Agricultura digital y eficiencia logística: evaluación del uso de agricultura 4.0 en la cadena de suministro del cultivo de aguacate en Colombia

Elisa del Carmen Navarro Romero, Phd[1,2]
[1] *Universidad El Bosque, Colombia, ednavarro@unbosque.edu.co*
[2] *Universidad Militar Nueva Granada, Colombia, elisa.navarro@unimilitar.edu.co*

Resumen– ***Este análisis se centra en cómo el software de gestión afecta la automatización de la cadena de suministro del aguacate en Colombia, en el contexto de la agricultura digital. A través del análisis de casos de implementación y fuentes secundarias, se verifica que Estas herramientas digitales mejoran significativamente la eficiencia operativa, la trazabilidad y la toma de decisiones al centralizar datos cruciales del proceso productivo. La implementación de estas herramientas ha logrado disminuir las pérdidas poscosecha hasta un 12%, aumentar la trazabilidad en un 90% y reducir los costos logísticos entre un 5% y un 10%. Asimismo, los productores que las adoptan pueden aumentar sus márgenes de rentabilidad en un 15% y acelerar la respuesta logística en un 20–30%. Estas soluciones permiten gestionar inventarios, controlar calidad y cumplir estándares internacionales, optimizando recursos y promoviendo transparencia. No obstante, persisten barreras como los altos costos iniciales, la falta de capacitación técnica y la resistencia al cambio. Se concluye que el software de gestión constituye una herramienta estratégica para incrementar la competitividad del sector aguacatero colombiano, ofreciendo evidencia para guiar políticas públicas de transformación digital agrícola.***

Palabras claves— ***Automatización, cadena de suministro agrícola, aguacate, agricultura digital.***

Abstract: ***This study evaluates the impact of management software on the automation of the supply chain in avocado cultivation in Colombia. The findings show that this tool enhances operational efficiency, traceability, and decision-making by integrating key information throughout the production process. Its implementation has enabled post-harvest losses to be reduced by up to 12%, improved traceability by 90%, and lowered logistics costs by 5% to 10%. Additionally, producers who adopt these solutions are estimated to increase their profit margins by 15% and accelerate logistics response times by 20% to 30%. The software allows for inventory control, quality management, and compliance with market standards, optimizing resources and ensuring process transparency. However, its adoption faces barriers such as high costs, lack of training, and resistance to change. Despite these challenges, management software is concluded to be a strategic solution to strengthen the competitiveness and sustainability of Colombian avocados in national and international markets.***

Keywords — Automation, agricultural supply chain, avocado, digital agriculture.

I. INTRODUCCIÓN

La agricultura se enfrenta a uno de sus retos más grandes actualmente: actualizar tanto sus procesos de producción como logísticos en un entorno cada vez más digitalizado y competitivo. La agricultura digital aparece como un enfoque completo que incluye tecnologías como el software de gestión, el Internet de las Cosas (IoT) y el blockchain, con el propósito de mejorar las cadenas de suministro, aumentar la trazabilidad y hacer más eficiente la operación en el sector agroindustrial. En países como Colombia, donde el aguacate se ha destacado como uno de los productos agrícolas con mayor posibilidad de exportación, estas tecnologías representan una oportunidad estratégica para potenciar su competitividad en mercados internacionales [1], [2].

La variedad de aguacate Hass ha crecido rápidamente en años recientes, aumentando sus exportaciones de 10 millones de USD en 2014 a 230 millones de USD en 2022, consolidándose como uno de los principales productos de exportación no tradicionales del país [3]. Sin embargo, este crecimiento ha dejado al descubierto limitaciones en la logística, como pérdidas después de la cosecha, fallos en el control de calidad y una trazabilidad insuficiente, que disminuyen la rentabilidad y sostenibilidad del negocio [4].

La adopción de software de gestión agrícola se plantea como una solución para abordar estos retos. Esta herramienta permite unificar datos de campo, procesos logísticos y operaciones comerciales en una sola plataforma, lo que facilita la toma de decisiones basadas en datos, el control de inventarios, la planificación de cosechas y el seguimiento de productos desde su fuente hasta el destino final [5]. Sin embargo, su implementación aún enfrenta retos como elevados costos de inversión, la falta de capacitación técnica y la resistencia al cambio de los productores [6].

