EIEI ACOFI 2025
5º Congreso Latinoamericano de Ingeniería
Más Información: www.acofi.edu.co/eiei
Ingeniería de impacto para cuidar y transformar la vida
ACOFI: 50 años por la excelencia de la educación en ingeniería.

Mejora de la productividad del sector caficultor empleando tecnologías 4.0: caso Asociación Cafetera CAFETOL

Óscar Mayorga Torres

Universidad Francisco de Paula Santander
Cúcuta, Colombia

Resumen

La Asociación Productora y Comercializadora de Café Especial Toledo (CAFETOL) se dedica a la producción de café especial con altos estándares de calidad, asocia veintidós (22) caficultores que garantizan la calidad del grano, cumpliendo con la normatividad internacional para su exportación; sin embargo, la asociación ha presentado inconvenientes en el cumplimiento de pedidos, reprocesos e ineficiente manipulación del producto impactando negativamente el costo y retrasos en la producción; para lo anterior, se analizó la información de las variables que afectan la eficiencia productiva en términos de cantidad, costo y tiempo.

Para lo anterior se realizó un diagnóstico en el escenario objeto de estudio, se tomaron 3 fincas productoras (muestra por conveniencia), analizando los flujos de proceso, operaciones de almacenamiento, manipulación y transporte; se determinó que el bajo nivel de transferencia tecnológica y capacitación de la mano de obra son factores que influyen directamente en la productividad de café especial de la asociación. Con lo anterior y como piloto de prueba se automatizaron los procesos de secado y tamizaje, además se incorporó un fotosensor con IA en el proceso de selección, que permitió identificar aquellos granos contaminados o que estaban fuera del estándar de la especificación incrementando la calidad del grano en un 98,2% y una eficiencia operativa del 100%; se estimó la relación costo-beneficio determinado una correlación entre el +1,02 al +1,06, lo que en términos de productividad representan 12000 kilos del grano que se agregan al volumen de exportación.

Finalmente, se evaluó la productividad y rentabilidad de la propuesta, para la muestra seleccionada; mostrando resultados efectivos de la mejor propuesta.

Palabras clave: productividad; cultivo de café; tecnologías de 4.0

DOI: https://doi.org/10.26507/paper.4812

Abstract

The Toledo Specialty Coffee Producers and Marketers Association (CAFETOL) is dedicated to the production of specialty coffee with high quality standards, associating twenty-two (22) coffee growers that guarantee the quality of the bean, complying with international regulations for export; however, the association has presented problems in the fulfillment of orders, reprocessing and inefficient handling of the product, negatively impacting the cost and delays in production; for the above, the information of the variables that affect the productive efficiency in terms of quantity, cost and time was analyzed.

For the above, a diagnosis was made in the scenario under study, 3 producing farms were taken (sample by convenience), analyzing the process flows, storage operations, handling and transportation; it was determined that the low level of technology transfer and training of the labor force are factors that directly influence the productivity of specialty coffee of the association. With the above and as a test pilot, the drying and sieving processes were automated, in addition a photosensor with AI was incorporated in the selection process, which allowed identifying contaminated grains or those that were out of specification standards, increasing grain quality by 98.2% and an operational efficiency of 100%; the cost-benefit ratio was estimated, determining a correlation between +1.02 and +1.06, which in terms of productivity represents 12,000 kilos of grain added to the export volume.

Finally, the productivity and profitability of the proposal was evaluated for the selected sample, showing effective results of the proposed improvement.

Keywords*: productivity; coffee cultivation; 4.0 technologies*

1. Introducción

El sector caficultor colombiano enfrenta desafíos en términos de productividad, sostenibilidad y cumplimiento de estándares internacionales (Federación Nacional de Cafeteros, 2020); en ese contexto, la Asociación CAFETOL, ubicada en el municipio de Toledo, Norte de Santander, busca posicionarse en el mercado de café especial mediante la mejora continua de sus procesos productivos.

Las tecnologías emergentes, enmarcadas en la denominada Industria 4.0, ofrecen herramientas eficaces para la modernización del sector agrícola y agroindustrial (SENA, 2025), por lo que esta revolución tecnológica incluye la adopción de internet de las cosas (IoT), inteligencia artificial (IA), automatización, análisis de datos y robótica (Klerkx et al., 2019), tecnologías que ya han demostrado su impacto positivo en la eficiencia y calidad de la producción agrícola (Zhang, et al., 2012).

