

# **Evaluación de la influencia de las actividades agrícolas en la calidad del agua del embalse**

## **Mancilla**

Estefanía Pachón Santana

Angie Lizeth Rodríguez Verdugo

Trabajo de Grado presentado para optar al título de Ingeniero Ambiental

Director: William Andrés Castañeda Celeita Dr. Ciencias Ambientales y sostenibilidad

Codirector: Pedro Renaldo Padilla González M. Sc. Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente



Universidad de Cundinamarca

Facultad de Ciencias Agropecuarias

Programa de Ingeniería Ambiental

Extensión Facatativa

2024

## DEDICATORIA

*Dedico este trabajo a mi mamá, por siempre creer en mí y ver el potencial que a veces no logro ver en mí misma. Tu amor incondicional me ha demostrado que todo es posible. A mi papá, mi “Rambo”, por enseñarme a enfrentar la vida con valentía, pero siempre con integridad y respeto hacia los demás. A mi pareja, tus palabras de aliento y tu constante compañía en los momentos difíciles fueron clave para que siguiera adelante sin rendirme. A mi familia y a Pollin, por su amor y apoyo incondicional. Y a mis amigos, que me acompañaron a lo largo de este proceso, recordándome que las verdaderas amistades perduran y son un refugio en el que siempre puedo contar.*

**Estefanía Pachón**

*A mi mamá, Dora Verdugo, por darme la vida y luego volverme a dar todo, por soportar estos años de esfuerzo y trasnochos y regalarme sus alas para soñar alto, a mi papá, Alirio Rodríguez, por ser mi punto de apoyo para mover el mundo, a ellos dos que son el pilar que sostiene mis sueños. A mis hermanos, Lorena, Tatiana, Yury y Daniel por su amor y fe en mí. A mis sobrinos Santiago, Thomas, Juanjo y Mía, que me han hecho sentir invencible. A Zoe y Bastet, por esperarme siempre, les amo. A mis amigos que como una vez les dije, mientras estuvimos juntos me hicieron amar más la vida, a Miguel que me acompañó con su paciencia y cariño y a todos los que de alguna manera me alentaron para continuar este camino.*

*Y a mí, por luchar y soñar.*

**Angie Rodríguez**

## **AGRADECIMIENTOS**

Queremos expresar nuestro sincero agradecimiento a nuestros directores de tesis William Andrés Castañeda Celeita y Pedro Renaldo Padilla González, por su compromiso, esfuerzo y dedicación, los cuales han sido fundamentales para la realización de esta investigación. Asimismo, extendemos nuestra profunda gratitud a todas las personas que, de manera directa e indirecta, apoyaron este proceso académico. Agradecemos especialmente a la Dirección de Investigación y a la Universidad de Cundinamarca por la financiación del proyecto, así como al acueducto por su colaboración en el análisis de muestras de agua. Además, deseamos reconocer a la profesora Dionne Paola Ballesteros Pintor por su invaluable apoyo en el cumplimiento de nuestros objetivos. Finalmente, agradecemos al señor Fernando Dueñas y a Jorge Bohórquez por su colaboración y disposición.

**TABLA DE CONTENIDO**

<b>Resumen</b> .....	7
<b>Abstract</b> .....	8
<b>Introducción</b> .....	9
<b>Planteamiento del problema</b> .....	11
<b>Justificación</b> .....	14
<b>Objetivos</b> .....	16
<b>Marco referencial</b> .....	17
<b>Diseño metodológico</b> .....	51
<b>Resultados y análisis</b> .....	75
<b>Conclusiones</b> .....	150
<b>Referencias</b> .....	153

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Formulación del Índice de Factibilidad del Suelo (IFS).....	39
<b>Tabla 2.</b> Rangos de factibilidad del suelo. ....	40
<b>Tabla 3.</b> Características y método de cálculo del subíndice de cada variable. ....	41
<b>Tabla 4.</b> Calificación de la calidad del agua según los valores del ICA. ....	45
<b>Tabla 5.</b> Escala de valoración para los indicadores para la sostenibilidad. ....	47
<b>Tabla 6.</b> Coordenadas de los puntos de muestreo para el análisis de suelo. ....	59
<b>Tabla 7.</b> Propiedades físicas y químicas para evaluar la calidad del suelo. ....	60
<b>Tabla 8.</b> Puntos de Monitoreo de agua en el embalse Mancilla.....	63
<b>Tabla 9.</b> Propiedades físicas y químicas para evaluar la calidad del agua. ....	64
<b>Tabla 10.</b> Descripción de los valores de pendiente. ....	67
<b>Tabla 11.</b> Clasificación de coberturas de la tierra en el área de estudio .....	76
<b>Tabla 12.</b> Pendiente media (%) de los cultivos presentes en el embalse Mancilla, Facatativá....	79
<b>Tabla 13.</b> Resultados de las características de calidad del suelo para el cultivo de papa. ....	81
<b>Tabla 14.</b> Resultados de las características de calidad del suelo en cultivo de maíz. ....	84
<b>Tabla 15.</b> Resultados de las características de calidad del suelo en cultivo de fresa .....	87
<b>Tabla 16.</b> Valores de referencia usados para el cálculo del índice IFS para el cultivo de papa. ....	90
<b>Tabla 17.</b> Valores de referencia usados para el cálculo del índice IFS para el cultivo de maíz. .	91
<b>Tabla 18.</b> Valores de referencia usados para el cálculo del índice IFS para el cultivo de fresa. .	92
<b>Tabla 19.</b> Cálculo del índice de factibilidad del suelo para cada cultivo. ....	94
<b>Tabla 20.</b> Resultados de los ensayos químicos con el agua del embalse Mancilla. ....	95
<b>Tabla 21.</b> Resultados del cálculo del ICA para las muestras del embalse Mancilla. ....	99
<b>Tabla 22.</b> Influencia de las características del suelo de los cultivos de la finca evaluada frente a la calidad del agua del embalse Mancilla. ....	102
<b>Tabla 23.</b> Marco de análisis con aspiraciones para el mejoramiento de la sostenibilidad del sistema productivo. ....	108
<b>Tabla 24.</b> Aspiraciones para la sostenibilidad, priorizadas y ordenadas.....	110
<b>Tabla 25.</b> Indicadores para evaluar la sostenibilidad del sistema productivo. ....	111
<b>Tabla 26.</b> Resultados de la evaluación realizada en la aplicación de la MESILPA.....	123
<b>Tabla 27.</b> Valores de indicadores y coeficientes de ponderación para obtener el I.S, correspondiente a la finca evaluada. ....	131
<b>Tabla 28.</b> Índice de sostenibilidad por dimensión de la finca evaluada.....	134

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Mapa del área de influencia del Embalse Mancilla, Facatativá .....	51
<b>Figura 2.</b> Metodología para la evaluación de la influencia de las actividades agrícolas en la calidad del agua del Embalse Mancilla.....	54
<b>Figura 3.</b> Visita de campo para el desarrollo de la entrevista .....	58
<b>Figura 4.</b> Visita de campo para el desarrollo de la lista de chequeo .....	58
<b>Figura 5.</b> Muestras de Suelo .....	61
<b>Figura 6.</b> Análisis de laboratorio de muestra de suelo (color).....	61
<b>Figura 7.</b> Puntos de monitoreo del embalse Mancilla.....	64
<b>Figura 8.</b> Muestras de agua .....	65
<b>Figura 9.</b> Matriz de análisis de la sostenibilidad.....	71
<b>Figura 10.</b> Obtención de la información para la construcción del marco de análisis de sostenibilidad. ....	71
<b>Figura 11.</b> Mapa de la clasificación de las coberturas de la tierra del embalse Mancilla, Facatativá. ....	76
<b>Figura 12.</b> Pendientes en la UHA del embalse Mancilla, Facatativá.....	77
<b>Figura 13.</b> Pendientes medias de los cultivos presentes en el del embalse Mancilla, Facatativá.....	79
<b>Figura 14.</b> Concentración de clorofila en el embalse Mancilla. ....	100
<b>Figura 15.</b> Representación gráfica tipo barra de la evaluación de sostenibilidad a partir de indicadores. ....	125
<b>Figura 16.</b> Representación gráfica tipo “telaraña” de la evaluación de sostenibilidad a partir de Representación gráfica tipo “telaraña” de la evaluación de sostenibilidad a partir de indicadores. ....	127

## RESUMEN

La investigación en la cuenca del embalse Mancilla buscó entender la relación entre los sistemas productivos, los usos del suelo y su impacto en la calidad del agua, promoviendo prácticas sostenibles. Se empleó un enfoque mixto, cuantitativo y cualitativo, basado en la Metodología para Evaluación de Sustentabilidad a partir de Indicadores Locales para Programas Agroecológicos (MESILPA), que analizó aspectos ecológicos, sociales y económicos. El estudio se estructuró en siete fases, comenzando con la caracterización de los sistemas productivos a través de visitas de campo y entrevistas, y la selección de indicadores de sostenibilidad para evaluar el impacto en la calidad del agua del embalse. Se concluyó que la calidad del agua era aceptable, con un estado trófico oligotrófico, y que las características del suelo no afectaron significativamente el recurso hídrico. Sin embargo, aunque los agricultores reconocieron la importancia del cuidado ambiental, las prácticas no fueron completamente sostenibles, lo que se reflejó en un índice de sostenibilidad negativo (-0,32). A pesar de esto, se observó interés por adoptar prácticas sostenibles. Las actividades productivas no afectaron significativamente la calidad del agua, aunque la erosión, las pendientes pronunciadas, y el uso inadecuado de agroquímicos podrían contribuir al deterioro del embalse. Se recomendó implementar acciones de mejora enfocadas en la conservación del ecosistema, el mantenimiento de la calidad del agua y la promoción de prácticas agrícolas sostenibles en la zona.

*Palabras clave:* Calidad del agua, suelo, sostenibilidad, impacto, indicador, embalse.

## ABSTRACT

Research in the Mancilla reservoir basin sought to understand the relationship between production systems, land uses and their impact on water quality, promoting sustainable practices. A mixed, quantitative and qualitative approach was used, based on the Methodology for Sustainability Assessment based on Local Indicators for Agroecological Programs (MESILPA), which analyzed ecological, social and economic aspects. The study was structured in seven phases, beginning with the characterization of the production systems through field visits and interviews, and the selection of sustainability indicators to evaluate the impact on the quality of the reservoir's water. It was concluded that the water quality was acceptable, with an oligotrophic trophic state, and that the soil characteristics did not significantly affect the water resource. However, although farmers recognized the importance of environmental care, practices were not completely sustainable, which was reflected in a negative sustainability index (-0.32). Despite this, there was interest in adopting sustainable practices. Productive activities did not significantly affect water quality, although erosion, steep slopes, and inappropriate use of agrochemicals could contribute to the deterioration of the reservoir. It was recommended to implement improvement actions focused on the conservation of the ecosystem, the maintenance of water quality and the promotion of sustainable agricultural practices in the area.

**Keywords:** *Water quality, soil, sustainability, impact, indicator, reservoir.*

## INTRODUCCIÓN

Los embalses son estructuras artificiales construidas mediante la edificación de represas, y cumplen un rol fundamental en el suministro de agua para diversos usos, tales como el abastecimiento de agua potable, la generación de energía hidroeléctrica, el riego agrícola y actividades recreativas (Domínguez, 2019). En el municipio de Facatativá, se localizan seis embalses: Gatillo Cero, Gatillo Uno, Gatillo Dos, Gatillo Tres, Santa Marta y Mancilla, los cuales tienen una relevancia significativa para la región al proporcionar agua para el consumo humano y diversas actividades económicas y sociales (Hernández, 2019).

No obstante, las actividades humanas desarrolladas en las áreas circundantes a los embalses, como la agricultura, la ganadería y la urbanización, ejercen un impacto considerable en la calidad del agua. Este concepto se refiere a las características físicas, químicas y biológicas que determinan su idoneidad para diferentes usos, incluyendo el consumo humano, el riego, la recreación y el sostenimiento de la vida acuática (Rodríguez, 2022). Por ejemplo, las prácticas agrícolas pueden generar esorrentías cargadas de nutrientes y agroquímicos hacia los embalses, promoviendo la eutrofización y el crecimiento desmedido de algas, lo que desequilibra los ecosistemas acuáticos. De igual manera, la urbanización en las proximidades de estos cuerpos de agua puede aumentar la carga de contaminantes, como hidrocarburos, metales pesados y productos químicos, deteriorando aún más la calidad del recurso hídrico (Muñoz et al., 2024).

Comprender la interacción entre las actividades antrópicas y la calidad del agua en los embalses es esencial para garantizar la sostenibilidad de estos recursos vitales. Este conocimiento es la base para diseñar e implementar medidas de mitigación que minimicen los impactos negativos y promuevan el uso racional de los embalses. Por ello, resulta indispensable realizar análisis

detallados sobre cómo las actividades humanas afectan estos ecosistemas acuáticos, permitiendo formular estrategias efectivas de manejo y conservación (Márquez et al., 2023).

En este contexto, el presente proyecto se enfocó en evaluar la influencia del sistema productivo de la finca evaluada en la calidad del agua del embalse Mancilla. Este análisis busca aportar información clave para la gestión sostenible de este recurso hídrico y contribuir a la preservación de los ecosistemas asociados.

## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La escasez mundial de agua representa un desafío creciente que afecta a una proporción significativa de la población global. Según la UNESCO (2021), aproximadamente el 25% de las personas en el mundo vivían en condiciones de estrés hídrico, caracterizadas por un acceso limitado al agua potable y servicios de saneamiento básico. Para el año 2030, se proyecta un déficit global del 40% en el suministro de agua debido al aumento de la población, el uso ineficiente de este recurso y los impactos del cambio climático.

En Colombia, la gestión del agua enfrenta serios problemas relacionados con la calidad y disponibilidad de este recurso. Las actividades humanas, como el vertimiento de aguas residuales domésticas e industriales, son responsables de una contaminación hídrica significativa, afectando tanto la salud humana como los ecosistemas acuáticos (Díaz et al., 2018; Betancourt, et al., 2012). Además, la agricultura, aunque es una actividad económica crucial, utiliza grandes volúmenes de agua dulce de manera ineficiente. Esto no solo contribuye al agotamiento de los recursos hídricos, sino que también introduce fertilizantes y pesticidas en cuerpos de agua, lo que provoca efectos adversos en los ecosistemas y riesgos sanitarios para los consumidores de alimentos contaminados (Cedeño et al., 2016; FAO, 1997).

En este contexto, el municipio de Facatativá enfrenta importantes retos en la gestión de su recurso hídrico, especialmente en lo que respecta al embalse Mancilla, una infraestructura fundamental para el suministro de agua potable de más de 100.000 habitantes (EL TIEMPO, 2014). Con una capacidad de almacenamiento de 253.000 m<sup>3</sup> de agua cruda (Garzón, 2019), el embalse abastece a la planta de tratamiento de agua que suple las necesidades de la población. Sin embargo,

se han identificado deficiencias en los servicios públicos relacionados con la calidad y sostenibilidad de este recurso.

El sistema de acueducto de Facatativá depende de varias fuentes hídricas ubicadas en las veredas La Selva, San Rafael, La Tribuna, Mancilla y Los Manzanos, siendo la quebrada Mancilla la segunda fuente más importante (EAF, 2023). Estas dinámicas resaltan la urgencia de implementar estrategias de manejo sostenible que garanticen la conservación de los recursos hídricos y permitan afrontar los desafíos actuales y futuros.

A pesar de la relevancia del embalse Mancilla, desde su inauguración en 2014, se han realizado pocos estudios sobre su calidad de agua y funcionamiento ecosistémico. Además, no se han evaluado de manera integral los impactos que las actividades humanas, como las descargas de aguas residuales y las prácticas agrícolas e industriales, tienen sobre este cuerpo de agua. Este desconocimiento limita la capacidad de tomar decisiones fundamentadas para su manejo sostenible.

Entre las principales amenazas identificadas está la posible contaminación por la distribución y almacenamiento de combustibles en las cercanías del complejo de Ecopetrol, así como la presencia de plaguicidas en bajas concentraciones debido al uso de agroquímicos en los cultivos de hortalizas y fresas en áreas aledañas (EAF, 2023). Además, los contaminantes que llegan al embalse a través de esorrentías pueden generar impactos negativos tanto en el ecosistema como en la salud de la población (Cedeño et al., 2016).

Aunque la Empresa Aguas de Facatativá ha desarrollado un Plan de Emergencia y Contingencia para abordar posibles desastres y emergencias, la implementación de medidas de

monitoreo y mitigación aún es insuficiente para enfrentar los riesgos potenciales que amenazan la calidad del agua del embalse.

La falta de estudios sistemáticos y regulares dificulta comprender la magnitud de estos impactos y desarrollar estrategias efectivas de mitigación. Ante esta situación, surge la necesidad de responder a una pregunta clave: **¿Qué incidencia tienen las actividades agrícolas en las cercanías del embalse Mancilla sobre la calidad de su agua?**

Este planteamiento pone de manifiesto la urgencia de abordar el problema mediante investigaciones que permitan identificar los factores de contaminación, evaluar su impacto en la calidad del agua y diseñar estrategias sostenibles para garantizar la preservación de este recurso vital.

## JUSTIFICACIÓN

El proyecto se justifica a partir de los siguientes aspectos: *Económico y social*: El embalse es una fuente abastecedora de agua de la zona por parte de la empresa prestadora del servicio de agua potable de Facatativá (EMPRESA AGUAS DE FACATATIVÁ, Acueducto, Alcantarillado, Aseo y Servicios Complementarios EAF SAS ESP), se emplea para consumo humano y para las diferentes actividades antrópicas. La calidad del agua es fundamental para garantizar la sostenibilidad de las actividades económicas y de la salud pública, al conocer la incidencia de las actividades sobre la calidad del agua permitirá identificar las principales afectaciones para así tomar medidas correctivas y preventivas para reducir o eliminar los impactos negativos generados en la población y en la economía. *Ambiental*: El embalse Mancilla contribuye al equilibrio ecológico y sostiene una variedad de ecosistemas acuáticos y terrestres, además de preservar la biodiversidad local, lo que a su vez beneficia tanto a la economía como a las comunidades cercanas, pero se debe tener en cuenta que al ser una infraestructura se debe buscar la integración armoniza entre este tipo de proyectos, el medio ambiente y el contexto de la comunidad (tradiciones) (Cardenas, et al., 2023). Sin embargo, se ha evidenciado que los embalses son generadores de gases de efecto invernadero debido a que se presenta la descomposición de vegetación o por la presencia de contaminantes derivados de actividades agrícolas e industriales, como fertilizantes y residuos, podría impactar negativamente al ecosistema, alterando el equilibrio del sistema y aumentando el riesgo de procesos como la eutrofización (Nilsson, 2009). La eutrofización, en particular, puede reducir los niveles de oxígeno en el agua, afectando a las especies acuáticas y desestabilizando el ecosistema en su conjunto. Por lo tanto, es fundamental identificar y controlar estas afectaciones para proteger y conservar este recurso hídrico, asegurando así su viabilidad a largo plazo (Akinnowo, 2023). *Científico*: Los resultados de este estudio

proporcionarán información actualizada sobre el estado del embalse, ayudando a la empresa Aguas de Facatativá a tomar decisiones informadas sobre la gestión del agua y el proceso de abastecimiento. Además, este estudio cerrará brechas de conocimiento, sirviendo de referencia para futuras investigaciones y posibles pruebas piloto en el embalse. Así, el proyecto no solo contribuirá a la preservación y sostenibilidad del embalse Mancilla, sino que también ofrecerá un modelo valioso para el monitoreo y conservación de otros cuerpos de agua bajo presión antrópica.

## OBJETIVOS

### **Objetivo general:**

Evaluar la incidencia de las actividades productivas, asociadas al embalse en la calidad del agua y su estado trófico.

### **Objetivos específicos:**

- Caracterizar el sistema dinámico presente en el área de influencia del embalse Mancilla.
- Evaluar la sostenibilidad del sistema dinámico en el área de influencia del embalse Mancilla.
- Integrar la influencia de los modelos de producción agropecuaria en el estado de la calidad de agua del embalse de Mancilla.

## MARCO REFERENCIAL

### **Marco conceptual.**

#### *Agua y suelo.*

El agua es esencial para la vida en nuestro planeta y su disponibilidad y calidad son cruciales para el desarrollo sostenible de las comunidades y la preservación de los ecosistemas (Mora, 2019). No obstante, la presencia de contaminantes puede afectar el agua, alterando su composición y teniendo efectos negativos en la salud humana y el medio ambiente. Por lo tanto, es importante comprender las características y propiedades del agua para poder identificar su calidad y así garantizar su uso eficiente, gestión adecuada y aprovechamiento responsable (UNESCO, 2021).

El suelo, una capa natural que cubre la superficie terrestre, desempeña un papel fundamental en los procesos naturales de nuestro planeta. Es esencial para la vida, ya que provee el soporte físico necesario y los nutrientes indispensables para el crecimiento y desarrollo de las plantas. Recientemente, se ha introducido el concepto de "multifuncionalidad del suelo" para resaltar que no solo tiene funciones de producción, sino también otras importantes como la regulación del ciclo hidrológico, la contribución a la captura de carbono y el mantenimiento de la biodiversidad. La conservación y el manejo adecuado del suelo son fundamentales para asegurar la sostenibilidad de los ecosistemas y el bienestar humano (Castillo et al., 2021; Baveye et al., 2016).

Además, es esencial comprender cómo los contaminantes se comportan en el medio ambiente al considerar las características físicas y químicas del agua y el suelo. Estas características son determinantes para la capacidad de retención, transporte y degradación de los contaminantes en el agua y el suelo. Por ejemplo, la capacidad de retención de agua del suelo puede afectar la filtración de los contaminantes hacia las capas subterráneas, mientras que la solubilidad de los contaminantes en el agua puede influir en su dispersión y movimiento en los cuerpos de agua (Menéndez & Muñoz, 2021).

### ***Embalse.***

Un embalse es una estructura construida con el propósito de almacenar agua, ya sea para abastecer de agua potable, generar energía hidroeléctrica o para el riego agrícola. Estos cuerpos de agua artificiales se forman mediante la construcción de una represa que bloquea el flujo de un río y retiene un volumen específico de agua. Los embalses pueden convertirse en lugares donde se acumulan contaminantes provenientes de diversas fuentes, como la escorrentía agrícola, la descarga de aguas residuales o la deposición atmosférica. La cantidad de agua almacenada en un embalse depende de la altura de la presa y de la forma geométrica del área inundada, conocida como "vaso" (Sandoval, 2018).

### ***Plaguicida y pesticida.***

Un plaguicida es una sustancia o mezcla de sustancias utilizadas para prevenir, controlar o eliminar plagas y enfermedades en los cultivos, incluyendo vectores de enfermedades humanas. Los pesticidas y plaguicidas son productos químicos empleados en la agricultura para combatir plagas y enfermedades en los cultivos, ya sea aplicándolos directamente sobre las plantas o

tratando las semillas. Algunos de los componentes de estos productos pueden persistir en el agua y el suelo, lo que puede llevar a la contaminación de los recursos hídricos y la acumulación de residuos tóxicos en el suelo (Castrejón, 2014).

