando Astarita*. <https://rolandoastarita.blog/2017/04/15/funciones-de-produccion-y-capital/>
- [4] Bautista, S. (2024, 17 de febrero). *Grandes empresas y academia v1* [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=G0afv3BCfHU>
- [5] Becerra, I., Ghotme, K., Romeiro, E., & Bernal, L. R. (2022). Evaluation of the Educational Management Process for the Integration of Didactic Models Mediated by ICT: A Multiple Case Study. *Ensaio: Avaliação e Políticas Públicas em Educação*, 30(116), 788-812. <https://doi.org/10.1590/s0104-403620210002902889>
- [6] Bermúdez, M., García, J., & Ramírez, L. (2019). La Industria 4.0 en Colombia: desafíos y oportunidades. *Revista de Innovación y Tecnología*, 14(2), 45-60.
- [7] Bhattacharjya, B. R., Kakoty, S. K., & Singha, S. (2019). A Feedback Mechanism for Appropriate Technology Development and Dissemination: Case Study Approach. *Technology in Society*, 57, 104-114.
- [8] Cabezas, R. T., Vanegas-Barrero, V., & Lesmes-Patino, J. A. (2023). *Analysis of Technological Trends in Digital Public Services: The Context of Colombia* [Speech]. Conference on Information Systems and Technologies (CISTI). <https://doi.org/10.23919/CISTI58278.2023.1021205>
- [9] Camargo, G. (1935). *Geografía histórica de Sogamoso*. Editorial Sugamuxi.
- [10] Cameron, A. C., & Trivedi, P. K. (2005). *Microeconometrics: Methods and applications*. Cambridge University Press.
- [11] Chaves Palacios, J. (2004). Desarrollo tecnológico en la primera revolución industrial. *Revista de Historia*, 17, 93-109.

- [12] Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). (2024). *Encuesta de Micronegocios (EMICRON)–II trimestre de 2024*. Boletín técnico. <https://www.dane.gov.co/files/operaciones/EMICRON/bol-EMICRON-IItrim2024.pdf>
- [13] Díaz, L. C. P. (2013). Los primeros años del desarrollo empresarial en Boyacá. *Historia Caribe*, 8(22), 231-249.
- [14] Durán, J., & Castillo, R. (2023). Factors Related to Information and Communication Technologies Adoption in Small Businesses in Colombia. *Journal of Innovation and Entrepreneurship*, 12(55). <https://doi.org/10.1186/s13731-023-00272-5>
- [15] Fagan, B. (2018). Fishing: How the Sea Fed Civilization. *Journal of Interdisciplinary History*, 49(2), 315-316. https://doi.org/10.1162/jinh_r_01271
- [16] Feliu, G. & Sudrià C. (2013). *Introducción a la historia económica mundial* (2.a ed.). Universitat de València.
- [17] Fonseca, D. (2013). Desarrollo e implementación de las TIC en las pymes de Boyacá-Colombia. *FAEDPYME International Review*, 2(4), 49-59.
- [18] Ford, M. (2021). *Rule of the Robots: How Artificial Intelligence Will Transform Everything*. John Murray Press.
- [19] Gallego, J. M., Gutiérrez, L. H., & Lee, S. H. (2015). A Firm-Level Analysis of ICT Adoption in an Emerging Economy. *Industrial and Corporate Change*, 24(1), 191-221. <https://doi.org/10.1093/icc/dtu009>
- [20] Gómez, C., Valencia, F., & Marulanda, C. (2018). Las tecnologías de la información y las comunicaciones y los servicios tecnológicos en las entidades públicas del Triángulo del Café en Colombia. *Información Tecnológica*, 29(4), 119-126. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642018000400119>
- [21] Gupta, V., Ranjan, S., Chatterjee, A., & Alka, M. (2023). *India's Technology-Led Development: Managing Transitions to a Digital Future* (Vol. 1). Routledge.
- [22] Gutiérrez, N.F., Calvo, M.A., Ramírez, J.J. & Olarte, F.A. (2014). *Work-in-Progress: Engineering and Project-Based Learning as the Focus of Technology Education in Colombian High Schools* [Speech] International Conference on Interactive Collaborative Learning, ICL 2014, 897-900.
- [23] Huérfano Aguilar, S. D. (2021). *Del buey a la locomotora, energía, acero y metabolismo en el Valle de Iraca (Boyacá-Colombia, 1954-1983)* [Tesis de maestría]