Este estudio demuestra como a través de la implementación de tecnologías 4.0 se tiene un impacto positivo en la productividad de la asociación cafetera (Atehortúa, 2018), partiendo de un diagnóstico, análisis de procesos y ejecución de intervenciones tecnológicas específicas como

la automatización del secado, tamizaje y la selección del grano mediante fotosensores con IA, lo anterior complementado con formación técnica al personal y futuros desarrollos como el uso de drones para monitoreo agrícola, para atender la demanda del mercado internacional y mejorar la rentabilidad de los productores rurales.

2. Marco teórico

2.1. Industria 4.0 y agricultura inteligente

La Industria 4.0, hace referencia a la cuarta revolución industrial, caracterizada por la integración de tecnologías digitales como el internet de las cosas (IoT), inteligencia artificial (IA), automatización y análisis de datos en tiempo real; en el ámbito agroindustrial, estas tecnologías están transformando la forma en que se producen y procesan los alimentos, introduciendo conceptos como la agricultura de precisión, el uso de drones para monitoreo y aspersión, y sensores inteligentes para el control de calidad (Klerkx et al., 2019).

2.2. Productividad en el sector caficultor

La productividad agrícola en el contexto cafetero está determinada por la eficiencia de las labores culturales, el manejo postcosecha, la calidad del grano y el acceso a mercados, la incorporación de tecnologías y buenas prácticas reduce los costos de producción; mejora el rendimiento por hectárea y asegura estándares internacionales exigidos para la exportación (Federación Nacional de Cafeteros, 2020).

2.3. Automatización de procesos agroindustriales

La automatización permite disminuir la variabilidad operativa, aumentar la trazabilidad y reducir tiempos y errores, en la caficultura (Cembranos, 2014), procesos como el secado, la clasificación y el empaque pueden optimizarse mediante maquinaria semiautomatizada y sensores inteligentes; aportando en la calidad final del producto y su valor en el mercado (Atehortúa, 2018).

3. Metodología

La investigación de tipo aplicada, inicio con el desarrollo de un diagnóstico al proceso productivo y operacional de las 3 fincas seleccionadas (muestro por conveniencia) en las cuales se aplicaron diagrama causal, Ishikawa y Pareto; los resultados obtenidos fueron analizados con Python ®©, por lo que se diseñó una mejora con intervención tecnológica que incluyó la automatización del secado y tamizaje, y la implementación de un fotosensor con IA, donde, finalmente se llevaron a cabo las intervenciones técnicas al proceso.

4. Resultados

4.1. Diagnóstico de la capacidad productiva

En el diagnóstico de la capacidad productiva se identificaron reprocesos, fallos en la manipulación y retrasos en la producción debido a una baja transferencia tecnológica, manejo empírico del proceso y falta de formación técnica de la mano de obra; el análisis de 3 fincas piloto permitió establecer factores que inciden directamente en los costos, tiempos y calidad del café especial. Se analizaron 10 etapas principales del proceso productivo, donde se evaluó el tiempo y nivel tecnológico de la operación de cada proceso para una carga de 1000 kilos (ver cuadro 1).

Etapa	Actividades principales	Nivel tecnológico	Tiempo
Recolección	Selección manual del grano maduro	Manual	1 día
Despulpado	Separación del mucílago	Manual	12 hr
Fermentación	Proceso natural en tanques	Manual	24 hr
Lavado	Retiro del mucílago	Manual	1 hr
Secado	Secado al sol o mecánico	Manual	7–15 días
Trillado	Retiro del pergamino con trilladora	Semi-industrial	10 min
Tostado	Tueste homogéneo en cilindro	Semi-industrial	3 hr
Molienda	Reducción del grano a polvo fino	Semi-industrial	3 hr
Empaque	Sellado manual, inspección	Manual	10 min
Almacenamiento	Apilado en estantes de madera	Manual	- - -

` *Cuadro 1. Etapas principales del proceso productivo de CAFETOL*

Con lo anterior, el análisis causal representado (figura 1), muestra las interrelaciones sistémicas que condicionan el desempeño de las fincas asociadas, identificando factores como la falta de capacitación en prácticas de gestión, mala distribución de planta y uso de tecnología semi-industrial; los cuales inciden negativamente en la eficiencia operativa y en el cumplimiento de la promesa de servicio; a su vez, afecta la competitividad en mercados internacionales lo que disminuye la rentabilidad de la asociación.

