

## Predicción del rendimiento de cultivos de café: un mapeo sistemático

### Forecast yield prediction of coffee crops: a systematic mapping

Cristian Camilo Muñoz Ordóñez<sup>1</sup>  Carlos Alberto Cobos Lozada<sup>2</sup>  Julián  
Fernando Muñoz Ordóñez<sup>2</sup> 

<sup>1</sup>Ingeniero Físico y estudiante de la Maestría en Computación.

<sup>2</sup>Ingeniero de Sistemas y Magíster en Informática. PhD. en Ingeniería de Sistemas y Computación. Coordinador del Grupo de I+D en Tecnologías de la Información (GTI) categoría A de COLCIENCIAS y docente del Departamento de Sistemas de la Universidad del Cauca.

<sup>3</sup>Ingeniero Físico, Magíster en Computación y PhD en Ciencias de la Computación, docente del programa de Ingeniería de Sistemas de la Corporación Universitaria Comfacaucá – Unicomfacaucá.

## Resumen

El café es uno de los productos agrícolas más comercializados internacionalmente y en Colombia, es el primer producto de exportación no minero-energético. En este contexto, la predicción del rendimiento de los cultivos de café es vital para el sector, ya que permite a los caficultores establecer estrategias de manejo del cultivo, maximizando sus ganancias o reduciendo posibles pérdidas. En este artículo, se abordan aspectos cruciales de la predicción del rendimiento de los cultivos de café mediante una revisión sistemática de literatura de documentos consultados en Scopus, ACM, Taylor & Francis y Nature. Estos documentos se sometieron a un proceso de filtrado y evaluación para responder cinco preguntas clave: variables predictoras, variable objetivo, técnicas y algoritmos empleados, métricas para evaluar la calidad de la predicción y especies de café reportados. Los resultados revelan distintos grupos de variables predictoras que incluyen factores atmosféricos, químicos, obtenidos vía satélite, relacionados con fertilizantes, suelo, manejo del cultivo y sombras. La variable objetivo más recurrente es el rendimiento medido en peso de granos por hectárea u otras medidas, con un caso que considera el área foliar. Entre las técnicas predominantes en la predicción del rendimiento se encuentran la regresión lineal, los bosques aleatorizados, el análisis de componentes principales, la regresión por conglomerados, las redes neuronales, los árboles de clasificación y regresión y las máquinas de aprendizaje extremo. Las métricas más comunes para evaluar la calidad de los modelos predictivos incluyen la raíz del error cuadrático medio, coeficiente de determinación ( $R^2$ ), error absoluto medio, error estándar, coeficiente de correlación de Pearson y desviación estándar. Por último, las variedades de café más estudiadas son robusta, arábica, racemosa y zanguebariae.

## Abstract

Coffee is one of the most traded agricultural products internationally; in Colombia, it is the first non-mining-energy export product. In this context, the prediction of coffee crop yields is vital for the sector since it allows coffee growers to establish crop management strategies, maximizing their profits or reducing possible losses. This paper addresses crucial aspects of coffee crop yield prediction through a systematic literature review of documents consulted in Scopus, ACM, Taylor & Francis, and Nature. These documents were subjected to a filtering and evaluation process to answer five key questions: predictor variables used, target variable, techniques and algorithms employed, metrics to evaluate the quality of the prediction, and species of coffee reported. The results reveal some groups of predictor variables, including atmospheric, chemical, satellite-derived, fertilizer-related, soil, crop management, and shadow factors. The most recurrent target variable is yield, measured in bean weight per hectare or other measures, with one case considering leaf area. Predominant techniques for yield forecasting include linear regression, random forests, principal component analysis, cluster regression, neural networks, classification and regression trees, and extreme learning machines. The most common metrics to evaluate the quality of predictive models include root mean squared error, coefficient of determination ( $R^2$ ), mean absolute error, error deviation, Pearson's correlation coefficient, and standard deviation. Finally, robusta, arabica, racemosa, and zanguebariae are the most studied coffee varieties.

#### Keywords:

coffee yield, forecasting, machine learning, predictive variables, quality metrics.

#### Palabras clave:

Aprendizaje de máquina, métricas de calidad, predicción, rendimiento del café, variables predictivas.

#### Cómo citar:

Muñoz, C.C., Cobos, C.A., Muñoz, J.F., Predicción del rendimiento de cultivos de café: un mapeo sistemático. *Ingeniería y Competitividad*, 2023, 25(3); e-30513171. doi: 10.25100/iyc.v25i3.13171

Recibido: 08-18-23

Aceptado 09-13-23

#### Correspondencia:

camilomu@unicauca.edu.co,  
ccobos@unicauca.edu.co,  
jfmunoz@unicomfacaucá.edu.co

Este trabajo está licenciado bajo una licencia internacional Creative Commons Reconocimiento-No Comercial-CompartirIgual4.0.

#### Conflicto de intereses:

Ninguno declarado



### ¿Por qué se realizó?

Este estudio se llevó a cabo para abordar y conocer los aspectos (variables predictoras, métodos o técnicas, especies o variedades y métricas de comparación) más relevantes para la predicción del rendimiento de los cultivos de café, uno de los productos agrícolas de mayor importancia en la economía de Colombia y del mundo. Predecir el rendimiento con precisión es fundamental para que los caficultores puedan tomar decisiones informadas sobre el manejo de sus cultivos, lo que puede influir en sus ganancias y reducir posibles pérdidas.

### ¿Cuáles fueron los resultados más relevantes?

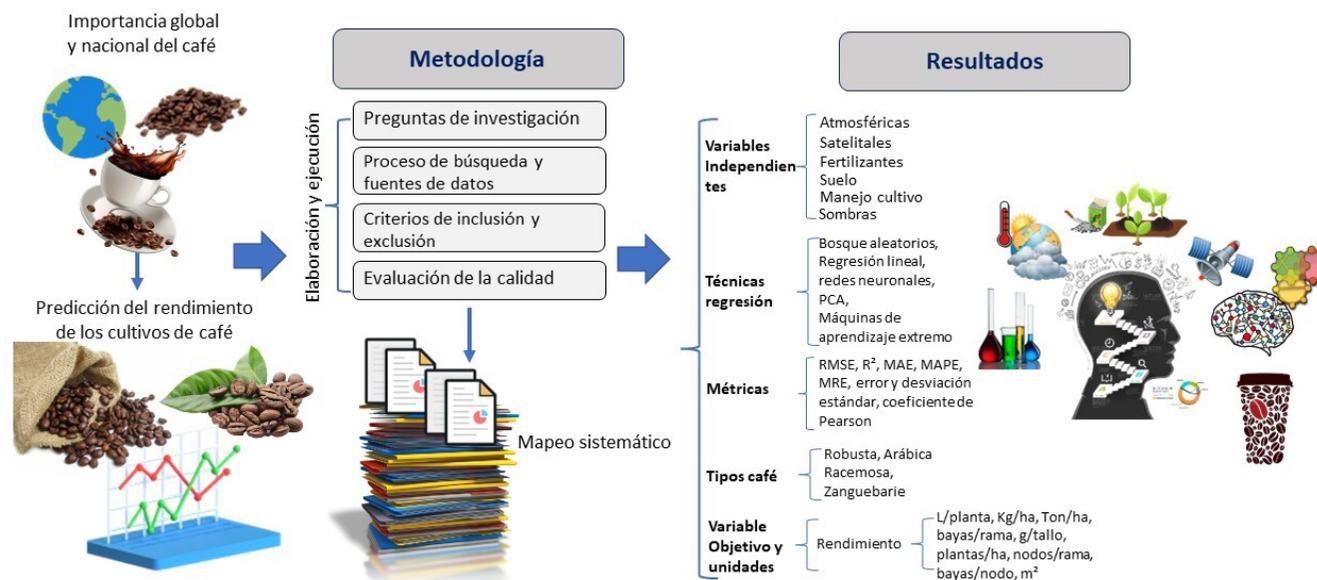
Se encontró que las variables predictoras más reportadas en la literatura incluyen aspectos atmosféricos, químicos, relacionados con el suelo, fertilizantes, el manejo del cultivo y tomados de imágenes satelitales. Los principales métodos o técnicas más utilizados para predecir el rendimiento de los cultivos de café incluyen la regresión lineal, los bosques aleatorizados, la regresión por conglomerados, las redes neuronales, los árboles de clasificación y regresión y las máquinas de aprendizaje extremo. Las métricas de comparación más comúnmente usadas para evaluar la calidad de la predicción son la raíz del error cuadrático medio y el coeficiente de determinación ( $R^2$ ), entre otras. Finalmente, las especies de café más estudiadas fueron la robusta, arábica, racemosa y zanguebariae.

### ¿Qué aportan estos resultados?

Estos resultados aportan valiosa información para la comunidad científica, los caficultores y en general para la industria del café, ya que proporciona una comprensión más profunda de las variables y técnicas clave en la predicción del rendimiento del café, lo que puede ayudar a mejorar las estrategias de manejo de estos cultivos y proponer nuevos estudios que cuenten con mayor precisión y expliquen mejor sus resultados. Además, al identificar las especies de café más estudiadas, se puede promover la diversidad genética y la investigación en torno a las variedades menos estudiadas.

#### Graphical Abstract

### Predicción del rendimiento de cultivos de café: un mapeo sistemático.



## Introducción

Según el Observatorio de Complejidad Económica (*The Observatory of Economic Complexity, OEC*) del MIT Media Lab, el café en 2021 fue el producto número 124 más comercializado del mundo, con transacciones totales de USD \$36 billones. Las exportaciones de este producto crecieron 16,3%, representando el 0,17% del comercio mundial total (1). La mayor parte del consumo se da en países del “Norte Global” (2), de los cuales Estados Unidos destaca entre las primeras posiciones registrando en el total de su población un consumo diario del 74% (3). Además, según una encuesta de 2022 realizada por *Drive Research*, tres de cada cuatro estadounidenses beben café todos los días y 49% de esta población toma de tres a cinco tazas diarias (4) (5). Por otro lado, la Federación Europea del Café afirma que los consumidores de ese continente tienen la demanda per cápita más alta del mundo, con el 30% del total generado (6).