- en Historia]. Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/79815>
- [24] Jakobsen, K., Mikalsen, M., & Lilleng, G. (2023). A Literature Review of Smart Technology Domains with Implications for Research on Smart Rural Communities. *Technology in Society*, 75, 102397. <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2023.102397>
- [25] Joyanes, L. (2017). *Industria 4.0: la cuarta revolución industrial*. Editorial Alfaomega.
- [26] Mantilla Avendaño, L. T. (2019). *Industria 5.0: ¿vuelve el hombre al centro de los procesos de producción?* [Trabajo de grado en Economía], Universidad EAFIT. <http://hdl.handle.net/10784/15195>
- [27] Melo, J. (2017). *Historia mínima de Colombia*. Colegio de México, Editorial Turner.
- [28] Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones de Colombia. (2018). *Política de Gobierno Digital*. MinTIC.
- [29] Montier, J., & Pilkington, P. (2018). *Total Factor Productivity Growth = Totally Fictitious Pretentious Garbage*. GMO.
- [30] Munar, L. M. (2018). Software Development in Colombia: A Legal Approach. *Law, State and Telecommunications Review*, 10(2), 53-66. <https://doi.org/10.26512/lstr.v10i2.21493>
- [31] OECD. (2019). *OECD Skills Outlook 2019: Thriving in a Digital World*. OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/df80bc12-en>
- [32] Roel, V. (1998). *La tercera revolución industrial y la era del conocimiento*. Universidad Editorial Mayor de San Marcos, Fondo Editorial.
- [33] Rogers, E. M. (2003). *Diffusion of Innovations* (5th ed.). Free Press.
- [34] Romer, P. M. (1990). Endogenous Technological Change. *Journal of Political Economy*, 98(5), S71-S102. <https://doi.org/10.1086/261725>
- [35] Schumpeter, J. A. (1942). *Capitalism, Socialism, and Democracy*. Harper & Brothers.
- [36] Schwab, K. (2016). *The Fourth Industrial Revolution*. World Economic Forum.

- [37] Schwab, K. (2020). La Cuarta Revolución Industrial. *Futuro Hoy*, 1(1), 6-10. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4299164>
- [38] Solow, R. M. (1956). A Contribution to the Theory of Economic Growth. *Quarterly Journal of Economics*, 70(1), 65-94. <https://doi.org/10.2307/1884513>
- [39] Tiwasing, P., Clark, B., & Gkartzios, M. (2022). How Can Rural Businesses Thrive in the Digital Economy? *Heliyon*, 8(10), e10745. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e10745>
- [40] Tornatzky, L. G., & Fleischer, M. (1990). *The Processes of Technological Innovation*. Lexington Books.
- [41] Treviño, E., Béjar, R., & Naranjo, M. (2020). Methodological Challenges in the Use of Large-Scale Assessment Data for Policy Analysis. *International Journal of Educational Development*, 74, 102164. <https://doi.org/10.1016/j.ijedudev.2020.102164>
- [42] Urbina Orantes, J. (2020). ¿Influyeron la cultura y el aprendizaje en la evolución humana? *Revista Digital Universitaria*, 21(5). <https://doi.org/10.22201/cuaieed.16076079e.2020.21.5.3>
- [43] Wooldridge, J. M. (2010). *Econometric Analysis of Cross Section and Panel Data* (2nd ed.). MIT Press.