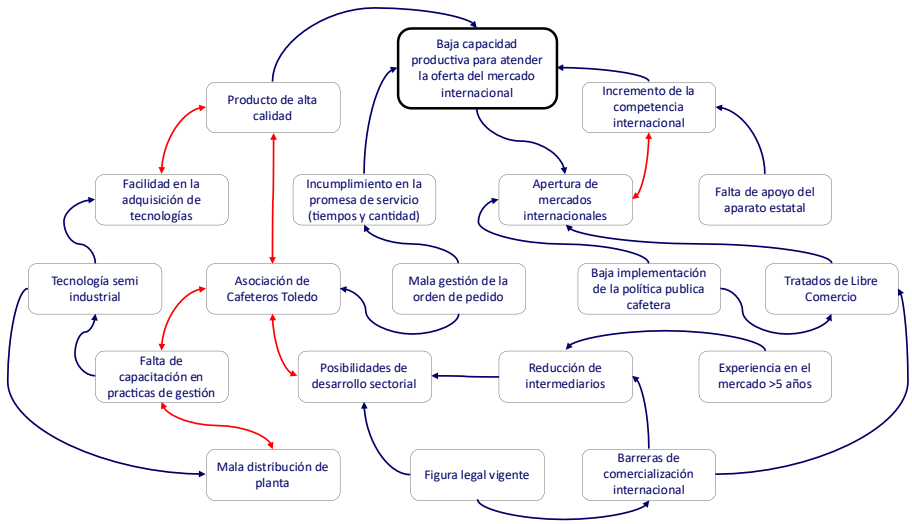

Figura 1. Diagrama causal del proceso productivo fincas CAFETOL

Por otro lado, se aplicó un diagrama causa-efecto (figura 2), relacionando los factores que inciden en la baja capacidad productiva de la asociación, mostrando el factor de gestión administrativa con mayor contribución relacional a la oportunidad de mejora con un ponderado de 0,25 del total, a su vez, la causa más crítica es el incumplimiento de la promesa de servicio (tiempos y cantidades) con un ponderado total de 0,15; posteriormente se muestran los factores con sus ponderados correspondientes: tecnología y equipos (0,20), métodos (0,15), talento humano (0,15), producto (0,10), infraestructura (0,10) y factores normativos y legales (0,05). Del análisis se establece que los factores asociados a la baja productividad se relacionan con la obsolescencia tecnológica, deficiencias en la administración operativa y debilidades en la formación del capital humano; propiciando una baja rentabilidad en las fincas de la muestra y por ende en la asociación; en tal sentido, se hace necesario incorporar estrategias, recursos y medios tecnológicos que mitiguen la problemática.