Los pesticidas y plaguicidas, al dejar residuos en el agua y el suelo, pueden tener efectos negativos en los ecosistemas acuáticos y terrestres. Estos contaminantes pueden afectar la calidad del agua, causar la muerte de organismos acuáticos y alterar los ciclos biogeoquímicos. Además, la exposición a estos contaminantes puede tener efectos perjudiciales para la salud humana, ya sea a través del consumo de agua contaminada o de alimentos cultivados en suelos contaminados. Estos compuestos también pueden llegar a las zonas costeras a través de los ríos, afectando a especies marinas (Castrejón, 2014).

### ***Sistemas de información geográfica (SIG).***

Un Sistema de Información Geográfica (SIG) se describe como una combinación de métodos, herramientas y datos organizados de manera lógica y coordinada, cuya finalidad es capturar, almacenar, procesar, analizar, transformar y mostrar información geográfica junto con sus atributos para responder a diversas necesidades. Esta tecnología facilita la gestión y el análisis de datos espaciales, surgiendo como respuesta a la demanda de obtener información rápidamente para resolver problemas y responder preguntas de forma inmediata (Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander Von Humboldt, 2006).

### ***Ortofoto.***

Una ortofoto es una imagen fotográfica de la superficie terrestre que ha sido corregida para eliminar las distorsiones causadas por el relieve y la inclinación de la cámara, lo que le permite tener las mismas propiedades métricas que un mapa, incluyendo una escala precisa y conocida.

### ***Corine Land Cover.***

Esta metodología tiene como objetivo realizar un inventario uniforme de la cobertura biofísica de la superficie terrestre, basado en la interpretación visual de imágenes satelitales asistida por computadora y en la creación de una base de datos geográfica (IDEAM, 2010). En el caso de Colombia, la leyenda nacional de coberturas de la tierra, desarrollada mediante la metodología Corine Land Cover adaptada al país, se maneja a una escala de 1:100.000 (IGAC, 2008). Esta leyenda proporciona información temática esencial para comprender los recursos naturales, evaluar las formas de ocupación y uso del espacio geográfico, y actualizar los datos sobre la dinámica de las coberturas terrestres (IDEAM, 2010).

### ***Cobertura.***

El IGAC (2013) describe la cobertura del suelo como el aspecto tangible y morfológico de la superficie terrestre, compuesto por todos los elementos, ya sean de origen natural o cultural, que conforman su recubrimiento. Estos elementos pueden observarse y medirse mediante fotografías aéreas, imágenes satelitales u otros sensores remotos. Este concepto está estrechamente relacionado con el uso de la tierra, entendido como las funciones o actividades realizadas por el ser humano sobre dichas coberturas, ya sea de manera parcial o permanente, con el objetivo de transformarlas o conservarlas para obtener productos y beneficios. Ejemplos de estas actividades

incluyen la minería, la agricultura y la pesca. La relevancia de este vínculo radica en la necesidad de aplicar correctamente esta metodología.

### ***Pendiente.***

La pendiente es la variación de la inclinación, determinando el comportamiento de un sistema respecto al desplazamiento de las capas de suelo (erosión o sedimentación), ya que en zonas de altas pendientes hay más problemas de erosión: mientras que en regio planas aparecen principalmente problemas de drenaje y sedimentación (Reyes, 2010).

### ***Escorrentía.***

La escorrentía se refiere al desplazamiento del agua desde una cuenca hidrográfica hacia ríos y arroyos. Puede originarse tanto de la escorrentía superficial, que es el flujo de agua sobre la superficie del suelo, como del flujo subsuperficial, que es el agua que se infiltra en el suelo y luego emerge en los cuerpos de agua. Durante este proceso, la escorrentía puede transportar sustancias contaminantes, como pesticidas y plaguicidas, desde el suelo hacia los cuerpos de agua, lo que provoca la contaminación del agua y tiene un impacto negativo en los ecosistemas acuáticos (Paz & Vázquez, 2004).

### ***Estado trófico.***

Dentro de un sistema hídrico, es importante el análisis de la cantidad de nutrientes y la producción biológica, permitiendo evaluar la calidad del agua, es decir, el estado trófico (Marín,

et al., 2023). Este permite relacionar estas dos variables que pueden verse modificadas de forma natural o antrópica, donde se evalúa el contenido de nitrógeno y fósforo con la productividad de los agentes primarios del ecosistema (fitoplancton). Por lo que es un indicador de la salud del cuerpo de agua, debido a que si se menciona que hay un alto nivel trófico y ocurre espontáneamente, puede indicar contaminación por exceso de esos dos nutrientes ya que son elementos que restringe del crecimiento fitoplanctónico (MITECO, 2017).

### ***Eutrofización.***

La presencia excesiva de nutrientes en un ecosistema puede no ser beneficiosa, a pesar de que se podría pensar que más nutrientes implican un mayor crecimiento y desarrollo de los organismos que lo habitan. La eutrofización es un fenómeno que ocurre cuando hay un exceso de nutrientes, como nitrógeno y fósforo, en los cuerpos de agua, ya sea de forma natural o debido a la intervención humana. Este exceso de nutrientes puede tener efectos negativos en los ecosistemas acuáticos, alterando los procesos químicos y la dinámica de estos (Chapa, 2010). La eutrofización se manifiesta visualmente a través de agua turbia, mal olor, proliferación de algas y lirios, y sedimentos oscuros debido a la descomposición de la materia orgánica. Este fenómeno está relacionado con la contaminación del agua y puede agotar el oxígeno en el agua, lo que resulta en la muerte de organismos acuáticos y perturba el equilibrio ecológico de los ecosistemas acuáticos (Mora, 2019).

### ***Actividad antrópica.***

Durante la evolución del ser humano, se han desarrollado múltiples procesos para avanzar en nuestro progreso en el planeta. Estas acciones se denominan actividades antrópicas y se refieren

a cualquier actividad que los seres humanos realicen, ya sea que tenga un impacto positivo o negativo. Sin embargo, estas actividades suelen asociarse con efectos negativos, como la deforestación, la quema de combustibles fósiles, entre otras (Borzi, 2018).

### ***Sostenibilidad y sustentabilidad.***

El desarrollo exponencial del ser humano desde el siglo XIX ha llevado a percibir muchas actividades antropogénicas como negativas, especialmente debido al deseo de poder y la sobreexplotación de recursos. Esto ha generado una creciente preocupación por el medio ambiente y ha impulsado la transición hacia una economía circular. En este contexto, han surgido los términos sustentabilidad y sostenibilidad, que, aunque se emplean a menudo como sinónimos, tienen diferencias conceptuales importantes (Gracia, 2015).

La sostenibilidad se refiere a la capacidad de satisfacer las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer las suyas. Este concepto abarca tres ámbitos fundamentales: el social, el económico y el ambiental. Por su parte, la sustentabilidad se enfoca específicamente en la preservación de los ecosistemas y en el uso racional de los recursos naturales para garantizar su disponibilidad a largo plazo. Es decir, la sustentabilidad se centra en el ámbito ambiental de la sostenibilidad, priorizando la integridad ecológica y la capacidad de carga de los sistemas naturales (Mariño, et al., 2018).

### ***Indicador.***

Los indicadores son herramientas específicas, observables y medibles que permiten evaluar el progreso o los cambios en relación con objetivos establecidos en una investigación o programa. (OIT, s.f.). Los indicadores proporcionan información cuantitativa o cualitativa que facilita el análisis de tendencias, la toma de decisiones y el seguimiento del progreso en relación con objetivos específicos. Pueden definirse como parámetros o valores que se basan en los datos, funcionan como soporte para medir y evaluar al brindar información para la toma de decisiones (Stockholm Environment Institute [SEI], 2003).

### *Índice.*

El índice es un elemento que señala o representa un valor, posición, proporción o contenido, utilizado como herramienta para la organización, comparación o interpretación de información en diferentes contextos (Real Academia Española, 2024). Un índice sintetiza información diversa en una forma simplificada para representar el estado, desempeño o tendencia de un sistema o proceso. Un índice se crea a partir de dos o más indicadores o el conjunto de indicadores, esto ayuda a mejorar la toma de decisiones. Se debe tener en cuenta que el índice sirve para indicar algo o especificarlo, no da una definición exacta o general (Stockholm Environment Institute [SEI], 2003).

### *Características para el análisis de suelo.*

#### *pH.*

El pH del suelo es un indicador clave que afecta directamente la disponibilidad de nutrientes para las plantas y la actividad de los microorganismos en el sustrato. Este parámetro mide el nivel de acidez o alcalinidad del suelo en una escala logarítmica, donde un valor de 7.0

representa la neutralidad. Valores inferiores a 7 indican que el suelo es ácido, mientras que aquellos superiores reflejan una condición alcalina (Osorio, 2012).

### ***Conductividad eléctrica.***

La conductividad eléctrica es un indicador indirecto de la cantidad de sales presentes en el suelo, cuyos valores se expresan en milimhos/cm, dS/cm o micromhos/cm. Los suelos con alta conductividad eléctrica suelen contener una elevada concentración de sales, lo que dificulta el crecimiento adecuado de las plantas. Cada cultivo tiene tolerancias específicas a diferentes rangos de conductividad eléctrica, según el tipo de sales presentes en el suelo. Sin embargo, de manera general, se establecen los siguientes rangos: menos de 500 micromhos/cm permite un buen desarrollo, entre 500 y 1000 micromhos/cm pueden surgir problemas en ciertos cultivos, y por encima de 1000 micromhos/cm se presentan dificultades para la mayoría de los cultivos (Garrido, M. 1994).

### ***Textura.***

La textura del suelo se refiere a la proporción relativa de sus componentes principales, como arena (en sus fracciones gruesas, media y fina), limo y arcilla (Rucks et al., 2004). La interacción de estas partículas, cada una con propiedades específicas de tamaño y forma, determina las características físicas del suelo. Esto incluye su capacidad para retener y drenar agua, el flujo de aire y, por ende, la disponibilidad de nutrientes esenciales para el crecimiento de las plantas (FAO, 2016).

### ***Color.***

El color del suelo es una característica visual que ofrece información clave sobre su composición química y sus condiciones físicas. Analizado mediante el sistema de notación de colores Munsell, este atributo permite identificar variaciones en el contenido de minerales, la presencia de materia orgánica y señales de procesos geológicos particulares (Rucks et al., 2004).

### ***Materia orgánica.***

La materia orgánica (MO), expresada en porcentaje, representa la cantidad de restos orgánicos transformados presentes en el suelo, los cuales contribuyen al incremento de su contenido de nutrientes. Este componente posee una alta capacidad de intercambio catiónico, lo que significa que retiene eficientemente cationes en el suelo. Además, mejora la microestructura del suelo, desempeñando un papel crucial en la prevención de la erosión y promoviendo el desarrollo de la microfauna edáfica. Estos aspectos hacen de la materia orgánica un parámetro esencial para evaluar, de manera indirecta, la fertilidad de un suelo (Garrido, M. 1994).

### ***Compactación.***

Este proceso consiste en aplicar energía al suelo para reducir los espacios vacíos y aumentar su densidad. Este procedimiento reorganiza las partículas, disminuyendo el volumen de poros y acercándolas entre sí, lo que incrementa la densidad del suelo. Como resultado, se modifican la forma, el tamaño y la distribución de los poros, lo que afecta la capacidad del suelo para retener agua, el intercambio de gases y agua, además de incrementar la resistencia mecánica (Berli, 2001; Gysi et al. , 2001).

### ***Retención de humedad.***

La humedad del suelo es un factor clave que influye en procesos fundamentales, como la disponibilidad de agua para las plantas y la conductividad eléctrica del sustrato. Este parámetro, medido como contenido volumétrico de agua, indica la fracción del espacio poroso del suelo que está ocupado por el agua (Caballero, 2012).

### ***Nitrógeno.***

El nitrógeno es, probablemente, el nutriente más importante para las plantas. Este elemento esencial es fundamental en la síntesis de aminoácidos, que posteriormente se transforman en proteínas. Además, el nitrógeno es necesario para la formación de compuestos clave como la clorofila, los ácidos nucleicos y las enzimas. Entre los nutrientes del suelo indispensables para el crecimiento vegetal, el nitrógeno es el más limitante en los ecosistemas terrestres (Vitousek et al., 1997).

El nitrógeno inorgánico se encuentra en formas solubles como nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ), nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ), amonio ( $\text{NH}_4^+$ ) intercambiable y amonio no intercambiable fijado en las arcillas (Rutherford et al., 2007). Por otro lado, el nitrógeno orgánico incluye una amplia variedad de compuestos (Binkley y Vitousek, 1989), que pueden no estar disponibles para las plantas debido a su complejidad molecular o perderse mediante procesos como la desnitrificación, la erosión del suelo, la lixiviación o la volatilización (Philippot y Germon, 2005).

Este elemento desempeña un papel crucial en la composición y diversidad de especies, así como en la dinámica y el funcionamiento de la mayoría de los ecosistemas. Las plantas nativas de cada región están adaptadas para funcionar de manera óptima en suelos con concentraciones bajas de nitrógeno disponibles (Vitousek et al., 1997).

### ***Fósforo.***

El fósforo es uno de los diecinueve elementos esenciales para el desarrollo y la supervivencia de las plantas. Este nutriente desempeña un papel fundamental como componente clave en los sistemas encargados de la captura, almacenamiento y transferencia de energía. Además, forma parte de estructuras macromoleculares vitales, como los ácidos nucleicos y los fosfolípidos, lo que lo convierte en un elemento indispensable en prácticamente todos los procesos fisiológicos de las plantas.

### ***Potasio.***

El potasio cumple múltiples funciones esenciales en la nutrición de las plantas, aunque no se integra en la estructura de los compuestos orgánicos. En su lugar, se mantiene en forma iónica dentro de la solución celular o actúa como activador de diversas enzimas. Se ha identificado que alrededor de 80 enzimas dependen del potasio, desempeñando roles clave en procesos como el metabolismo energético, la síntesis de almidón, la reducción de nitratos, la fotosíntesis y la degradación de azúcares.

El potasio también es fundamental para regular el potencial osmótico del agua celular, lo que contribuye a reducir la pérdida de agua a través de las hojas y mejora la capacidad de las raíces para absorber agua del suelo. Este nutriente desempeña un papel crucial en la adaptación de las plantas a condiciones ambientales adversas, como el estrés hídrico, las heladas y las enfermedades. Además, el potasio influye positivamente en la calidad de frutos, hortalizas y flores, realzando sus características organolépticas.

### *Características para el análisis de agua.*

#### *Nitrógeno.*

Los compuestos nitrogenados son fundamentales no solo por la importancia del nitrógeno en las funciones metabólicas de los seres vivos, sino también por su abundancia en el aire, el suelo y el agua, resultado de su compleja química. El nitrógeno puede presentar siete estados de oxidación, que van desde -3 hasta +5, lo que le permite formar una amplia variedad de compuestos. Entre los más comunes se encuentran el amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) y el ion amonio ( $\text{NH}_4^+$ ) en estado -3, el nitrógeno molecular ( $\text{N}_2$ ) en estado 0, el trióxido de dinitrógeno ( $\text{N}_2\text{O}_3$ ) en estado +3, y el pentóxido de dinitrógeno ( $\text{N}_2\text{O}_5$ ) y el ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ) en estado +5.

En los sistemas acuáticos, los compuestos nitrogenados pueden tener un origen natural, como la disolución de nitrógeno atmosférico, la presencia de depósitos geológicos ricos en nitrógeno, el flujo de escorrentías superficiales y subterráneas, la fijación biológica por organismos procariotas y la descomposición de materia orgánica. Sin embargo, también existen fuentes antropogénicas, como el uso doméstico e industrial, y la deposición atmosférica causada por la contaminación del aire.

La acumulación de compuestos nitrogenados en los cuerpos de agua genera tres principales problemas ambientales:

*Aumento de la acidez:* afecta la estabilidad del ecosistema acuático.

*Eutrofización:* provoca un crecimiento excesivo de algas y plantas, lo que reduce el oxígeno disuelto (OD) y amenaza la vida acuática.

*Toxicidad:* concentraciones elevadas de nitrógeno, tanto en aguas superficiales como subterráneas, pueden limitar su uso como fuente de agua potable o para actividades como la

acuicultura. En este último caso, el nitrógeno orgánico acumulado puede impedir el funcionamiento eficaz de sistemas de reutilización del agua.

Además, el exceso de nitrógeno en el agua potable, especialmente en forma de amoníaco o nitratos, representa un riesgo para la salud pública. Cambios en las concentraciones de nitritos en los sistemas de distribución de agua pueden indicar procesos de nitrificación, lo que compromete aún más la calidad del agua y pone en peligro su seguridad para el consumo humano.

### ***Fósforo.***

El fósforo está presente en las aguas naturales y residuales principalmente en forma de fosfatos, que incluyen ortofosfatos, fosfatos condensados y polifosfatos ligados a compuestos orgánicos. Los ortofosfatos utilizados como fertilizantes en terrenos agrícolas o residenciales suelen ser arrastrados hacia las aguas superficiales a través de las lluvias (Romero Rojas, JA, 2002).

Este elemento es esencial para el crecimiento de los organismos y, en muchos casos, actúa como el nutriente limitante de la productividad primaria en los cuerpos de agua. Cuando el fósforo es el factor limitante, la descarga de aguas residuales, ya sean brutas o tratadas, junto con escorrentías agrícolas o ciertos desechos industriales, puede estimular un crecimiento excesivo de microorganismos y organismos fotosintéticos en el medio acuático. Este fenómeno puede desequilibrar significativamente el ecosistema (Romero Rojas, JA, 2002).

El aumento de la concentración de fosfatos en los cuerpos de agua superficiales genera un problema ambiental debido a la reproducción acelerada y descontrolada de organismos

unicelulares que dependen del fósforo como fuente de nutrientes, lo que puede tener consecuencias negativas para el equilibrio y la salud de los ecosistemas acuáticos (Romero Rojas, JA, 1996).

### ***pH.***

El pH es un indicador clave que mide el grado de acidez o alcalinidad de una sustancia en una escala de 0 a 14, donde 0 representa una solución altamente ácida, 7 es neutro y 14 es altamente básica. Analíticamente, se define como el logaritmo negativo de la concentración de iones hidrógeno ( $H^+$ ), y está relacionado con ácidos, que donan  $H^+$ , y bases, que los aceptan (Cuéllar, 2018). En aguas naturales, el pH oscila generalmente entre 6,5 y 8,5, pero factores como la presencia de dióxido de carbono ( $CO_2$ ), ácidos orgánicos o descargas ácidas pueden alterarlo, afectando negativamente la vida acuática, causando corrosión, dañando cultivos y favoreciendo la disolución de sales metálicas tóxicas (Cuéllar, 2018).

Además, el pH del agua influye directamente en los procesos biológicos de los ecosistemas acuáticos. Valores extremos, ya sea muy ácidos o muy básicos, pueden ser perjudiciales para las especies acuáticas, afectando su capacidad de osmorregulación y reproducción. Su variación está influenciada tanto por factores naturales, como la geología del suelo y el clima, como por actividades antropogénicas, incluyendo la minería y el vertido de residuos (Roldán & Ramírez, 2008). Por ello, el monitoreo y control del pH es esencial para garantizar la salud ambiental y el equilibrio de los ecosistemas acuáticos.

### ***Demanda química de oxígeno (DQO).***

La DQO (Demanda Química de Oxígeno) es un parámetro fundamental para evaluar la calidad del agua, ya que mide la cantidad de oxígeno requerida para oxidar completamente la

materia orgánica e inorgánica presente en ella. Este indicador refleja la carga orgánica total de un cuerpo de agua, incluyendo compuestos biodegradables y no biodegradables, así como sustancias químicas que afectan directamente la salud del ecosistema acuático (Ramalho, 2003).

Altos valores de DQO son indicativos de una alta concentración de contaminantes orgánicos y químicos, lo que pone en riesgo el equilibrio ecológico y la vida acuática. Además, este parámetro permite evaluar el impacto de las actividades humanas, especialmente aquellas derivadas de desechos industriales y urbanos, que contribuyen significativamente al deterioro de la calidad del agua. Por ello, el tratamiento adecuado de los contaminantes es esencial antes de reutilizar el agua o retornarla al medio ambiente (Roldán & Ramírez, 2008).

### ***Conductividad eléctrica.***

La conductividad es una medida de la capacidad del agua para transmitir corriente eléctrica, determinada por la concentración, movilidad y valencia de los iones presentes, así como por la temperatura en el momento de la medición (IDEAM, 2006). Esta propiedad se ve influenciada por la presencia de sales disueltas, como los iones de sodio, cloruro, calcio y magnesio, lo que la convierte en un indicador indirecto de la mineralización y el grado de pureza del agua. Una elevada conductividad puede señalar la presencia de contaminación derivada de actividades agrícolas, industriales o de vertidos de aguas residuales, afectando la calidad del agua. Además, la medición de la conductividad es útil para estimar los sólidos disueltos totales y evaluar la estabilidad de los ecosistemas acuáticos, brindando información clave sobre su capacidad de respuesta ante las actividades humanas (Roldán & Ramírez, 2008; IDEAM, 2006).

***Oxígeno disuelto (OD).***

El oxígeno disuelto (OD) es la cantidad de oxígeno gaseoso ( $O_2$ ) presente en el agua, fundamental para la respiración de los organismos aerobios y un indicador clave de la capacidad biológica de un cuerpo de agua. Su concentración está determinada por factores físicos, químicos y biológicos del sistema acuático, así como por los procesos de producción y consumo de oxígeno. Además, el OD se ve influenciado por parámetros como la temperatura, la altitud y la salinidad disuelta del agua (IDEAM, 2004).

Un nivel adecuado de oxígeno disuelto es esencial para la supervivencia de especies acuáticas, especialmente aquellas sensibles a bajos niveles de oxígeno, como los peces y ciertos invertebrados. Por tanto, la concentración de OD refleja la salud del ecosistema acuático, indicando su capacidad para mantener la biodiversidad. Factores como la temperatura, la velocidad del flujo y la presencia de contaminantes orgánicos afectan estos niveles, lo que hace que la medición del OD sea crucial para evaluar la calidad del agua (Roldán & Ramírez, 2008).

**Relación nitrógeno total/fósforo total (NT/PT):** Este criterio evalúa el equilibrio de nutrientes en el agua, particularmente nitrógeno y fósforo, que son esenciales para el crecimiento de plantas y microorganismos acuáticos. Sin embargo, un desequilibrio en esta relación, como un exceso de nutrientes, puede provocar fenómenos de eutrofización, donde el crecimiento excesivo de algas reduce el oxígeno disponible y afecta negativamente la fauna y flora acuáticas. La relación NT/PT ayuda a identificar la influencia de actividades agrícolas y urbanas que incrementan estos nutrientes en los cuerpos de agua (Roldán & Ramírez, 2008).

## **Marco teórico.**

### ***Impactos negativos en el suelo y el agua.***

El suelo como el agua pueden sufrir impactos negativos debido a actividades humanas y fenómenos naturales. La contaminación del suelo y del agua es una preocupación importante, ya que puede tener consecuencias perjudiciales para la salud humana, la biodiversidad y los ecosistemas en general. La contaminación del suelo puede ocurrir por la liberación de sustancias tóxicas, como productos químicos agrícolas, residuos industriales y desechos domésticos, lo cual afecta su calidad y fertilidad, así como a los organismos que lo habitan (Menéndez, 2021).

Por otro lado, la contaminación del agua puede ser causada por vertidos de sustancias químicas, aguas residuales no tratadas, derrames de petróleo y otros contaminantes. Esto afecta la calidad del agua, poniendo en riesgo la vida acuática y la salud humana cuando se consume agua contaminada (Benavides et al, 2020).