Para satisfacer esta demanda global de café se cuenta con aproximadamente 60 millones de agricultores de pequeña escala ubicados principalmente en América del Sur y el Caribe, Sudeste Asiático, Noreste Africano, India y China (2). En consecuencia, el café se convierte en uno de los productos agrícolas más comercializados a nivel internacional (7), constituyendo una parte importante de la economía general y una fuente considerable de ingresos de divisas para muchos países, la mayoría en desarrollo (8).

Colombia no es ajena a esta tendencia global, su posición como tercer productor de café en el mundo hace evidente su estrecha relación con este cultivo (1) (9), siendo el primer producto de exportación no minero-energético del país (10), en donde su comercialización genera aproximadamente 730 mil empleos directos los cuales sustentan a 555.692 familias en 22 departamentos, además que el 25% de la población rural del país es cafetera (11), hechos que destacan la importancia de plantear y ejecutar continuamente mejoras para optimizar su producción y superar los continuos y diversos retos socioeconómicos y ambientales que enfrenta este cultivo.

El cultivo del café enfrentó desafíos socioeconómicos y ambientales, como la abolición de cláusulas económicas del Acuerdo Internacional del Café en 1989 (12) (13), causando volatilidad en el mercado y contribuyendo a la denominada “crisis del café” (14). Actualmente la inseguridad alimentaria, envejecimiento comunitario, migración juvenil y condiciones precarias de los recolectores son problemas que afectan la cadena productiva de este cultivo (11). El cambio climático, con un aumento de 1.1°C desde 1850 a 1900 (15), ha intensificado fenómenos extremos, erosionando suelos y causando déficits de agua para el cultivo (16). A causa de lo anterior se estima que las áreas adecuadas para la producción de café disminuirán entre un 73 y un 88% para América Latina en 2050 (17) (18).

En Colombia, observando la fuerte relación de sus habitantes con la producción de café y los inconvenientes por los que atraviesa este cultivo, se ha venido incursionando en la agricultura de precisión (en adelante AP) a través del desarrollo de técnicas y tecnologías para asistir en el monitoreo de los cultivos, controlar el uso apropiado de pesticidas y fertilizantes, y mejorar la producción, a la vez que se reduce el impacto en el medio ambiente (19) (20). Se espera que la AP implique cada vez más la recopilación automatizada de datos y la toma de decisiones a nivel finca/granja, aumentando la eficiencia de los recursos de la industria agrícola, reduciendo el uso de agua y químicos nocivos, y aminorando así las repercusiones negativas sobre el ecosistema (21) (22).

En este contexto, contar con algoritmos precisos que puedan predecir el rendimiento de la producción de café, cobra un valor significativo, esta labor parte del aprovechamiento del registro y monitoreo de las actividades agrícolas, lo que permite tomar decisiones basadas en datos reales (23) (24) y a partir de una predicción precisa del rendimiento calculada de diferentes variables, se podrán hacer recomendaciones en el manejo del cultivo para obtener una mayor producción (25) (26)(20).

En el presente artículo, se muestran los resultados de un mapeo sistemático que busca determinar cuáles métodos, técnicas o algoritmos se han usado a la fecha para predecir el rendimiento de la productividad en los cultivos de café.

## Metodología

Este estudio fue realizado como un mapeo sistemático siguiendo las guías propuestas en (27). En esta sección se detalla la manera como se estructuró el mapeo para identificar, evaluar y resumir las investigaciones previas más relevantes relacionadas con la predicción y determinación del rendimiento de la productividad en los cultivos de café. A continuación, se detallan los pasos seguidos.

### Preguntas de investigación

Las preguntas de investigación que direccionaron este estudio y su motivación se presentan en la tabla 1.

### Proceso de búsqueda y fuentes de documentos

Para definir la cadena de búsqueda se siguió un proceso iterativo de mejora y refinamiento que luego de seis versiones permitió obtener el siguiente resultado:

Componente 1: (yield OR productiv\*) AND

Componente 2: ("coffee") AND

Componente 3: ("soil fertility" OR "soil survey" OR "crop\* practice" OR "crop\* management" OR "clim\*" OR "weather" OR "shad\*" OR "pests" OR "diseases").

**Tabla 1.** Preguntas de investigación

ID	Pregunta de investigación	Motivación
1	¿Cuáles son las variables, factores o atributos (plagas, enfermedades, sombra, clima, suelo, prácticas de cultivo, tipo de cultivo, u otras) más utilizadas, sus características (tipo de datos, unidad de medida, en qué periodo de cultivo se mide, entre otras) usadas en la predicción del rendimiento de los cultivos de café?	Identificar las variables, su manera de acoplarse con otras de distinta naturaleza (por ejemplo: variables físicas con químicas y con aquellas relacionadas con el suelo) y encontrar conjuntos de datos útiles para la predicción del rendimiento de los cultivos de café.
2	¿Cuáles son los principales métodos, técnicas o algoritmos utilizados en la predicción del rendimiento de los cultivos de café?	Identificar los diferentes métodos, técnicas o algoritmos utilizados para la predicción del rendimiento de los cultivos de café, que puedan ser usados para comparar sus resultados contra nuevos desarrollos.

3	¿Cuál es la variable objetivo, sus características y procesamiento en cada uno de los estudios del estado del arte?	Entender la naturaleza y dinámica de la variable objetivo (grano seco, grano recién recolectado, u otros) del dataset con el que se van a implementar los diferentes métodos, técnicas o algoritmos.
4	¿Cuáles son las métricas de comparación más utilizadas para evaluar la calidad de la predicción en cada una de las investigaciones realizadas?	Comprender las métricas de calidad más utilizadas para evaluar los resultados obtenidos en las investigaciones previas.
5	¿Cuáles son las especies de café y sus características más relevantes, sobre las cuales se han generado más investigaciones enfocadas en la predicción de su rendimiento?	Determinar en la actualidad las especies de café más estudiadas y sus respectivas características.

Esta cadena de búsqueda definitiva contiene 3 componentes principales que deben estar presentes en los resultados (en la cadena están unidos por operadores lógicos AND) y cada componente corresponde a uno o más elementos definidos en la estrategia PICO (Población, Intervención, Comparación y Resultado) (27). Los operadores booleanos OR dentro de un mismo componente incorporan palabras alternativas y sinónimos en cada uno de los componentes. El primer componente se relaciona con el resultado, es decir, predecir o definir la productividad, el segundo se relaciona con la población objetivo, en este caso los cultivos de café y el tercero se relaciona con la intervención o la comparación a través de una lista amplia de términos enfocados en el manejo agronómico de la tierra, que permite buscar documentación relacionada con suelos, prácticas de cultivo, clima, sombras, plagas y enfermedades. El símbolo de asterisco (\*) se usó como carácter comodín para la raíz de la palabra que la precede, por ejemplo, el término *crop\** puede hacer referencia a los términos *crop*, *crops* o *cropping*. Es preciso comentar que el tercer componente no incluye aspectos sociales y económicos que pueden afectar la productividad de los cafetales, esto se establece como trabajo para una futura versión ampliada del presente mapeo.

La tabla 2, muestra las fuentes de los documentos (índices o bases de datos científicas) utilizadas para realizar la búsqueda de los artículos publicados. En cada una de ellas se usó la opción de búsqueda avanzada.

**Tabla 2.** Bibliotecas digitales utilizadas para realizar la búsqueda de información

Base de datos	URL
Scopus	<a href="https://www.scopus.com/">https://www.scopus.com/</a>
ACM	<a href="https://dl.acm.org/search/advanced">https://dl.acm.org/search/advanced</a>
Taylor & Francis	<a href="https://www-tandfonline-com.acceso.unicauca.edu.co/search/advanced">https://www-tandfonline-com.acceso.unicauca.edu.co/search/advanced</a>
Nature	<a href="https://www-nature-com.acceso.unicauca.edu.co/search/advanced">https://www-nature-com.acceso.unicauca.edu.co/search/advanced</a>

### Criterios de inclusión y exclusión

Una vez elaboradas las cadenas de búsqueda e identificadas las fuentes de los documentos, se procedió a establecer los criterios de inclusión y exclusión con la finalidad de seleccionar los artículos afines con los objetivos de investigación. Estos criterios se muestran en la tabla 3.

## Evaluación de la calidad

Cada uno de los documentos distintos (únicos) que resultaron de la búsqueda y aprobaron los criterios de inclusión y exclusión pasaron por un proceso de evaluación de su calidad teniendo en cuenta los criterios que se presentan en la tabla 4. Esta tabla también presenta los valores asignados (-1, 0 o 1) a cada criterio dependiente de su nivel de cumplimiento.

El criterio de calidad 1 (C1) relacionado con la "Pertinencia temática" busca establecer el nivel en el que el artículo aborda aspectos relevantes o proporcionan información valiosa sobre métodos, técnicas, algoritmos, factores o características de los cultivos y datos que influyen en el rendimiento de los cultivos de café. La evaluación de este criterio implica analizar la relación directa de los documentos con los cultivos de café, la exhaustividad y profundidad de los datos presentados, la validez y relevancia de la información proporcionada, la originalidad en términos de avances en el conocimiento y la utilidad práctica de los conceptos expuestos. La integración de estos factores permite establecer el grado de relevancia temática del artículo en el ámbito de la predicción del rendimiento de los cultivos de café. El criterio de calidad 2 (C2) relacionado con "Metodología rigurosa" busca establecer el grado en que el artículo utiliza métodos científicos rigurosos, confiables y repetibles, describiendo claramente el diseño del estudio, la muestra de datos utilizada, las variables medidas y el apropiado análisis y comparación (si aplica) de los resultados obtenidos. El criterio de calidad 3 (C3) relacionado con "Resultados significativos" busca establecer el nivel en que el artículo presenta resultados significativos y relevantes para el objetivo del estudio del mapeo sistemático. El artículo debe proporcionar información útil sobre los efectos de los diferentes factores en la producción de café y ayudar a identificar los elementos principales que afectan la precisión en la predicción de su rendimiento. La cuantificación de este criterio considera la importancia de los resultados en el contexto del estudio, destacando su contribución a la comprensión y mejora de la producción cafetera. El criterio de calidad 4 (C4) relacionado con "Evaluación del dataset" busca determinar la calidad del conjunto de datos usado en el artículo, describiendo sus variables, factores o atributos y la amplitud de estos en relación con el contexto de la aplicación, es decir, que incluya variables relacionadas con la dinámica ambiental, la topográfica y/o las prácticas de cultivo, datos sobre el suelo, entre otros. Un valor de 1 representa datos exhaustivos y altamente relevantes, enriqueciendo la investigación. Un valor de 0 indica datos adecuados, pero con espacio para mejoras en la completitud. Un valor de -1 denota datos insuficientes y poco relevantes para el estudio. Esta escala cuantifica la calidad del conjunto de datos, siendo mayor cuanto más completo y pertinente es para la investigación. El criterio de calidad 5 (C5) relacionado con "Ranking de la revista en JCR" busca evaluar la calidad de la revista donde el artículo fue publicado, en este sentido se presume que entre mejor sea el cuartil reportado en el JCR más exigente ha sido el proceso de revisión previa a su publicación.