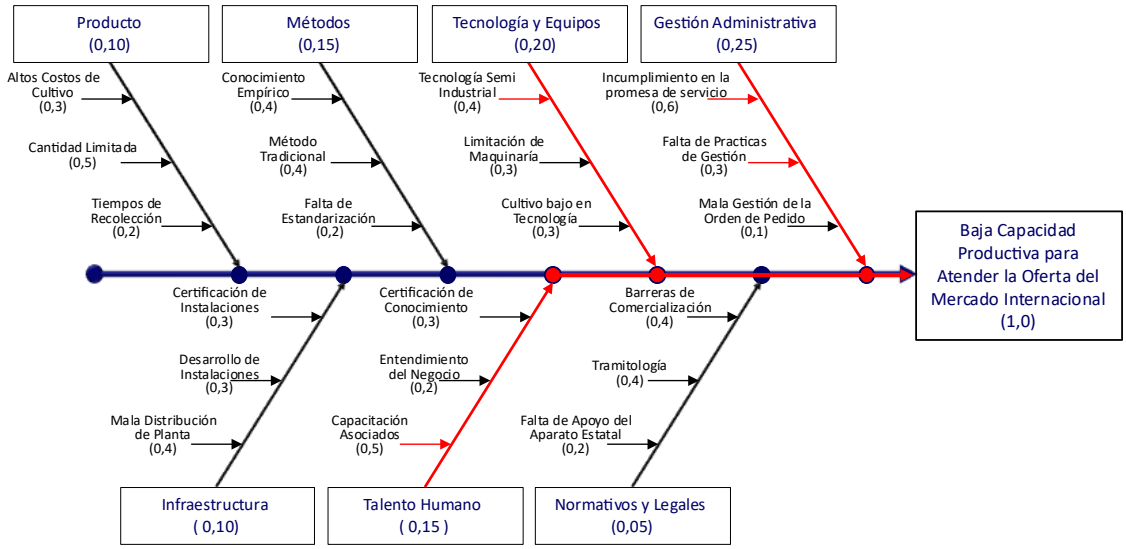

Figura 2. Diagrama Causa-Efecto proceso productivo fincas CAFETOL

Por consiguiente, en la figura 3, en el diagrama de Pareto se aplicaron las causas que afectan el desempeño de la Asociación CAFETOL indicando que tres factores concentran el 81% del impacto total sobre la problemática analizada, la causa referente es el incumplimiento en la promesa de servicio (tiempos y cantidad), con una frecuencia relativa del 35,5%, lo que presenta una deficiencia en la planificación, gestión de pedidos y capacidad de respuesta a las exigencias del mercado; aunado a esto, el incremento de la competencia internacional (30,0%) y las barreras de comercialización internacional (15,5%), ambos factores reflejan presiones del entorno externo que limitan la competitividad de la asociación.

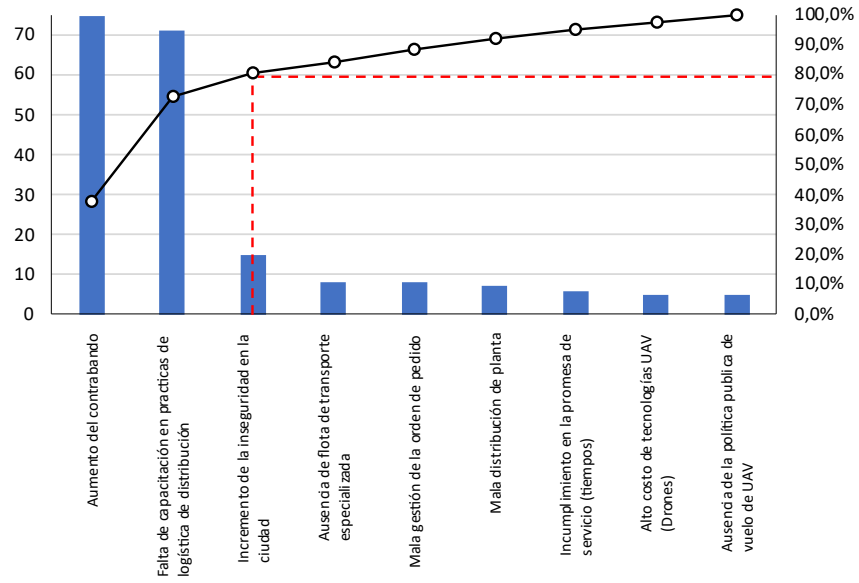

Figura 3. Diagrama de Pareto del proceso productivo fincas CAFETOL

4.2. Intervenciones tecnológicas aplicadas

Como parte del diseño de la mejora, se automatizaron los procesos de secado y tamizaje, anteriormente manuales, incorporando un fotosensor con inteligencia artificial (IA) en la etapa de selección de grano, que permitió identificar los granos contaminados o fuera de especificación, en el Cuadro 2 se presenta la mejora en la eficiencia del proceso: el secado reduce su duración en un 35,7%, el tamizaje mejora su precisión en 15,3% y la selección disminuye el grano fuera de norma del 12% al 1,8%; por lo tanto, la eficiencia operativa alcanza el 100% y el tiempo total del ciclo se reduce en un 24,3%, sin afectar la calidad del producto final.