Este estudio pretende evaluar el impacto del uso de software de gestión en la automatización de la cadena de suministro del cultivo de aguacate en Colombia, analizando cómo influye en la eficiencia logística, en la trazabilidad del producto y en la toma de decisiones estratégicas. La investigación aspira a proporcionar evidencia empírica que demuestre el valor de estas tecnologías dentro del marco de la

agricultura 4.0, y ofrecer recomendaciones prácticas para su adopción efectiva en el sector [7].

II. La Industria del Aguacate

En la última década, el aguacate, sobre todo la variedad Hass, se ha vuelto un producto sumamente solicitado en el panorama internacional, gracias a sus reconocidos beneficios para la salud, como el suministro de grasas saludables, fibra y vitaminas esenciales. La creciente popularidad de este alimento ha causado una gran expansión de su cultivo en varios países de América Latina, como México, Perú, Chile y especialmente Colombia, que se ha destacado como uno de los principales exportadores emergentes a nivel mundial [6].

No obstante, este incremento en la demanda conlleva varios desafíos. En el contexto colombiano, regiones como Antioquia, Tolima, Huila y Caldas han extendido sus áreas de cultivo, generando oportunidades económicas, pero también provocando tensiones ambientales y sociales. Entre los retos más destacados están el uso intensivo de agua, el cambio de las coberturas forestales por monocultivos y la presión sobre los pequeños productores, que tienen dificultades para integrarse equitativamente en las cadenas de valor. Frente a esto, en el país se han empezado a implementar distintas investigaciones y proyectos piloto que aplican soluciones basadas en tecnologías digitales y modelos de producción sostenibles. Estas iniciativas buscan mejorar la trazabilidad, la eficiencia operativa y la justa distribución de los beneficios, proponiendo un enfoque que combine rentabilidad, sostenibilidad ambiental y justicia social como pilares del desarrollo agrícola moderno en Colombia. [8].

En la Figura 1 se observa la distribución porcentual de la producción mundial de aguacate en 2018, donde también destacan naciones como México (44%) República Dominicana (13%), Perú (10%), Colombia (8%) e Indonesia (7%) como actores relevantes del mercado. Otros países con menor participación incluyen a Brasil (5%), Kenia (5%), Estados Unidos (3%), Venezuela (3%) e Israel (3%), lo que evidencia una concentración significativa de la producción en pocos países latinoamericanos.

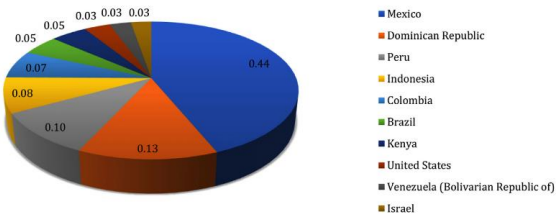

Figure 1. Participación por país en la producción global de aguacate (2018).
Fuente: PR Newswire & Food and Agriculture Organization (FAO). (2019). *Avocado market: Harvested area of avocado worldwide and global avocado production in 2018* https://www.prnewswire.com/

A. Cadena de Suministro del Aguacate

La creciente producción de aguacate y su creciente popularidad han impulsado una expansión acelerada de la producción, en Colombia y en América Latina en general, lo que ha generado importantes desafíos en términos ambientales, sociales y logísticos. En este contexto, diversas investigaciones recientes han comenzado a cuestionar los modelos tradicionales de producción y distribución, proponiendo enfoques más integrales que conjuguen eficiencia económica con responsabilidad social. Estos estudios, desarrollados a través de colaboraciones interdisciplinarias, plantean nuevas formas de gestionar la cadena de suministro del aguacate, promoviendo prácticas más sostenibles frente a las presiones del mercado global.

Como muestra la Fig.2, la cadena de suministro del aguacate presenta una estructura compleja que abarca desde la producción primaria hasta la transformación y distribución hacia múltiples industrias, incluyendo la alimentaria, farmacéutica, cosmética y textil.

