



Consultor
INISEFOR-
LabTEc, UNA
(andresaguilarba20@
gmail.com)



Investigador,
INISEFOR-LabTEc,
UNA (mauricio.vega.
araya@una.cr)

MOCUPP Café: información satelital para monitorear el paisaje cafetalero costarricense



Estudiante,
Ingeniería en
Ciencias Agrarias
(nicole.obando.
moran@est.una.ac.cr)



Estudiante,
Ingeniería en Gestión
Ambiental (karina.
sevilla.segura@est.
una.ac.cr)

*Cristian Aguilar-Barboza
Mauricio Vega-Araya
Nicole Obando Morán
Karina Sevilla Segura
Priscilla Rigg Aguilar*



Priscilla Rigg Aguilar
Académica,
Investigadora,
INISEFOR, UNA
(priscilla.rigg.
aguilar@una.cr)

El café forma parte de la historia ambiental, económica y cultural de Costa Rica. Aunque el país ha diversificado su economía, el paisaje cafetalero continúa siendo un componente clave de muchas zonas rurales, especialmente en regiones de altitud media y alta del Valle Central, Los Santos, Occidente, Pérez Zeledón, Coto Brus. Sin embargo, conocer con precisión dónde se cultiva café, cuánta área ocupa y qué cobertura arbórea lo acompaña no es una tarea sencilla. Los cafetales presentan arreglos muy diversos: algunos muy pocos se cultivan sin sombra, otros, la gran mayoría bajo sombra dispersa o densa, y muchos se ubican en laderas, cerca de bosques, charrales, cercas vivas o cultivos con respuestas espectrales parecidas.

Esa complejidad explica la importancia del Monitoreo del Uso y Cobertura de la Tierra en Paisajes Productivos, conocido como MOCUPP. En el caso del café, el proceso MOCUPP Café fue desarrollado para generar información

geoespacial actualizada, pública y técnicamente robusta sobre el parque cafetalero nacional y la cobertura arbórea asociada. Esta es útil para la planificación territorial, la gestión ambiental, la trazabilidad productiva y el cumplimiento de nuevas exigencias internacionales vinculadas con cadenas de suministro libres de deforestación, como las establecidas por la Unión Europea (European Parliament y Council of the European Union, 2023).

El estudio se realizó para todo el territorio de Costa Rica y se organizó, además, según las regiones cafetaleras del Instituto del Café de Costa Rica (ICAFE) y las regiones de planificación del Ministerio de Planificación Nacional y Política Económica. El objetivo principal fue mapear el cultivo de café para los años 2021 y 2022, estimar la cobertura arbórea presente en un radio de 2 km alrededor de los cafetales y analizar los cambios ocurridos entre ambos años. El área mínima mapeable utilizada fue de 0.2 ha, criterio acordado para capturar con mayor detalle la estructura fragmentada de muchas áreas cafetaleras del país.

La metodología combinó trabajo de campo, fotointerpretación, imágenes satelitales y aprendizaje automático (**Figura 1**). Se utilizaron datos Sentinel-1, que aportan datos de radar y permiten observar la superficie aún bajo nubosidad, y datos Sentinel-2, que ofrecen información óptica y multispectral de la vegetación (Flores-Anderson et al., 2026; Maskell et al., 2021). También se incorporó información topográfica derivada del modelo digital de elevación Shuttle Radar Topography Mission (SRTM, por sus

siglas en inglés). A partir de estos insumos se construyeron cerca de 80 covariables, entre ellas índices de vegetación, índices derivados de radar, texturas, componentes principales, pendiente y orientación del terreno. Luego de revisar redundancias y multicolinealidad, se seleccionaron 62 variables multitemporales para alimentar el modelo de clasificación.

El proceso de clasificación se basó en aprendizaje a partir de una red neuronal profunda, entrenada con aproximadamente 200 000 puntos por año. Las clases principales fueron cultivo de café, cobertura arbórea y otras tierras. También, se aplicó un post-procesamiento automático orientado a objetos (Tassi et al., 2021), con el propósito de reducir el efecto de “sal y pimienta” típico de las clasificaciones píxel a píxel, y una revisión manual en QGIS para corregir falsos positivos y falsos negativos. Esta combinación permitió generar capas geoespaciales más consistentes. Además, mejoró su utilidad para la toma de decisiones.