### ***Relación entre el suelo y el agua y como conservar estos recursos.***

La relación entre el suelo y el agua es estrecha, ya que el suelo actúa como un filtro natural para el agua que se infiltra a través de él. El suelo retiene y filtra los contaminantes, evitando que lleguen directamente a las fuentes de agua subterránea y superficial. Sin embargo, cuando el suelo está degradado o contaminado, su capacidad para filtrar y purificar el agua se ve comprometida, lo que puede resultar en la contaminación del agua (Lozano et al, 2020).

Por lo tanto, es fundamental proteger y conservar tanto el suelo como el agua, adoptando prácticas sostenibles de manejo de la tierra y evitando la contaminación. Esto implica promover la

agricultura y la gestión forestal sostenibles, implementar sistemas eficientes de tratamiento de aguas residuales, reducir el uso de productos químicos tóxicos y fomentar la educación ambiental para crear conciencia sobre la importancia de estos recursos y su relación interdependiente (Escobar et al., 2020).

Es muy importante conocer las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo y el agua por su impacto en la salud de los ecosistemas y en la calidad de vida de los seres vivos. Estas propiedades nos brindan información esencial sobre la capacidad del suelo para retener agua, la disponibilidad de nutrientes, la presencia de contaminantes y la diversidad de organismos que lo habitan (Menéndez, 2021).

Las propiedades físicas del suelo, como su textura, estructura y porosidad, determinan su capacidad para retener agua y permitir la circulación de aire. Estas propiedades influyen en aspectos como la disponibilidad de agua para las plantas, la infiltración y el drenaje del agua, así como la resistencia a la erosión. Al comprender estas propiedades, podemos tomar decisiones informadas sobre el manejo adecuado del suelo, como la elección de cultivos apropiados, la implementación de prácticas de conservación del suelo y la prevención de la degradación.

Las propiedades químicas del suelo y el agua, como el pH, la capacidad de intercambio catiónico y la presencia de nutrientes, afectan la disponibilidad de nutrientes para las plantas y la capacidad del suelo para retener y liberar contaminantes (Brenes & Rojas, 2005). El conocimiento de estas propiedades nos permite ajustar el pH del suelo, aplicar fertilizantes de manera adecuada y prevenir la acumulación de sustancias tóxicas en el suelo y el agua (Martínez et al., 2008).

Por otro lado, las propiedades biológicas del suelo y el agua se refieren a la diversidad y actividad de los organismos que los habitan, como bacterias, hongos, lombrices y otros microorganismos. Estos organismos desempeñan funciones esenciales en los ciclos de nutrientes, la descomposición de materia orgánica, la formación de agregados del suelo y la mejora de su estructura. Al comprender estas propiedades biológicas, podemos promover la salud del suelo y mantener la biodiversidad de los ecosistemas. En conclusión, adquirir conocimiento acerca de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo y el agua nos permite tomar decisiones informadas sobre el manejo sostenible de estos recursos, prevenir la contaminación, conservar la biodiversidad y garantizar la disponibilidad de agua y alimentos de calidad para las generaciones futuras (Roldan, 2016).

#### ***Problemas derivados de actividades humanas.***

Las actividades humanas, como la agricultura y la ganadería, pueden tener consecuencias negativas en el agua y el suelo. Estas actividades pueden generar problemas como la eutrofización, que es causada por el exceso de nutrientes, como el nitrógeno y el fósforo, en los cuerpos de agua. Estos nutrientes provienen principalmente de la escorrentía de fertilizantes agrícolas y desechos animales (Triviño & Zambrano, 2018).

La eutrofización puede tener varios efectos perjudiciales en los ecosistemas acuáticos. El crecimiento excesivo de algas y plantas acuáticas debido al exceso de nutrientes puede agotar el oxígeno en el agua, lo que resulta en la muerte de organismos acuáticos. Además, la descomposición de estas algas y plantas puede generar sedimentos oscuros y mal olor en el agua.

Esto altera la calidad del agua y afecta la vida acuática, así como la recreación y el uso humano del agua (Toro, 2019).

Además de la eutrofización, las actividades humanas también pueden generar otros problemas en el agua y el suelo. El uso excesivo de pesticidas y herbicidas en la agricultura puede contaminar el agua y afectar la salud de los organismos acuáticos. La sobreexplotación de los recursos hídricos para la agricultura y la ganadería puede llevar a la escasez de agua y la degradación de los ecosistemas acuáticos. La deforestación y la urbanización también pueden aumentar la erosión del suelo y la sedimentación en los cuerpos de agua, lo que afecta la calidad del agua y la vida acuática (Toro, 2019).

Así, las actividades humanas, como la agricultura y la ganadería, pueden generar problemas en el agua y el suelo, como la eutrofización causada por el exceso de nutrientes. Además, el uso de pesticidas, la sobreexplotación de los recursos hídricos y la degradación del suelo también pueden tener impactos negativos en los ecosistemas acuáticos. Es importante implementar prácticas sostenibles y medidas de gestión adecuadas para minimizar estos problemas y proteger nuestros recursos naturales (Triviño & Zambrano, 2018).

### ***Calidad del agua.***

La calidad del agua se refiere a las características físicas, químicas y biológicas que determinan su aptitud para diferentes usos, como consumo humano, riego agrícola, vida acuática y recreación. En Colombia, se evalúa la calidad del agua mediante características y métodos

establecidos por entidades como el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y el Instituto Nacional de Salud (Rodríguez, 2022).

Para calcular la calidad del agua en Colombia, se realizan muestreos periódicos en diferentes puntos de monitoreo, como ríos, lagos y fuentes de agua potable. Estos muestreos se llevan a cabo siguiendo protocolos específicos y los resultados se comparan con los estándares establecidos para determinar si el agua cumple con los criterios de calidad. Las características evaluadas incluyen aspectos físicos como temperatura, pH y turbidez, químicos como metales pesados, nutrientes y contaminantes, y biológicos como la presencia de bacterias indicadoras de contaminación fecal. Estos análisis se realizan en laboratorios especializados (Triviño & Zambrano, 2018).

Es fundamental realizar monitoreos regulares para detectar cambios en la calidad del agua y tomar medidas correctivas en caso de identificar problemas de contaminación. Esto contribuye a proteger los recursos hídricos y garantizar la salud de las comunidades que dependen de ellos.

*Índices e indicadores para evaluar el estado del suelo, el agua y la sostenibilidad de un sistema.*

La calidad del suelo y del agua puede evaluarse mediante herramientas como indicadores e índices, que permiten analizar y cuantificar diferentes aspectos clave de su estado.

Para interpretar las características del suelo, se diseñó un **Índice de Factibilidad del Suelo (IFS)**, un parámetro que evalúa su aptitud para usos específicos como la agricultura, la construcción o la conservación ambiental. Este índice considera diversos factores que influyen en

la funcionalidad del suelo y su capacidad para soportar actividades humanas sin experimentar una degradación significativa. Además, proporciona información clave sobre las propiedades, procesos y características del suelo (Bremer y Ellert, 2004).

Los IFS son herramientas que permiten medir cómo responde la funcionalidad del suelo a las condiciones ambientales, indicando si su calidad mejora, se mantiene o disminuye con el tiempo (Ghaemi et al., 2014). También brindan información valiosa sobre los efectos de los cambios en el uso del suelo y el impacto de las prácticas agrícolas en su degradación o sostenibilidad (Astier et al., 2002). No obstante, no existe una IFS universalmente aplicable a todos los contextos y propósitos (Cantú et al., 2007). Estos índices se construyen a partir de propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, así como de los procesos que ocurren en él (Larson y Pierce, 1991; Doran y Parkin, 1994; NRCS, 1996; Seybold et al., 1997).

El IFS se formula mediante la definición de categorías basada en rangos óptimos para cada parámetro evaluado, asignándoles una valorización numérica de 4 a 1 (dependiendo de la necesidad), donde 4 representa las condiciones más favorables y 1 las menos óptimas (Tabla 1). Su objetivo es establecer una herramienta que permita ponderar y evaluar la viabilidad del suelo para actividades específicas, como el cultivo (Segura, A. Torres, A. 2024).

**Tabla 1.**

*Formulación del Índice de Factibilidad del Suelo (IFS).*

CARACTERÍSTICA	RANGO	CATEGORÍA	VALORACIÓN
<b>Característica por evaluar.</b>	Los valores aceptables y no aceptables de la característica para asignar rangos óptimos y no óptimos.	Perfecta	4
		Aceptable	3
		Regular	2
		No apta	1

De acuerdo con las características que se evalúen, se les asigna un peso de importancia y este es multiplicado por la valoración que se dio, finalmente se hace la sumatoria y se obtiene el índice:

$$IFS = \sum (Valoración\ de\ característica \times Peso\ de\ importancia)$$

El índice de factibilidad de suelo (IFS) puede estar entre los siguientes rangos:

**Tabla 2.**

*Rangos de factibilidad del suelo.*

<b>FACTIBILIDAD DEL SUELO PARA CULTIVO DE PAPA</b>		
<b>Suelo</b>	Factible	3 - 4
	Aceptable	2 - 3
	Desfavorable	1 - 2

Este valor indicara la factibilidad del suelo para cada cultivo a analizar.

El **Índice de Calidad del Agua (ICA)** es una herramienta fundamental para la interpretación y evaluación de la calidad del agua en corrientes superficiales. Su propósito es proporcionar un valor numérico que clasifique la calidad del agua en una de cinco categorías, facilitando su comprensión y gestión. Este índice se basa en mediciones de un conjunto de variables fisicoquímicas, que pueden ser de cinco o seis tipos, dependiendo del contexto del monitoreo y las mediciones obtenidas en cada punto de evaluación (IDEAM, 2013; CAR, 2023).

En Colombia, el ICA es supervisado por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), que establece los criterios y variables a ser evaluadas. Estas

variables fisicoquímicas incluyen el oxígeno disuelto, los sólidos suspendidos totales (SST), la demanda química de oxígeno (DQO), la conductividad eléctrica, el pH y la relación nitrógeno total/fósforo total (NT/PT). Cada una de estas variables aporta información crucial sobre las condiciones y el estado del agua en las corrientes superficiales, ayudando a evaluar su aptitud para diferentes usos ecológicos y determinar su impacto potencial en el medio ambiente (IDEAM, 2013; CAR, 2023).

La metodología utilizada para interpretar los resultados de estas variables implica convertir sus valores de concentración en un subíndice que va de 0 a 1, donde los valores más altos indican mejores condiciones de calidad. Este subíndice se integra en una curva funcional que permite clasificar la calidad del agua (Tabla 3). Además, se asigna un peso específico a cada variable para reflejar su importancia relativa en la evaluación global de la calidad del agua, lo que asegura una valoración precisa y representativa de las condiciones del recurso hídrico (IDEAM, 2013; CAR, 2023).

**Tabla 3.**

*Características y método de cálculo del subíndice de cada variable.*

<b>VARIABLE</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>CURVA FUNCIONAL</b>
<b>Oxígeno Disuelto (OD)</b>	%	Si el $PS_{OD} < 100\%$ :
		$I_{OD} = 1 - (1 - 0,01 * PS_{OD})$
<b>Demanda Química de Oxígeno (DQO)</b>	mg/L	Si el $PS_{OD} > 100\%$ :
		$I_{OD} = 1 - (0,01 * PS_{OD} - 1)$
		Si $DQO \leq 20$ , entonces $I_{DQO} = 0,91$
		Si $20 < DQO \leq 25$ , entonces $I_{DQO} = 0,71$
		Si $25 < DQO \leq 40$ , entonces $I_{DQO} = 0,51$
		Si $40 < DQO \leq 80$ , entonces $I_{DQO} = 0,26$
		Si $DQO > 80$ , entonces $I_{DQO} = 0,125$

VARIABLE	UNIDAD	CURVA FUNCIONAL
<b>Conductividad Eléctrica (CE)</b>	μS/cm	$I_{OD} = 1 - 10^{(-3,26+1,34\text{Log}10C.E.)}$
		Si el $I_{CE} < 0$ , entonces $I_{CE} = 0$
<b>pH</b>	Unidades de pH	Si $pH < 4$ , entonces $I_{pH} = 0,1$
		Si $4 \leq pH \leq 7$ , entonces $I_{pH} = 0,02628419 * e^{(pH-0,520025)}$
		Si $7 < pH \leq 8$ , entonces $I_{pH} = 1$
		Si $8 < pH \leq 11$ , entonces $I_{pH} = 1 * e^{[(pH-8)*-5187742]}$
		Si $pH > 11$ , entonces $I_{pH} = 0,1$
<b>Relación NT/PT</b>	mg/L/mg/L	Si $15 \leq NT/PT \leq 20$ , entonces $I_{NT/PT} = 0,8$
		Si $10 < NT/PT < 15$ , entonces $I_{NT/PT} = 0,6$
		Si $5 < NT/PT \leq 10$ , entonces $I_{NT/PT} = 0,35$
		Si $NT/PT \leq 5$ , ó $NT/PT > 20$ , entonces $I_{NT/PT} = 0,15$

*Nota. IDEAM (2013).*

Para determinar el índice de oxígeno disuelto (IOD), como paso esencial en el cálculo del Índice de Calidad del Agua (ICA), se debe hacer un procedimiento metódico que incluye el cálculo del porcentaje de saturación de oxígeno disuelto, ajustado a las condiciones locales de presión y temperatura (IDEAM, 2013; CAR, 2023).

### **Cálculo de la presión atmosférica local usando la Ecuación Barométrica Simplificada.**

$$P_{local} = P_0 * \left(1 - \frac{L * h}{T_0}\right)^{-\frac{M * g}{R * L}}$$

Donde:

$P_{local}$  representa la presión atmosférica en la altitud h del cuerpo de agua.

$P_0$  presión a nivel del mar.

L fue la tasa de cambio de temperatura con la altitud o lapse rate (valor estándar de 0.0065 K/m).

h fue la altitud del cuerpo de agua en metros.

$T_0$  fue la temperatura a nivel del mar en Kelvin.

$M$  masa molar del aire.

$g$  aceleración debido a la gravedad (9.81 m/s<sup>2</sup>).

$R$  constante de los gases (8.314 J/(mol·K)).

Este modelo permite obtener una aproximación de la presión atmosférica local en el cuerpo de agua, ajustada a la altitud específica.

### **Cálculo de la Concentración de Saturación de Oxígeno en el Agua ( $C_p$ ).**

Con la presión local ( $P_{local}$ ) calculada, se determina la concentración de saturación de oxígeno en el agua ( $C_p$ ) en el cuerpo de agua, que depende de la presión atmosférica y de la temperatura del agua en el sitio (Roldán & Ramírez, 2008). Para ajustar la concentración de saturación de oxígeno a las condiciones locales, se utiliza la siguiente fórmula:

$$C_p = C_{sat} * \left( \frac{P_{local}}{760} \right)$$

Donde:

$C_p$  concentración de saturación de oxígeno en el agua en mg/L.

$C_{sat}$  la concentración de oxígeno en condiciones de saturación a nivel del mar a la temperatura específica del agua del cuerpo de agua.

$P_{local}$  presión atmosférica calculada para la altitud del cuerpo de agua.

760 presión atmosférica estándar a nivel del mar en mmHg.

El valor de  $C_{\text{sat}}$  ajustado a la temperatura del agua del cuerpo de agua, ya que esta influye directamente en la solubilidad del oxígeno; a mayor temperatura, menor es la capacidad del agua para disolver oxígeno.

### **Paso 3: Cálculo del Porcentaje de Saturación de Oxígeno Disuelto (PSOD).**

Finalmente, utilizando los valores de oxígeno disuelto medido en el cuerpo de agua ( $OD$ ) y la concentración de saturación de oxígeno ajustada ( $C_p$ ), se calcula el porcentaje de saturación de oxígeno disuelto ( $PS_{OD}$ ) con la fórmula:

$$PS_{OD} = \frac{OD * 100}{C_p}$$

Donde:

$PS_{OD}$  porcentaje de saturación de oxígeno disuelto en el cuerpo de agua.

$OD$  concentración de oxígeno disuelto medida en el agua (en mg/L).

$C_p$  concentración de saturación de oxígeno en el agua bajo las condiciones de presión y temperatura del cuerpo de agua.

El valor de PSOD obtenido refleja el porcentaje de saturación de oxígeno en el cuerpo de agua en comparación con el nivel máximo de oxígeno disuelto que es posible en las condiciones ambientales locales.

El ICA final se calcula sumando los subíndices ponderados de cada variable mediante la fórmula:

$$ICA_j = \sum W_i * I_{ij}$$

Donde:

$ICA_j$  representa el Índice de Calidad del Agua calculado en el punto de monitoreo.

$W_i$  es el peso o importancia asignada a la variable de calidad.

$I_i$  es el valor de la variable, calculado al ingresar la concentración medida en el punto en la ecuación o curva correspondiente.

j denota la variable incluida en el indicador.

El valor final del ICA permite clasificar el agua en categorías de calidad. Esta clasificación, además de simplificar la interpretación, facilita la visualización de los resultados (Tabla 4).

#### **Tabla 4.**

*Calificación de la calidad del agua según los valores del ICA.*

CLASIFICACIÓN	RANGO
Bueno	0,91 – 1,00
Aceptable	0,71 – 0,90
Regular	0,51 – 0,70
Malo	0,26 – 0,50
Muy Malo	0 – 0,25

*Nota. IDEAM (2013, pp. 5–6).*

La combinación de estos criterios dentro del ICA permite clasificar la calidad del agua de acuerdo con categorías que facilitan su interpretación y orientan a las autoridades ambientales en la toma de decisiones y la gestión sostenible del recurso hídrico (IDEAM, 2013; CAR, 2023).

El **índice de estado trófico** es una característica clave para evaluar la calidad del agua, ya que clasifica los cuerpos de agua según su producción biológica. Este índice se calcula considerando la transparencia del agua, la concentración de fósforo total y la clorofila (Orquera & Cabrera, 2019). Según su valor, se clasifica en cuatro categorías: oligotrófico (menos de 30, baja concentración de nutrientes), mesotrófico (30-60, concentración moderada), eutrófico (60-90, alta concentración) e hipertrófico (más de 90, exceso de nutrientes) (Pradenas, 2021).

Los **indicadores de sostenibilidad** son herramientas clave para representar de manera operativa los elementos que conforman la sostenibilidad de los sistemas de producción. Según Sarandón y Flores (2009), un indicador es una variable seleccionada que permite identificar tendencias a lo largo del tiempo. Estas variables simplifican la complejidad del sistema, proporcionando una base para evaluar aspectos ambientales, sociales y económicos, y reflejan los valores asociados al concepto de sostenibilidad (Astier y González, 2008).

Los indicadores pueden ser cualitativos, cuantitativos o una combinación de ambos (cuali-cuantitativos). Además, son específicos al contexto, lo que significa que son adecuados para los procesos y sistemas en los que se aplican, pero pueden no ser relevantes para otros escenarios. Por lo tanto, no existe un conjunto de indicadores de uso universal (Maser et al., 1999).

Cada indicador debe incluir: su nombre, una descripción clara de su propósito y una escala de valoración estandarizada. Esta escala debe detallar cada nivel de contribución a la sostenibilidad, donde +2 representa el mayor aporte posible y -2 el menor (Acevedo, et al., 2013) (Tabla 5).

**Tabla 5.**

*Escala de valoración para los indicadores para la sostenibilidad.*

<b>INDICADOR</b>	<b>ESCALA DE VALORACIÓN</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
<b>Indicador de sostenibilidad</b>	2	El indicador mejora fuertemente la sostenibilidad del sistema productivo.
	1	El indicador mejora levemente la sostenibilidad.
	0	Neutro. No genera impacto sobre la sostenibilidad.
	-1	Impacto levemente negativo para la sostenibilidad.
	-2	Impacto fuertemente negativo para la sostenibilidad del sistema productivo.

*Nota. Acevedo, et al., 2013.*

Esta escala facilita la evaluación del impacto de las intervenciones en los agroecosistemas, identificando si contribuyen de manera positiva o negativa a la sostenibilidad (Acevedo, et al., 2013).

En algunos casos, se presentan como **índices de sostenibilidad (IS)** que son valores agregados obtenidos a partir de indicadores individuales, y se enfocan en describir procesos específicos (Masera et al., 1999). Estos índices se pueden calcular como el promedio ponderado de los valores de los indicadores. Sin embargo, es importante tener en cuenta que no todos los indicadores contribuyen de igual manera a la sostenibilidad (Sarandón y Flores, 2009). Por lo tanto, es conveniente ajustar los valores obtenidos considerando la importancia relativa de cada indicador en relación con la sostenibilidad local.

Para llevar a cabo esta corrección o ponderación, se emplea un coeficiente que multiplica el valor obtenido por cada indicador y el número de importancia asignado, dividido entre el total de puntos de importancia, según la siguiente fórmula:

$$IS = \frac{\sum (\text{Valor obtenido para cada indicador} \times \# \text{ de puntos de importancia de indicador})}{\sum \text{puntos de importancia}}$$

De esta manera el valor inicialmente obtenido aumenta o disminuye levemente, de acuerdo con la importancia relativa que le fue dada al indicador sobre la sostenibilidad total del sistema productivo sostenibilidad (Acevedo, et al., 2013).

Los valores cercanos a cero indican que no tienen ningún aporte a la sostenibilidad, los valores negativos indicarán que tienen un efecto adverso, y los valores positivos lo contrario.

**Marco legal.**

En Colombia, existen varias leyes que regulan el agua y los suelos, el Código Nacional de los Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente, establecido por la Ley 2811 de 1974, regula la conservación y protección de los recursos naturales en Colombia, incluyendo el agua y los suelos. Esta ley establece las normas para el uso sostenible de los recursos naturales y la protección de los ecosistemas.

Por otro lado, la Ley 164 de 1994 establece el régimen de uso y manejo de los suelos en Colombia, promoviendo su conservación y uso sostenible. Su objetivo es regular las actividades relacionadas con la tierra, evitando la degradación y erosión del suelo, y promoviendo prácticas agrícolas y forestales sostenibles.

La Ley 1333 de 2009, por su parte, no solo regula la conservación y protección de los recursos naturales, sino que también establece disposiciones para la prevención y control de la contaminación del agua y del suelo. Su objetivo es prevenir y controlar la contaminación ambiental, estableciendo sanciones para quienes incumplan las normas ambientales.

A su vez, la Ley 281 de 1996 establece el régimen de protección y uso de los suelos agrícolas. Su objetivo es promover la conservación y uso sostenible de los suelos agrícolas, evitando su degradación y erosión, y fomentando prácticas agrícolas adecuadas.

Finalmente, el Decreto 1076 de 2015, Reglamenta el sector de agua potable y saneamiento básico en Colombia. Establece las normas técnicas y los procedimientos para la prestación de los servicios de agua potable y saneamiento básico, incluyendo la gestión de los recursos hídricos.

## DISEÑO METODOLÓGICO

### Área de estudio.

El Embalse Mancilla (ver Figura 1), construido en la Quebrada Mancilla, se caracteriza por su estructura compuesta por un núcleo de arcilla y espaldones de material granular, con una capacidad de almacenamiento de aproximadamente 320,000 metros cúbicos (Mora, 2019; Tapia, et al., 2019). Situado a una altitud promedio de 2610 metros sobre el nivel del mar, en el norte del municipio de Facatativá, este embalse experimenta temperaturas que oscilan entre 12° y 18°C a lo largo del año. Además, presenta un patrón de lluvias bimodal, con dos periodos de precipitación en marzo-mayo y octubre-noviembre, y su precipitación anual varía significativamente, situándose en un rango de 600 a 1200 mm, una de las áreas con mayor precipitación en la zona.