**Tabla 3.** Criterios de inclusión y exclusión

Criterios de inclusión	Criterios de exclusión
Artículos dentro de una ventana de tiempo de 10 años (2014 a 2024), cuando en dicho artículo se evidencia el uso de una base de datos relacionado con la predicción del rendimiento de los cultivos de café.	Artículos que no estén escritos en inglés, español, portugués o francés.

Artículos dentro de una ventana de tiempo de 5 años (2018 a 2024) donde se muestren métodos, técnicas o algoritmos de predicción del rendimiento de los cultivos de café.

Artículos duplicados que sean reportados por diferentes fuentes de documentos; sólo se preserva el reportado por la primera fuente.

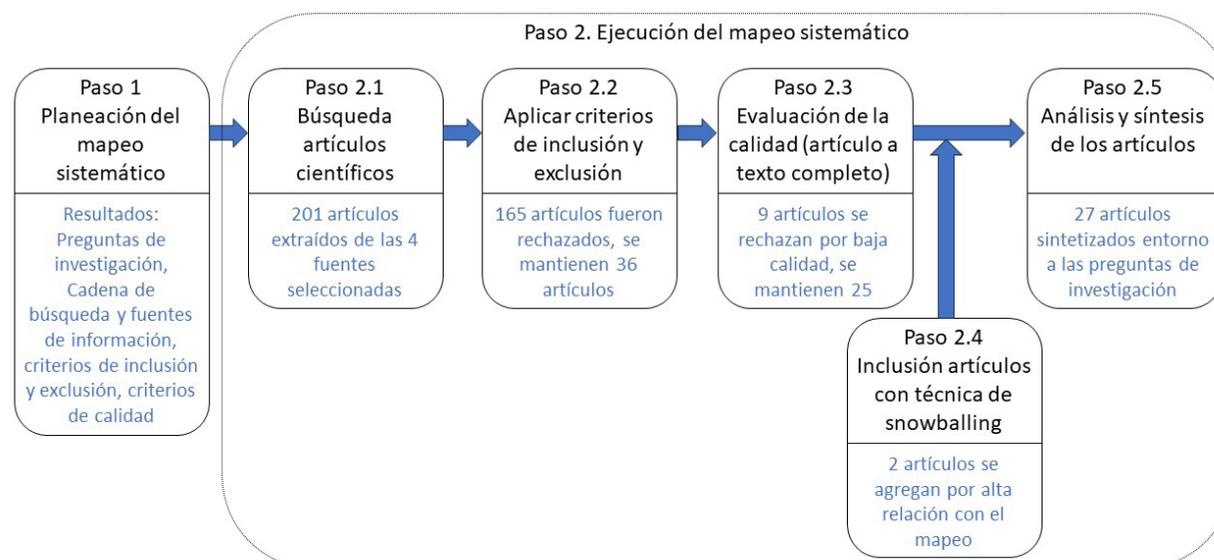
Que el texto completo esté disponible para el equipo de investigación.

Que el documento permita dar respuesta a por lo menos una de las preguntas de investigación definidas anteriormente.

**Tabla 4.** Criterios de calidad

Criterio	Descripción	Calificación		
		-1	0	1
C1	Pertinencia temática	No	Parcialmente	Si
C2	Metodología rigurosa	No	Parcialmente	Si
C3	Resultados significativos	No	Parcialmente	Si
C4	Evaluación del dataset	No relacionadas	Involucra rendimiento	Aspectos y variables relevantes
C5	Ranking de la revista en JCR	No	Q4, Q3	Q2, Q1

La **Figura 1** resume el flujo de proceso realizado para la obtención del mapeo sistemático.



**Figura 1.** Proceso mapeo sistemático

## Resultados y discusión

La tabla 5, muestra los resultados de la búsqueda ejecutada. La búsqueda primero se realizó en *Scopus* y luego en las otras fuentes en el mismo orden en el que aparecen en la tabla. Para cada uno de los artículos encontrados en cada fuente se leyó su título, resumen y palabras clave; con esta información y la aplicación de los criterios de inclusión y exclusión se seleccionaron los artículos relevantes para el mapeo o se descartaron. En la medida que se revisaban nuevas fuentes también se descartaron los documentos duplicados. Al final se contó con 36 artículos relevantes para el mapeo los cuales pasaron a la fase de evaluación de la calidad. De esos 36 se descartaron 9 por su baja calidad.

**Tabla 5.** Cantidad de artículos encontrados y seleccionados por fuente

Buscador	Número de artículos encontrados	Número de artículos seleccionados
Scopus	110	31
ACM	11	1
Taylor & Francis	65	1
Nature	15	3
<b>Total</b>	<b>201</b>	<b>36</b>

El Anexo 1 lista los 27 documentos que finalmente se incluyeron en el análisis, los 25 seleccionados previamente y 2 adicionales (los identificados como 26 y 27) que se seleccionaron usando la técnica de "bola de nieve" (*snowballing*) luego de haber leído el texto completo de cada uno de los documentos previamente seleccionados y revisar detenidamente sus referencias. A continuación, se presentan las respuestas obtenidas a cada una de las cinco (5) preguntas de investigación planteadas.

### Variables utilizadas para predecir el rendimiento en los cultivos de café

**Sombras:** en la predicción del rendimiento de los cultivos de café las investigaciones reportan distintas variables, factores o atributos, algunos de estos trabajos tienen como objetivo examinar los efectos que ocasiona la interacción de las sombras de los árboles y la textura del suelo con estados reproductivos en el rendimiento del café (28) (29), la comparación del rendimiento de los cafetales con y sin la presencia de árboles leguminosos (30) y el control y efecto de los factores bióticos y abióticos de distintas plantas que dan sombra (31). La sombra habitualmente se mide en un porcentaje (%) presente sobre las plantas de café, lo que conlleva a una intensificación del tipo de suelo bajo esta (arcilloso, arenoso, limoso), afectando directamente la productividad del café medido en kg/ha, sacos/ha o litros/planta; frecuentemente la unión de estos factores se evalúa o registra en periodos reproductivos jóvenes y estados avanzados de edad, en periodos de cosecha, lo que a su vez permite seleccionar el mejor tipo de genotipo acorde a la condición predominante en el cultivo (32). La tabla 6 resume las variables encontradas en relación con la sombra en los cultivos de café.

**Tabla 6.** Variables relacionadas con sombra

Nombre	Medida	Número de veces reportada
Tipo de sombra	Tipo de árbol	4
Sombra	%	2

**Atmosféricas** (ver tabla 7): un conjunto de variables recurrentemente presentadas en las investigaciones son las relacionadas con la atmósfera e incluyen la temperatura, el déficit de presión de vapor, las precipitaciones, los requerimientos potenciales del agua (relacionada con el estrés hídrico), el déficit de agua mensual (mm/mes), la humedad relativa y la radiación solar. En (33) se muestra cómo el rendimiento de los cafetales está ligado a una prolongada temporada de lluvias que favorece el crecimiento vegetativo, aumentando así el potencial de producción (incremento el número de nudos fructíferos), mientras que la baja precipitación durante la formación de los granos causa el efecto contrario.

De manera similar se ha estudiado la interacción que tiene el rendimiento del cultivo con los valores de estrés hídrico, el cual afecta el crecimiento del café dependiendo de la etapa fenológica en la que se encuentre y los requerimientos de agua del cultivo (litros), al no permear suficiente agua a la profundidad necesaria para cubrir la pérdida ocasionada por la evapotranspiración (34). Esto último está muy relacionado con lo propuesto en (35) donde se desarrollaron modelos agrometeorológicos para la predicción de los rendimientos anuales de café arábica (*Coffea arabica*), utilizando los déficits de agua mensuales (mm/mes) en las etapas reproductivas (alto rendimiento) y en la etapa vegetativa (bajo rendimiento), donde se ven más afectados por esta variable.

Otras variables climáticas relacionadas con la productividad del café incluyen la humedad relativa (%RH) (36) y la presión de vapor (VPD en kPa) (37) (38) (39); en esta última investigación se logró identificar un umbral de rápida disminución del rendimiento que se presenta cuando esta variable está por encima de 0,82 kPa y a su vez, se definió un intervalo de temperatura de 2°C a 2.9°C sobre el cual si el calentamiento global llega a superar, lo más probable es que los países que representan el 90% del suministro mundial de café perciban una drástica disminución en la producción. De esta forma se introduce la variable transversal a la mayoría de las investigaciones relacionadas con productividad y clima, por ejemplo, en (37); (40) se percibe la influencia de la temperatura (°C) en el rendimiento del café Robusta, determinando que cada aumento de 1°C en las temperaturas medias, mínimas o máximas por encima de 16,2/24,1 °C corresponde a una disminución del rendimiento de aproximadamente 14% o 350–460 kg/ha. En (33) (40) (35) (38) (39) (36), la temperatura se agrega generalmente como atributo al conjunto de datos de entrenamiento para los diferentes modelos, se mide con temporalidad trimestral y se incluye con valores promedio, mínimo y máximo.