La validación fue un componente clave del proceso. Para ello se aplicó un diseño aleatorio estratificado siguiendo buenas prácticas internacionales para estimar áreas y evaluar exactitud en mapas de cambio de cobertura (Olofsson et al., 2014). La interpretación de las muestras de validación fue realizada por personal técnico del ICAFE, independiente del equipo que produjo las clasificaciones. Este diseño permitió calcular no solo métricas de precisión, sino también intervalos de confianza e incertidumbre asociada a las estimaciones de área.

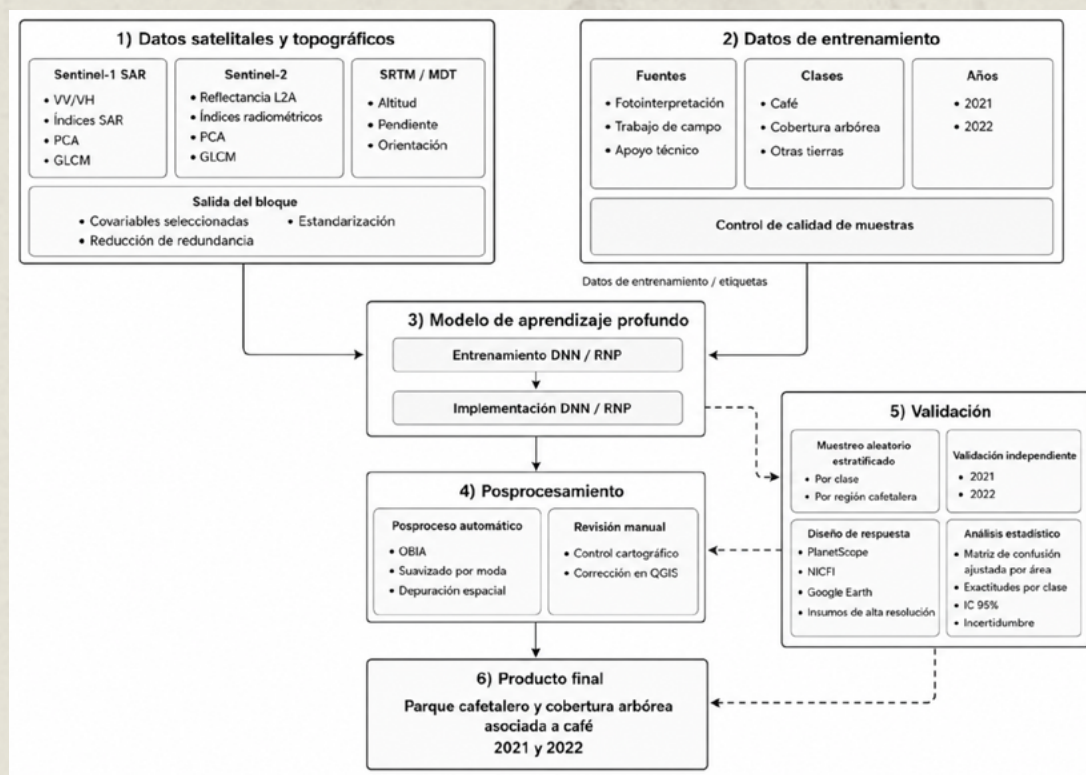


Figura 1: Flujo metodológico.

Los resultados permiten interpretar que el parque cafetalero nacional se mantuvo estable entre 2021 y 2022 (**Cuadro 1**). La superficie estimada fue de 82 616.7 ha en 2021 y 82 633.3 ha en 2022, con intervalos de confianza de $\pm 1\,005$ ha y ± 952.4 ha, respectivamente. La diferencia entre ambos años no fue estadísticamente significativa, lo cual es coherente con el carácter perenne del cultivo y con la ausencia de procesos amplios de expansión o contracción durante el periodo analizado. En términos generales, el café representa alrededor del 1.6 % del territorio nacional.

Cuadro 1. Resultados principales del mapeo MOCUPP Café para 2021 y 2022.

Clase	Área 2021 (ha)	Área 2022 (ha)	Indicador de calidad
Cultivo de café	82 616.7 $\pm$ 1 005	82 633.3 $\pm$ 952.4	Precisión global: 94.6 % a 95.8 %
Cobertura arbórea asociada	300 798.1 $\pm$ 3 001	300 478.7 $\pm$ 3 455	F1-score: 0.95
Otras tierras	314 034.6 $\pm$ 5 846	314 342.1 $\pm$ 4 646	F1-score: 0.93 a 0.96

Nota: los valores después del símbolo $\pm$ corresponden al intervalo de confianza al 95 %.