### Figura 1.

*Mapa del área de influencia del Embalse Mancilla, Facatativá.*



La investigación fue de tipo mixta (cuantitativa y cualitativa), y se definieron etapas específicas para analizar la relación entre los sistemas productivos, los usos del suelo, y su influencia sobre la calidad del agua en la zona del embalse Mancilla. Para abordar esta cuestión, se utilizó la Metodología para Evaluación de Sustentabilidad a partir de Indicadores Locales para el diseño de Programas Agroecológicos (MESILPA), que ofrece un enfoque integral para evaluar la sostenibilidad considerando aspectos ecológicos, sociales y económicos.

El diseño metodológico se dividió en siete fases, que abarcaron desde la caracterización de los sistemas productivos hasta la planificación de acciones de mejora, proporcionando un enfoque estructurado y completo para alcanzar el objetivo. La integración de modelos de producción agropecuaria y de calidad del agua en la cuenca de Mancilla tuvo importantes implicaciones para la toma de decisiones en la gestión de recursos y la promoción de prácticas sostenibles en la región. Este diseño se estructuró en siete fases:

### **FASE 1: Caracterización de los sistemas productivos.**

En esta fase, se llevó a cabo la caracterización de los sistemas productivos presentes en la cuenca del embalse Mancilla. Esto incluyó la identificación de las prácticas agrícolas y ganaderas, el uso de insumos y los sistemas de manejo. Se recopiló información relevante sobre la extensión y escala de cada sistema productivo en la zona de estudio mediante entrevistas y visitas a campo (Acevedo, et al., 2013).

### **FASE 2: Construcción del marco de análisis sobre sostenibilidad.**

En esta etapa, se construyó un marco de análisis que consideró los elementos clave del sistema productivo. Se definieron los objetivos de sostenibilidad, tomando en cuenta aspectos

ecológicos, sociales y económicos. Asimismo, se establecieron criterios de sostenibilidad (aspiraciones) que sirvieron como base para la evaluación (Acevedo, et al., 2013).

### **FASE 3: Priorización de aspectos para la sostenibilidad.**

Esta fase se enfocó en la identificación y priorización de los aspectos más relevantes y críticos para la sostenibilidad. Se evaluó la importancia relativa de cada aspecto, considerando su impacto en la calidad del agua y en el entorno (Acevedo, et al., 2013).

### **FASE 4: Definición y estandarización de indicadores.**

En esta etapa, se seleccionaron indicadores específicos que permitieron medir y evaluar los aspectos de sostenibilidad previamente identificados. Se definieron las unidades de medida y los métodos estandarizados para la recopilación de datos relacionados con estos indicadores (Acevedo, et al., 2013).

### **FASE 5: Evaluación de sostenibilidad.**

En la fase de evaluación de sostenibilidad, se recopilaron datos sobre los indicadores seleccionados en los sistemas productivos identificados en la Fase 1. Estos datos se utilizaron para evaluar la sostenibilidad de cada sistema productivo con respecto a los criterios establecidos en la Fase 2, revelando la situación actual de la sostenibilidad en la cuenca (Acevedo, et al., 2013).

### **FASE 6: Análisis de resultados – diagramación.**

Después de la evaluación, se analizaron los resultados obtenidos. Se buscó comprender las relaciones entre los sistemas productivos y la calidad del agua en el embalse. Los datos se

diagramaron visualmente para representar las interacciones y los impactos, lo que facilitó la comunicación de los resultados (Acevedo, et al., 2013).

### **FASE 7: Planeación de acciones de mejora.**

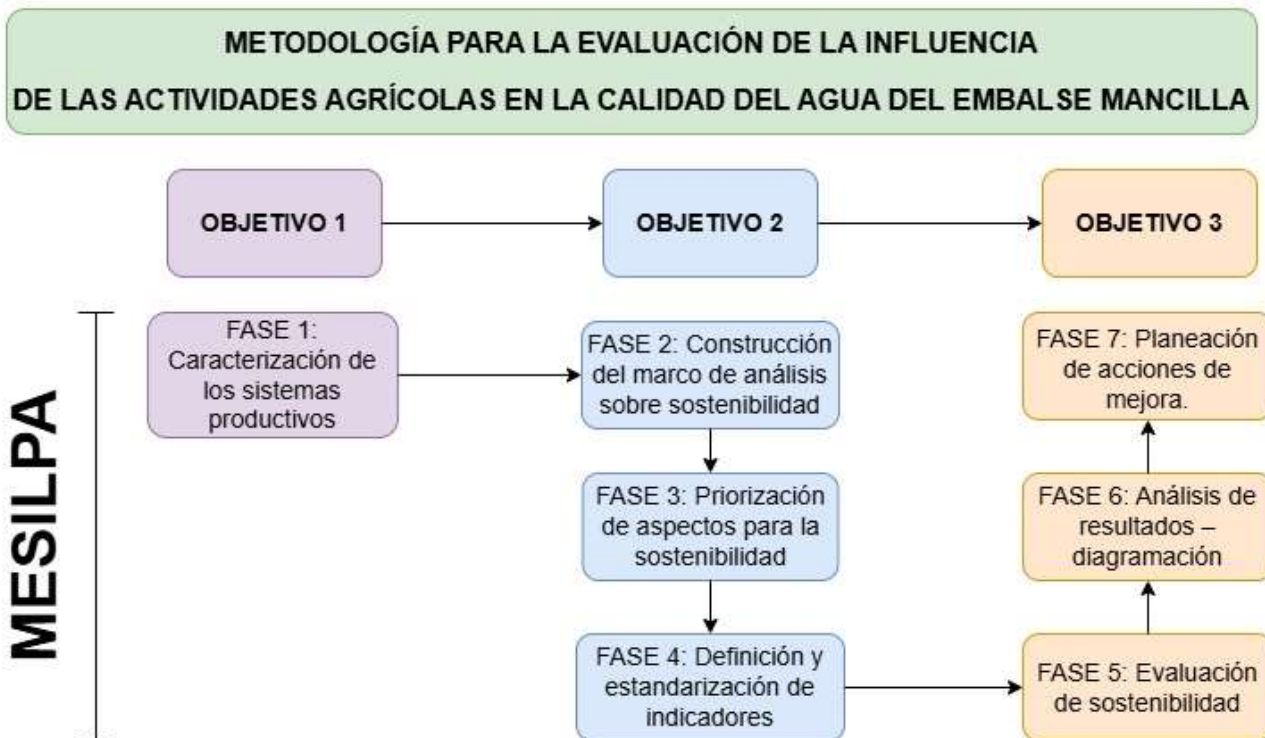
En la última fase, se desarrolló un plan de acciones de mejora basado en los resultados y las conclusiones de las fases anteriores. Se definieron estrategias y políticas para promover la sostenibilidad en la cuenca del embalse, incluyendo medidas de manejo y prácticas sostenibles que abordaran los sistemas productivos insostenibles y los aspectos críticos identificados (Acevedo, et al., 2013).

Para cada objetivo, se realizaron revisiones de información secundaria con el fin de recopilar datos relevantes, a partir de estudios previos, investigaciones y registros de agencias ambientales. Este proceso permitió discernir tendencias históricas, patrones y posibles puntos críticos relacionados con la calidad del agua del embalse Mancilla.

A continuación, en la Figura 2 se muestra las fases correspondientes a cada uno de los objetivos del proyecto. Es importante destacar que este proceso requiere iniciar con la Fase 1, ya que se trata de una metodología cíclica en la que cada fase depende de la anterior para su desarrollo. Por lo tanto, la Fase 1, que se enfoca en la caracterización de los sistemas productivos, fue fundamental para garantizar el avance y la coherencia en la ejecución de las siguientes fases

### **Figura 2.**

*Metodología para la evaluación de la influencia de las actividades agrícolas en la calidad del agua del Embalse Mancilla*



*Nota:* (Acevedo, et al., 2013).

**1. Objetivo 1: Caracterizar el sistema dinámico presente en el área de influencia del embalse Mancilla.**

Para definir y caracterizar el sistema en la zona de influencia de los sistemas productivos y del embalse Mancilla, se tuvo en cuenta la Fase 1 de la metodología del MESILPA que es caracterización de los sistemas productivos, en la cual se realizaron actividades con Sistemas de Información Geográfica (SIG), listas de chequeo, entrevista, análisis de suelo y agua. En primer lugar, se realizó un vuelo de dron para obtener datos geoespaciales en un radio de 3 km alrededor de la zona de influencia del embalse Mancilla. Estos datos fueron fundamentales para la creación de mapas temáticos que representaran la distribución de la cobertura y los usos del suelo en la

región circundante al embalse, además de ser cruciales para definir las rutas de las visitas de campo según el número de predios a evaluar.

El levantamiento de las ortofotos se llevó a cabo el 19 de enero de 2024, utilizando el dron DJI Mavic Air 2, reconocido por su portabilidad y cámara de alta gama. Esta cuenta con un sensor CMOS de 1/2", capaz de capturar imágenes de hasta 48 MegaPíxeles con resolución de 4056 x 3040 píxeles, garantizando un nivel de detalle sobresaliente. Durante el sobrevuelo, realizado a una altitud de 113 metros, se obtuvo un total de 340 imágenes, con una resolución espacial de 3.95 cm/píxel, abarcando un área de 0.617 km<sup>2</sup>. El procesamiento de las imágenes se efectuó mediante el software Agisoft Metashape Professional, utilizando un modelo digital del terreno (DEM) como base y ajustando los parámetros para generar un ortomosaico con coordenadas geográficas referenciadas en el sistema WGS 84.

La clasificación de coberturas se realizó a partir del ortomosaico generado, empleando algoritmos de análisis supervisados y no supervisados para identificar patrones espectrales asociados a diferentes tipos de cobertura, como vegetación, agua y suelo desnudo. Estos resultados fueron validados mediante el recorrido en el área de estudio, asegurando una alta precisión. Este proceso integró herramientas tecnológicas avanzadas y metodologías de análisis geoespacial, lo que permitió obtener resultados confiables y detallados, fundamentales para evaluar las características del territorio.

De manera simultánea, se elaboró una lista de verificación que incluyó aspectos como el tipo de cobertura vegetal, el uso del suelo, las técnicas de manejo empleadas, la caracterización de las actividades productivas y otros indicadores relevantes. Esta herramienta, junto con una

entrevista, se implementó durante las visitas de campo a los predios cercanos al embalse, lo que facilitó la recolección de datos cualitativos sobre los usos del suelo y las prácticas agrícolas.

Se identificó que la finca seleccionada para la evaluación es la que ocupa la mayor extensión de terreno alrededor del embalse, a cubrir un área de 418,571 m<sup>2</sup>. Por esta razón, se decidió centrar el análisis en esta finca. La información recopilada provino de entrevistas realizadas al propietario de la finca y a los agricultores, complementadas con la verificación in situ mediante una lista de chequeo.

La entrevista se estructuró en los siguientes ítems clave:

- Aspectos socioeconómicos: Se indagó sobre las condiciones básicas de vivienda de los habitantes, además de realizar un mapeo de los niveles educativos en la finca.
- Manejo de cultivos: Se evaluaron las actividades agrícolas realizadas, incluyendo los tipos de cultivos establecidos, los insumos empleados (como fertilizantes, herbicidas y pesticidas), y las técnicas de manejo aplicadas.
- Uso del recurso hídrico: Se investigó la fuente de agua utilizada para las actividades productivas, así como los métodos empleados para su extracción y distribución.
- Eslabón ecológico: Se recopilaron datos sobre las especies vegetales presentes en la zona de estudio, los animales que habitan el área, y los residuos generados por las actividades en la finca.

La lista de chequeo se utilizó como herramienta complementaria para validar la información obtenida en las entrevistas. Esto se realizó mediante la observación directa durante las visitas de campo, lo que permitió contrastar los datos cualitativos recopilados con la realidad

del terreno. Esta integración de métodos asegura un análisis más completo y detallado de los usos del suelo y las dinámicas agrícolas en la finca evaluada.

Esta información complementó los datos geospaciales obtenidos a través del vuelo del dron.

**Figura 3.**

*Visita de campo para el desarrollo de la entrevista*



**Figura 4.**

*Visita de campo para el desarrollo de la lista de chequeo*



Por otro lado, se realizaron análisis de laboratorio del suelo en el predio visitado, donde se tomaron muestras compuestas para cada uno de los cultivos presentes en la zona, en los siguientes puntos (Tabla 6):

**Tabla 6.**

*Coordenadas de los puntos de muestreo para el análisis de suelo.*

<b>COORDENADAS PARA CADA MUESTRA</b>			
<b>Cultivos</b>	<b>Maíz</b>	<b>Fresa</b>	<b>Papa</b>
<b>Muestra 1</b>	4,8444 N 74,3560 O	4,84348 N, -74,35380 O	4,8437 N 74,3529 O
<b>Muestra 2</b>	4, 8442 N 74,3554 O	4,84340 N, -74,35356 O	4,84507 N 74,35359 O
<b>Muestra 3</b>	4,8447 N 74,3551 O	4,84338 N, -74,35302 O	4,84542 N -74,35269 O

Estos análisis abarcaron propiedades como pH, conductividad eléctrica, textura, color, materia orgánica, compactación, retención de humedad y disponibilidad de nutrientes (entre ellos nitrógeno, fósforo y potasio). Los resultados de estos análisis proporcionaron una evaluación detallada de las propiedades físicas y químicas del suelo en la zona de influencia, contribuyendo a comprender la calidad del suelo y su idoneidad para diversos usos agrícolas. A continuación, se observa en la Tabla 7 los diferentes métodos empleados para cuantificar las propiedades establecidas de acuerdo con la Guía de trabajo basada en el método agroecológico de Nicholls et al. (2004) y el protocolo RASTA, 2010 (Rapid Soil and Terrain Assessment), que es una guía práctica para la caracterización del suelo y del terreno.

**Tabla 7.**

*Propiedades físicas y químicas para evaluar la calidad del suelo.*

<b>INDICADORES DE CALIDAD DEL SUELO</b>	<b>PROCEDIMIENTOS GENERALES</b>
<b>Textura</b>	Determinar textura organolépticamente (al tacto) para relacionarla con la estructura: Limoso, Arcilloso, Arenoso, etc.
<b>Compactación y porosidad</b>	Determinar la densidad aparente en el terreno implica emplear el método de la probeta con suelo disgregado. Para realizar este cálculo, es necesario consultar los valores de densidad real del suelo y, a partir de estos datos, calcular la porosidad. Cuando los valores de densidad real y aparente se encuentran en proximidad, esto sugiere que el suelo está compactado. Es deseable que la porosidad sea superior al 50%.
<b>Color</b>	Realizar un recorrido por el cultivo y tomar 3 muestras de suelo. Con la tabla de colores Munsell determinar el color del suelo.
<b>Retención de humedad</b>	Emplear el método gravimétrico, donde se mide la cantidad de agua retenida en el suelo después de someterlo a condiciones de saturación y posterior secado. Las muestras se pesan inicialmente y luego se colocan en un horno a 105°C durante

<b>INDICADORES DE CALIDAD DEL SUELO</b>	<b>PROCEDIMIENTOS GENERALES</b>
<b>pH y conductividad eléctrica</b>	24 horas para eliminar completamente el agua presente. Después del secado, se vuelven a pesar. Para calcular el porcentaje de retención de humedad, se resta el peso final del peso inicial, y el resultado se divide entre el peso final. Finalmente, se multiplica por cien para obtener el porcentaje de agua eliminada.
<b>Materia orgánica y disponibilidad de nutrientes (entre ellos nitrógeno, fósforo y potasio).</b>	A través de los siguientes instrumentos: pHmetro y conductímetro.  Se llevarán muestras para análisis de laboratorio para contrastar y contar con mayor veracidad de los datos.

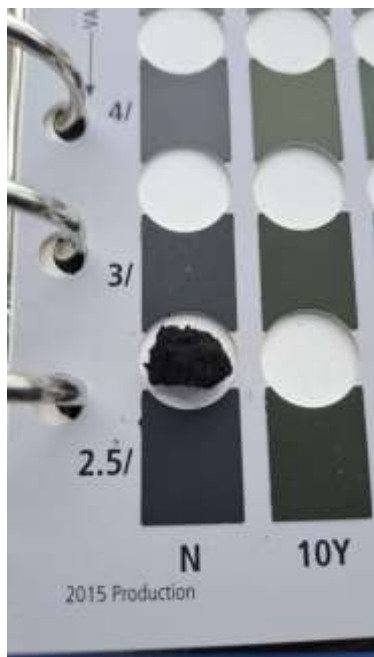
**Figura 5.**

*Muestras de Suelo*



**Figura 6.**

*Análisis de laboratorio de muestra de suelo (color).*



Para facilitar la interpretación de los resultados y evaluar la calidad del suelo en función de los requerimientos de cada cultivo, se diseñó un Índice de Factibilidad del Suelo (IFS). Este índice clasifica las propiedades del suelo según su proximidad a los rangos óptimos establecidos para ocho características clave en este caso de estudio: *pH* (30%), *materia orgánica* (20%), *nitrógeno* (10%), *fósforo* (10%), *potasio* (10%), *conductividad eléctrica* (10%), *textura* (5%), y *porosidad* (5%). Los pesos asignados a cada propiedad se definieron en función de la relevancia que los agricultores consideraron para cada característica, calculando en su experiencia y conocimiento práctico.

Cada característica fue evaluada numéricamente en una escala de 1 a 4, donde un puntaje de 4 representaba valores que se encontraban dentro o muy próximos al rango óptimo, mientras que un puntaje de 1 correspondía a valores significativamente alejados de dicho rango. Para calcular el Índice de Factibilidad del Suelo (IFS), se multiplicó la puntuación obtenida en cada característica por su peso asignado, obteniendo así un puntaje ponderado. La suma de estos

puntajes ponderados generó el valor total del IFS, que refleja la factibilidad del suelo para cada cultivo analizado.

El IFS se clasifica en tres rangos principales: factible, con valores entre 3 y 4; aceptable, con valores entre 2 y 3; y desfavorable, con valores entre 1 y 2. Esta clasificación permite identificar de manera clara y práctica el nivel de adecuación del suelo para los requerimientos de los cultivos.

Este enfoque metodológico asegura una evaluación integral, objetiva y específica de la calidad del suelo, proporcionando una herramienta útil para la toma de decisiones en la gestión agrícola (Segura & Torres, 2024).

En resumen, se realizó una combinación estratégica de actividades que incluyeron Sistemas de Información Geográfica (SIG), listas de chequeo y análisis de suelo para caracterizar la cobertura y los usos del suelo en la zona de influencia de los sistemas productivos. Estas acciones se llevaron a cabo de manera coordinada y permitieron una comprensión integral de la dinámica del suelo en la región, contribuyendo así al logro del objetivo específico.

Además, para el análisis de la calidad del agua del embalse se requirieron análisis fisicoquímicos en campo. Se realizaron cuatro tomas de muestras integradas en diferentes períodos de tiempo, una en temporada húmeda (mayo) y tres en temporada seca (enero, junio y julio), en tres puntos distribuidos en todo el embalse (Tabla 8).

### **Tabla 8.**

*Puntos de Monitoreo de agua en el embalse Mancilla*

PUNTOS DE MONITOREO	COORDENADAS
1	4,842973 N -74,351816 O
2	4,843529 N -74,350353 O
3	4,844347 N -74,349178 O

**Figura 7.**

*Puntos de monitoreo del embalse Mancilla*



Con las diferentes muestras tomadas, se evaluaron las siguientes características, como se detalla en la Tabla 9:

**Tabla 9.**

*Propiedades físicas y químicas para evaluar la calidad del agua.*

<b>INDICADORES DE CALIDAD DEL AGUA</b>	<b>PROCEDIMIENTOS GENERALES</b>
<b>Nitrógeno y Fósforo</b>	Método de reducción de cadmio y método del molibdato de amonio.
<b>pH, DQO, SST, Conductividad eléctrica y OD</b>	A través de los siguientes instrumentos: pHmetro, conductímetro, colorimétrico y oxímetro

*Fuente. Elaboración propia.*

Para corroborar los resultados obtenidos en el análisis de la calidad del agua, se recurrió a información bibliográfica sobre el Índice del Estado Trófico del embalse Mancilla. Este índice fue utilizado como referencia adicional para validar y contextualizar la calidad del agua del embalse, permitiendo comparar los datos obtenidos con estudios previos y evaluar de manera más integral las condiciones del ecosistema acuático.

Finalmente, se desarrolló una relación entre la calidad del agua y la calidad del suelo, destacando las características evaluadas y su incidencia en la calidad del agua del embalse. Este análisis permitió identificar cómo las condiciones de los suelos de la finca objeto de estudio influyen directamente en los parámetros de calidad del agua del embalse.

## **Figura 8.**

*Muestras de agua*



\* **Clasificación de las coberturas de la tierra:**

Para realizar la clasificación de coberturas de la tierra del área de influencia del embalse Mancilla, se recolectó información en campo a través de visitas a campo y vuelo de dron para así obtener una ortofoto de alta resolución para delimitar y clasificar las coberturas. Además, siguiendo la metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia a escala 1:100.000. Este método se utilizó debido a su alta precisión para cartografiar las coberturas de la tierra, empleando una leyenda nacional estandarizada que facilita la interpretación de los datos geospaciales. Este proceso incluyó la identificación de las distintas categorías de uso del suelo en la zona de estudio, contribuyendo a una evaluación detallada de su impacto ambiental, en especial en la relación con el embalse. La información obtenida se analizó para evaluar las dinámicas y los posibles cambios en el uso de la tierra y su efecto en los recursos naturales de la región.

\* **Pendiente media del área de estudio:**

La pendiente media de la cuenca se calcula como la media ponderada de las pendientes de todas las superficies elementales de la cuenca, manteniendo constante la línea de máxima pendiente (Tabla 10). Este índice refleja la velocidad media de la escorrentía, así como su capacidad de arrastre y el nivel de erosión (Ibáñez Asensio, Sara; Moreno Ramón, Héctor; Gisbert Blanquer, 2011). Mediante la herramienta de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y por medio del sensor de ALOS PALSAR dio como resultado un Modelo de Elevación Digital (DEM) de la zona de estudio a una escala 1:12.500, se obtuvo la pendiente media del área analizada.

**Tabla 10.**

*Descripción de los valores de pendiente.*

<b>PORCENTAJES (%)</b>	<b>GRADOS (°)</b>	<b>DESCRIPCIÓN EN PENDIENTES SIMPLES</b>	<b>DESCRIPCIÓN EN PENDIENTES COMPUESTAS</b>
<b>0-3%</b>	0-2°	Plano	A nivel
<b>3-7%</b>	2-4°	Ligeramente inclinado	Ligeramente ondulado
<b>7-12%</b>	4-7°	Moderadamente inclinado	Ondulado a ligeramente quebrado
<b>12-25%</b>	7-14°	Fuertemente inclinado	Fuertemente ondulado o quebrado
<b>25-50%</b>	14-27°	Ligeramente escarpado	Fuertemente quebrado
<b>50-75%</b>	27-37°	Moderadamente escarpado	Escarpado
<b>&gt;75%</b>	>37°	Fuertemente escarpado	Muy escarpado

*Fuente: (IGAC, 2021).*

**\* Análisis de agua:**

La metodología para calcular el Índice de Calidad del Agua (ICA) en cuerpos de agua superficial siguió un proceso estructurado, basado en la medición de seis variables fisicoquímicas

clave. Las variables que se consideró en este índice son el oxígeno disuelto, los sólidos suspendidos totales, la demanda química de oxígeno, la conductividad eléctrica, el pH y la relación de nitrógeno total respecto al fósforo total. Cada una de estas variables contribuye con un peso específico dentro de la fórmula de cálculo del ICA; sin embargo, en caso de que no haya datos disponibles sobre alguna característica, se realizó el cálculo empleando solo cinco de estas variables y su peso de importancia para cada medida fue de 0,2 (IDEAM, 2013; CAR, 2023). El objetivo fue obtener un valor integrado que permitiera evaluar la calidad del agua de forma sencilla y consistente.