**Tabla 7.** Variables atmosféricas

Nombre	Medida	Número de veces reportada
Precipitación	mm	13
Temperatura	°C	12
Humedad relativa	%	6
Presión de vapor de aire	kPa	4
Evapotranspiración	mm/día	3
Radiación solar	w/m <sup>2</sup>	3
Estrés hídrico (medida de la transpiración que ocurre en una planta en el tiempo de medición, mediante el registro de la temperatura de la planta y el déficit de presión de vapor del agua (Tomado de (43))	Adimensional	1

**Suelo y manejo del cultivo** (ver tabla 8): En (41) se aprecia como los autores determinan la clasificación, manejo y cálculo del rendimiento de parcelas de café basado en la pedología (estudio del suelo) y características del manejo del cultivo en distintos cafetales de Brasil. Las variables consideradas incluyen propiedades del suelo como la caracterización morfológica y muestreo a profundidades de 0–0,2 m, 0,4–0,7 m y 1,0–1,5 m, lo que permite posteriormente delimitar su distribución terrestre con ayuda de la pendiente del terreno (información proveniente de satélites), encontrando la relación suelo-paisaje. También se destaca dentro de los atributos algunas variables relacionadas con el manejo del cultivo, como: densidad de las plantas, edad del cultivo, áreas de riego y no riego, métodos de encalado (aplicación de un material alcalinizante al suelo, por lo general calcio y magnesio), manejo de los pastizales (limpieza, deshierbe y poda), periodos de fertilización y compost (41) (42), además de tener en cuenta las buenas prácticas de intervención de cultivos propuestas por entes directores en el país como CENICAFE en Colombia (38). El procesamiento de estos conjuntos de datos implica el análisis de la relación entre las características del suelo y el rendimiento del café para establecer clases de manejo específicas.

**Tabla 8.** Variables relacionadas con el suelo y el manejo del cultivo

Nombre	Variable relacionada con el suelo	Variable	Medida	Número de veces
Edad del cultivo	x		meses - años	14
Tipos - textura del suelo	x		Tipo	8
pH del suelo	x		Adimensional	6
Capacidad de intercambio catiónico	x		cmol(+)/dm <sup>3</sup> - cmol/litro	4
Contenido de limo	x		%	4
Elevación - pendiente	x		m - grados	4
Régimen de poda, corte, deshierbe		x	cantidad/mes – horas/ha año	3
Densidad del cultivo		x	plantas/m <sup>2</sup>	3
Número de tratamientos fitosanitarios (plaguicidas)		x	cantidad/mes - g/ha año	2
Cantidad de riego		x	cantidad/mes	1

**Obtenidas satelitalmente** (ver tabla 9): El uso de imágenes satelitales, generalmente ópticas, también supone un enfoque innovador y práctico en la predicción del rendimiento, la evaluación nutricional, la detección de plagas y enfermedades, el pronóstico del clima y la evaluación de las necesidades de agua en áreas de cultivo. Las siguientes investigaciones (44) (45) (46) se enfocaron en complementar información medida en campo (45) con la obtenida desde el espacio, determinando parámetros como índice de área foliar, evolución del estado fenológico de los cultivos en períodos productivos, estrés hídrico y evapotranspiración real derivada de satélite (45), utilizando técnicas de teledetección, corregritos e implementación de índices de vegetación como NDVI y EVI (46). El procesamiento de datos de este tipo, obtenidos de manera indirecta, implica evaluar constantemente su relación con el entorno en tierra, a través de indicadores, observaciones directas y mediciones de variables específicas in situ, como la altura de la planta, la cantidad de nutrientes aplicados y la incidencia de plagas y enfermedades (45). Este tipo de enfoques tienen uso potencial como herramienta para el monitoreo y la evaluación de las condiciones de salud y estado fenológico de diferentes cultivos de forma rápida y precisa, asistiendo en la aplicación de estrategias más adecuadas para la toma de decisiones en áreas de cultivos de gran escala.

**Tabla 9.** Variables obtenidas satelitalmente

Nombre	Medida	Número de veces reportada
NDVI	Adimensional	2
EVI	Adimensional	2
Modelo de elevación digital	m	2
Tipos de coberturas del suelo	Adimensional	1
Evapotranspiración real derivada de satélites	mm/día	1
Radiancia	W/sr*m <sup>2</sup> *μm	1

**Químicas** (ver tabla 10): Otro de los componentes más relevantes en la productividad de los cultivos de café es su mantenimiento químico; la variación de la cantidad de nutrientes que recibe la tierra es crucial para las cosechas futuras (44)(41), algunos de los elementos más utilizados, medidos comúnmente en mol/l, son: magnesio, hierro, calcio, boro, nitrógeno, fósforo y potasio, junto con los niveles de pH en el suelo y los nutrientes del suelo evaluados por los niveles de carbono orgánico presentes en la muestra (37) (47) (35). Se observa como en la mayoría de los artículos evaluados, el rendimiento del café Robusta está principalmente limitado por la disponibilidad de nitrógeno (29), también algunas combinaciones optimizan la producción (38), así como la implementación de insumos de nutrientes orgánicos como la hojarasca y sintéticos: ácido húmico (kg / acre) y urea (48). Otros análisis más detallados se presentan en (44) donde a algunas de las variables descritas antes se le suman: Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> y Al<sup>3+</sup> intercambiables, extraído en una solución de 1 mol/litro KCl; acidez potencial (H<sup>+</sup> + Al<sup>3+</sup>); materia orgánica del suelo (MOS) y capacidad de intercambio catiónico (CIC).

**Tabla 10.** Variables químicas

Nombre	Medida	Número de veces reportada
Potasio	kg/ha	7
Materia orgánica en el suelo	%	7
Fósforo	mg/kg – kg/ha	6
Calcio	meq/kg – kg/ha (mil equivalentes por kilogramo)	5
Nitrógeno	mg/kg	4
Magnesio	meq/kg – kg/ha	4
Azufre	mg/kg – kg/ha	2
Zinc	mg/kg – kg/ha	2
Sodio	mg/kg	1
Boro	mg/kg	1

**Fertilizantes** (ver tabla 11): relacionado con los aditivos químicos utilizados para el mantenimiento e incremento de la productividad, también se tiene en cuenta el uso de fertilizantes para la tierra, materia orgánica del suelo (49) (47) (35); (50), el compost y los abonos verdes (GM) como alternativas para suministrar nutrientes a los cultivos agrícolas con mínimos riesgos ambientales (50). Otro enfoque sugiere agregar fertilizantes orgánicos en cantidades de 10 kg/planta/año, y fertilizantes inorgánicos en forma de Fosfato de Roca 240, Urea 400 y KCl 320 g/planta/año (47), en ambos casos se registra un incremento en la altura de la planta, el diámetro de la copa (CD), el número de ramas plagiotrópicas (tallo que crece de manera horizontal o inclinada) (PBN) y el rendimiento (sacos de 60 kg/ha) (47) (50). Otra clase de fertilizantes naturales fueron los probados en (49) donde se utilizaron cuatro abonos: cáscara de café, yeso agrícola, polímero retenedor de agua y compuesto orgánico y se comparó con suelos sin estos abonos, encontrando que con el uso de *Urochloa decumbens*

+ cáscara de café/compuesto orgánico + fertilizantes de liberación controlada se obtiene un mayor crecimiento y rendimiento de las plantas de café.

**Tabla 11.** Variables relacionadas con los fertilizantes

Nombre	Medida	Número de veces reportada
fertilizantes de liberación controlada	% libras/acre	5
Acondicionadores de suelo - Tipo de fertilizante (cáscara de café, yeso agrícola, polímero retenedor de agua, compuesto orgánico (estiércol))	kg/ha año Tipo kg/ha año	2

**Características físicas de la planta, su semilla y resistencia a plagas** (ver tabla 12): el estudio de las características físicas de la planta de café como: parámetros de crecimiento, números de hojas, características de los granos, número de nodos fructíferos, diámetro de la copa, altura alcanzada desde su base (37) (51) (52), junto con el conocimiento de las propiedades y comportamientos de la semilla de la que proviene, usando por ejemplo el perfil climático para comprender los requisitos básicos requeridos por las especies *Coffea racemosa* y *C. zanguebariae*, en el caso de (53), se comparan con los del café arábica (*C. arabica*) y robusta (*C. canephora*), y ayudan a determinar que las dos primeras especies tienen una mayor tolerancia al calor, un bajo requerimiento de precipitaciones, mayor tolerancia a la estación seca y un desarrollo más rápido de los frutos (cada 4 meses de floración a frutos maduros). De manera transversal a todos los procesos descritos en este párrafo y en los anteriores, es de vital importancia considerar como variable existente la presencia de enfermedades o plagas sobre los cafetales. En (52) evalúan veintitrés cultivares resistentes a la roya, y cuatro variedades y tres cultivares susceptibles como variable control, obteniendo que la presencia y control de la enfermedad afectan el futuro rendimiento del área de donde proceden las plantas seleccionadas. Lo anterior ha sido relacionado como indicador de productividad en los cultivos de café (51) (53) (47) (52).

En resumen, los artículos consultados revelan que las variables más utilizadas para determinar el rendimiento de la productividad en los cultivos de café incluyen aspectos como: el porcentaje de cobertura y los tipos de sombras sobre los cafetales, producidos por: solo árboles de leguminosas, árboles de leguminosas y plantas de banano, y otras plantas, o solo árboles frutales o forestales; de igual forma los índices de vegetación (NDVI, EVI) obtenidos de imágenes satelitales que se correlacionan con la productividad de los cultivos de café. Otro aspecto para tener en cuenta son los atributos relacionados con el clima o la atmósfera, dentro de las que cabe resaltar variables como temperatura (°C), precipitación (mm), humedad relativa (%RH), estrés hídrico (litros requeridos por litros renovables), presión de vapor (kPa) y déficit de agua mensuales (mm/mes).