Anexo 1. Encuesta de implementación de tecnologías en las empresas de Boyacá

Número	Categoría	Pregunta	N.º de preguntas por categoría		
1	Información de la empresa	Nombre de la persona que responde la encuesta.	6		
2		Cargo en la empresa de la persona que responde la encuesta.			
3		Nombre de la empresa.			
4		Municipio o municipios donde opera la empresa.			
5		Tamaño de la empresa.			
6		Actividad económica de la empresa.			
7	Tecnologías 4.0	¿La empresa cuenta con procesos productivos automatizados? (colaboración robótica).	8		
8		¿La empresa cuenta con empleados en modalidad de teletrabajo o virtualidad?			
9		¿La empresa cuenta con herramientas de <i>Big Data</i> ?			
10		¿La empresa usa tecnologías digitales como uso de sensores y/o sistemas de información? (cadena de suministros digitales).			
11		¿La empresa cuenta con almacenamiento de información en la nube?			
12		¿La empresa utiliza sistemas ciberfísicos?			
13		¿La empresa utiliza la inteligencia artificial (IA) en alguno de sus procesos? (Uso de asistentes virtuales, análisis de datos y toma de decisiones, personalización de productos y servicios, automatización de tareas, etc.)			
14		¿La empresa utiliza el internet de las cosas? (conectar maquinas entre sí y con la nube)			
15		Tecnologías 3.0		¿La empresa cuenta con procesos productivos en los que se use internet?	6
16				¿La empresa utiliza canales de comunicación a través de redes sociales o de comunicación digital?	
17	¿La empresa cuenta con dispositivos <i>smart</i> ? (<i>Smart grid, Smart phones, Smart TV</i>).				
18	¿La empresa aprovecha y se desenvuelve en la globalización económica a través de importaciones o exportaciones de materias primas?				
19	¿La empresa utiliza tecnologías digitales en atención al cliente como en procesos internos de la empresa? (<i>front-office</i> y <i>back-office</i>).				
20	¿La empresa utiliza las impresiones 3D? (Las también conocidas como fabricación aditiva, son un proceso de creación de objetos físicos tridimensionales a partir de un archivo digital).				
21	Tecnologías verdes	¿La empresa cuenta con procesos de mitigación de gases de efecto invernadero?	3		
22		¿La empresa cuenta con sistemas de producción basados en economía circular?			
23		¿La empresa cuenta con mecanismos de energía renovable?			

Fuente: elaboración propia.

Anexo 2. Preguntas de las entrevistas a grandes empresas

Numeración	Preguntas de las entrevistas
1	¿Había escuchado hablar sobre la economía o la industria 4.0?
2	¿Cuáles de las siguientes herramientas de la economía 4.0 está implementando actualmente en su empresa? <ul style="list-style-type: none"> • Inteligencia artificial • <i>Big data</i> • Almacenamiento en la nube • Automatización y robótica
3	¿Han experimentado algún cambio en la cultura empresarial y en la forma de trabajar desde que comenzaron a implementar tecnologías de la economía 4.0?
4	¿Han notado un aumento en la eficiencia y la productividad en su empresa desde que comenzaron a utilizar tecnologías de la economía 4.0?
5	¿Qué desafíos han encontrado al implementar estas tecnologías en su empresa?
6	¿Tienen algún plan o estrategia a largo plazo para seguir implementando tecnologías de la economía 4.0 en su empresa?
7	¿Cree que el gobierno de Boyacá está haciendo lo suficiente para impulsar la economía 4.0 en el departamento?

Fuente: elaboración propia.