En cada punto de monitoreo, se realizaron mediciones de las variables de calidad del agua, las cuales fueron enviadas a un análisis de laboratorio por el acueducto. Los resultados obtenidos se interpretaron mediante una curva funcional, que transformó los valores de concentración en un subíndice de 0 a 1. Además, se asignó un peso específico a cada variable para reflejar su importancia relativa en la calidad general del agua (IDEAM, 2013; CAR, 2023).

Una vez obtenidos los valores de las variables, cada una se procesó mediante una fórmula específica que definió el subíndice de calidad correspondiente. Para el oxígeno disuelto, se calculó primero el porcentaje de saturación, que posteriormente se transformó en un subíndice utilizando una fórmula que valoró su capacidad para sustentar la vida acuática. En el caso de los sólidos suspendidos, se midió su concentración en miligramos por litro y se ajustó a una relación funcional que demostró su relación con la turbidez.

La demanda química de oxígeno reflejó la carga de compuestos orgánicos e inorgánicos susceptibles de oxidación, mientras que la conductividad eléctrica se relacionó con la cantidad de sales disueltas en el agua, indicando la mineralización. El pH evaluó la acidez o alcalinidad, analizando el equilibrio iónico y los posibles efectos sobre la flora y fauna acuática. Finalmente,

la relación NT/PT mostró el equilibrio de nutrientes, un aspecto crucial en los ecosistemas acuáticos (IDEAM, 2013; CAR, 2023).

*Paso 1: Cálculo de la Presión Atmosférica Local.*

Se estimó la presión atmosférica en la altitud específica del embalse utilizando la Ecuación Barométrica Simplificada, que calcula una disminución lineal de la temperatura con la altitud dentro de la troposfera. Esta metodología se validó para altitudes moderadas, hasta aproximadamente 5000 metros, donde la variación de temperatura mantiene un patrón constante (NOAA et al., 1976; NASA, 2021). El cálculo de la presión atmosférica local fue esencial, ya que la solubilidad del oxígeno en el agua, representada por la concentración de saturación de oxígeno ( $C_p$ ), dependió directamente de la presión del entorno. Con la presión local ajustada a la altitud, se aplicó ésta en la ecuación de  $C_p$  para determinar la cantidad máxima de oxígeno que pudo disolverse en el agua bajo dichas condiciones (Martínez et al., 2011).

Los datos empleados incluyen la altitud del embalse, la presión a nivel del mar (1013,25 hPa o 760 mmHg), la temperatura a nivel del mar en Kelvin (288,15 K) y la masa molar del aire (0,029 kg/mol).

*Paso 2: Cálculo de la Concentración de Saturación de Oxígeno en el Agua ( $C_p$ ).*

Con la presión local ( $P_{local}$ ) calculada, se calcula la concentración de saturación de oxígeno en el agua ( $C_p$ ) del embalse, considerando los parámetros ambientales correspondientes.

*Paso 3: Cálculo del Porcentaje de Saturación de Oxígeno Disuelto (PSOD).*

Se calculó el porcentaje de saturación de oxígeno disuelto (PSOD) utilizando los valores de oxígeno disuelto medidos en el agua del embalse (OD) y la concentración de saturación de oxígeno ajustada ( $C_p$ ).

#### *Conversión de Nitritos y Fosfatos.*

Los datos de nitritos y fosfatos proporcionados por el acueducto se convirtieron en concentraciones de nitrógeno y fósforo totales para el cálculo del Índice de Calidad del Agua (ICA). Los factores de conversión empleados se extrajeron de un documento del Departamento de Medio Ambiente y Ciencia de Queensland (Environment and Science, Queensland Government, 2018).

#### *Cálculo del Índice de Calidad del Agua (ICA).*

El ICA final se calculó sumando los subíndices ponderados de cada variable. El valor final permitió clasificar el agua en categorías de calidad, facilitando la interpretación de los resultados en términos del impacto sobre los ecosistemas acuáticos.

## **2. Objetivo: Evaluar la sostenibilidad del sistema dinámico en el área de influencia del embalse Mancilla.**

En este objetivo, se consideraron las fases 2 hasta la 5, para evaluar la sostenibilidad. En la Fase 2 se llevó a cabo la construcción de un marco de análisis de la sostenibilidad. Por lo que fue necesario la identificación de los criterios que influyen sobre esa sostenibilidad entre los sistemas productivos y la calidad del embalse, se requirió establecer unos atributos y unas dimensiones, las cuales nos permiten diseñar una matriz para obtener información consensuada entre los productores, que son las aspiraciones que ellos consideran pertinentes para la

construcción de un concepto para la agricultura sostenible (Acevedo, et al., 2013). A continuación, se puede observar la matriz que se empleó, en la Figura 9.

### Figura 9.

#### *Matriz de análisis de la sostenibilidad*

Tabla 6.1. Marco de análisis para la sustentabilidad de la agricultura					
Dimensión	Productiva	Ambiental	Social	Cultural	Económica
Atributo					
Productividad					
Seguridad					
Equidad					
Aceptabilidad					
Autogestión					

El Marco para el análisis de sustentabilidad consiste en una disgregación del sistema productivo a partir del análisis de las dimensiones y atributos para la sustentabilidad.  
Por: los autores, 2012; adaptada de Hünne Meyer, De-Camino y Müller (1997).

*Nota.* Acevedo, et al., 2013.

### Figura 10.

*Obtención de la información para la construcción del marco de análisis de sostenibilidad.*



En la fase 3, se tomó como referencia la matriz previamente elaborada, considerando tanto la percepción de los agricultores como las necesidades más urgentes para mejorar la sostenibilidad del sistema productivo. A cada aspiración se le asignaron valores de prioridad, los cuales, al ser consensuados por los actores locales, se establecen como factores clave para determinar la sostenibilidad. Estos factores sirvieron de base para desarrollar los indicadores en la fase siguiente (Acevedo et al., 2013).

Cabe destacar que los valores de priorización asignados a las aspiraciones fueron iguales, concluyendo que todos los indicadores poseen la misma importancia en la sostenibilidad del sistema productivo. Por ello, se les otorgó un valor uniforme de uno (1). Sin embargo, para facilitar la integración y evitar redundancias, se redujo el número de aspiraciones. En este proceso, ninguna fue eliminada; en cambio, aquellas que resultaron similares o pudieron ser abordadas mediante los mismos indicadores fueron agrupadas. Esta estrategia permitió una mejor organización y simplificación en la construcción de los indicadores en la fase subsiguiente (Acevedo et al., 2013).

En la fase 4, se seleccionó el conjunto específico de aspiraciones de la fase tres, como base para la creación de indicadores de sostenibilidad, los cuales se diseñaron para ser precisos, cuantificables y representativos. Cada aspiración se convirtió en el punto de partida para un análisis detallado que permitió definir lo que realmente se esperaba de ese criterio. A partir de este análisis, se estableció tanto el concepto como el nombre del indicador, procurando que fueran claros, concretos y que representaran fielmente la aspiración. Además, se definió una escala estandarizada para medir cada indicador de manera objetiva.

Los indicadores fueron sometidos a revisiones rigurosas para garantizar que evaluaran de manera efectiva lo manifestado por los agricultores en las aspiraciones, asegurando así su

pertinencia para las condiciones regionales. Estas revisiones también verificaron que los métodos de evaluación fueran claros y coherentes, contribuyendo a un conjunto de indicadores adecuados para medir la sostenibilidad del sistema productivo de forma consistente y precisa (Acevedo et al., 2013).

En la fase 5, se llevó a cabo la medición de los indicadores construidos en la fase anterior, como parte de la evaluación de la sostenibilidad en la finca establecida. Se elaboró un instrumento de toma de datos que contenía la información clave del productor y de la finca, así como el listado de todos los indicadores seleccionados con sus respectivas escalas de medición (Acevedo et al., 2013).

### **3. Objetivo: Integrar la influencia de los modelos de producción agropecuaria en el estado de la calidad de agua del embalse de Mancilla.**

En la fase 6, se llevó a cabo un análisis de los resultados y se creó un índice de sostenibilidad. Se realizó una comparación para evaluar el nivel de sostenibilidad de la finca, considerando la importancia relativa de cada indicador. Se calculó un Índice de Sostenibilidad (IS) a nivel de finca con el promedio ponderado de los valores que se recogieron de la evaluación de cada indicador, pues en este caso, todos los indicadores contribuyeron de igual manera a la sostenibilidad y por ende se les dio el mismo valor de importancia (uno) (Acevedo et al., 2013).

En la fase 7, conocida como "Planeación de acciones de mejora", se inició un proceso interactivo de evaluación, reflexión y acción a partir de los resultados obtenidos en la evaluación de sostenibilidad en la finca. Se identificaron las principales debilidades y avances, lo que permitió

desarrollar nuevos planes de trabajo para mejorar el estado general de sostenibilidad. Se establecieron acciones específicas para mejorar el nivel de expresión de cada uno de los indicadores en general y de los de más bajo nivel en particular. Además, se revaluaron las prioridades de apoyo del proyecto, poniendo mayor atención en el desarrollo de aspectos de la sostenibilidad que evidenciaron baja expresión como resultado de la evaluación realizada en la finca (Acevedo et al., 2013).

## **RESULTADOS Y ANÁLISIS**

### **1. Objetivo: Caracterizar el sistema dinámico presente en el área de influencia del embalse Mancilla.**

Para caracterizar el sistema, se realizó una clasificación de las coberturas de la tierra y un análisis de los medios pendientes en la zona de estudio. Además, se llevó a cabo un análisis de suelo, cuyos resultados se presentarán mediante un Índice de Factibilidad del Suelo (IFS), con el objetivo de evaluar el estado del sistema productivo. Posteriormente, se realizó un análisis de la calidad del agua del embalse Mancilla, complementado con información bibliográfica sobre el Índice de Estado Trófico del embalse. Finalmente, se promoverá una evaluación entre las características del suelo y los resultados del análisis del agua, con el propósito de determinar el nivel de influencia de las actividades agrícolas en la calidad del agua del embalse Mancilla, como se muestra a continuación:

#### **FASE 1: Caracterización de los sistemas productivos.**

##### **\* Clasificación de las coberturas de la tierra:**

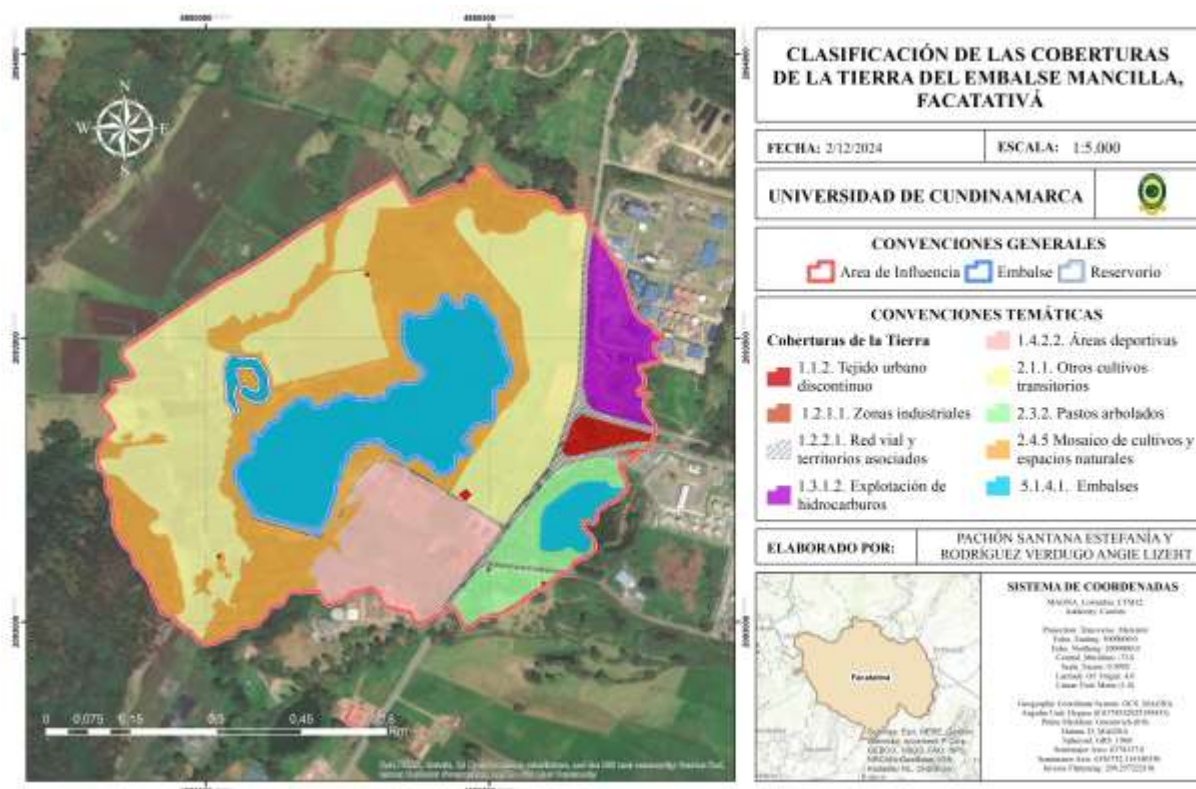
De acuerdo con los datos obtenidos, la cobertura predominante en el área de estudio corresponde a los otros cultivos transitorios (2.1.1), representando el 35.26% de la superficie total. Esto refleja el predominio de actividades agrícolas en la zona. Le sigue mosaico de cultivos y espacios naturales (2.4.5) con un 24.98%, destacando una presencia importante de agricultura mixta en la región. La tercera cobertura más extensa es la red vial y territorios asociados (1.2.2.1), con un 16.98%, lo que indica una infraestructura significativa, posiblemente relacionada con el

acceso al embalse y a zonas de actividad industrial o residencial. Este análisis destaca la diversidad de usos del suelo y su relación con las dinámicas económicas y ambientales de la región (

Figura 11 y Tabla 11).

**Figura 11.**

*Mapa de la clasificación de las coberturas de la tierra del embalse Mancilla, Facatativá.*



**Tabla 11.**

*Clasificación de coberturas de la tierra en el área de estudio*

COBERTURA DE LA TIERRA	PORCENTAJE
Otros cultivos transitorios	35.26%
Mosaico de cultivos y espacios naturales	24.98%
Red vial y territorios asociados	16.98%

<b>COBERTURA DE LA TIERRA</b>	<b>PORCENTAJE</b>
Pastos arbolados	9.19%
Embalses	4.86%
Zonas industriales	4.45%
Tejido urbano discontinuo	2.91%
Áreas deportivas	1.32%
Explotación de hidrocarburos	0.07%

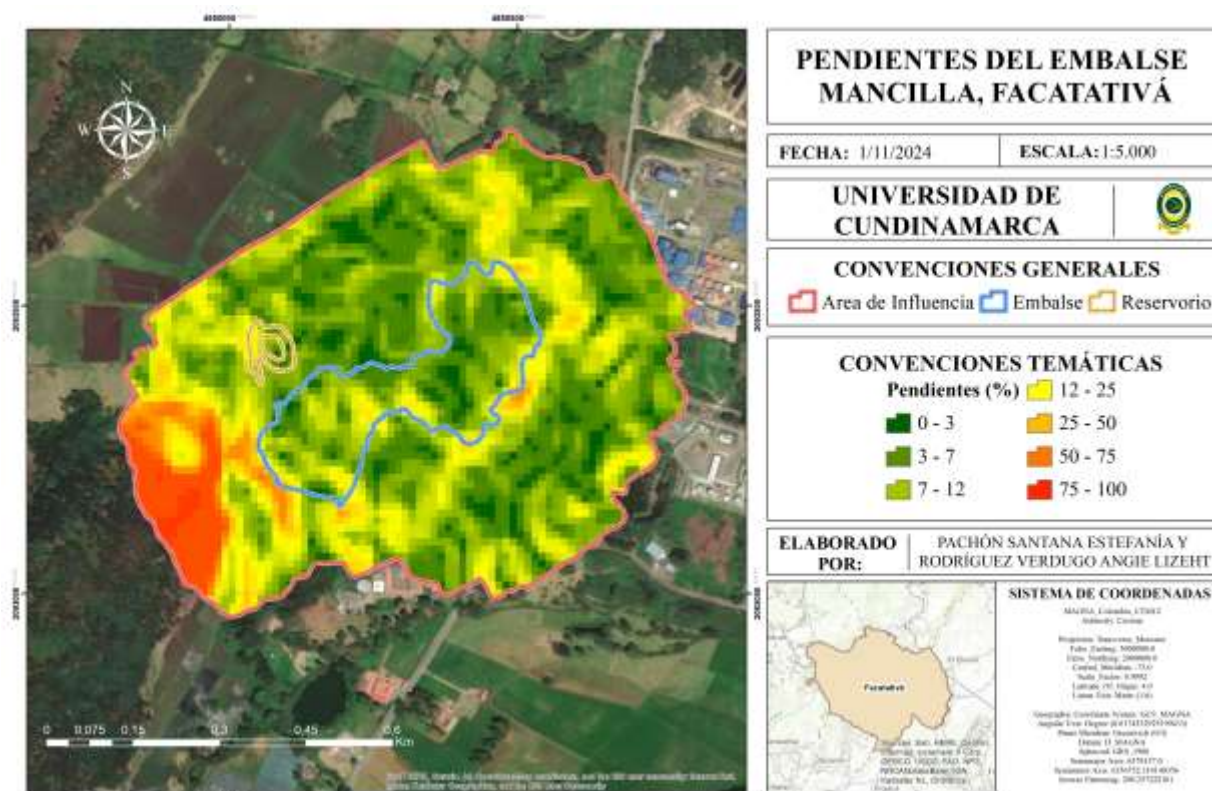
De acuerdo con el recorrido en campo, se determinó que la mayor parte del área está cubierta por cultivos transitorios, una clasificación que coincide con lo establecido en el Plan de Ordenamiento Territorial (POT) actualizado en 2022 por la Alcaldía Municipal de Facatativá. Este hecho refleja que el uso actual del suelo está alineado con la planificación territorial, lo cual es relevante para interpretar las posibles incidencias de estas actividades en la calidad del agua del embalse Mancilla. Dado que las áreas de cultivo transitorio son proyectadas como uso predominante en esta zona según el POT, las actividades agrícolas no presentan incompatibilidades normativas, lo que sugiere que las alteraciones en la calidad del agua están relacionadas directamente con el manejo inherente a estas prácticas agrícolas.

**\* Pendiente media del área de estudio:**

La pendiente media de la cuenca para el área de estudio delimitada es del 5,51%, lo que indica que presenta una ligera inclinación. La Figura 12 ilustra la distribución de las pendientes en la unidad hidrológica analizada.

**Figura 12.**

*Pendientes en la UHA del embalse Mancilla, Facatativá.*



Asimismo, se presentan las pendientes medias de cada uno de los cultivos evaluados en el sistema y de las zonas con mayor pendiente del área de estudio, como son: Fresa, maíz y papa (Tabla 12). En la

Figura 13 se muestra la distribución de las pendientes en cada cultivo. Aunque las pendientes presentes en los cultivos alrededor del embalse Mancilla no son extremadamente elevadas, el cultivo de fresa, con una pendiente media de 19.88%, podría tener un impacto considerable en la calidad del agua. Estas pendientes, aunque moderadas, facilitan la escorrentía y el transporte de nutrientes, sedimentos y posibles contaminantes hacia el embalse, especialmente si se aplican fertilizantes y pesticidas en estas zonas inclinadas. Este aporte de nutrientes, principalmente nitrógeno y fósforo, puede desencadenar procesos de eutrofización en el embalse, lo cual afectaría la biodiversidad acuática y la calidad del agua (Camargo & Alonso, 2006).

Por su parte, los cultivos de maíz y papa, con pendientes medias de 10.83% y 6.57% respectivamente, representan un riesgo de escorrentía más bajo. Sin embargo, el cultivo de fresa requiere especial atención debido a su pendiente relativamente mayor. La presencia de estas inclinaciones incrementa el potencial de que los contaminantes alcancen el embalse en episodios de lluvias, ya que el agua arrastra los residuos agrícolas hacia el cuerpo de agua (Herrera, et al., 2021).

**Tabla 12.**

*Pendiente media (%) de los cultivos presentes en el embalse Mancilla, Facatativá*

<b>TIPO DE CULTIVO</b>	<b>PENDIENTE MEDIA (%)</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
<b>Fresa</b>	19.88	Ligeramente escarpado
<b>Maíz</b>	10.83	Moderadamente inclinado
<b>Papa</b>	6.57	Ligeramente inclinado

**Figura 13.**

*Pendientes medias de los cultivos presentes en el del embalse Mancilla, Facatativá.*



**Tabla 13.**

*Resultados de las características de calidad del suelo para el cultivo de papa.*

<b>CARACTERÍSTICAS DE CALIDAD DE SUELO</b>	<b>PAPA</b>
<b>Físicas</b>	
<b>Textura</b>	Franco arenoso Franco Franco arenoso
<b>Color</b>	10YR 2/1 Black 10YR 2/1 Black 10R 2.5/1 Reddish black
<b>Porosidad (%)</b>	64,0928131
<b>Compactación</b>	Normal
<b>Retención de humedad (%)</b>	15.00
<b>Erosión</b>	Tipo: Erosión hídrica Clase: Laminar Grado: Ligera
<b>Químicas</b>	
<b>pH</b>	5
<b>Materia orgánica (MO) %</b>	23,94
<b>Conductividad eléctrica (dS/m)</b>	1,17
<b>Disponibilidad de nutrientes</b>	
<b>Amonio (N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) (ppm o mg/kg)</b>	12,5
<b>Nitrato (N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) (ppm o mg/kg)</b>	97,3
<b>Nitrógeno (N-Min) (ppm o mg/kg)</b>	109,8
<b>Fósforo (P) (ppm o mg/kg)</b>	15
<b>Potasio (K) (ppm o mg/kg)</b>	435

En la Tabla 7, se observa que el suelo del cultivo de papa presenta una **textura** franco arenosa, la cual es óptima para el crecimiento de esta planta (Molina, Mairena Santos & Aguilar, 2004). El **color** del suelo se clasifica como 10YR 2/1 (Black), donde el tono 10YR indica una mezcla de amarillo (Y) y rojo amarillento (YR), con un valor de luminosidad 2 (color muy oscuro) y un croma 1 (saturación neutra o tenue), lo cual sugiere una coloración cercana al negro. Este tipo

de coloración es común en suelos ricos en materia orgánica o humus. También se identificó otro color, 10R 2.5/1 (Reddish Black), que indica una tonalidad rojiza debido a la presencia de óxidos de hierro y manganeso, también típica de suelos con alto contenido de materia orgánica (Reyes, 2021). Este tipo de color puede señalar características de drenaje y aireación específicas, como suelos encharcados o con alta actividad biológica (Reyes, 2021).