La distribución territorial del cultivo confirma una fuerte concentración geográfica. La región cafetalera de Los Santos agrupó cerca de 28 400 ha, equivalente a aproximadamente una tercera parte del parque cafetalero nacional. Le siguieron Occidente, con cerca de 18 600 ha, y Valle Central, con alrededor de 11 600 ha. Pérez Zeledón y Coto Brus también mantienen una participación relevante, mientras que Turrialba y Zona Norte representan extensiones menores (**Figura 2**). Desde la perspectiva de las regiones de planificación, la Región Central y la Región Brunca reúnen la mayor parte del café del país.

Las pérdidas y ganancias de cultivo detectadas entre 2021 y 2022 fueron marginales. A escala nacional se estimaron 151.6 ha de ganancia y 135.0 ha de pérdida, con un balance prácticamente neutro. Estos valores deben interpretarse con cautela, pues se encuentran dentro de los márgenes de incertidumbre del producto. Más que una expansión real del cultivo, las pequeñas diferencias podrían reflejar procesos locales de renovación, replantación, manejo o ajustes de clasificación.

En cuanto a la cobertura arbórea asociada al café, el análisis registró 300 798.1 ha en 2021 y 300 478.7 ha en 2022 dentro del radio de 2 km alrededor del parque cafetalero. Esta estabilidad es

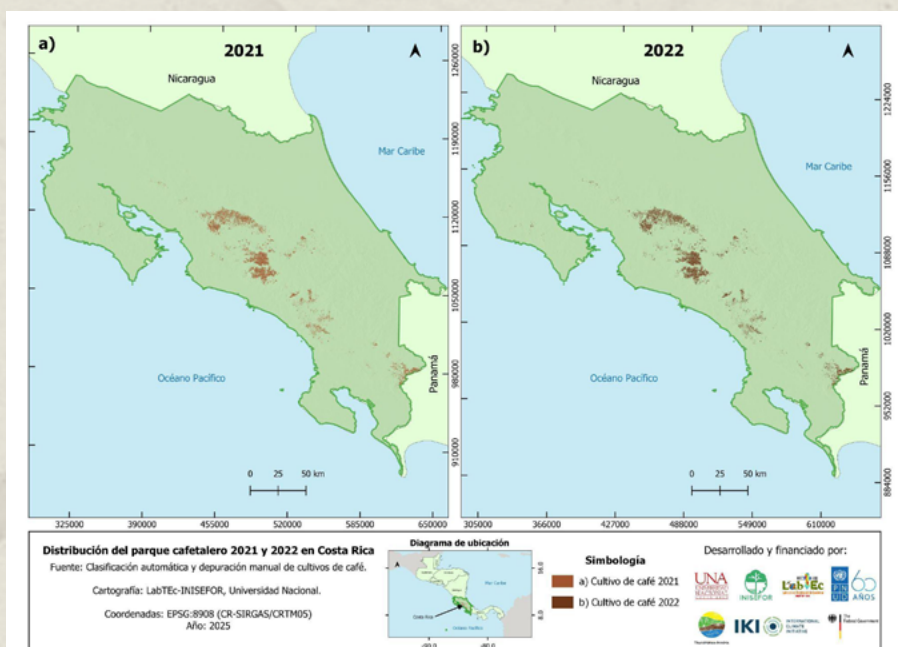


Figura 2: Mapa de distribución de cultivo de café para los años 2021 y 2022 en Costa Rica.

Nota: Elaboración propia.

relevante porque muestra que, en el corto plazo, el arbolado presente en el entorno cafetalero no evidencia cambios amplios. No obstante, la lectura ambiental requiere prudencia: los procesos de regeneración, pérdida o sustitución de arbolado suelen desarrollarse en periodos más largos que un año.

La pérdida de cobertura arbórea estimada para el periodo 2021-2022 fue de 319.3 ha, menos del 0.1 % de la cobertura arbórea analizada. Las mayores pérdidas absolutas se observaron en Pérez Zeledón, Turrialba y Occidente. Aun así, estos cambios no deben atribuirse automáticamente al cultivo de café. El indicador representa pérdida de arbolado en el entorno cafetalero, pero no demuestra por sí mismo que el café haya sido la causa directa. En paisajes productivos complejos, los cambios pueden responder a múltiples factores: manejo de fincas, urbanización dispersa, renovación agrícola, eventos locales o transiciones graduales de uso del suelo.

Los resultados de validación respaldan la confiabilidad del método. La precisión global aumentó de 94.6 % en 2021 a 95.8 % en 2022, mientras que el coeficiente Kappa pasó de 92.2 % a 93.6 %. Para la clase café, la precisión del productor se mantuvo entre 0.95 y 0.96, y el F1-score fue de 0.96 en ambos años. Estos indicadores muestran que el uso combinado de imágenes Sentinel, covariables ambientales, redes neuronales profundas, posprocesamiento orientado a objetos y validación independiente puede ofrecer

resultados sólidos para el monitoreo de paisajes agrícolas complejos.