Etapa del proceso	Indicador	Parámetros actuales	Parámetros de mejora	Resultados de la mejora
Secado	Tiempo promedio por ciclo	7775 min.	5000 min.	- 35,7%
Tamizaje	Precisión de clasificación	85%	98,2%	+15,3 p.p.
Selección	% de grano fuera de norma	12%	1,8%	-85%
Eficiencia operativa	Índice general del sistema	80%	100%	+20 p.p.
Tiempo total ciclo	Tiempo recolección a empaque	11221 min.	8500 min.	-24,3%

Cuadro 2. Mejora en la eficiencia del proceso

A partir del estudio del flujo operativo de la planta, se identificaron los cuellos de botella asociados a tiempos en varias etapas del proceso, mostrando que el ciclo completo desde la recepción del café hasta el empaque final se requería aproximadamente 11221 minutos, siendo el secado (7775 min), fermentado (1389 min) y despulpado (888 min) los procesos con mayor demanda de tiempo, en la figura 4 se muestra, la mejora con la incorporación tecnológica minimizando reprocesos y manteniendo el estandarizar de calidad del producto.

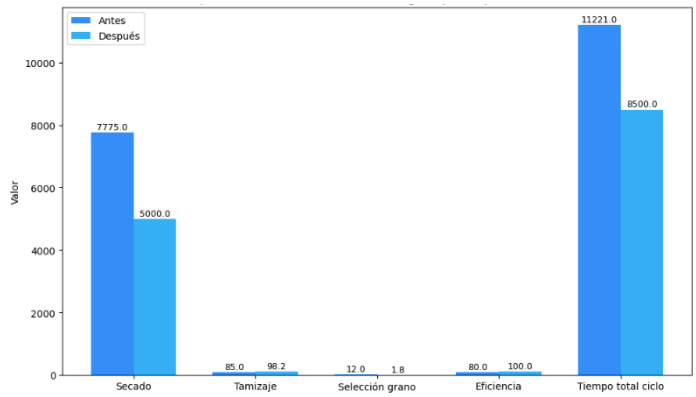

Figura 4. Impacto de las intervenciones tecnológicas por etapa del proceso

Por otro lado, en la figura 5 se presenta la reducción de 2.721 min en el tiempo total de operación al pasar de los parámetros actuales (11.221 minutos) a los propuestos con mejoras (8.500 minutos), entre los cuales la disminución del 24,25% incide es altamente en estas actividades de las operaciones de las fincas. Al incorporar tecnología de selección y foto inspección en el proceso productivo se evidencio un aumento en la operación del 98,2% al 100% en eficiencia operativa, debido al uso de tecnología de clasificación mediante sensores ópticos. Para la selección del grano, se apropia tecnología 4.0 de una operación no estandarizada a un nivel de precisión del 85%, incorporando visión artificial y control automatizado.

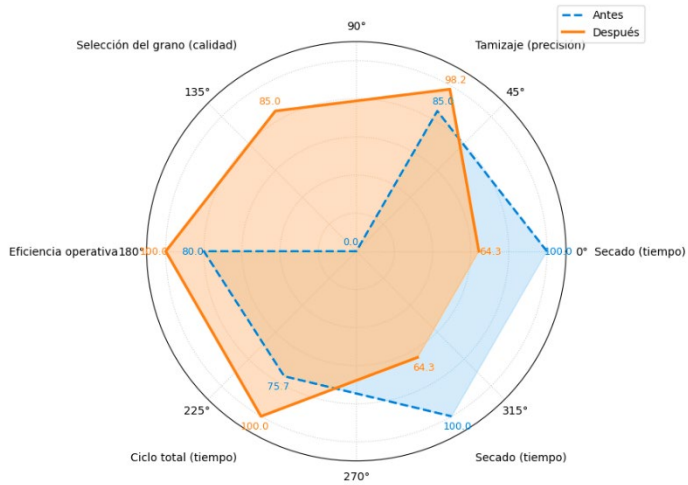

Figura 5. Mejora por etapa del proceso

4.3. Impacto en la productividad y la calidad

La implementación sistema de selección asistido inteligencia artificial IA (fotosensor) mejoro la precisión de la clasificación de granos que cumplen los estándares de los mercados internacionales pasando de 85% al 98,2% eliminando granos contaminados, fuera de la especificación o desperdicios. Atehortúa (2018) afirma que la integración de sistemas

automatizados en el proceso de postcosecha puede elevar los niveles de calidad en al menos un 10%-20%, dependiendo del grado de intervención. En la mejora desarrollada también se intervino la fase de secado, donde se aumentó en 12.000 kg de café especial al volumen exportable, con una relación costo-beneficio que osciló entre +1,02 y +1,06, indicando una eficiencia operativa que se incrementó del 65% al 100% debido a la instalación de sensores automáticos que controlan temperatura y humedad (cuadro 3).