**Tabla 12.** Variables relacionadas con las características físicas de la planta, su semilla y resistencia a plagas

Nombre	Medida	Número de veces reportada
Altura de la planta (coeficiente de crecimiento de la copa, profundidad mínima de raíces, profundidad máxima de raíces)	cm	8
Número de ramas	Adimensional	7
Número de nudos	Adimensional	6
Tipos de plagas – enfermedades (Incluye tratamientos fitosanitarios, aporte de plaguicidas)	Adimensional	3

Área foliar (incluye el tamaño del follaje)	m <sup>2</sup>	2
Diámetro del tallo	mm	2
Secuenciación de ADN - Genotipos	Adimensional	2
Distancia de los cafetos a los árboles de abrigo	m	1
Concentración de nutrientes en las hojas	nudos/rama, nudos/cultivo, frutos/rama	1

A las anteriores características se suman las relacionadas con el suelo, dentro de las que destacan sus tipos: arenosos, arcillosos, de limo, también materia orgánica en el suelo (hasta el momento todas medidas en % de peso seco del suelo), y la pendiente del terreno (%); además el manejo del cultivo, con datos como: densidad de las plantas (# plantas/ha), edad del cultivo (años), áreas de riego y no riego (ha<sup>2</sup>), métodos de encalado, manejo de los pastizales (limpieza, deshierbe y poda), periodos y tipos de fertilizantes (Fosfato de Roca 240, Urea 400, KCl 320, cáscara de café, yeso agrícola, polímero retenedor de agua y compuesto orgánico medidos en g/planta/año) y compost.

Se agregan variables enfocadas en los componentes químicos, algunos de ellos son: pH, acidez (cmol/L), aluminio (cmol/L), potasio (meq/100ml), calcio (meq/100ml), magnesio (meq/100ml), fósforo (meq/L), zinc (meq/L), cobre (meq/L), manganeso (meq/L), hierro (meq/L) y finalmente, los atributos relacionados con las características físicas del cultivo como: números plantas por agujero, número de nodos fructíferos, diámetro de la copa (cm), altura del árbol (m), número de tallos ortotrópicos (aquellos tallos cuya dirección de crecimiento es perpendicular al suelo) por cafeto, distancia entre filas y plantas (m); los datos del tipo de semilla con sus respectivas características y los relacionados con plagas y/o enfermedades presentes en la zona cultivada.

Como se puede observar, estas variables se miden en diferentes unidades y períodos de cultivo, algunas obtenidas con mediciones directas, análisis estadísticos, observaciones en campo o también determinadas por procesos matemáticos procedentes de uno o más atributos. El procesamiento de estos datos implica análisis descriptivo, espacial, de correlación, evaluaciones de tendencias, entre otros, para determinar la influencia de cada atributo en el rendimiento de los cultivos de café.

A continuación, en la tabla 13 se presenten los artículos que comparten directamente los data sets usados para el desarrollo de la investigación o cuentan con la posibilidad de solicitarlos a través de un correo electrónico.

**Tabla 13.** Artículos que disponen de acceso a conjuntos de datos relacionados con rendimiento de cultivos de café

Referencia	Referencia
(54)	(47)
(44)	(31)
(33)	(42)
(30)	(40)
(51)	(55)
(29)	(38)
(53)	(52)
(45)	(39)
(34)	(36)

## Métodos, técnicas o algoritmos utilizados en la predicción del rendimiento

Dentro de los enfoques propuestos en la literatura para la predecir la productividad en los cultivos de café, se encuentran aquellos que evalúan la relación de los porcentajes de sombra, materia orgánica en el suelo, radiación solar, crecimiento de ramas, altura de la planta y/o contenido de P, entre otros, los cuales fueron sometidos a un análisis de varianza multivariado (MANOVA) analizando por conjuntos de experimentos en parcelas (por clon - tipo de semilla) fraccionadas en el tiempo (por temporada), utilizando bloques al azar. Los resultados obtenidos permiten comprender el impacto de la variación climática en la fotosíntesis y otros procesos fisiológicos relacionados con el desarrollo de las plantas y la productividad del café; los modelos autorregresivos de primer orden fueron ajustados a las series temporales de las ramas plagiotrópicas y ortotrópicas para estimar el crecimiento medio asociado con la productividad de diferentes semillas (56).

También se han implementado técnicas que analizan las variables nutricionales (44) (41), usando algoritmos de aprendizaje automático como árboles de clasificación y regresión (*Classification and Regression Tree, CART*) y bosques aleatorizados (*Random Forest o RF*) para predecir clases de rendimiento en los cafetales. Estos modelos permiten identificar umbrales de nutrientes cruciales para obtener un alto rendimiento y minimizar su variabilidad; además, seleccionan del conjunto de variables químicas las más importantes para maximizar el rendimiento (Mg, Fe y Ca) (47). Así mismo en (44) (45) se realiza un análisis de datos geoespaciales donde se referencia el uso de variables de teledetección (*remote sensing*), determinando parámetros como índice de área foliar, evolución del estado fenológico de los cultivos en períodos productivos, estrés hídrico y evapotranspiración real derivada de satélite, para estimar el rendimiento del café en el campo. Si bien se indica que las variables relacionadas con el estado nutricional del café fueron más importantes que las variables de teledetección, el enfoque de análisis de datos geoespaciales puede proporcionar información adicional para la determinación del rendimiento.

En (28) los datos medidos se analizan estadísticamente utilizando un análisis de varianza de tres vías (ANOVA) para un diseño completamente aleatorizado. Se aplicó un modelo estadístico completo para examinar la interacción triple de los árboles de sombra, el suelo y la etapa reproductiva. Se realizó un análisis de regresión lineal simple para examinar la relación entre el rendimiento del café y las variables individuales del suelo. También se llevó a cabo un análisis de regresión múltiple para cuantificar el porcentaje contributivo de las variables individuales del suelo y los efectos de los árboles de sombra en la varianza total del rendimiento del café, como en (56) donde se identificaron los patrones de correlación de grupos de variables fisiológicas con el rendimiento del café. El método paso a paso se implementó para eliminar cualquier variable no correlacionada con la variable objetivo y establecer un modelo final de regresión múltiple significativo.

Existe un gran número de modelos de regresión que podrían considerarse para medir el impacto de las anomalías climáticas y de otras variables en el rendimiento del café (44) (37); (35). Dado que los modelos de regresión se basan únicamente en datos, se requiere de un *dataset* de entrenamiento para describir empíricamente las relaciones entre las variables y el rendimiento de café (33). Según los datos disponibles, el modelado del rendimiento se ha basado en regresiones lineales y lineales múltiples (51), bosques aleatorizados (55), redes neuronales (36) o regresión por conglomerados (una mezcla de agrupamiento o *clustering* con modelos de regresión) (41). Se usan

modelos de regresión complejos para modelar todos los procesos involucrados en el crecimiento y desarrollo de las plantas. En la práctica, a menudo los modelos más útiles son los estadísticos más simples debido al número limitado de muestras; como resultado, en (28) se propone un método de regresión lineal múltiple para modelar la relación entre las observaciones de las anomalías en el rendimiento del café y las anomalías climáticas. Este modelo ofrece la ventaja de tener un número limitado de parámetros, que a su vez pueden interpretarse fácilmente, porque representan la sensibilidad del rendimiento del café a la entrada de distintas variables como las expuesta en la sección 3.1.

En (41) se realiza un proceso de selección de atributos para hacer menos compleja la interpretación del modelo, reducir el error y el ruido en el análisis, lo anterior modelado con Bosques Aleatorizados con Eliminación de Características Recursivas (*Recursive Feature Elimination, RFE*). Los procesos descritos se evaluaron con validación cruzada de 10 folders. Para definir las clases homogéneas en función de las variables involucradas en la producción, cuidado y tratamiento de los cultivos de café, se realizó una agrupación jerárquica de componentes principales (*Hierarchical Clustering on Principal Components, HCPC*) siguiendo tres pasos estándar en el análisis multivariante: (i) realizar el Análisis por Componentes Principales (*Principal Component Analysis, PCA*); (ii) obtener un clúster jerárquico utilizando el método de *Ward* y; (iii) realizar la agrupación particional mediante *k-means*.

En resumen, los algoritmos de aprendizaje automático, como CART, RF, PCA, HCPC, *K-means*, redes neuronales, regresiones lineales sencillas y múltiples, se han empleado para modelar y predecir el rendimiento del café (ver tabla 14).

**Tabla 14.** Métodos, técnicas o algoritmos usados en la predicción de los cultivos de café

Nombre	Número de veces reportada
Regresión lineal (múltiple, de lazo, neta elástica)	11
Bosques Aleatorizados	6
Análisis de componentes principales (PCA)	4
Regresión por conglomerados	2
Redes neuronales	2
Modelos lineales de efectos mixtos	2
Árbol de clasificación y regresión	1
Extreme Learning Machine	1
Modelos bayesianos jerárquicos	1

### Variable objetivo

El rendimiento del café (ver tabla 15) se evalúa en relación con los frutos recolectados en plantas y suelos, medido en litros por planta (44). La productividad del cultivo a menudo implica eliminar tendencias a largo plazo que pueden distorsionar los atributos estudiados (33) (38). La medición del rendimiento considera interacciones con sombras de árboles y tipos de suelo (31) (51), destacando mejoras en rendimiento con sombras y cafetos en condiciones jóvenes (28).

La evaluación de la productividad no se limita únicamente a mediciones directas; se calcula una anomalía restando la media de una serie temporal de rendimientos (kg/ha) (53) (35), a las muestras temporales definidas para cada estudio, dependiendo de la escala temporal requerida. Otro método involucra cosechar frutos de diferentes plantas, evaluando peso y volumen del café cosechado, posteriormente 3 L (litros) de

muestra se seca, se pesan y se le mide el rendimiento en kg/ha (23) y bolsas de 60 kg/ha (50).

En (49), se estudiaron correlaciones entre lluvia mensual de verano y componentes del rendimiento como hojas por rama, nodos por rama, bayas por rama y bayas por nodos de cultivo en café arábica y robusta (45) (38), permitiendo comprender efectos del cambio climático en la fenología y rendimiento del café.

La recolección de granos de café maduros en árboles centrales se usa como indicador de la productividad (51) (34). El rendimiento acumulado se calculó como la masa total de cerezas de café por árbol, recolectadas durante 2017-2019, así como por hectárea utilizando la densidad de plantación de cafetos de 1.333 plantas.