Anexo 3. Preguntas entrevistas a expertos

Numeración	Preguntas de las entrevistas
1	¿Desde su perspectiva, puede dar un contexto o una descripción acerca de la industria y la economía 4.0?
2	¿Cuál es su perspectiva frente a la implementación de la tecnología 4.0 en las empresas del departamento de Boyacá (sector industrial, manufacturero, educación, salud y turismo)?
3	¿Cuáles cree que han sido las dificultades o las barreras que se presentan en aquellas empresas que no han implementado este tipo de tecnologías?
4	¿Qué estrategias sugiere usted como conocedor del tema, para buscar el crecimiento del desarrollo regional a través de este tipo de tecnología?
5	¿Cuáles serían los impactos esperados si se implementa este tipo de tecnología en las empresas del departamento?
6	¿Cree que la economía 4.0 podría ayudar a resolver algunos problemas económicos actuales de Boyacá?
7	¿Cree que el gobierno de Boyacá está haciendo lo suficiente para impulsar la economía 4.0 en el departamento?

Fuente: elaboración propia.

Anexo 4. Clasificación de las preguntas de la encuesta en tres grupos

Clasificación de las preguntas de la encuesta

N.º Pregunta	Clase de tecnología	Descripción de la pregunta	Variable proxy asignada
Grupo A: adopción de la tecnología (proxy para el factor A de PTF)			
9	Tecnologías 4.0	¿La empresa cuenta con herramientas de Big Data?	A
11	Tecnologías 4.0	¿La empresa cuenta con almacenamiento de información en la nube?	A
13	Tecnologías 4.0	¿La empresa utiliza la inteligencia artificial (IA) en alguno de sus procesos?	A

21	Tecnologías verdes	¿La empresa cuenta con procesos de mitigación de gases de efecto invernadero?	A
22	Tecnologías verdes	¿La empresa cuenta con sistemas de producción basados en economía circular?	A
23	Tecnologías verdes	¿La empresa cuenta con mecanismos de energía renovable?	A
Grupo K: inversión en capital tecnológico (proxy para K)			
10	Tecnologías 4.0	¿La empresa usa tecnologías digitales como uso de sensores y/o sistemas de información?	K
12	Tecnologías 4.0	¿La empresa utiliza sistemas ciberfísicos?	K
14	Tecnologías 4.0	¿La empresa utiliza el internet de las cosas (IoT)?	K
17	Tecnologías 3.0	¿La empresa cuenta con dispositivos smart? (Smart grid, Smart phones, Smart TV).	K
18	Tecnologías 3.0	¿La empresa aprovecha la globalización económica a través de importaciones o exportaciones?	K
20	Tecnologías 3.0	¿La empresa utiliza las impresiones 3D? (fabricación aditiva).	K
Grupo L: capital humano y automatización (proxy para L)			
7	Tecnologías 4.0	¿La empresa cuenta con procesos productivos automatizados? (colaboración robótica).	L
8	Tecnologías 4.0	¿La empresa cuenta con empleados en modalidad de teletrabajo o virtualidad?	L
15	Tecnologías 3.0	¿La empresa cuenta con procesos productivos en los que se use internet?	L
16	Tecnologías 3.0	¿La empresa utiliza canales de comunicación a través de redes sociales o de comunicación digital?	L
19	Tecnologías 3.0	¿La empresa utiliza tecnologías digitales en atención al cliente como en procesos internos?	L

Fuente: elaboración propia

Anexo 5. Sensibilidad del modelo adaptado a Coob-Douglas

Classified	True		
	D	~D	Total
+	0	0	0
-	7	102	109
Total	7	102	109
Classified + if predicted $\Pr(D) \geq 0.5$			
True D defined as $Y \neq 0$			
Sensitivity $\Pr(+ D)$		0.00%	
Specificity $\Pr(- \sim D)$		100.00%	
Positive predictive value $\Pr(D +)$.	
Negative predictive value $\Pr(\sim D -)$		93.58%	
False + rate for true ~D $\Pr(+ \sim D)$		0.00%	
False - rate for true D $\Pr(- D)$		100.00%	
False + rate for classified + $\Pr(-D +)$.	
False - rate for classified - $\Pr(D -)$		6.42%	
Correctly classified		93.58%	

Fuente: cálculos propios