En cuanto a la **porosidad**, según Cairo (1995), estos suelos presentan una porosidad elevada (64.09%), dentro del rango óptimo de 55% a 65%, atribuible a su textura predominantemente franca. Los resultados del análisis de color también sugieren un contenido alto de materia orgánica, que contribuye positivamente a la porosidad y al drenaje del suelo. La **compactación** se mantiene en niveles normales, equilibrando resistencia estructural y permeabilidad adecuada, lo cual facilita el paso de aire y agua en el suelo (Ibáñez, 2022). Respecto a la **retención de humedad**, los suelos franco arenosos (15%) tienden a retener menos agua debido a sus partículas más grandes en comparación con suelos francos (Gisbert et al., 2010).

Sobre la **erosión**, el cultivo presenta erosión hídrica clasificada como Clase: Laminar y Grado: Liger, información obtenida del Portal de Datos Abiertos del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y del shape de zonificación de degradación de suelos (2022), realizado por la Corporación Autónoma Regional (CAR). Según el IDEAM y U.D.C.A. (2015), la erosión hídrica es un proceso que implica la pérdida de la capa superficial del suelo debido a la disgregación y transporte de partículas por la acción del agua. En el caso de la erosión laminar, esto implica la remoción relativamente uniforme del suelo de un área, sin el desarrollo de canales de agua visibles, comúnmente referida como "calvas de erosión".

Este tipo de erosión está asociado con la erosión en "entresurcos" o protosurcos; aunque algunos autores destacan diferencias en su morfología, para los propósitos de este protocolo se consideran dentro de la misma clase. El grado ligero indica que existe alguna evidencia de daño en los horizontes superficiales del suelo, caracterizado por un adelgazamiento uniforme de la capa de suelo. En este caso, no se observan surcos visibles ni inicios de cárcavas. La pérdida de suelo puede alcanzar entre el 25% y el 50% del horizonte A, dependiendo de su espesor, aunque las funciones bióticas originales permanecen intactas.

Para las propiedades químicas, los suelos de cultivo de papa son predominantemente ácidos, con un rango de pH de 4.5 a 5.5. La descomposición de la materia orgánica y la aplicación de fertilizantes amoniacales tienden a incrementar la acidez del suelo (reducción del pH). La acidez en el suelo de la finca evaluada (**pH 5**) está en el rango normal para este cultivo y se debe a la abundancia de hidrogeniones y aluminio, que desplazan nutrientes esenciales como calcio, magnesio, sodio y potasio, los cuales pueden ser eliminados fácilmente por lluvias o riego (Herrera Heredia et al., 2000; Soledad, 1994).

El contenido de **materia orgánica** se encuentra en un nivel elevado, superior al rango de 3.5% a 6% (Molina et al., 2004). Esto podría estimular un crecimiento excesivo del follaje, lo cual reduciría la calidad y el rendimiento de los tubérculos (Herrera Heredia et al., 2000).

La **conductividad eléctrica** (1.17 dS/m) también se halla en el rango óptimo de 1-4 dS/m; valores superiores podrían indicar problemas de salinidad y afectar la producción de papa (Molina et al., 2004).

Los niveles de **nitrógeno** mineral, en sus formas de nitrato y amonio, alcanzan 109.8 ppm, superando el rango óptimo de 50-75 ppm recomendado por el ICA (1992). El nitrógeno es crucial

para el crecimiento de las plantas y la síntesis de clorofila; su deficiencia puede reducir la fotosíntesis, generando hojas de color verde pálido y causando senescencia temprana (Herrera Heredia et al., 2000). No obstante, el exceso de nitrógeno estimula el crecimiento de hojas y tallos en detrimento de la formación de tubérculos, lo que resulta en plantas vigorosas, pero menos productivas en términos de cosecha de tubérculos. Además, las concentraciones elevadas de nitrato pueden afectar los ecosistemas cercanos debido a su lixiviación, incrementando el riesgo de eutrofización en cuerpos de agua (Sullivan et al., 2021).

El **fósforo**, en cambio, presenta concentraciones bajas respecto al rango óptimo de 40-60 ppm (ICA, 1992). Este nutriente es indispensable para el crecimiento de raíces y tubérculos; su deficiencia provoca rigidez en la planta y retraso en la madurez, reduciendo la producción de papa (Herrera Heredia et al., 2000).

Para el **potasio (K)**, los valores óptimos oscilan entre 117-234 ppm; sin embargo, se registró una concentración de 435 ppm, lo cual es elevado (ICA, 1992). La deficiencia de potasio se manifiesta en un tono verde oscuro, necrosis en hojas y aparición de manchas en los tubérculos y una concentración alta de este elemento puede afectar cuerpos de agua cercanos por lixiviación (Herrera Heredia et al., 2000).

En la Tabla 14, se muestra las características de la calidad de suelos del cultivo de maíz.

#### **Tabla 14.**

*Resultados de las características de calidad del suelo en cultivo de maíz.*

<b>CARACTERÍSTICAS DE CALIDAD DE SUELO</b>	<b>MAÍZ</b>
<b>Físicas</b>	
<b>Textura</b>	Franco Franco Franco arenoso
<b>Color</b>	7.5YR 3/1 Very Dark Gray 7.5YR 2.5/1 Black 7.5YR 2.5/1 Black
<b>Porosidad (%)</b>	58,6454047
<b>Compactación</b>	Normal
<b>Retención de humedad (%)</b>	20.00
<b>Erosión</b>	Tipo: Erosión hídrica Clase: Laminar Grado: Ligera
<b>Químicas</b>	
<b>pH</b>	4,9
<b>Materia orgánica (MO) %</b>	27,75
<b>Conductividad eléctrica (dS/m)</b>	0,5334567890
<b>Disponibilidad de nutrientes</b>	
<b>Amonio (N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) (ppm o mg/kg)</b>	13,3
<b>Nitrato (N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) (ppm o mg/kg)</b>	51,9
<b>Nitrógeno (N-Min) (ppm o mg/kg)</b>	65,1
<b>Fósforo (P) (ppm o mg/kg)</b>	11
<b>Potasio (K) (ppm o mg/kg)</b>	347

El cultivo de maíz requiere suelos profundos y fértiles con una **textura** franca, como los de la finca evaluada (FENALCE, 2011). El **color** de la muestra, clasificado como "7.5YR 3/1 Very Dark Gray," indica una mezcla de tonos amarillos y rojos, sugiriendo una leve tonalidad rojiza en el gris oscuro del suelo. Este tono oscuro y grisáceo suele asociarse con suelos ricos en materia orgánica, con condiciones persistentes de humedad o sujetos a procesos de reducción, donde la falta de oxígeno disminuye la oxidación de minerales como el hierro (Schaetzl & Anderson, 2005). Otro color observado, "7.5YR 2.5/1 Black," es indicativo de un alto contenido de materia orgánica,

lo que oscurece el suelo y, en casos de drenaje deficiente, propicia la acumulación de materia orgánica y la reducción de minerales en ambientes con bajo oxígeno (Schaetzl & Anderson, 2005). En cuanto a la **porosidad, compactación y erosión**, los resultados son similares a los obtenidos en cultivos de papa. La muestra tiene una **retención de humedad** del 20 %, superior a la del cultivo de papa, lo cual coincide con su textura (Gisbert, Ibáñez & Moreno, 2010).

En términos químicos, el **pH** del suelo (4.9) no se encuentra en el rango óptimo (5.0–7.5), lo que puede generar toxicidad por aluminio y manganeso, y reduce la disponibilidad de nutrientes como fósforo, calcio, magnesio y molibdeno debido a la inmovilización de estos en el suelo (FENALCE, 2011). La finca evaluada presenta un contenido de **materia orgánica** del 27 %, que supera el rango óptimo de 5–10 % sugerido por el ICA (1992), lo cual libera nutrientes como nitrógeno y potasio durante su descomposición. Sin embargo, un exceso de materia orgánica puede provocar drenaje deficiente y encharcamiento, además de disminuir el pH del suelo a medida que se liberan ácidos orgánicos.

La **conductividad eléctrica** (CE) del suelo debe ser inferior a 2 dS/m para un desarrollo adecuado del cultivo, y en esta muestra es de 0.5 dS/m, lo cual se considera óptimo (Siachoque et al., 2023). Un exceso de sales afectaría negativamente el desarrollo del maíz al influir en el pH y la disponibilidad de nutrientes, dificultando la absorción de iones como potasio, nitratos, fosfatos y calcio; además, puede inhibir el desarrollo radicular y limitar el crecimiento de las plantas (Siachoque et al., 2023).

Respecto a la disponibilidad de nutrientes, el contenido de **nitrógeno** en el suelo es de 65.1 ppm, superando el rango óptimo de 23–35 ppm para el maíz (ICA, 1992). Un nivel elevado de nitrógeno puede fomentar un desarrollo excesivo de hojas y tallos a expensas de la formación de

mazorcas, además de presentar el mismo riesgo ambiental que en el cultivo de papa debido a la lixiviación de nitratos. El **fósforo**, con un nivel de 11 ppm, está por debajo del rango óptimo de 20–40 ppm, lo cual puede deberse a la acidez del suelo. Esta deficiencia limita el desarrollo de las raíces y el tamaño de los granos, afectando el rendimiento y la capacidad de la planta para realizar la fotosíntesis y almacenar energía (FENALCE, 2011; ICA, 1992).

Finalmente, el **potasio** se encuentra en 347 ppm, excediendo el rango óptimo de 78–156 ppm (ICA, 1992). Este exceso puede causar deficiencias secundarias, ya que la planta absorbe potasio en detrimento de otros nutrientes esenciales, afectando el desarrollo de raíces y hojas. Esta acumulación puede deberse al uso de fertilizantes ricos en potasio (FENALCE, 2011).

En la Tabla 15 se muestra las características de la calidad de suelos del cultivo de fresa.

**Tabla 15.**

*Resultados de las características de calidad del suelo en cultivo de fresa.*

<b>CARACTERÍSTICAS DE CALIDAD DE SUELO</b>	<b>FRESA</b>
	<b>Físicas</b>
<b>Textura</b>	Franco Franco Franco
<b>Color</b>	10YR 2/1 Black 10YR 2/1 Black 10YR 2/1 Black
<b>Porosidad (%)</b>	60,18518519
<b>Compactación</b>	Normal
<b>Retención de humedad (%)</b>	25.00
<b>Erosión</b>	Tipo: Erosión hídrica Clase: Laminar Grado: Ligera

CARACTERÍSTICAS DE CALIDAD DE SUELO	FRESA
<b>Químicas</b>	
<b>pH</b>	4,8
<b>Materia orgánica (MO) %</b>	30,92
<b>Conductividad eléctrica (dS/m)</b>	0,43
<b>Disponibilidad de nutrientes</b>	
<b>Amonio (N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) (ppm o mg/kg)</b>	16,1
<b>Nitrato (N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) (ppm o mg/kg)</b>	44,4
<b>Nitrógeno (N-Min) (ppm o mg/kg)</b>	60,5
<b>Fósforo (P) (ppm o mg/kg)</b>	5
<b>Potasio (K) (ppm o mg/kg)</b>	282

La **textura** ideal para los suelos en cultivos de fresa es arenosa o franco arenosa, ligeramente ácida, suelta, aireada y bien drenada, ya que los suelos pesados limitan el desarrollo radicular (Cámara de Comercio de Bogotá, Vicepresidencia de Fortalecimiento Empresarial, 2015). En el caso de la finca evaluada, la textura del suelo es franca (tabla 9). El **color** del suelo, clasificado como 10YR 2/1 (Black), sugiere una tonalidad muy oscura y neutra, cercana al negro. Este tipo de color es común en suelos ricos en materia orgánica o humus (Schaeztl & Anderson, 2005).

En cuanto a **porosidad, compactación y erosión**, los resultados obtenidos son similares a los del cultivo de papa. La **retención de humedad**, correspondiente al 25% según la textura de la muestra, se encuentra dentro del rango óptimo (Gisbert, Ibáñez, & Moreno, 2010).

Para las propiedades químicas, el **pH** óptimo del suelo para el cultivo de fresa está entre 5.5 y 6.5 (Cámara de Comercio de Bogotá, Vicepresidencia de Fortalecimiento Empresarial, 2015). Sin embargo, en este cultivo el pH es de 4.8, indicando un suelo ácido, lo cual puede limitar la disponibilidad de nutrientes y aumentar la toxicidad.

El contenido de **materia orgánica** en el suelo debe situarse entre el 4% y el 6%, pero en este caso es del 30.92%. Un nivel tan alto de materia orgánica puede llevar a una acumulación excesiva de nutrientes, lo que favorece el crecimiento de follaje a expensas de flores y frutos, afectando la producción y calidad de las fresas. Además, la descomposición de la materia orgánica libera ácidos que pueden bajar aún más el pH del suelo (Cámara de Comercio de Bogotá, Vicepresidencia de Fortalecimiento Empresarial, 2015).

La **conductividad eléctrica** óptima se sitúa entre 0.75 y 1.5 dS/m (Ministerio de Agricultura y Ganadería, Servicio Fitosanitario del Estado, & Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, 2017). Con un valor de 0.43 dS/m, este suelo está por debajo del rango óptimo, lo cual indica una baja disponibilidad de nutrientes, posiblemente causada por lluvias intensas o riego excesivo, que pueden provocar lixiviación en suelos arenosos, reduciendo la concentración de iones y, por ende, la conductividad.

Respecto a los nutrientes, el **nitrógeno** asimilable (amonio y nitrato) debería estar entre 100 y 200 ppm, pero el valor en este suelo es de 60.5 ppm, lo que indica deficiencia. El **fósforo** también está por debajo del rango óptimo, con un valor de 5 ppm frente al rango ideal de 20-30 ppm. Estas condiciones pueden ser consecuencia del pH ácido del suelo, ya que en suelos ácidos, el fósforo se fija en formas insolubles y la actividad microbiana que transforma el nitrógeno orgánico en formas asimilables se ve reducida. La baja CE sugiere además una baja concentración de nutrientes solubles, lo que podría ser un síntoma de escasa fertilización o lixiviación (Cámara de Comercio de Bogotá, Vicepresidencia de Fortalecimiento Empresarial, 2015).

Por último, el **potasio** está por encima del rango óptimo de 120-180 ppm, con un valor de 282 ppm, posiblemente debido al uso de fertilizantes, a la liberación de potasio por la materia

orgánica, o al riego con aguas ricas en potasio. Esta concentración elevada puede ocasionar problemas tanto en la planta como en el suelo (Ministerio de Agricultura y Ganadería, Servicio Fitosanitario del Estado, & Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, 2017).

### **Índice de factibilidad del suelo (IFS):**

Para interpretar estos resultados de manera más sencilla y reconocer la calidad del suelo para cada cultivo, se formulará un Índice de Factibilidad del Suelo (IFS) que incluirá ciertas características evaluadas. A estas características se les asignarán categorías con una valoración numérica. Se establecen rangos donde los valores cercanos a estos óptimos reciben una puntuación de 4, y los más alejados, una puntuación de 1 (Segura, A. Torres, A. 2024).

A continuación, se muestra los valores de referencia usados para el cálculo del índice IFS para el cultivo de papa.

**Tabla 16.**

*Valores de referencia usados para el cálculo del índice IFS para el cultivo de papa.*

<b>CARACTERÍSTICA</b>	<b>RANGO</b>	<b>CATEGORÍA</b>	<b>VALORACIÓN</b>
<b>Textura</b>	Franca	Perfecta	4
	Franco-arcillosa	Aceptable	3
	Limoso	Regular	2
	Arcilloso	No apta	1
<b>Porosidad (%)</b>	55% - 65%	Perfecta	4
	65% - 70%	Aceptable	3
	45% - 55%	Regular	2
	<45% o >70%	No apta	1
<b>Ph</b>	4,5 – 5,5	Perfecto	4
	5,5 – 6,5	Aceptable	3
	3,0 – 4,5	Desfavorable	2
	<3,0 o >6,5	No apto	1

CARACTERÍSTICA	RANGO	CATEGORÍA	VALORACIÓN
<b>Materia orgánica (MO) %</b>	3,5 - 6	Perfecto	4
	6 - 10	Aceptable	3
	2 - 3,5	Regular	2
	<2 o >10	No apto	1
<b>Conductividad eléctrica (dS/m)</b>	1 - 4	Perfecta	4
	4 - 5	Aceptable	3
	0,5 - 1	Regular	2
	<0,5 o >5	No apta	1
<b>Nitrógeno (N-Min) (ppm o mg/kg)</b>	50 - 75	Perfecto	4
	40 - 50	Aceptable	3
	75 - 85	Regular	2
	<40 o >85	No apto	1
<b>Fósforo (P) (ppm o mg/kg)</b>	40 - 60	Perfecto	4
	35 - 40	Aceptable	3
	60 - 65	Regular	2
	<35 o >65	No apto	1
<b>Potasio (K) (ppm o mg/kg)</b>	117 - 234	Perfecto	4
	90 - 117	Aceptable	3
	234 - 300	Regular	2
	<90 o >300	No apto	1
<b>Factibilidad del suelo para cultivo de papa</b>			
<b>Suelo</b>	Factible		3 - 4
	Aceptable		2 - 3
	Desfavorable		1 - 2

A continuación, en la Tabla 17, se muestra los valores de referencia usados para el cálculo del índice IFS para el cultivo de maíz.

**Tabla 17.**

*Valores de referencia usados para el cálculo del índice IFS para el cultivo de maíz.*

CARACTERÍSTICA	RANGO	CATEGORÍA	VALORACIÓN
<b>Textura</b>	Franca	Perfecta	4
	Franco-arcillosa	Aceptable	3
	Limoso	Regular	2
	Arcilloso	No apta	1
<b>Porosidad (%)</b>	55% - 65%	Perfecta	4

CARACTERÍSTICA	RANGO	CATEGORÍA	VALORACIÓN
	65% - 70%	Aceptable	3
	45% - 55%	Regular	2
	<45% o >70%	No apta	1
<b>pH</b>	5,0 – 7,5	Perfecto	4
	4,5 – 5,0	Aceptable	3
	7,5 – 8,0	Desfavorable	2
	<4,5 o >8,0	No apto	1
<b>Materia orgánica (MO) %</b>	5 - 10	Perfecto	4
	4 - 5	Aceptable	3
	10 – 11	Regular	2
	<4 o >11	No apto	1
<b>Conductividad eléctrica (dS/m)</b>	1 - 2	Perfecta	4
	0,5 - 1	Aceptable	3
	2 - 3	Regular	2
	<0,5 o >3	No apta	1
<b>Nitrógeno (N-Min) (ppm o mg/kg)</b>	23 - 35	Perfecto	4
	35 - 65	Aceptable	3
	18 - 23	Regular	2
	<18 o >65	No apto	1
<b>Fósforo (P) (ppm o mg/kg)</b>	20 - 40	Perfecto	4
	10 - 20	Aceptable	3
	40 - 50	Regular	2
	<10 o >50	No apto	1
<b>Potasio (K) (ppm o mg/kg)</b>	78 - 156	Perfecto	4
	65 - 78	Aceptable	3
	156 - 200	Regular	2
	<65 o >200	No apto	1
<b>Factibilidad del suelo para cultivo de maíz</b>			
<b>Suelo</b>	Factible		3 - 4
	Aceptable		2 - 3
	Desfavorable		1 - 2

A continuación, en la Tabla 18 se muestra los valores de referencia usados para el cálculo del índice IFS para el cultivo de fresa.

**Tabla 18.**

*Valores de referencia usados para el cálculo del índice IFS para el cultivo de fresa*

CARACTERÍSTICA	RANGO	CATEGORÍA	VALORACIÓN
<b>Textura</b>	Franca- arenosa	Perfecta	4
	Franco	Aceptable	3
	Franco-arcillosa	Regular	2
	Arcilloso	No apta	1
<b>Porosidad (%)</b>	55% - 65%	Perfecta	4
	65% - 70%	Aceptable	3
	45% - 55%	Regular	2
	<45% o >70%	No apta	1
<b>pH</b>	5,5 – 6,5	Perfecto	4
	4,5 – 5,5	Aceptable	3
	6,5 – 7,0	Desfavorable	2
	<4,5 o >7,0	No apto	1
<b>Materia orgánica (MO) %</b>	4 - 6	Perfecto	4
	2 - 4	Aceptable	3
	6 – 8	Regular	2
	<2 o >8	No apto	1
<b>Conductividad eléctrica (dS/m)</b>	0,75 – 1,5	Perfecta	4
	0,4 – 0,75	Aceptable	3
	1,5 - 2	Regular	2
	<0,4 o >2	No apta	1
<b>Nitrógeno (N-Min) (ppm o mg/kg)</b>	100 - 200	Perfecto	4
	50 - 100	Aceptable	3
	200 - 220	Regular	2
	<50 o >220	No apto	1
<b>Fósforo (P) (ppm o mg/kg)</b>	20 - 30	Perfecto	4
	10 - 20	Aceptable	3
	30 - 40	Regular	2
	<10 o >40	No apto	1
<b>Potasio (K) (ppm o mg/kg)</b>	120 - 180	Perfecto	4
	180 - 290	Aceptable	3
	100 - 120	Regular	2
	<100 o >290	No apto	1
<b>Factibilidad del suelo para cultivo de fresa</b>			
<b>Suelo</b>	Factible		3 - 4
	Aceptable		2 - 3
	Desfavorable		1 - 2

Se evaluaron un total de ocho características, a cada una de las cuales se le asignará un porcentaje según su relevancia: pH (30%), materia orgánica (20%), nitrógeno (10%), fósforo

(10%), potasio (10%), conductividad eléctrica (CE) (10%), textura (5%) y porosidad (5%). De este modo que:

$$IFS = (\text{pH} \times 0,3) + (\text{MO} \times 0,2) + (\text{N} \times 0,1) + (\text{P} \times 0,1) + (\text{K} \times 0,1) + (\text{CE} \times 0,1) + (\text{T} \times 0,05) + (\text{PA} \times 0,05)$$

De acuerdo con esta información, en la Tabla 19, se evidenció que los factores físicos y químicos de cada uno de los cultivos (papa, maíz y fresa) se encontraron en condiciones aceptables para su producción, dado que el Índice de Factibilidad del Suelo para los tres cultivos se sitúa en el rango de 2 a 3 (aceptable). Esto refleja una combinación favorable de características como porosidad, textura, conductividad eléctrica y pH, en los cuales se obtuvo el puntaje más alto. Sin embargo, otras características como potasio, fósforo, nitrógeno y materia orgánica registraron un puntaje menor, lo que indica que estos factores afectan la estabilidad del suelo. Esto subraya la necesidad de intervenciones específicas para mejorar la sostenibilidad y la productividad de cada uno de los cultivos.

**Tabla 19.**

*Cálculo del índice de factibilidad del suelo para cada cultivo.*

CARACTERÍSTICA	CULTIVO		
	PAPA	MAÍZ	FRESA
pH	5	4,9	4,8
Valoración	4	3	3
Materia orgánica (%)	23,94	27,75	30,92
Valoración	1	1	1
Nitrógeno (N-Min) (ppm o mg/kg)	109,8	65,1	60,5
Valoración	1	1	3
Fósforo (P) (ppm o mg/kg)	15	11	5

CARACTERÍSTICA	CULTIVO		
	PAPA	MAÍZ	FRESA
Valoración	1	3	1
Potasio (K) (ppm o mg/kg)	435	347	282
Valoración	1	1	3
Conductividad eléctrica (dS/m)	1,17	0,5	0,43
Valoración	4	3	3
Textura	Franco	Franco	Franco
Valoración	4	4	3
Porosidad (%)	64,1	58,6	60,18
Valoración	4	4	4
IFS	2,5	2,3	2,45
CATEGORIA	Aceptable	Aceptable	Aceptable

#### Análisis de agua:

Para el análisis del agua, se recolectaron cinco muestras en cuatro periodos distintos. Todas las muestras fueron enviadas al laboratorio del acueducto, obteniéndose los resultados que se detallan en la Tabla 20.