La estructura propuesta de una cadena de suministro integral del aguacate, en la que se articulan distintos centros de procesamiento y distribución con industrias finales. Desde la finca productora, los diferentes subproductos del aguacate —como pulpa, semillas, hojas y cáscaras— son canalizados hacia plantas especializadas para su transformación y posterior distribución a sectores como el alimenticio, farmacéutico, cosmético, textil y de reciclaje. Este modelo promueve el aprovechamiento total del fruto y sus residuos, favoreciendo la sostenibilidad y la economía circular en el agro colombiano.

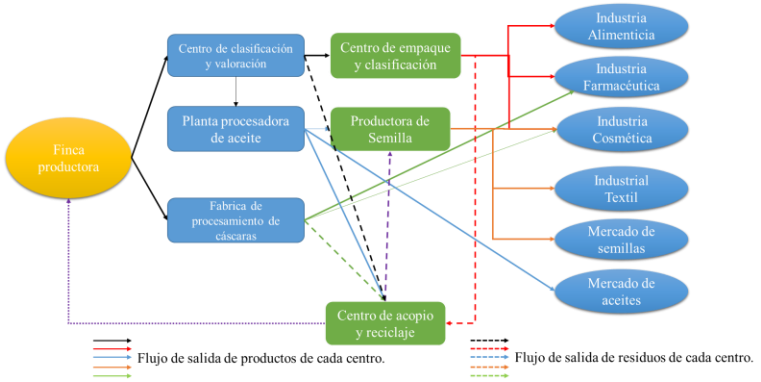

Figure 2. Cadena de suministro aguacate

Fuente: PR Newswire & Food and Agriculture Organization (FAO). (2019). *Avocado market: Harvested area of avocado worldwide and global avocado production in 2018* https://www.prnewswire.com/

Este proceso genera no solo productos de alto valor comercial, sino también subproductos que, adecuadamente gestionados, pueden integrarse en esquemas de economía circular. Sin embargo, uno de los principales retos actuales radica en la incorporación de tecnologías avanzadas que permitan una trazabilidad eficiente, una mayor automatización

en los centros de acopio y procesamiento, y una gestión inteligente de residuos. La transformación digital de esta cadena no solo representa una oportunidad para optimizar recursos y reducir impactos ambientales, sino también para fortalecer la competitividad del sector en los mercados internacionales.

III. AGRICULTURA DIGITAL (4.0)

A. ¿Qué es la Agricultura Digital?

La agricultura digital simboliza un cambio importante en el sector agrícola, al incorporar tecnologías avanzadas como sensores, inteligencia artificial, análisis de datos y conectividad para maximizar la producción agrícola. Este cambio pretende aumentar la eficiencia, sostenibilidad y capacidad de recuperación del sector ante retos como el cambio climático y la creciente demanda de alimentos [9].

La agricultura digital, o agricultura 4.0, se centra en el empleo de tecnologías digitales para la recopilación, el procesamiento y el análisis instantáneo de datos agrícolas. Estas herramientas posibilitan que los agricultores tomen decisiones informadas en cuanto al manejo de cultivos, uso de recursos y prácticas sustentables. Tecnologías como el Internet de las Cosas (IoT), drones, sistemas de información geográfica (SIG) y plataformas de gestión agrícola forman parte fundamental de esta revolución tecnológica [10].

B. Situación de la Agricultura Digital en Colombia

La implementación de tecnologías digitales en la agricultura ha tenido progresos notables, aunque sigue enfrentando retos. Iniciativas como el proyecto Agro 4.0, que tiene como objetivo proponer recomendaciones de política pública para fomentar la adopción de tecnologías avanzadas y el uso de datos en el agro colombiano, con el fin de mejorar su productividad y competitividad, han demostrado el potencial de la inteligencia artificial y el IoT en cultivos estratégicos como el cacao, café y aguacate, mejorando la eficiencia y rentabilidad de pequeños y medianos productores. No obstante, siguen existiendo barreras vinculadas a la interoperabilidad de las soluciones tecnológicas y a la necesidad de ajustarlas a las particularidades de cada cultivo y región[11].

Asimismo, la carencia de infraestructura adecuada, formación y políticas públicas efectivas restringe la adopción generalizada de estas tecnologías en la agricultura colombiana. La brecha digital entre zonas urbanas y rurales, así como la escasa conectividad en áreas remotas, son factores que deben abordarse para garantizar una transformación digital inclusiva y equitativa[12].