Indicador	Parámetros Actuales	Parámetros de Mejora
Eficiencia operativa del secado	(65 – 70) %	100%
Tiempo en la selección manual	Prolongado	Reducción significativa
Producción exportable anual	Base anterior	+12000 kg extra
Costo por reproceso	Alto	Reducido casi a cero

Cuadro 3. Eficiencia operativa del proceso

En el cuadro 4, se presentan los resultados en cuanto al indicador económico costo-beneficio, mostrando que una transformación tecnológica puede aumentar la rentabilidad en más de un 4% respecto al escenario inicial, mejorando tanto volumen como calidad del café a exportar; con esto, se realizó la comparación de escenarios proyectados; en el escenario 1, con 10000 kg adicionales de café exportable, altos costos y un precio estándar por kg, la relación costo-beneficio C/B es de 1.02, con una ganancia marginal. El escenario 2 al mejorar los procesos y reducir los costos a un nivel medio, se incrementa la producción a 12000 kg y se mejora ligeramente el precio por kg, alcanzando una relación C/B de 1.04. Finalmente, para el escenario 3, que realiza la apropiación de tecnologías como sensores y automatización; logra más de 13500 kg exportables, mantiene los costos controlados y accede a un precio premium, elevando la relación C/B a 1.06.

Escenario	Kg exportables	Costos asumidos	Precio por kg	Relación C/B estimada
Escenario 1	10.000 kg	Alto	Estándar	1.02
Escenario 2	12.000 kg	Medio	Estándar-alto	1.04
Escenario 3	13.500+ kg	Controlado	Premium	1.06

Cuadro 4. Relación C/B estimada

Por otro lado, se presenta un panorama en cuanto a la retribución por la inversión en la mejora, donde, en el escenario conservador, con alta inversión y menor rendimiento, se obtiene una relación de +1,02, mientras que en un escenario óptimo con máxima eficiencia, control de costos y acceso a mercados premium, el retorno puede alcanzar hasta +1,06; al cuantificar este impacto económico se evalúa la viabilidad financiera de aplicar tecnologías 4.0 en cooperativas productoras de café especial (figura 6).

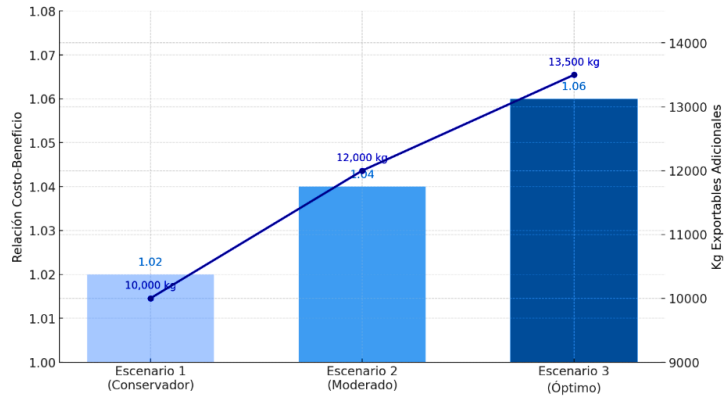

Figura 6. Escenarios de impacto económico tras la mejora tecnológica en CAFETOL

4.4. Formación del talento humano y proyecciones futuras

La mejora tecnológica permitió reducir 2.721 minutos del ciclo total como se establece en la figura 7, es decir, una reducción del 24.2% en el tiempo general del proceso de la eficiencia operativa, logrando una mayor rotación de producto, ahorro energético y reducción de costos operativos; de esto se deduce que con estas mejoras incorporadas se logra una reducción del 30% por los errores operativos.