**Tabla 20.**

*Resultados de los ensayos químicos con el agua del embalse Mancilla*

CARACTERÍSTICAS	RESULTADOS			
	22-ene-24	10-may-24	13-jun-24	19-jul-24
pH	7.40	7.86	7.13	6.80
Conductividad (µs/cm)	47.00	48.10	51.10	47.40
Fosfato (mg PO <sub>4</sub> /L)	0.71	0.12	0.09	2.61
Nitrito (mg NO <sub>2</sub> /L)	0.07	0.08	0.05	0.07
DQO (mg/L)	14,5	14,33	14,89	15,1
Oxígeno Disuelto (mg/l)	5,72	5,03	7,89	6,41

Los valores de pH registrados se encuentran dentro del rango adecuado para cuerpos de agua superficiales, lo que sugiere que el embalse mantiene condiciones químicas relativamente estables y no presenta una acidez o alcalinidad que afecte significativamente a la biota acuática (Boyd, 2015). Sin embargo, la leve acidificación observada en julio (pH 6.80) podría indicar alteraciones ambientales puntuales o posibles fuentes de contaminación que requieren seguimiento. Este descenso en el pH durante la temporada seca podría estar relacionado con la concentración de ciertos compuestos debido a la evaporación, así como con cambios en la actividad biológica del embalse a medida que disminuye el flujo de agua, lo cual es común en ecosistemas acuáticos con temporadas climáticas (Nienie, et al., 2017). En contraste, en la temporada de lluvias, el pH mostró una tendencia a la neutralización (8.00 en diciembre y 7.86 en mayo), probablemente debido a la dilución de sustancias ácidas en el aumento del volumen de agua (Dodds & Whiles, 2010). Monitorear de manera continua esta característica es crucial, ya que las condiciones de sequía pueden provocar fluctuaciones de pH que afecten a organismos sensibles a cambios en la acidez del agua (Roldán & Ramírez, 2008).

La conductividad eléctrica en el embalse osciló entre 47.00 y 51.70  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , reflejando un nivel bajo característico de cuerpos de agua dulce con limitada presencia de sales y iones disueltos, lo cual es favorable para mantener condiciones adecuadas de salinidad y biodiversidad en el ecosistema. Durante la temporada seca (junio y julio), se observó un incremento en la conductividad (51.70  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), posiblemente asociado al efecto de concentración por evaporación. Por otro lado, en mayo, el mes más lluvioso, la conductividad también mostró un valor elevado (48.10  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), probablemente debido al arrastre de minerales y sedimentos desde la cuenca (California State Water Resources Control Board, 2018). Aunque estas fluctuaciones son

estacionales y esperadas en cuerpos de agua superficiales, los valores registrados se mantienen dentro del rango característico de sistemas poco impactados, lo que sugiere un equilibrio favorable (Roldán & Ramírez, 2008).

En julio, el nivel de fosfato en el embalse se elevó (2.61 mg/L) en comparación con otros meses, particularmente durante la temporada seca. Este incremento puede estar relacionado con una concentración de nutrientes resultante de la menor cantidad de agua disponible, así como con posibles contribuciones de fuentes externas, como la escorrentía de la cuenca en meses anteriores (Roldán & Ramírez, 2008). Es probable que la acumulación de fosfatos en julio se deba al arrastre de nutrientes por lluvias intensas en mayo, ya que estas pueden transportar nutrientes desde zonas agrícolas o suelos erosionados hacia el embalse. Los niveles elevados de fosfatos en la temporada seca suponen un riesgo de eutrofización, dado que las condiciones de baja renovación de agua y temperaturas altas facilitan el crecimiento excesivo de algas (Ramos, 2018).

Los niveles de nitrito permanecieron bajos (0.06 - 0.08 mg/L), sin cambios significativos entre temporadas. La estabilidad en las concentraciones de nitrito a lo largo de todas las mediciones sugiere que esta característica no está fuertemente afectada por la estacionalidad, lo cual es positivo, ya que concentraciones bajas de nitrito son adecuadas para la salud del ecosistema acuático. Esto también sugiere una baja incidencia de contaminación orgánica que podría generar nitritos (Roldán & Ramírez, 2008).

La Demanda Química de Oxígeno (DQO) en el embalse se mantuvo en valores relativamente constantes, con un leve aumento en julio (15.10 mg/L) durante la temporada seca, probablemente debido a la concentración de compuestos orgánicos e inorgánicos por la menor renovación de agua. Aunque este parámetro refleja la influencia combinada de factores naturales y antrópicos, los valores registrados se encuentran dentro de rangos aceptables para cuerpos de agua superficiales similares, lo que sugiere que no hay una afectación crítica al ecosistema. Sin embargo, es importante monitorear este incremento, ya que podría reducir la disponibilidad de oxígeno disuelto si coincide con altos niveles de nutrientes que favorezcan la proliferación de algas (Márquez, et al., 2023; Roldán & Ramírez, 2008).

En junio, durante la temporada seca, los niveles de oxígeno disuelto son altos (7,89 mg/L), posiblemente debido a una menor entrada de materia orgánica y una mejor oxigenación superficial por exposición al aire. En contraste, en mayo, al inicio de la temporada de lluvias, los niveles disminuyen significativamente (5.03 mg/L), debido a la carga de nutrientes y materia orgánica arrastrada por las lluvias, lo que incrementa la demanda biológica de oxígeno y reduce su disponibilidad. Esto refleja un balance estacional influido por factores como la descomposición y la estratificación térmica, con riesgos potenciales para los organismos sensibles (Roldán & Ramírez, 2008).

A continuación, en la Tabla 21, se presentan los resultados del cálculo del ICA para evaluar la calidad del agua de corrientes de agua superficial.

**Tabla 21.**

*Resultados del cálculo del ICA para las muestras del embalse Mancilla.*

<b>FECHA</b>	<b>ICA</b>	<b>CLASIFICACIÓN</b>
<b>22-Ene-24</b>	0,7604	Acceptable
<b>10-May-24</b>	0,7398	Acceptable
<b>13-Jun-24</b>	0,7567	Acceptable
<b>19-Jul-24</b>	0,7606	Acceptable

El embalse Mancilla, construido en 2014, ha sido objeto de seguimiento constante para evaluar su Índice de Calidad del Agua (ICA), debido a su carácter relativamente reciente como infraestructura. Desde su construcción, el ICA se ha mantenido en una categoría "Acceptable", lo que indica que, pese a posibles factores externos y variaciones estacionales, el embalse ha logrado conservar una calidad de agua estable. Esta estabilidad en el ICA podría atribuirse a un manejo adecuado de la infraestructura y al control de posibles fuentes de contaminación en su área de influencia, lo cual permite mantener el sistema acuático en condiciones aceptables para su propósito (Armengol, et al.,2009).

El hecho de que el embalse mantenga una calidad de agua aceptable menos de diez años después de su construcción es positivo y sugiere que tanto el diseño como la gestión de la infraestructura han sido apropiados. No obstante, investigaciones han demostrado que los embalses tienden a acumular sedimentos y nutrientes con el tiempo, lo que eventualmente puede impactar negativamente la calidad del agua. Este proceso de acumulación podría llevar a la eutrofización y a una disminución de oxígeno en el agua, lo que representa un riesgo para la estabilidad ecológica del embalse en el largo plazo. Por tanto, es fundamental que se mantenga un monitoreo regular del

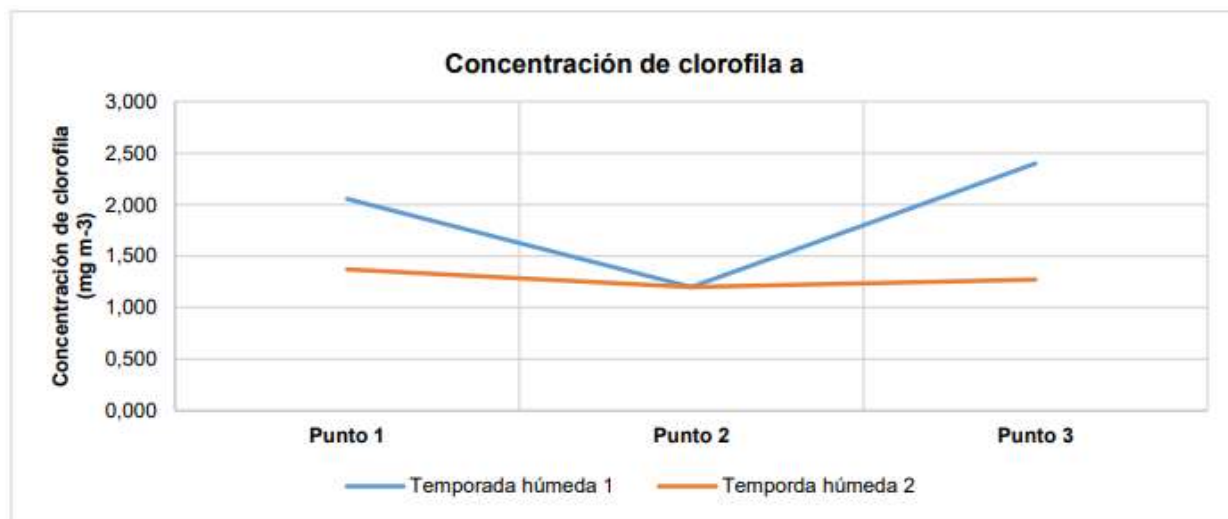
ICA para prever y controlar cualquier posible deterioro en la calidad del agua con el tiempo (Ramos, 2018).

### Índice de estado trófico:

Según Castañeda, P., & Sánchez., T. 2024, el embalse Mancilla se clasifica como un cuerpo hídrico oligotrófico, es decir, que presenta bajos niveles de nutrientes y poca producción biológica. Esto bajo los criterios de aplicación sobre los niveles de clorofila (a) modificado por la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico debido a que se encuentra entre el rango 1 a 2.5 mg/m<sup>3</sup> (OCDE) 1982 (Figura 14).

### Figura 14.

*Concentración de clorofila en el embalse Mancilla.*



*Nota:* Castañeda & Sánchez (2024).

Los resultados del análisis de laboratorio de la calidad del agua del embalse respaldan la conclusión de que su estado actual es aceptable, lo cual coincide con su clasificación trófica como oligotrófico. Este estado indica bajos niveles de nutrientes, lo que sugiere que el embalse aún no presenta signos de eutrofización, una condición en la que el exceso de nutrientes podría generar proliferación de algas y afectar la calidad del agua.

Sin embargo, aunque el embalse no muestra evidencias de deterioro significativo en este momento, es esencial mantener un monitoreo constante para identificar cualquier cambio temprano en su calidad. Las actividades productivas en la finca evaluada, como el uso de fertilizantes y agroquímicos, pueden llegar a tener un impacto negativo en el embalse a través de la escorrentía y la infiltración, especialmente si se siguen prácticas de manejo insostenibles en el tiempo.

Por esta razón, se recomienda implementar prácticas de manejo sostenible en la finca para minimizar el riesgo de aporte de nutrientes y sustancias químicas al embalse. Esto incluye técnicas de conservación de suelos, uso controlado de agroquímicos, y prácticas de retención de sedimentos y nutrientes que reduzcan la probabilidad de afectación del embalse.

A largo plazo, un programa de monitoreo constante de la calidad del agua, en conjunto con medidas de manejo sostenible en la finca, permitirá mantener la buena calidad del agua en el embalse, contribuyendo a la sostenibilidad del sistema productivo y a la preservación de los recursos hídricos de la región.

### Correlación entre análisis de agua y suelo:

A continuación (ver Tabla 22), se muestra la correlación de los análisis de la calidad del agua del embalse Mancilla y los análisis de las características del suelo de los cultivos de la finca:

**Tabla 22.**

*Influencia de las características del suelo de los cultivos de la finca evaluada frente a la calidad del agua del embalse Mancilla.*

CARACTERÍSTICAS	CULTIVOS		
	PAPA	MAÍZ	FRESA
	No incide	No incide	No incide
<b>Nitrógeno</b>	A pesar de que la concentración de nitrógeno es elevada en el área de cultivo de papa, se observa que esta no afecta los niveles de nitrógeno en el embalse. Los análisis de agua realizados indican que el nitrógeno en el embalse se mantiene en niveles aceptables, lo que sugiere que actualmente no existe un aporte de nitrógeno desde el cultivo hacia el cuerpo de agua.	A pesar de que la concentración de nitrógeno es elevada en el área de cultivo de maíz, se observa que esta no afecta los niveles de nitrógeno en el embalse. Los análisis de agua realizados indican que el nitrógeno en el embalse se mantiene en niveles aceptables, lo que sugiere que actualmente no existe un aporte de nitrógeno desde el cultivo hacia el cuerpo de agua.	Las concentraciones de nitrógeno en el cultivo son deficientes y por ende tampoco afecta la calidad de agua del embalse.
	No incide	No incide	No incide
<b>Fósforo</b>	Las concentraciones de fósforo en el cultivo son deficientes y por	Las concentraciones de fósforo en el cultivo son deficientes y por	Las concentraciones de fósforo en el cultivo son deficientes y por

CARACTERÍSTICAS	CULTIVOS		
	PAPA	MAÍZ	FRESA
	ende tampoco afecta la calidad de agua del embalse.	ende tampoco afecta la calidad de agua del embalse.	ende tampoco afecta la calidad de agua del embalse.
	No incide	No incide	No incide
<b>pH</b>	pH normal en cultivo y tampoco incide en la calidad de agua del embalse.	Aunque este cultivo presenta un pH ácido, lo cual facilita la movilización de compuestos potencialmente problemáticos para la calidad del agua y refleja altos niveles de hidrogeniones y aluminio, actualmente no influye en la acidez del embalse.	Aunque este cultivo presenta un pH ácido, lo cual facilita la movilización de compuestos potencialmente problemáticos para la calidad del agua y refleja altos niveles de hidrogeniones y aluminio, actualmente no influye en la acidez del embalse.
	No incide	No incide	No incide
<b>Conductividad eléctrica</b>	La conductividad eléctrica del suelo se encuentra en un rango óptimo, lo cual indica un equilibrio adecuado de sales que no afecta negativamente la calidad del agua del embalse. Este nivel de conductividad sugiere que el manejo del suelo y de los insumos es adecuado y que no existe una acumulación excesiva de sales que pudiera ser arrastrada hacia el embalse, preservando así su calidad.	Este cultivo tiene una conductividad eléctrica baja, pero esta condición no incide en la conductividad eléctrica del embalse.	Este cultivo tiene una conductividad eléctrica baja, pero esta condición no incide en la conductividad eléctrica del embalse.
<b>OD</b>	No incide	No incide	No incide

CARACTERÍSTICAS	CULTIVOS		
	PAPA	MAÍZ	FRESA
	Aunque la materia orgánica y otros nutrientes están presentes en altas concentraciones en el suelo, los niveles de oxígeno disuelto (OD) en el embalse se mantienen dentro de un rango normal.	Aunque la materia orgánica y otros nutrientes están presentes en altas concentraciones en el suelo, los niveles de oxígeno disuelto (OD) en el embalse se mantienen dentro de un rango normal.	Aunque la materia orgánica y otros nutrientes están presentes en altas concentraciones en el suelo, los niveles de oxígeno disuelto (OD) en el embalse se mantienen dentro de un rango normal.
DQO	No incide	No incide	No incide
	Aunque la materia orgánica en el suelo es alta, los niveles de Demanda Química de Oxígeno (DQO) en el embalse se encuentran dentro de un rango normal.	Aunque la materia orgánica en el suelo es alta, los niveles de Demanda Química de Oxígeno (DQO) en el embalse se encuentran dentro de un rango normal.	Aunque la materia orgánica en el suelo es alta, los niveles de Demanda Química de Oxígeno (DQO) en el embalse se encuentran dentro de un rango normal.
Pendiente	No incide	No incide	No incide
	La pendiente en el cultivo de papa no es muy pronunciada, lo que implica que no tiene incidencia en la calidad del agua del embalse debido a actividades como la escorrentía. Esta característica del terreno minimiza el arrastre de sedimentos y nutrientes hacia el embalse, ayudando a preservar la calidad del agua en la zona	La pendiente en el cultivo de maíz es baja, lo que implica que no tiene incidencia en la calidad del agua del embalse debido a actividades como la escorrentía. Esta característica del terreno minimiza el arrastre de sedimentos y nutrientes hacia el embalse, ayudando a preservar la calidad del agua en la zona	A pesar de que la pendiente es muy pronunciada, esta no incide en el arrastre de materiales hacia el embalse debido a la escorrentía.
Textura, porosidad y compactación	Si incide	Si incide	Si incide
	Este cultivo, con características optimas en el suelo, permite una	Este cultivo, con características optimas en el suelo, permite una	Este cultivo, con características optimas en el suelo, permite una

<b>CARACTERÍSTICAS</b>	<b>CULTIVOS</b>		
	<b>PAPA</b>	<b>MAÍZ</b>	<b>FRESA</b>
	filtración efectiva del agua, minimizando la escorrentía superficial y la pérdida de nutrientes, lo que reduce el riesgo de eutrofización en los cuerpos de agua. Además, la estabilidad del suelo previene la erosión, lo que evita el arrastre de sedimentos y contaminantes hacia los cuerpos de agua, contribuyendo así a mantener su calidad.	filtración efectiva del agua, minimizando la escorrentía superficial y la pérdida de nutrientes, lo que reduce el riesgo de eutrofización en los cuerpos de agua. Además, la estabilidad del suelo previene la erosión, lo que evita el arrastre de sedimentos y contaminantes hacia los cuerpos de agua, contribuyendo así a mantener su calidad.	filtración efectiva del agua, minimizando la escorrentía superficial y la pérdida de nutrientes, lo que reduce el riesgo de eutrofización en los cuerpos de agua. Además, la estabilidad del suelo previene la erosión, lo que evita el arrastre de sedimentos y contaminantes hacia los cuerpos de agua, contribuyendo así a mantener su calidad.

De acuerdo con los resultados del análisis de suelo de la finca evaluada y como se observa en la anterior tabla, las actividades agropecuarias realizadas alrededor del embalse Mancilla no inciden en la calidad de su agua. Aunque se encuentran altas concentraciones de compuestos como nitrógeno, potasio y materia orgánica, los resultados de la calidad del agua del embalse evidencian que no hay influencia negativa por parte de estos elementos. Esto puede atribuirse a las características del suelo que permiten que actúe como un amortiguador o buffer, pues presenta alta porosidad y una retención de humedad aceptable, facilitando así el proceso de infiltración del agua.

Sin embargo, es importante destacar que la pendiente del terreno, especialmente en los cultivos de fresa, es escarpada. Esto podría aumentar la escorrentía durante temporadas de lluvias intensas y contribuir a la erosión hídrica, que implica la pérdida de la capa superficial del suelo

debido al transporte de partículas por el agua. Este fenómeno podría incrementar el riesgo de contaminación en el embalse a través de la lixiviación o escorrentía de nutrientes.

A pesar de estos riesgos, las barreras vivas presentes alrededor del embalse han sido efectivas en impedir en gran medida el paso de estos contaminantes, lo que se refleja positivamente en la calidad del agua. Estas barreras naturales juegan un papel crucial en la protección del embalse, ayudando a conservar su integridad ecológica y la calidad de sus recursos hídricos.

## **2. Objetivo: Evaluar la sostenibilidad del sistema dinámico en el área de influencia del embalse Mancilla.**

Se diseñó un marco de análisis de sostenibilidad enfocado en identificar aspiraciones orientadas al mejoramiento del sistema productivo. Estas aspiraciones fueron priorizadas para desarrollar los indicadores necesarios para la evaluación de sostenibilidad. Finalmente, se aplicó la evaluación de la finca utilizando los indicadores generados, como se detalla a continuación:

### **FASE 2: Construcción del marco de análisis sobre sostenibilidad.**

Mediante de la entrevista realizada al propietario de la finca evaluada, junto a los trabajadores de la finca y la caracterización del sistema dinámico, se analizó la información obtenida para evaluar la sostenibilidad del área de estudio en el área de influencia del embalse Mancilla, es necesario desarrollar un marco de análisis con aspiraciones para el mejoramiento de la sostenibilidad del sistemas productivo, que se generará a partir de la información recopilada en la entrevista que se desarrolló para definir y caracterizar el sistema dinámico, allí se tendrán en

cuenta las aspiraciones que los agricultores creen que son necesarias para alcanzar la sostenibilidad de los sistemas productivos, como se observa en la Tabla 23:

Tabla 23.

*Marco de análisis con aspiraciones para el mejoramiento de la sostenibilidad del sistema productivo.*

ATRIBUTO	DIMENSIONES				
	Productividad	Ambiental	Social	Cultural	Económica
<b>Productividad</b>	-Implementación de nuevas técnicas agroecológicas.	-Estrategias de uso y conservación de agua. -Siembra y conservación de agua. -Evaluación de calidad de agua de los cuerpos cercanos.			
<b>Seguridad</b>	-Reducción del uso de agroquímicos.	-Reforestación con especies nativas. -Estrategias de uso y conservación de suelo. -Rotación de cultivos. -Uso de agroquímicos. -Evaluación de calidad del suelo. -Buenas prácticas agrícolas.	-Participación de la comunidad en actividades de conservación. -Aprovechamiento del recurso hídrico para mantener la productividad del cultivo. -Evaluar el uso del agua.	-Desarrollar capacitaciones a la comunidad. -Percepción de la importancia del cuidado ambiental.	-Reducción de costos por prácticas sostenibles en la producción.
<b>Equidad</b>		-Disposición correcta de los vertimientos. -Disposición correcta de los residuos. -Generación de conciencia ambiental.	-Generar estrategias de		

ATRIBUTO	DIMENSIONES				
	Productividad	Ambiental	Social	Cultural	Económica
<b>Aceptabilidad</b>	-Planeación y cronogramas para cada producción. -Continuidad en los procesos de siembra.		participación (intercambio de conocimientos) y sentido de pertinencia	-Investigar si hay prácticas tradicionales que ayudan a la gestión sostenible del agua y el suelo.	
<b>Autogestión</b>			respecto al uso adecuado del suelo y del agua.		

### **FASE 3: Priorización de aspectos para la sostenibilidad.**

Posteriormente, se llevó a cabo la priorización de las aspiraciones. Este proceso fue clave para definir los indicadores y simplificar el número total de aspiraciones e indicadores a trabajar. Aunque inicialmente se generaron 24 aspiraciones, se seleccionaron 14 como prioritarias, es importante aclarar que ninguna de las aspiraciones fue descartada, sino que aquellas que resultaron similares o que podían abordarse mediante los mismos indicadores se agruparon entre sí, lo que facilitó su integración (ver Tabla 24). Este enfoque contribuye a optimizar la toma de decisiones (Acevedo, et al., 2013).

Se puede observar que se obtuvieron 14 aspiraciones, de las cuales 2 son de la dimensión productiva, 8 de la dimensión ambiental, 1 de la dimensión social, 2 de la dimensión cultural y 1 de la dimensión económica.

Tabla 24.