MOCUPP Café aporta una herramienta estratégica para Costa Rica. Sus datos pueden apoyar la gestión pública, orientar acciones de conservación y restauración en paisajes productivos, fortalecer la trazabilidad del sector cafetalero y mejorar la transparencia frente a mercados que solicitan evidencia geográfica sobre deforestación. También permite pasar de diagnósticos generales a información espacialmente explícita, útil para gobiernos locales, instituciones públicas, organizaciones productivas y comunidades vinculadas con el café.

Los resultados están disponibles en el Sistema Nacional de Información Territorial (SNIT) en el nodo MOCUPP – Café de la Escuela de Geografía de la Universidad de Costa Rica: https://geoportal.ucr.ac.cr/geoserver/mocupp_cafe/wfs y en el visor del Laboratorio de Teledetección de Ecosistemas del INISEFOR de la Universidad Nacional: <http://www.labtec.una.ac.cr/DashBoardCafe/>

El principal aprendizaje es que el parque cafetalero costarricense muestra una estructura territorial consolidada y estable en el corto plazo. Sin embargo, esa estabilidad no debe entenderse como ausencia de desafíos. La conservación del arbolado asociado, el monitoreo de pérdidas localizadas, la actualización periódica de las capas y la integración del conocimiento técnico del ICAFE y de las comunidades productoras serán claves

para mantener un sistema de información confiable. Para futuros monitoreos se recomienda ampliar los intervalos de análisis a periodos bianuales o mayores, de modo que sea posible detectar cambios más relevantes y reducir el ruido propio de comparaciones anuales.

En síntesis, MOCUPP Café demuestra que la tecnología satelital y el aprendizaje automático pueden ponerse al servicio de una pregunta concreta: cómo monitorear mejor los paisajes productivos para tomar mejores decisiones. En un país donde el café sigue siendo parte de la identidad territorial, contar con información pública, validada y actualizable es una condición necesaria para avanzar hacia una producción más transparente, resiliente y compatible con la conservación ambiental.

Agradecimientos

Las personas autoras agradecen al Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) por el apoyo técnico y financiero brindado en el marco del proyecto *Rutas Transformadoras bajas en Emisiones de Carbono y Resilientes al Clima de Costa Rica (TRANSFORMA)*, el cual permitió fortalecer las capacidades nacionales para el monitoreo geoespacial del cultivo de café y de la cobertura arbórea asociada. Asimismo, se reconoce el valioso acompañamiento del Instituto del Café de Costa Rica (ICAFE), especialmente por su participación en los procesos de validación y revisión técnica de los productos generados. Este esfuerzo conjunto

permitió generar información robusta, pública y útil para apoyar la sostenibilidad del sector cafetalero, la gestión territorial y la toma de decisiones ambientales en Costa Rica.

Referencias

- European Parliament y Council of the European Union. (2023). Regulation (EU) 2023/1115 of the European Parliament and of the Council of 31 May 2023 on the making available on the Union market and the export from the Union of certain commodities and products associated with deforestation and forest degradation. Official Journal of the European Union, L150, 206-247. <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2023/1115/oj>
- Flores-Anderson, A. I., Cardille, J. A., Kellndorfer, J., Meyer, F. J., & Olofsson, P. (2026). On the sensitivity of SAR C- and L-band dual-polarized data for detection of early deforestation in the tropics. *Remote Sensing of Environment*, 333, 115133. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2025.115133>
- Maskell, G. M., Chemura, A., Nguyen, H., Gornott, C. y Mondal, P. (2021). Integration of Sentinel optical and radar data for mapping smallholder coffee production systems in Vietnam. *Remote Sensing of Environment*, 266, 112709. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112709>
- Olofsson, P., Foody, G. M., Herold, M., Stehman, S. V., Woodcock, C. E. y Wulder, M. A. (2014). Good practices for estimating area and assessing accuracy of land change. *Remote Sensing of Environment*, 148, 42-57. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.02.015>
- Tassi, A., Gigante, D., Modica, G., Di Martino, L. y Vizari, M. (2021). Pixel- vs. object-based Landsat 8 data classification in Google Earth Engine using Random Forest: The case study of Maiella National Park. *Remote Sensing*, 13(12), 2299. <https://doi.org/10.3390/rs13122299>