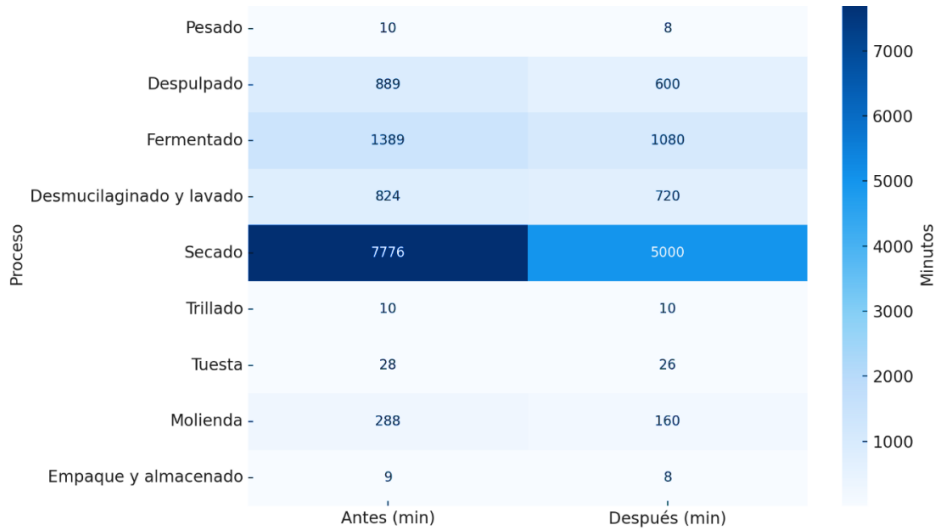

Figura 7. Comparación de tiempos por proceso antes y después de la mejora

Mediante los datos obtenidos de la mejora, se proyectó la incorporación de tecnologías de vuelo no tripulado (UAVs) equipados con cámaras multiespectrales y sistemas de aspersión automatizada (figura 8), para que en la cosecha se generen mapas del estado del cultivo, detectar plagas o malezas de forma temprana y planificar rutas eficientes de recolección, lo anterior. Lo sustenta Tamilselvan, et al. (2021), quienes reportan que la integración de tecnologías 4.0 en la agroindustria puede elevar entre un 20% y 35% los indicadores de desempeño; para el caso el uso de drones y vehículos inteligentes tienen la posibilidad de

aumentar en un 45% la productividad y reducir en un 35% el consumo de recursos como el agua, con miras a la sostenibilidad y rendimiento productivo.

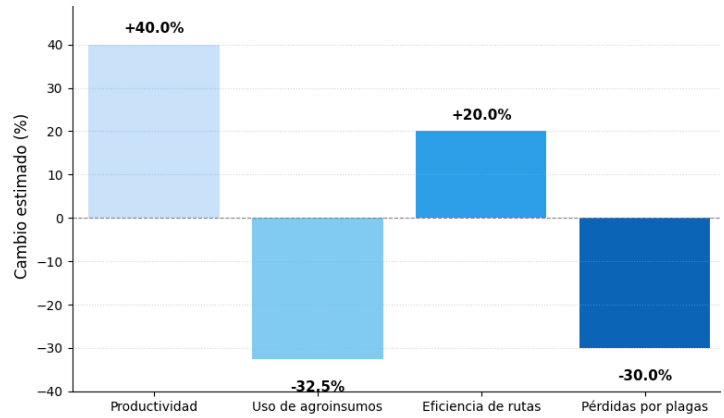

Figura 8. Indicadores esperados de impacto de Tecnología de vuelo

La propuesta se sustenta en varios casos de éxito desarrollados en cultivos de maíz, caña de azúcar y viñedos, entre otros; en el cuadro 5 se despliega las ventajas de la incorporación de esta tecnología en las fases de cosecha y postcosecha, mejorando tiempos productivos, disponibilidad de la mano de obra, optimización de recursos y gestión inteligente del cultivo.