C. Impacto de la Agricultura Digital

Según el Ministerio de Agricultura (2023), la implementación de tecnologías digitales en la agricultura ha generado beneficios medibles en diversos niveles de la cadena productiva. Estudios recientes en Colombia indican que el uso de plataformas de agricultura digital ha permitido aumentar la productividad de cultivos estratégicos como el aguacate, el café y el cacao entre un 10% y un 25%, gracias a una mejor planificación de siembras, monitoreo de condiciones y control de insumos.

Plataformas como Siembra.Co han facilitado la conexión directa entre productores y consumidores finales, mejorando la trazabilidad en más del 80% de los procesos certificados y reduciendo los intermediarios, lo que se traduce en un aumento del ingreso directo al agricultor de hasta un 18% en promedio[13].

Adicionalmente, la digitalización ha permitido reducir hasta un 30% el uso ineficiente de agua y fertilizantes mediante sistemas de riego inteligente y monitoreo climático en tiempo real. También ha mejorado la capacidad de respuesta ante eventos climáticos adversos, con sistemas de alerta temprana que han logrado anticipar riesgos en un 70% de los casos analizados en fincas piloto[14].

En la figura 3, se presenta una proyección de las mejoras en los procesos:

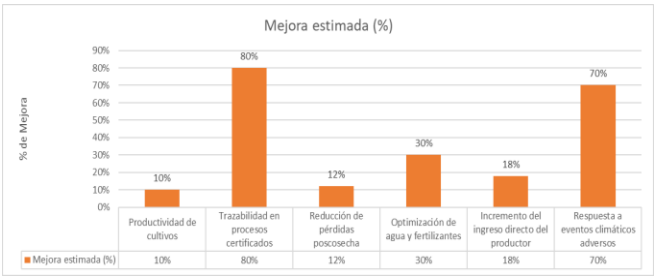

Figure 3. Porcentaje de mejora

Fuente: Ministerio de Agricultura, 2023.

Estos avances apoyan una agricultura más resistente, sostenible y rentable, alineada con los propósitos de desarrollo rural y seguridad alimentaria.

D. Apoyo del Gobierno Colombiano a la Agricultura: Inversiones y Políticas Recientes

El Gobierno nacional ha implementado una serie de incentivos destinados a mejorar las condiciones económicas y productivas de los campesinos. Entre estas iniciativas resalta la asignación de 45.000 millones de pesos al Incentivo a la Capitalización Rural (ICR), buscando apoyar proyectos de inversión liderados por pequeños productores rurales (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2024b). Adicionalmente, se han destinado más de 75.000 millones de pesos a subsidiar las tasas de interés de los créditos

agropecuarios, facilitando el acceso a financiamiento en condiciones preferenciales, como una tasa efectiva anual del 4% para los campesinos (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2023c)[8][15]. Se asignaron también más de 100.000 millones de pesos adicionales al ICR con el fin de reducir los saldos de crédito de los productores, aliviando así sus cargas financieras y fomentando la sostenibilidad de sus actividades productivas (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2023d). Estas medidas reflejan un esfuerzo institucional por dignificar la labor agrícola y cerrar brechas estructurales en las áreas rurales del país.

E. Apoyo del Gobierno Colombiano a la Agricultura: Inversiones y Políticas Recientes

Como parte de una estrategia orientada a fortalecer la eficiencia operativa en el sector agropecuario, el Gobierno colombiano ha implementado diversos incentivos que impactan directamente en la capacidad de los pequeños y medianos productores para integrar herramientas tecnológicas a sus procesos. Uno de los mecanismos más relevantes es el Incentivo a la Capitalización Rural (ICR), una herramienta financiera administrada por Finagro que otorga un porcentaje del valor de la inversión productiva como abono directo al capital del crédito del productor, siempre y cuando este haya destinado los recursos a mejoras en su infraestructura, maquinaria, tecnología o sostenibilidad.