En (34) y (52), se mostró como el uso correcto de zanjas y fertilizantes incrementa la productividad del café robusta en un 333%, registrando como el rendimiento de los cultivos sin tratamiento decae en 210 kg/ha año granos de café, en comparación con los 700 kg/ha año granos de café (medida de rendimiento que también se maneja en (32)) producidos con el uso de la técnica enunciada.

También se han usado datos oficiales por provincia del rendimiento del cultivo de café, para ajustar parámetros de modelos calculados que entregan como respuesta dicha variable objetivo, en kg/ha o ton/ha (39), es decir, en cada variación de un atributo, los rendimientos pronosticados se compararon con los observados hasta que se encontraron las mejores combinaciones (48), en otras palabras, el modelo cuyos resultados entregó menos errores. Además, se ejecutó una evaluación visual para verificar qué tan bien el modelo simula la variabilidad del rendimiento interanual observada.

En (31) se evaluó el manejo del campo y la productividad en café y pastos mediante la realización de entrevistas a agricultores y propietarios de terrenos. Se recopiló la siguiente información: edad del campo (años), intensidad de corte (horas/ha), intensidad de deshierbe (horas/ha), aporte de plaguicidas (g/ha año), aporte de nutrientes a través de fertilizantes químicos (kg/ha año; N, P, K y Ca), aporte de nutrientes a través de fertilizantes orgánicos (kg/ha año; N, P, K) y uso de estiércol (kg/ha año). La productividad del café (kg/ha) se evaluó con base en los rendimientos promedio de los dos años anteriores.

**Tabla 15.** Variables objetivo usados para la predicción de los cultivos de café

Nombre	Medida	Número de veces reportada
Rendimiento o Productividad	litros/planta - kg/ha - ton/ha - bolsas de 60 kg/ha nodos/rama - bayas/rama - bayas/nodos - nudos fructíferos/rama kg total de cerezas de café/árbol - plantas/ha (kg/ha año granos de café - g/tallo)	24
Área foliar	m <sup>2</sup>	1

Finalmente, el rendimiento en los cultivos de café fue obtenido también a través de la correlación de imágenes satelitales con datos in situ de productividad (40), se usaron los índices de vegetación NDVI y EVI para identificar zona sensible al estrés hídrico. Se determinó que un alto índice foliar en épocas lluviosas, hacia más probable un incremento en la productividad, reflejado en una mayor cobertura de área foliar, en contraste a lo sucedido, en las épocas secas donde se redujo. Adicionalmente, se

detectaron las zonas que históricamente presentan mayores problemas por estrés hídrico, que afecta el desarrollo y productividad del cultivo.

En general la variable objetivo de todos los estudios listados gira en torno al cálculo y/o análisis del rendimiento en los cultivos de café, medido en litros por planta, el peso y volumen de los granos cosechados, la productividad en kg/ha, sacos de 60 kg/ha, ton/ha, nodos/rama, bayas/rama, bayas/nodos de cultivo, nodos de cultivo/rama, entre otros.

### Métricas para evaluar la calidad

En el estudio realizado para evaluar el rendimiento del café, se emplearon diferentes métricas estadísticas para analizar los resultados obtenidos. Se utilizó el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) (56) (41) (37) (49) (42) (55) (39); en (41) obtienen un valor de 0,26 kg/ha, lo que indica que aproximadamente el 26% de la variabilidad en el rendimiento del café puede ser explicada por las variables consideradas en el modelo. Además, se calculó la raíz del error cuadrático medio (Root-Mean-Square Error, RMSE) y el error absoluto medio (Mean Absolute Error, MAE) (28) (56) (41) (53) (48) (35) (39), cuyos valores fueron de 136,95 kg/ha y 111,41 kg/ha, respectivamente (23). Estas métricas son ampliamente utilizadas para medir la precisión de los modelos obtenidos y, en este caso, reflejan que hay diferencias estadísticamente significativas en los modelos de predicción del rendimiento del café.

Para evaluar la capacidad predictiva del modelo, se utilizaron otras métricas como el error porcentual absoluto medio de predicción (*Mean Absolute Percentage Error, MAPE*) (28)(56) (53) (48) y el índice de acuerdo de Willmott (WI) (48). El MAPE mide el promedio de los errores porcentuales entre los valores predichos y los observados; en (53) se reporta que variaron entre el 8% y el 13%, lo cual indica una buena precisión en las predicciones. Además, se empleó el WI para evaluar la similitud entre los valores predichos y los observados, obteniendo resultados favorables.

Otras métricas como el coeficiente de eficiencia de *Nash-Sutcliffe* (*Nash Sutcliffe Model Efficiency Coefficient, ENS*) (35) se ejecutaron sobre un conjunto de datos de prueba independiente, permitiendo verificar la capacidad del modelo para generalizar los resultados. Además, se utilizó también el Índice de *Legates y McCabe* (*Legate and McCabe's Index, LMI*) en dicha evaluación, proporcionando información adicional sobre la calidad de las predicciones obtenidas.

En resumen, las métricas utilizadas proporcionan una evaluación integral de los resultados de los diferentes modelos implementados (ver tabla 16), para determinar la diferencia estadística en la predicción del rendimiento del café. Estas métricas permitieron medir la precisión de las predicciones (similitud entre los valores predichos y observados), así como la capacidad de generalización del modelo en diferentes conjuntos de datos. Los resultados en general indicaron que los diferentes modelos fueron capaces de explicar y predecir parte de la variabilidad en el rendimiento del café, presentando un desempeño aceptable en términos de precisión y generalización.

**Tabla 16.** Métricas usadas para evaluar la calidad en la predicción de los cultivos de café

Nombre	Formula	Número de veces reportada
Coeficiente de determinación ( $R^2$ )	$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - f_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$	8
Coeficiente de correlación de Pearson ( $r$ )	$r = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})(f_i - \bar{f})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (f_i - \bar{f})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$	8
Error de raíz cuadrada media (RMSE)	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - f_i)^2}$	7
Error estándar ( $\sigma_{\bar{x}}$ )	$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$	4
Error porcentual absoluto medio (MAPE)	$MAPE = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left  \frac{y_i - f_i}{y_i} \right $	4
Error absoluto medio (MAE)	$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n  y_i - f_i $	3
Error relativo medio (MRE)	$MRE = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left  \frac{y_i - f_i}{y_i} \right $	2
Desviación estándar ( $\sigma$ )	$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (f_i - \bar{f})^2}{n - 1}}$	1

Nota: a continuación, se presentan las abreviaturas de la tabla 16 y su significado:  $n$  es el número de observaciones en el conjunto de datos,  $y_i$  es el valor real del  $i$ -ésimo registro (observación) del rendimiento del café,  $f_i$  es el valor predicho por el modelo para el  $i$ -ésimo registro,  $\bar{y}$  es el valor promedio de los valores reales del rendimiento y  $\bar{f}$  es el valor promedio de los valores predichos.

### Especies de café más investigados

Se han estudiado principalmente cuatro especies de café ( tabla 17). El más investigado es el Robusta (*Coffea canephora*), con 15 menciones. Sus características clave incluyen grano redondo, cultivado entre 0-800 m.s.n.m para crecimiento rápido (53) (17), temperatura óptima 24-30°C (32) y lluvias 1500-2500 mm (30). Se reporta sobre variaciones estacionales en su fisiología (57) (47), especialmente en intercambio gaseoso. En épocas secas, se observa menor asimilación de carbono debido a baja conductancia estomática (55). Altos valores de déficit de presión de vapor de aire afectan negativamente el rendimiento (56).

La segunda especie de café más reportado es el Arábica, con 11 menciones, mostrando sus principales características, a saber: cultivado generalmente por encima de los 800 m.s.n.m hasta los 2000 m, es considerado un café de altura (38), su grano es más alargado con una fisura curvilínea, más susceptible a la roya del café (52); su crecimiento óptimo se da entre los 15 a 24°C (39), con precipitaciones de 1500 a 2000mm (36), su rendimiento es favorecido por la alta concentración de magnesio en sus hojas (42), así como calcio intercambiable en su suelo (49) (50), mitigando así los impactos estacionales de la productividad en verano y otoño (25).

Finalmente, en (53) se observaron otras dos especies de café: racemosa y zanguebariae, los cuales poseen rasgos útiles para el desarrollo de las plantas de cultivo de café, particularmente la tolerancia al calor, el bajo requerimiento de precipitaciones, la tolerancia a la estación seca y el rápido desarrollo de frutos (aproximadamente 4 meses de floración a frutos maduros), además son más resistentes a las plagas y enfermedades particularmente al minador de la hoja del café, en comparación con las especies Arábica y Robusta.