Actividad	Tecnología Aplicada	Acciones	Beneficios Esperados
Mapeo Aéreo	Drones con cámaras multiespectrales	Generar mapas de salud del cultivo y zonas críticas	Detección temprana de plagas y estrés hídrico (Zhang, et al., 2012); mejora decisiones de riego y fertilización
Aspersión Dirigida	Drones con aspersores inteligentes	Aplicación precisa de agroinsumos en áreas detectadas	Reducción de agroquímicos hasta 40% y menor exposición del personal (Siddique, et al., 2024)
Rutas de Recolección	Drones georreferenciados	Planificación eficiente de rutas de cosecha según madurez del cultivo	Disminución de tiempos improductivos hasta un 20% (Tarazona, et al., 2022); mejora eficiencia logística de campo

Cuadro 5. Incorporación de tecnologías de vuelo en CAFETOL

5. Conclusiones

La implementación tecnológica en los procesos redujo el tiempo total del ciclo productivo en un 24,3%, pasando de 11.221 a 8.500 minutos, lo cual mejoró la eficiencia operativa del sistema y permitió una mayor rotación del producto; asimismo, la calidad del grano exportable se incrementó del 85% al 98,2%, debido a la automatización del proceso de secado y selección con fotosensores asistidos por IA, eliminando los granos fuera de las especificaciones.

La aplicación tecnológica permitió aumentar en 12.000 kg el volumen anual exportable de café especial, generando un retorno estimado de inversión con una relación costo-beneficio que pasó de 1,02 a 1,06.

La incorporación de drones multiespectrales con sistemas de aspersión y planificación logística permitió aumentar la productividad agrícola hasta en un 45% y reducir el uso de agroquímicos en un 40%, al mejorar la toma de decisiones agronómicas y optimizar las rutas de recolección, aportando al fortalecimiento de la sostenibilidad del cultivo y la capacidad de respuesta ante las exigencias del mercado internacional en la asociación.

6. Referencias

- Atehortúa González, A. (2018). Tecnología e innovación: una apuesta para desarrollar el agro colombiano. *Revista Colombiana de Investigaciones Agroindustriales*. ISSN: 2422-4456 (Electronic). https://doi.org/10.23850/24220582.1797
- Cembranos Nistal, F. J. (2014). Planificación de la gestión y organización de los procesos de montaje de sistemas de automatización industrial. Ediciones Paraninfo.
- Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. (2020). *Buenas prácticas agrícolas en caficultura*. Bogotá, Colombia. https://federaciondecafeteros.org/static/files/15Anexos.pdf
- Klerkx, L., Jakku, E., & Labarthe, P. (2019). A review of smart farming technologies and the role of the social sciences. *NJAS-Wageningen Journal of Life Sciences*, Vol. 90–91, 100285. https://doi.org/10.1016/j.njas.2019.100315
- Mayorga Torres, Ó. (2020). *Propuesta de mejoramiento para el proceso de fabricación del café en CAFETOL*. Universidad Francisco de Paula Santander.
- SENA. (2025). *Agrosena*, Colombia. https://www.sena.edu.co/es-co/formacion/Paginas/agro_sena.aspx
- Siddique, A., Hameed, S., Rehman, A., Basharat, H., Irfan, R., & Zikria, Y. B. (2024). Smart agriculture drone for crop spraying using image-processing and machine learning techniques: Experimental validation. ResearchGate. http://dx.doi.org/10.3390/iot5020013
- Tamilselvan, G., Niresh, J., & Dharun, D. (2021). The review of application of drones for smart agriculture. IAR Journal of Engineering and Technology, 2(1), 1–11. https://doi.org/10.47310/iarjet.2021.v02i01.020
- Tarazona-Jiménez, J., Jiménez-Romero, J., Aguilar-Imitola, K., & Lamos-Díaz, H. (2022). Un algoritmo ALNS para el VRPD en la distribución de última milla. Revista UIS Ingenierías, 21(3), 153–176. https://doi.org/10.18273/revuin.v21n3-2022012
- Zhang, C., & Kovacs, J. M. (2012). The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture: a review. *Precision Agriculture*, Vol. 13, No. 6, pp. 693–712. https://doi.org/10.1007/s11119-012-9274-5

Sobre los autores

- **Óscar Mayorga Torres**: Ingeniero Industrial, Especialista en Ingeniería de Producción y Logística, Magister en Ingeniería Industrial. Profesor Universidad Francisco de Paula Santander. oscarmtorres@ufps.edu.co

Los puntos de vista expresados en este artículo no reflejan necesariamente la opinión de la Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería.

Copyright © 2025 Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería (ACOFI)