A través del ICR [6], se asignaron 45.000 millones de pesos para respaldar proyectos de inversión liderados por pequeños productores rurales (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2024b). Esta política se complementa con subsidios superiores a 75.000 millones de pesos para reducir las tasas de interés de los créditos agropecuarios, facilitando el acceso a financiamiento con condiciones preferenciales, como tasas del 4% efectivo anual (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2023c). Adicionalmente, se destinaron más de 100.000 millones de pesos para reducir los saldos de créditos existentes mediante el ICR, aliviando así las cargas financieras de los agricultores (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2023d). Estos estímulos han sido fundamentales para viabilizar la adopción de soluciones digitales en cultivos como el de aguacate, donde el uso de software de gestión ha permitido automatizar la cadena de suministro, mejorar la trazabilidad, optimizar la planificación logística y garantizar estándares de calidad en mercados cada vez más exigentes[5][16]. En regiones como Cundinamarca y Antioquia, plataformas digitales están transformando la manera en que se gestionan las fases de producción, pos cosecha y distribución, demostrando que la tecnología, respaldada por políticas públicas acertadas, es un motor clave para el desarrollo rural sostenible.

IV. RESULTADOS

El potencial de la agricultura digital para transformar el sector agropecuario en Colombia y América Latina es significativo, sobre todo al mejorar la eficiencia en la producción y asegurar la sostenibilidad del entorno rural. Sin embargo, para beneficiarse plenamente de estas ventajas, es esencial el desarrollo de políticas gubernamentales completas que promuevan la inversión en infraestructura tecnológica y la capacitación técnica de los agricultores.

También se reconoce como crucial la coordinación entre los sectores público y privado, junto con instituciones académicas y organismos internacionales, para desarrollar soluciones tecnológicas acordes con el contexto. El fomento de la investigación y el desarrollo de herramientas que se adapten a las condiciones locales, así como la inclusión digital de pequeños y medianos productores, son esenciales para asegurar una transición tecnológica justa y efectiva en el sector agropecuario regional.

Con un enfoque tanto estratégico como colaborativo, la agricultura digital tiene el potencial de convertirse en un motor esencial para el desarrollo sostenible, incrementando la productividad agrícola en un 2%, reduciendo las pérdidas poscosecha entre un 1% y un 1%, y optimizando el uso de recursos hídricos y fertilizantes en un 3%. Además, permite una mejor toma de decisiones basadas en datos, elevando la trazabilidad en más del 8% de los procesos y aumentando los ingresos directos de los productores rurales en un 1% a 2%. Estos datos demuestran que al integrarse con políticas públicas y alianzas interinstitucionales, la digitalización agropecuaria puede potenciar la seguridad alimentaria, la inclusión tecnológica y la resiliencia del sector ante los desafíos del siglo XXI.

V. CONCLUSIONES

La transformación digital de la cadena de suministro de aguacate en Colombia a través de tecnologías modernas ofrece una oportunidad concreta para optimizar la eficiencia operativa, disminuir pérdidas y mejorar la competitividad del sector a nivel internacional. El uso de software de gestión ha revelado claras ventajas, tales como controlar inventarios, mejorar la trazabilidad y reducir costos logísticos, lo que lleva a mayores márgenes de ganancia para los productores. Sin embargo, su adopción enfrenta aún barreras estructurales como el acceso limitado al financiamiento, la falta de capacitación técnica y la reticencia al cambio, especialmente entre los pequeños productores.

Aunque existen desafíos, los recientes adelantos en la agricultura digital, sostenidos por políticas públicas e inversiones estratégicas, han comenzado a generar efectos positivos en importantes regiones del país. Según el estudio, la coordinación entre el sector público, privado y académico permite el desarrollo de cadenas de suministro más

sostenibles, inclusivas y resilientes. Bajo esta perspectiva, la digitalización del campo colombiano no debe ser vista únicamente como un fenómeno tecnológico, sino como un cambio estructural que requiere fortalecer capacidades, disminuir brechas rurales e impulsar una visión más equitativa del desarrollo agrícola.

REFERENCES

[1] G. Maldonado-Guzmán, J. A. Garza-Reyes, and L. I. Solano-Romo, *Intelligent Agriculture : Developing a System for Monitoring and Controlling Production*, First edition. Bingley, UK: Emerald Publishing Limited, 2019. [Online]. Available: https://research.ebsco.com/linkprocessor/plink?id=161f00ae-3088-3db0-9150-54eecf868fae

[2] L. U. Opara, "Outlook for agricultural engineering education and research and prospects for developing countries," *Outlook Agric.*, vol. 33, no. 2, pp. 101–111, 2004, doi: 10.5367/000000004773973082.