**Tabla 17.** Especies de café investigados

Nombre	Características	Número de veces reportada
Robusta	Requerimiento de temperatura y precipitación 23.7°C/1596 mm, variaciones estacionales relacionadas con el intercambio gaseoso, pérdida del rendimiento ocasionado por alteraciones del déficit de presión de vapor de aire	15
Arábica	Requerimiento de temperatura y precipitación 18.7°C/1614 mm, susceptible a la roya del café, rendimiento favorecido por concentración de mg en sus hojas y el calcio intercambiable en el suelo	11
Racemosa	Proporciona una bebida aromática de color ligeramente oscuro y bajo en cafeína, temperaturas medias mensuales de 18,9–26,4 °C, una precipitación anual de 1.600 mm y una estación seca de 4 a 5 meses, resistencia a plagas y enfermedades, resiliencia climática, acortamiento de tiempo de fructificación en comparación con Arábica y Robusta	1
Zanguebariae	Planta de bosques costeros, bosques ribereños, bosques caducifolios y matorrales a una altura de 0 a 500 m, planta más grande y robusta en comparación con Racemosa, siendo más alta (con un diámetro de tallo más grande), con hojas más grandes, más frutos por nudo y semillas más grandes	1

## Conclusiones

Los estudios seleccionados permitieron identificar las variables independientes más utilizadas para predecir el rendimiento en los cultivos de café, su interacción, la unidad de medida con las que son determinadas y su influencia en los procesos de cosecha acorde a las diferentes etapas que atraviesan los cafetales; las publicaciones escogidas conforme los criterios de búsqueda utilizados, permitieron encontrar una lista amplia de variables relacionadas con el suelo, el clima, químicas, satelitales, antropogénicas, físicas y relacionadas con enfermedades y plagas, como insumos efectivos para la predicción del rendimiento en los cultivos de café. Dichas variables incluyen las relacionadas con las sombras presentes en los cafetales, como el porcentaje de cobertura y los tipos de sombras y árboles que las producen. Además, se utilizan índices de vegetación obtenidos de imágenes satelitales para evaluar la productividad. Las variables atmosféricas incluyeron la temperatura, precipitación, humedad relativa y estrés hídrico. El suelo, el manejo del cultivo y sus prácticas habituales (densidad de las plantas, edad del cultivo, áreas de riego y no riego, métodos de encalado, manejo de los pastizales (limpieza, deshierbe y poda), periodos de fertilización y compost), son factores clave. El mantenimiento químico del suelo (magnesio, hierro, calcio, boro, nitrógeno, fósforo y potasio, junto con los niveles de pH en tierra y nutrientes del suelo), incluyendo el uso de fertilizantes, también son considerados para predecir la productividad. Finalmente, las características físicas de la planta y su resistencia a

enfermedades y plagas también influyen en la producción final del café. En conjunto, todos estos factores contribuyen a determinar el rendimiento de los cultivos de café.

Los modelos/algoritmos/técnicas más usadas para la predicción del rendimiento en los cultivos de café incluyen a la regresión lineal múltiple (lasso o neta elástica), bosques aleatorizados, regresión por conglomerados, redes neuronales, árboles de clasificación y regresión, máquinas de aprendizaje extremo, modelos lineales de efectos mixtos, modelos bayesianos jerárquicos, ANOVA y MANOVA. Adicionalmente, PCA (análisis de componentes principales) fue utilizado en la fase de procesamiento de los datos en algunos de los artículos revisados.

La variable objetivo para medir el rendimiento mayormente reportada es aquella que gira en torno al cálculo y/o análisis del rendimiento en los cultivos de café, medida en litros/planta, kg/ha, ton/ha, bolsas de 60 kg/ha, nodos/rama, bayas/rama, bayas/nodos, nudos fructíferos/rama, kg total de cerezas de café/árbol, plantas/ha, kg/ha año granos de café y g/tallo. También con un enfoque satelital se relaciona el incremento del área foliar en m<sup>2</sup> con el aumento del rendimiento de los cultivos de café.

Las métricas más comúnmente usadas para medir la calidad de los modelos de predicción de rendimiento de los cultivos de café, partiendo de que es una tarea de estimar un valor real continuo son R<sup>2</sup>, RMSE, MAE, Coeficiente de correlación de Pearson, Error estándar, MAPE, MRE y Desviación estándar.

Finalmente, las especies de café más estudiados en los artículos seleccionados fueron el robusta (*coffea canephora*), arábica (*coffea arabica*), racemosa (*coffea racemosa*) y zanguebariae (*coffea zanguebariae*).

Este mapeo sistemático está orientado a investigadores interesados en el desarrollo de nuevas propuestas en la predicción del rendimiento de los cultivos de café, así como, a quienes estén interesados en investigar en cómo hacer recomendaciones a los caficultores sobre las técnicas de cultivo que deben utilizar para incrementar la productividad de sus cultivos.

## Referencias bibliográficas

1. OEC. Coffee OEC - The Observatory of Economic Complexity [Internet]. 2022 [cited 2022 Oct 9]. Available from: <https://oec.world/en/profile/hs/coffee>
2. Sporchia F, Caro D, Bruno M, Patrizi N, Marchettini N, Pulselli FM. Estimating the impact on water scarcity due to coffee production, trade, and consumption worldwide and a focus on EU. J Environ Manage. 2023 Feb 1;327:116881.
3. Allen L. Coffee Statistics: Consumption, Preferences, & Spending [Internet]. 2023 [cited 2023 Jul 20]. Available from: <https://www.driveresearch.com/market-research-company-blog/coffee-survey/>
4. Collins M. 90 U.S Coffee Statistics You Should Know - New Infographics [Internet]. 2022 [cited 2023 Jul 20]. Available from: <https://www.perfectbrew.com/blog/coffee-statistics-infographic/>
5. Ali AA, Student PD, Kannaji Rao C V, Ravi J. Factors Influencing Members' Economic Satisfaction In Cooperatives: The Case Of Oromia Coffee Farmer Cooperative Union

- In Oromia Regional State Of Ethiopia. Seybold Report Journal. 2023;18(04):147–72.
6. ECF. International Trade [Internet]. 2022 [cited 2022 Oct 9]. Available from: <https://www.ecf-coffee.org/about/international-trade/>
  7. International Trade Centre. The Coffee Guide Fourth edition TRADE IMPACT FOR GOOD. 2021 Oct [cited 2023 Jul 21]; Available from: <http://www.intracen.org>
  8. Bacsi Z, Fekete-Farkas M, Ma'ruf MI. A Graph-Based Network Analysis of Global Coffee Trade—The Impact of COVID-19 on Trade Relations in 2020. *Sustainability* 2023, Vol 15, Page 3289 [Internet]. 2023 Feb 10 [cited 2023 Jul 20];15(4):3289. Available from: <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/4/3289/htm>
  9. Utrilla-Catalan R, Rodríguez-Rivero R, Narvaez V, Díaz-Barcos V, Blanco M, Galeano J. Growing Inequality in the Coffee Global Value Chain: A Complex Network Assessment. *Sustainability* 2022, Vol 14, Page 672 [Internet]. 2022 Jan 8 [cited 2023 Jul 20];14(2):672. Available from: <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/2/672/htm>
  10. Ministerio de Comercio I y TC. Perfiles económicos y comerciales. 2022 Apr 6 [cited 2023 Jul 21];1–9. Available from: <https://bit.ly/45tHbuj>
  11. Rendón JCM, Villalobos CFA, Ledesma FAR. Mirada a los aspectos económicos, financieros, sociales y ambientales del cultivo del café en Colombia - 2022. Documentos de Trabajo ECACEN [Internet]. 2023 Jun 21 [cited 2023 Jul 22];(1):144–61. Available from: <https://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/working/article/view/6938>
  12. Ghoshray, Atanu. Trends and persistence of farm-gate coffee prices around the world. 96th Annual Conference, April 4-6, 2022, K U Leuven, Belgium [Internet]. 2022 [cited 2023 Jul 22]; Available from: <https://ideas.repec.org/p/ags/aesc22/321166.html>
  13. Gilbert CL. International Commodity Agreements: An obituary notice. *World Dev.* 1996 Jan 1;24(1):1–19.
  14. Echeverri Valencia MF, Hurtado Rivera I. Precio internacional del café, cambio climático y mercados financieros. *Economía Colombiana Análisis de Coyuntura.* 2021;41:1–12.
  15. IPCC. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change; Technical Summary* [Internet]. Cambridge University Press CUK and NYNU, editor. 2021 [cited 2023 Jul 9]. 33–144 p. Available from: <https://bit.ly/3KI8YPE>
  16. Eftekhari MS. Impacts of Climate Change on Agriculture and Horticulture. *Climate Change: The Social and Scientific Construct* [Internet]. 2022 Jan 1 [cited 2023 Jul 22];117–31. Available from: <https://link.springer.com/>

17. Kath J, Mittahalli Byrareddy V, Mushtaq S, Craparo A, Porcel M. Temperature and rainfall impacts on robusta coffee bean characteristics. *Clim Risk Manag.* 2021 Jan 1;32:100281.
18. Malek Ž, Loeffen M, Feurer M, Verburg PH. Regional disparities in impacts of climate extremes require targeted adaptation of Fairtrade supply chains. *One Earth.* 2022 Aug 19;5(8):917–31.
19. Gyarmati G, Mizik T. The present and future of the precision agriculture. *SOSE 2020 - IEEE 15th International Conference of System of Systems Engineering, Proceedings.* 2020 Jun 1;593–6.
20. Sott MK, Furstenuau LB, Kipper LM, Giraldo FD, Lopez-Robles JR, Cobo MJ, et al. Precision Techniques and Agriculture 4.0 Technologies to Promote Sustainability in the Coffee Sector: State of the Art, Challenges and Future Trends. *IEEE Access.* 2020;8:149854–67.
21. Javid M, Haleem A, Singh RP, Suman R. Enhancing smart farming through the applications of Agriculture 4.0 technologies. *International Journal of Intelligent Networks.* 2022 Jan 1;3:150–64.
22. Valentini R, Sievenpiper JL, Antonelli M, Dembska K. Achieving the sustainable development goals through sustainable food systems. *Achieving the Sustainable Development Goals Through Sustainable Food Systems.* 2019 Oct 10;1–262.
23. Santhosh CS, Umesh KK. A Compendium Probabilistic Prospective for Predicting Coffee Crop Yield Based on Agronomical Factors. *4th International Conference on Emerging Research in Electronics, Computer Science and Technology, ICERECT 2022.* 2022;
24. Renju RS, Deepthi PS, Chitra MT. A Review of Crop Yield Prediction Strategies based on Machine Learning and Deep Learning. *Proceedings of International Conference on Computing, Communication, Security and Intelligent Systems, IC3SIS 2022.* 2022;
25. de Carvalho Alves M, Sanches L, Pozza EA, Pozza AAA, da Silva FM. The role of machine learning on Arabica coffee crop yield based on remote sensing and mineral nutrition monitoring. *Biosyst Eng.* 2022 Sep 1;221:81–104.
26. Nazirul M, Sarker I, Wu M, Alam GMM, Islam S. Role of climate smart agriculture in promoting sustainable agriculture: a systematic literature review. *Int J Agricultural Resources.* 2019;15(4):323–37.
27. Kitchenham B. Source: "Guidelines for performing Systematic Literature Reviews in SE", Kitchenham et al *Guidelines for performing Systematic Literature Reviews in Software Engineering.* 2007;
28. Le VH, Truong CT, Le AH, Nguyen BT. A Combination of Shade Trees and Soil Characteristics May Determine Robusta Coffee (*Coffea canephora*) Yield in a