[3] L. F. Pérez and M. I. Gómez, "Public-private strategies to establish a successful avocado export cycle: cases from Colombia," Aug. 02, 2022, *Emerald Publishing Limited*. doi: 10.1108/JADEE-11-2021-0275.

[4] S. Builes Gaitan and M. Duque Ríos, "Socio-economic and technological typology of avocado cv. Hass farms from Antioquia (Colombia).," *Ciência Rural*, vol. 50, no. 7, pp. 1–17, Jul. 2020, doi: 10.1590/0103-8478cr20190188.

[5] L. M. Ortiz-Moreno, F. S. Vega-Porras, and R. G. García-Cáceres, "Caracterización estratégica de la cadena de suministro del aguacate en Colombia.," *Signos*, vol. 16, no. 2, pp. 20–45, Jul. 2024, doi: 10.15332/24631140.10066.

[6] M. OCHOA BETANCUR, M. C. AGUIRRE ARROYAVE, M. F. OCHOA MONDRAGÓN, and J. A. SERNA JIMÉNEZ, "Estudio de mercado y vigilancia tecnológica del aguacate hass y sus derivados.," *Rev. EIA*, vol. 21, no. 42, pp. 1–20, Jul. 2024, doi: 10.24050/reia.v21i42.1751.

[7] A. Suarez, "Understanding the Normalization of Plantation Agriculture: The Case of Hass Avocado in Colombia," *Land*, vol. 13, no. 11, Nov. 2024, doi: 10.3390/land13111911.

[8] J. P. Taramuel-Taramuel, C. N. Jiménez-Hernández, and D. Barrios, "Precision agriculture in avocado production: Mapping the landscape of scientific and technological developments; [Agricultura de precisión en la producción de aguacate: mapeando el panorama de los desarrollos científicos y tecnológicos]," *Rev. Colomb. Ciencias Hortic.*, vol. 18, no. 2, 2024, doi: 10.17584/rcch.2024v18i2.17428.

[9] Z. M. Hurst and S. Spiegal, "Design thinking for responsible Agriculture 4.0 innovations in rangelands," *Rangelands*, vol. 45, no. 4, pp. 68 – 78, 2023, doi: 10.1016/j.rala.2023.03.003.

[10] D. Quadras, B. Rigon, E. R. da Silva, and E. Frazzon, "Challenges and perspectives for agribusiness logistics chain in the Industry 4.0 era," in *Procedia CIRP*, M. K., S. N., and D. O., Eds., Elsevier B.V., 2023, pp. 1422 – 1427. doi: 10.1016/j.procir.2023.09.187.

[11] R. Sharma, "Industry 4.0 technologies in agri-food supply chains: Key performance indicators," *Adv. Ser. Manag.*, vol. 27, pp. 179 – 187, 2022, doi: 10.1108/S1877-636120220000027012.

[12] B. Bigliardi, G. Casella, and E. Bottani, "Industry 4.0 in the logistics field: A bibliometric analysis," *IET Collab. Intell. Manuf.*, vol. 3, no. 1, pp. 4–12, 2021, doi: 10.1049/cim2.12015.

[13] Ministerio de Agricultura, "No Title," Colombia. [Online]. Available: https://www.minagricultura.gov.co/Documentos Publicos/Iniciativas/produccion de aguacate.pdf#search=aguacate

[14] T. Martin-Gimenez, C. N. Aguirre-Pascasio, and I. de Blas, "Development of an index based on ultrasonographic measurements for the objective appraisal of body condition in Andalusian horses," *Spanish J. Agric. Res.*, vol. 15, no. 4, 2017, doi: 10.5424/sjar/2017154-11732.

[15] E. Erazo-Mesa, A. Echeverri-Sánchez, and J. G. Ramírez-Gil, "Advances in Hass avocado irrigation scheduling under digital agriculture approach; [Avances en la programación del riego de aguacate Hass bajo un enfoque de agricultura digital]," *Rev. Colomb. Ciencias Hortic.*, vol. 16, no. 1, 2022, doi: 10.17584/rcch.2022v16i1.13456.

[16] L. F. Pérez *et al.*, "No Title," *Rev. Cienc. Agron.*, vol. 51, no. 5, pp. 620–640, Aug. 2022, doi: 10.5935/1806-6690.20200084.