- Tropical Monsoon Environment. *Agronomy* [Internet]. 2023 Jan 1 [cited 2023 May 27];13(1):65. Available from: <https://www.mdpi.com/2073-4395/13/1/65/htm>
29. Chavez E, Wade J, Miernicki EA, Torres M, Stanek EC, Subía C, et al. Apparent nitrogen limitation of Robusta coffee yields in young agroforestry systems. *Agron J* [Internet]. 2021 Nov 1 [cited 2023 May 22];113(6):5398–411. Available from: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/agj2.20725>
  30. Piato K, Subía C, Lefort F, Pico J, Calderón D, Norgrove L. No Reduction in Yield of Young Robusta Coffee When Grown under Shade Trees in Ecuadorian Amazonia. *Life* [Internet]. 2022 Jun 1 [cited 2023 May 22];12(6):807. Available from: <https://www.mdpi.com/2075-1729/12/6/807/htm>
  31. Khusnul K, Suratno, Asyiah NI, Hariyadi S. Analysis of the Effect of Several Types of Shade on the Productivity of Robusta Coffee. *JPhCS* [Internet]. 2021 Jan 27 [cited 2023 Jun 25];1751(1):012060. Available from: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2021JPhCS1751a2060K/abstract>
  32. Venancio LP, Do Amaral JFT, Cavatte PC, Vargas CT, Dos Reis EF, Dias JR. Vegetative growth and yield of robusta coffee genotypes cultivated under different shading levels. *Biosci j (Online)* [Internet]. 2019 Sep 1 [cited 2023 Jun 25];35(5):1490–503. Available from: <http://www.seer.ufu.br/index.php/biosciencejournal/article/view/45039/27073>
  33. Dinh TLA, Aires F, Rahn E. Statistical Analysis of the Weather Impact on Robusta Coffee Yield in Vietnam. *Front Environ Sci*. 2022 Jun 20;10:880.
  34. Kouadio L, Tixier P, Byrareddy V, Marcussen T, Mushtaq S, Rapidel B, et al. Performance of a process-based model for predicting robusta coffee yield at the regional scale in Vietnam. *Ecol Modell*. 2021 Mar 1;443:109469.
  35. De Oliveira Aparecido LE, De G, Rolim S, Paulo AP, Castellane D. Forecasting of the annual yield of Arabica coffee using water deficiency. *Pesqui Agropecu Bras* [Internet]. 2018 Dec 1 [cited 2023 Jun 25];53(12):1299–310. Available from: <https://www.scielo.br/j/pab/a/xH8kJPvgLvyZNHMYkmWp5qy/?lang=en>
  36. Kittichotsatsawat Y, Tippayawong N, Tippayawong KY. Prediction of arabica coffee production using artificial neural network and multiple linear regression techniques. *Scientific Reports* 2022 12:1 [Internet]. 2022 Aug 25 [cited 2023 Jun 25];12(1):1–14. Available from: <https://www.nature.com/articles/s41598-022-18635-5>
  37. Santhosh CS, Umesh KK. A Compendium Probabilistic Prospective for Predicting Coffee Crop Yield Based on Agronomical Factors. 2023 Mar 15;1–8.
  38. Molina ALV, Peralta VPP, Orozco ABP, Iglesias MIO, Guerrero EG. Calibration of the aquacrop model in special coffee (*Coffea Arabica*) crops in the sierra nevada of Santa Marta, Colombia. *Journal of Agronomy*. 2018;17(4):241–50.
  39. Kath J, Craparo A, Fong Y, Byrareddy V, Davis AP, King R, et al. Vapour pressure

deficit determines critical thresholds for global coffee production under climate change. *Nature Food* 2022 3:10 [Internet]. 2022 Oct 13 [cited 2023 Jun 25];3(10):871–80. Available from: <https://www.nature.com/articles/s43016-022-00614-8>

40. Kath J, Byrareddy VM, Craparo A, Nguyen-Huy T, Mushtaq S, Cao L, et al. Not so robust: Robusta coffee production is highly sensitive to temperature. *Glob Chang Biol* [Internet]. 2020 Jun 1 [cited 2023 Jun 25];26(6):3677–88. Available from: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/gcb.15097>
41. Gonçalves MGM, Avalos FAP, dos Reis JV, Costa MV, Silva SHG, Poggere GC, et al. Pedology-based management class establishment: a study case in Brazilian coffee crops. *Precis Agric* [Internet]. 2022 Jun 1 [cited 2023 May 22];23(3):1027–50. Available from: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11119-021-09873-0>
42. Teixeira HM, Bianchi FJA, Cardoso IM, Tiftonell P, Peña-Claros M. Impact of agroecological management on plant diversity and soil-based ecosystem services in pasture and coffee systems in the Atlantic forest of Brazil. *Agric Ecosyst Environ*. 2021 Jan 1;305:107171.
43. López López R, Arteaga Ramírez R, Vázquez Peña MA, López Cruz I, Sánchez Cohen I. Índice de estrés hídrico como un indicador del momento de riego en cultivos agrícolas. *Agricultura técnica en México* [Internet]. 2009 [cited 2023 Aug 6];35(1):97–111. Available from: [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0568-25172009000100010&lng=es&nrm=iso&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0568-25172009000100010&lng=es&nrm=iso&tlng=es)
44. de Carvalho Alves M, Sanches L, Pozza EA, Pozza AAA, da Silva FM. The role of machine learning on Arabica coffee crop yield based on remote sensing and mineral nutrition monitoring. *Biosyst Eng*. 2022 Sep 1;221:81–104.
45. Kouadio L, Byrareddy VM, Sawadogo A, Newlands NK. Probabilistic yield forecasting of robusta coffee at the farm scale using agroclimatic and remote sensing derived indices. *Agric For Meteorol*. 2021 Aug 15;306:108449.
46. Castro R. Remote monitoring of coffee cultivation through computational processing of satellite images. *Proceedings - 2019 7th International Engineering, Sciences and Technology Conference, IESTEC 2019*. 2019 Oct 1;13–8.
47. Wardani N, Hendra J, Rivaie AA. Improvement of robusta coffee performance with conservation and fertilizer treatment in Air Nangingan District, Tanggamus Regency, Lampung. *IOP Conf Ser Earth Environ Sci*. 2021;648(1).
48. Kishor M, Jayakumar M, Gokavi N, Mukharib DS, Raghuramulu Y, Udayar Pillai S. Humic acid as foliar and soil application improve the growth, yield and quality of coffee (cv. C × R) in Western Ghats of India. *J Sci Food Agric* [Internet]. 2021 Apr 1 [cited 2023 Jun 25];101(6):2273–83. Available from: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/jsfa.10848>
49. Voltolini GB, Vilela MS, Alecrim A de O, Silva LC da, José Guimarães R, Netto PM, et al. Techniques for sustainable coffee crop management: impacts on growth and

yield. <https://doi.org/101080/0365034020222157406> [Internet]. 2022 [cited 2023 May 22]; Available from: <https://www.informahealthcare.com/doi/abs/10.1080/03650340.2022.2157406>

50. Martins Neto FL, Peralta-Antonio N, de Paula Pimenta M, Rocha SBF, Silva Santos RH. Continuous Application of Compost and Green Manure Improves the Plant Growth and Productivity of Coffee Trees. *Commun Soil Sci Plant Anal* [Internet]. 2022 [cited 2023 Jun 25];53(8):987–99. Available from: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00103624.2022.2039174>
51. Somashekhargouda Patil, Jeena Devasia, N. Surya Prakash Rao. Influence of elevation and rainfall on leaf growth, bean characteristics and yield components of arabica and robusta coffee under changing climatic conditions in Karnataka state, India. In: *Journal of Plantation Crops*, 2022, 50(2) [Internet]. 2022 [cited 2023 May 22]. p. 78–84. Available from: <https://updatepublishing.com/journal/index.php/JPC/article/view/7981>
52. Veiga AD, Rocha OC, Guerra AF, Bartholo GF, Rodrigues GC, Pereira W, et al. Agronomic performance and adaptability of arabic coffee resistant to leaf rust in the central brasilian savanna. *Coffee Sci* [Internet]. 2018 [cited 2023 Jun 25];13(1):41–52. Available from: <http://www.sbicafe.ufv.br/handle/123456789/10629>
53. Davis AP, Gargiulo R, Almeida IN das M, Caravela MI, Denison C, Moat J. Hot Coffee: The Identity, Climate Profiles, Agronomy, and Beverage Characteristics of *Coffea racemosa* and *C. zanguebariae*. *Front Sustain Food Syst*. 2021 Oct 21;5:383.
54. Le VH, Truong CT, Le AH, Nguyen BT. A Combination of Shade Trees and Soil Characteristics May Determine Robusta Coffee (*Coffea canephora*) Yield in a Tropical Monsoon Environment. *Agronomy* [Internet]. 2023 Jan 1 [cited 2023 May 22];13(1):65. Available from: <https://www.mdpi.com/2073-4395/13/1/65/htm>
55. Kouadio L, Deo RC, Byrareddy V, Adamowski JF, Mushtaq S, Phuong Nguyen V. Artificial intelligence approach for the prediction of Robusta coffee yield using soil fertility properties. *Comput Electron Agric*. 2018 Dec 1;155:324–38.
56. Custodio AM, de Menezes Silva PE, Santos TR dos, Lourenço LL, Avila RG, da Silva AR, et al. Seasonal Variation in Physiological Traits of Amazonian *Coffea canephora* Genotypes in Cultivation Systems with Contrasting Water Availability. *Agronomy* 2022, Vol 12, Page 3197 [Internet]. 2022 Dec 16 [cited 2023 May 27];12(12):3197. Available from: <https://www.mdpi.com/2073-4395/12/12/3197/htm>
57. Dinh TLA, Aires F, Rahn E. Statistical Analysis of the Weather Impact on Robusta Coffee Yield in Vietnam. *Front Environ Sci*. 2022 Jun 20;10:880.