*Aspiraciones para la sostenibilidad, priorizadas y ordenadas.*

<b>ASPIRACIONES TOTALES</b>					
<b>DIMENSIONES</b>					
<b>ATRIBUTO</b>	<b>Productividad</b>	<b>Ambiental</b>	<b>Social</b>	<b>Cultural</b>	<b>Económica</b>
<b>Productividad</b>		-Siembra y conservación de agua.			
<b>Seguridad</b>		-Evaluación de calidad de agua de los cuerpos cercanos.			
<b>Equidad</b>	-Implementación de nuevas tecnologías.	-Reforestación con especies nativas.	-Participación de la comunidad en actividades de conservación.	-Capacitaciones.	-Reducción de costos por prácticas sostenibles en la producción.
<b>Aceptabilidad</b>	-Planeación y cronograma de los cultivos.	-Rotación de cultivos. -Uso de agroquímicos.		-Percepción de la importancia del cuidado ambiental.	
<b>Autogestión</b>		-Evaluación de calidad del suelo. -Gestión adecuada de los residuos sólidos. -Gestión adecuada de los vertimientos.			
	2	8	1	2	1

#### FASE 4: Definición y estandarización de indicadores.

Para este estudio de caso, cada una de las catorce aspiraciones para la sostenibilidad priorizadas se convierte en un indicador que permitirán la descripción del sistema productivo. Cada indicador incluye un nombre, una descripción y una escala de valoración estandarizada donde se describe cada nivel y su aporte a la sostenibilidad siendo +2 el mayor aporte posible y -2 el de menos contribución, como se muestra en la Tabla 25:

De esta manera, la evaluación del sistema se estructurará con 2 indicadores en la dimensión productiva, 8 en la dimensión ambiental, 1 en la dimensión social, 2 en la dimensión cultural, y 1 en la dimensión económica. Cabe destacar que estos indicadores también están interrelacionados, lo que permitirá una evaluación más integral de la sostenibilidad.

**Tabla 25.**

*Indicadores para evaluar la sostenibilidad del sistema productivo.*

#	INDICADOR	DESCRIPCIÓN O CONCEPTO	ESCALA DE MEDICIÓN	FORMA DE MEDICIÓN
1	Implementación de nuevas tecnologías	Adopción y aplicación de nuevas técnicas, tecnologías o prácticas para conservar y optimizar la sostenibilidad del sistema (riego por goteo	2. Se han implementado nuevas tecnologías de manera consistente y con resultados positivos. 1. Se han implementado algunas tecnologías, pero de	Evaluar la documentación y registros de la finca (informes, proyectos, planes de acción) para verificar qué nuevas técnicas han sido implementadas. Realizar inspecciones in situ para

#	INDICADOR	DESCRIPCIÓN O CONCEPTO	ESCALA DE MEDICIÓN	FORMA DE MEDICIÓN
		automatizado, biorremediación, sistema de monitoreo de agua con sensores IoT y cubiertas vegetales).	<p>forma limitada o sin continuidad.</p> <p>0. Se han implementado pocas tecnologías, y sin un impacto claro en los procesos.</p> <p>-1. No se ha implementado ninguna tecnología nueva, y los procesos siguen siendo tradicionales.</p> <p>-2. No hay interés ni intención de implementar tecnologías nuevas.</p>	<p>observar el uso de tecnologías de conservación de agua.</p> <p>Llevar a cabo monitoreos periódicos para verificar el grado de implementación y el impacto de las nuevas técnicas en la conservación del agua</p>
2	Planeación y cronograma de los cultivos	Nivel de organización y planificación en el cronograma de siembra y cosecha de cultivos.	<p>2. Planeación detallada y cronograma riguroso, ajustado a las condiciones climáticas.</p> <p>1. Planeación básica, con ajustes ocasionales en el cronograma, pero con margen de mejora.</p> <p>0. Planeación mínima del cronograma, con cambios frecuentes y falta de seguimiento adecuado.</p> <p>-1. Planeación deficiente o inexistente, con cronograma errático y poca atención a las condiciones del suelo.</p> <p>-2. No existe planificación ni cronograma en la siembra y cosecha, lo que afecta gravemente la productividad</p>	Entrevista con los agricultores para identificar los cronogramas de cultivos y su planificación.

#	INDICADOR	DESCRIPCIÓN O CONCEPTO	ESCALA DE MEDICIÓN	FORMA DE MEDICIÓN
3	Siembra y conservación de agua	Comprende las prácticas de preservación de fuentes, captación de agua lluvia, almacenamiento, riego eficiente y reciclaje de aguas usadas, dentro del sistema productivo.	<p>2. Predio autosuficiente en el uso de aguas a partir de la captación y almacenamiento de aguas lluvias. Desarrolla estrategias de conservación y reciclaje de agua y humedad.</p> <hr/> <p>1. Finca con reservorio para abundante agua, alto grado de autosuficiencia de aguas y algunas prácticas de conservación de humedad.</p> <hr/> <p>Reciclaje incipiente de aguas usadas.</p> <hr/> <p>0. Finca con reservorio de agua de mediano caudal; combina la captación de agua lluvia para riego de cultivos. Aplica pocas prácticas de conservación de fuentes. No reciclaje.</p> <hr/> <p>-1. Finca con reservorio de agua de poco caudal; la mayor parte del riego proviene del pozo profundo. No aplica prácticas de conservación.</p> <hr/> <p>-2. Riego de cultivos a partir de agua de pozo profundo. No prácticas de conservación, ni captación.</p>	<p>Recorrido por la finca con el agricultor. Listado de prácticas, así:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Preservación de fuentes de agua.</li> <li>• Captación y almacenamiento. <ul style="list-style-type: none"> <li>• Formas de riego.</li> </ul> </li> <li>• Reciclaje de aguas usadas, después de descontaminación.</li> </ul>
4		Medición del Índice de la Calidad del Agua para	2. BUENO. Significa que el agua tiene alta calidad,	Se toman muestras de agua y se analizan en laboratorio para

#	INDICADOR	DESCRIPCIÓN O CONCEPTO	ESCALA DE MEDICIÓN	FORMA DE MEDICIÓN
	Evaluación de calidad de agua de los cuerpos cercanos.	corrientes superficiales, mediante el análisis de laboratorio del agua de las características establecidos en el índice.	<p>generalmente libre de contaminantes significativos, adecuada para usos recreativos y conservación de la biodiversidad.</p> <hr/> <p>1. ACEPTABLE. La calidad del agua es moderada, permitiendo ciertos usos como el riego y actividades recreativas con un bajo riesgo para la salud.</p> <hr/> <p>0. REGULAR. El agua presenta una calidad media, con niveles de contaminación que limitan algunos usos y requieren vigilancia para evitar deterioro adicional.</p> <hr/> <p>-1. MALO. El agua tiene baja calidad, con contaminantes que afectan su uso seguro y limitan la supervivencia de la flora y fauna acuáticas.</p> <hr/> <p>-2. MUY MALO. El agua está fuertemente contaminada, inadecuada para casi cualquier uso y peligrosa para la salud humana y ambiental.</p>	<p>obtener los valores de pH, SST, nitrógeno, fósforo, conductividad eléctrica (CE), DQO, OD. Los resultados obtenidos para cada característica serán convertidos en subíndices utilizando una curva funcional de referencia. Posteriormente, se calculará el ICA mediante la fórmula: <math>ICA_j = \sum W_i * I_{ij}</math></p>
5	Reforestación con especies nativas	Integración de árboles nativos al sistema productivo como estrategia	2. Integración de árboles nativos dentro del sistema productivo: barreras, árboles dispersos, zonas de	Revisión de zonas especiales de arborización o ubicación de árboles en el predio. Listado de

#	INDICADOR	DESCRIPCIÓN O CONCEPTO	ESCALA DE MEDICIÓN	FORMA DE MEDICIÓN
		de conservación de agua y suelo.	<p>conservación, cultivos agroforestales, zonas de amortiguamiento, entre otras. Baja vulnerabilidad frente a los impactos negativos en la calidad del agua y suelo.</p> <hr/> <p>1. Proceso inicial de arborización con especies nativas.</p> <hr/> <p>0. Arborización escasa, pero con árboles nativos.</p> <hr/> <p>-1. Finca con pocos árboles en su mayoría no nativos.</p> <hr/> <p>-2. Finca sin arborización, muy vulnerable frente a los impactos negativos en la calidad del agua y del suelo.</p>	especies arbóreas encontradas en la finca.
6	Rotación de cultivos	<p>Alternan diferentes tipos de cultivos en el mismo terreno de una temporada a otra, en lugar de cultivar siempre la misma planta con el fin de mejorar la salud del suelo, prevenir la degradación y optimizar el uso de nutrientes en el suelo.</p>	<p>2. Se alternan cultivos complementarios y de diferentes familias vegetales en cada ciclo, incluyendo cultivos de cobertura o plantas fijadoras de nitrógeno, optimizando al máximo el uso del suelo y los nutrientes (Ciclo 30 meses: maíz - 6 meses, papa - 6 meses, fresa - 18 meses).</p> <hr/> <p>1. Se rotan 4 o más cultivos diferentes en un ciclo</p>	<p>Evaluar los registros agrícolas de la finca que indiquen la secuencia de cultivos plantados en cada ciclo.</p> <p>Realizar entrevistas con los responsables de la producción para obtener información sobre las prácticas de rotación y los cultivos utilizados.</p> <p>Visitas al terreno agrícola para verificar la rotación de cultivos.</p>

#	INDICADOR	DESCRIPCIÓN O CONCEPTO	ESCALA DE MEDICIÓN	FORMA DE MEDICIÓN
			<p>agrícola, maximizando los beneficios de la rotación.</p> <p>0. Se alternan 3 cultivos diferentes en un ciclo de cultivo.</p> <p>-1. Se alternan solo 2 cultivos en un mismo ciclo de cultivo.</p> <p>-2. El mismo cultivo se planta repetidamente sin cambios.</p>	
7	Uso de agroquímicos	Nivel de planificación en el uso de agroquímicos y la cantidad utilizada en las áreas cultivada.	<p>2. Uso eficiente de agroquímicos, con planificación detallada por área y cantidad</p> <p>1. Uso moderado de agroquímicos, con planificación básica, pero sin optimización completa</p> <p>0. Uso ocasional de agroquímicos sin planificación clara o control en las cantidades aplicadas</p> <p>-1. Uso inadecuado de agroquímicos, sin planificación o control, con posible riesgo de contaminación</p> <p>-2. No se realiza ningún tipo de planificación en el uso de agroquímicos, con aplicación indiscriminada</p>	Entrevista con los agricultores para identificar el uso y planificación en su proceso productivo.

#	INDICADOR	DESCRIPCIÓN O CONCEPTO	ESCALA DE MEDICIÓN	FORMA DE MEDICIÓN
8	Evaluación de calidad del suelo.	Medición del índice de factibilidad del suelo (IFS), mediante la adecuación de los suelos para soportar el sistema productivo específico (papa, fresa, maíz) de forma sostenible, evaluando su capacidad para cumplir con los requisitos básicos de nutrientes, estructura y condiciones químicas.	<p>2. Factible. Suelo muy adecuado para el cultivo, con alta factibilidad.</p> <hr/> <p>0. Aceptable. Suelo moderadamente adecuado, con algunas limitaciones que pueden ser gestionadas.</p> <hr/> <p>-2. Desfavorable. Suelo inadecuado para el cultivo en su estado actual.</p>	<p>Se toman muestras de suelo y se analizan en laboratorio para obtener los valores de pH, materia orgánica, nitrógeno, fósforo, potasio, conductividad eléctrica (CE), textura y porosidad. Los valores obtenidos se comparan con los niveles óptimos definidos para cada cultivo de acuerdo con unas categorías que tienen una valoración numérica. A estas características evaluadas se les asigna un porcentaje de relevancia, de modo que:</p> $IFS = (pH \times 0,3) + (MO \times 0,2) + (N \times 0,1) + (P \times 0,1) + (K \times 0,1) + (CE \times 0,1) + (T \times 0,05) + (PA \times 0,05)$ <p>El valor resultante del IFS indica la factibilidad del suelo para cada cultivo.</p>
9	Gestión adecuada de los residuos sólidos.	Implementación de prácticas responsables para la recolección, clasificación, tratamiento, y disposición final de los residuos sólidos. Este indicador busca evaluar cómo se gestionan los desechos en términos de reciclaje, compostaje,	2. Se implementa un sistema integral de gestión de residuos, con alta participación de la comunidad, reciclaje eficiente, compostaje, y disposición adecuada de los residuos peligrosos y no peligrosos, sin impacto ambiental negativo.	<p>Realizar visitas para analizar si la comunidad o la organización cuenta con políticas y procedimientos documentados para la gestión de residuos, así como si cumplen con normativas locales o nacionales.</p> <p>Verificar la existencia de infraestructura adecuada para la</p>

#	INDICADOR	DESCRIPCIÓN O CONCEPTO	ESCALA DE MEDICIÓN	FORMA DE MEDICIÓN
		reducción de residuos peligrosos, y disposición final en sitios autorizados.	<p>1. Se aplican prácticas completas de clasificación, recolección, tratamiento, y disposición final de los residuos según las normativas locales, con medidas regulares de reciclaje y reducción de residuos.</p> <hr/> <p>0. Se han implementado algunas medidas de clasificación y recolección de residuos, pero la disposición final o el tratamiento no es completamente adecuado o no se realiza de manera consistente.</p> <hr/> <p>-1. Existen prácticas limitadas para la gestión de residuos, pero no son sistemáticas ni cumplen con los estándares ambientales.</p> <hr/> <p>-2. No se llevan a cabo prácticas organizadas para la gestión o disposición correcta de los residuos.</p>	<p>recolección y clasificación de residuos (contenedores para reciclaje, puntos limpios, estaciones de compostaje).</p> <p>Realizar entrevista para evaluar el conocimiento y cumplimiento de las prácticas de gestión de residuos por parte de los usuarios, así como su disposición a participar en las iniciativas de reciclaje y correcta disposición de desechos.</p>
10	Gestión adecuada de los vertimientos.	Evaluar si se gestionan adecuadamente los vertimientos generados, cumpliendo con las normativas ambientales vigentes.	<p>2. Cumplimiento total de la normativa y manejo adecuado de los vertimientos</p> <hr/> <p>1. Cumplimiento parcial de la normativa, con algunos aspectos por mejorar</p>	<p>Entrevista con los agricultores e inspecciones en campo.</p> <p>Verificar la existencia de infraestructura adecuada para los vertimientos</p>

#	INDICADOR	DESCRIPCIÓN O CONCEPTO	ESCALA DE MEDICIÓN	FORMA DE MEDICIÓN
			0. Cumplimiento mínimo de la normativa, pero con deficiencias significativas -1. Gestión inadecuada, con varios incumplimientos de la normativa -2. No se realiza ningún tipo de gestión para los vertimientos	
11	Participación de la comunidad en actividades de conservación.	Nivel de involucramiento de la comunidad en actividades que promueven la conservación y sostenibilidad.	2. Alta participación comunitaria en actividades de conservación, con programas regulares y efectivos 1. Participación moderada de la comunidad en actividades puntuales de conservación 0. Participación esporádica o limitada en actividades, sin una estructura clara -1. Baja participación o falta de interés en las actividades de conservación -2. No hay participación de la comunidad en las actividades de conservación	Registro de las actividades realizadas por la comunidad.  Entrevistas a la comunidad presente del área.
12	Capacitaciones	Aumentar el conocimiento y la conciencia sobre la importancia de la sostenibilidad ambiental y fomentar la adopción de prácticas que reduzcan el	2. Se implementa un programa de capacitación integral y continuo que incluye múltiples temas relacionados con la sostenibilidad, con un alto	Registrar el número de capacitaciones que se realizan en un periodo de tiempo estandarizado.  Mantener un registro de los

#	INDICADOR	DESCRIPCIÓN O CONCEPTO	ESCALA DE MEDICIÓN	FORMA DE MEDICIÓN
		impacto ambiental (manejo adecuado de residuos peligrosos y vertimientos, conservación del agua y suelo).	<p>nivel de participación y seguimiento para evaluar el impacto en la conciencia y las prácticas ambientales.</p> <hr/> <p>1. Se han realizado capacitaciones regulares con buena asistencia y un enfoque claro en la conciencia ambiental, con evaluaciones post-capacitación para medir la retención de conocimientos.</p> <hr/> <p>0. Se han llevado a cabo varias capacitaciones, con una participación moderada, pero sin un plan estructurado o evaluación de impacto.</p> <hr/> <p>-1. Se han realizado algunas capacitaciones esporádicas, pero con baja asistencia y sin seguimiento posterior.</p> <hr/> <p>-2. No se han llevado a cabo programas de capacitación relacionados con la conciencia ambiental.</p>	<p>asistentes a cada capacitación, para evaluar la cobertura del programa.</p> <p>Aplicar pruebas o entrevista antes y después de las capacitaciones para medir el aumento del conocimiento y la comprensión de los temas tratados.</p> <p>Realizar entrevista entre los participantes para evaluar su satisfacción con la capacitación y su percepción sobre la relevancia de los temas abordados.</p> <p>Realizar un seguimiento a largo plazo para observar la implementación de prácticas aprendidas y su impacto en la comunidad o el entorno.</p>
13	Percepción de la importancia del cuidado ambiental.	Reconocer la conciencia que los individuos tienen sobre la necesidad de adoptar prácticas sostenibles, proteger los	2. Los individuos valoran profundamente el cuidado del medio ambiente y lo integran en su vida cotidiana, influyendo también en otros	Realizar entrevista o cuestionarios a los participantes para evaluar su percepción sobre la importancia del cuidado ambiental, midiendo el nivel de

#	INDICADOR	DESCRIPCIÓN O CONCEPTO	ESCALA DE MEDICIÓN	FORMA DE MEDICIÓN
		recursos naturales y reducir su impacto ambiental.	<p>para que adopten prácticas sostenibles.</p> <hr/> <p>1. Hay un buen nivel de comprensión sobre la importancia del cuidado ambiental, y se observa una participación activa en prácticas sostenibles y de protección del medio ambiente.</p> <hr/> <p>0. Las personas comprenden la importancia de proteger el medio ambiente, aunque su conocimiento es limitado y su compromiso es ocasional.</p> <hr/> <p>-1. Existe alguna percepción de la importancia del cuidado ambiental, pero no se refleja en comportamientos o acciones concretas.</p> <hr/> <p>-2. Los individuos no consideran el cuidado del medio ambiente como algo importante o necesario.</p>	<p>acuerdo con afirmaciones como "Proteger el medio ambiente es esencial para mi comunidad" o "Considero que mis acciones tienen un impacto en el entorno natural".</p> <p>Analizar si los individuos que muestran una alta percepción sobre la importancia del cuidado ambiental están cambiando su comportamiento, como reducir el consumo de recursos, reciclar, participar en actividades comunitarias de reforestación o educación ambiental.</p>
14	Reducción de costos por prácticas sostenibles en la producción.	Mide el impacto económico de la implementación de prácticas sostenibles en los procesos de producción. La reducción de costos puede surgir de diversas áreas, como el uso más eficiente	<p>2. Muy alta reducción de costos; la empresa ha experimentado un impacto financiero muy positivo.</p> <hr/> <p>1. Alta reducción de costos; los resultados son positivos y significativos.</p>	<p>Analizar los costos de producción antes y después de implementar prácticas sostenibles para calcular la reducción porcentual.</p> <p>Estimar el ahorro total en términos monetarios durante un</p>

#	INDICADOR	DESCRIPCIÓN O CONCEPTO	ESCALA DE MEDICIÓN	FORMA DE MEDICIÓN
		de los recursos (agua, energía, insumos), la disminución de residuos, y el aprovechamiento de subproductos. Las prácticas sostenibles pueden incluir la agricultura orgánica, el uso de tecnologías limpias, la rotación de cultivos, y la implementación de técnicas de conservación del suelo.	<p>0. Reducción de costos moderada; se observa un ahorro notable, pero aún por debajo de las expectativas.</p> <p>-1. Ligeramente reducción de costos; se ha logrado un ahorro mínimo, pero no es significativo.</p> <p>-2. No se observa reducción de costos; los costos han aumentado o se mantienen sin cambios.</p>	período específico (por ejemplo, un año).

### **FASE 5: Evaluación de sostenibilidad.**

Para la evaluación de los indicadores se contó con la participación tanto del propietario como del agricultor, lo que permitió obtener una visión más completa y contextualizada del sistema evaluado. Durante la valoración, se identificó que la escala previamente establecida no reflejaba con precisión las condiciones reales del entorno. Para solucionar esta discrepancia, se optó por utilizar una puntuación intermedia, con el fin de acercar los resultados a la realidad observada en el campo (Acevedo, et al., 2013). Los resultados obtenidos fueron consolidados en la Tabla 26, empleando los indicadores de sostenibilidad como base para evaluar el desempeño en las distintas dimensiones.

**Tabla 26.**

*Resultados de la evaluación realizada en la aplicación de la MESILPA.*

<b>INDICADORES</b>	<b>RESULTADO INDICADOR</b>
<b>Implementación de nuevas tecnologías</b>	-2
<b>Planeación y cronograma de los cultivos</b>	1
<b>Siembra y conservación de agua</b>	-0,5
<b>Evaluación de calidad de agua de los cuerpos cercanos.</b>	1
<b>Reforestación con especies nativas</b>	-1
<b>Rotación de cultivos</b>	1
<b>Uso de agroquímicos</b>	-1
<b>Evaluación de calidad del suelo.</b>	0
<b>Gestión adecuada de los residuos sólidos.</b>	-1
<b>Gestión adecuada de los vertimientos.</b>	0
<b>Participación de la comunidad en actividades de conservación.</b>	0,5
<b>Capacitaciones</b>	-1
<b>Percepción de la importancia del cuidado ambiental.</b>	0,5
<b>Reducción de costos por prácticas sostenibles en la producción.</b>	-2

Se identificaron deficiencias importantes en áreas clave como la implementación de nuevas técnicas, el uso de agroquímicos y la reforestación con especies nativas, especialmente en relación con la gestión del agua y del suelo (Acevedo et al., 2013). Asimismo, los puntajes negativos en capacitaciones sugieren una necesidad urgente de mejorar la formación de los actores involucrados (Altieri, 1995). Sin embargo, se destacan algunos aspectos positivos, como la planeación de cultivos, que muestran avances moderados hacia prácticas más sostenibles (FAO, 2017). Este análisis subraya la importancia de rediseñar las estrategias de capacitación y adoptar tecnologías que respondan mejor a las necesidades locales, con el fin de fortalecer el desempeño en las diversas dimensiones evaluadas (Acevedo et al., 2013).

3. **Objetivo: Integrar la influencia de los modelos de producción agropecuaria en el estado de la calidad de agua del embalse de Mancilla.**

La información recopilada en la fase anterior se analizó mediante diagramas, lo que facilitó su interpretación. Con base en estos resultados, se propusieron planes de mejora orientados a optimizar el sistema productivo, como se muestra a continuación:

**FASE 6: Análisis de resultados – diagramación.**

La forma más efectiva de interpretar la información recolectada en la evaluación es mediante recursos gráficos que permitan a técnicos, promotores y agricultores visualizar el desempeño de cada indicador. Esto facilita identificar los indicadores con menor valoración y aquellos con mayor cumplimiento, lo que a su vez permite planificar nuevas actividades para futuros periodos con el objetivo de incrementar los niveles de sostenibilidad del sistema productivo y mejorar la calidad del agua del embalse (Acevedo et al., 2013).

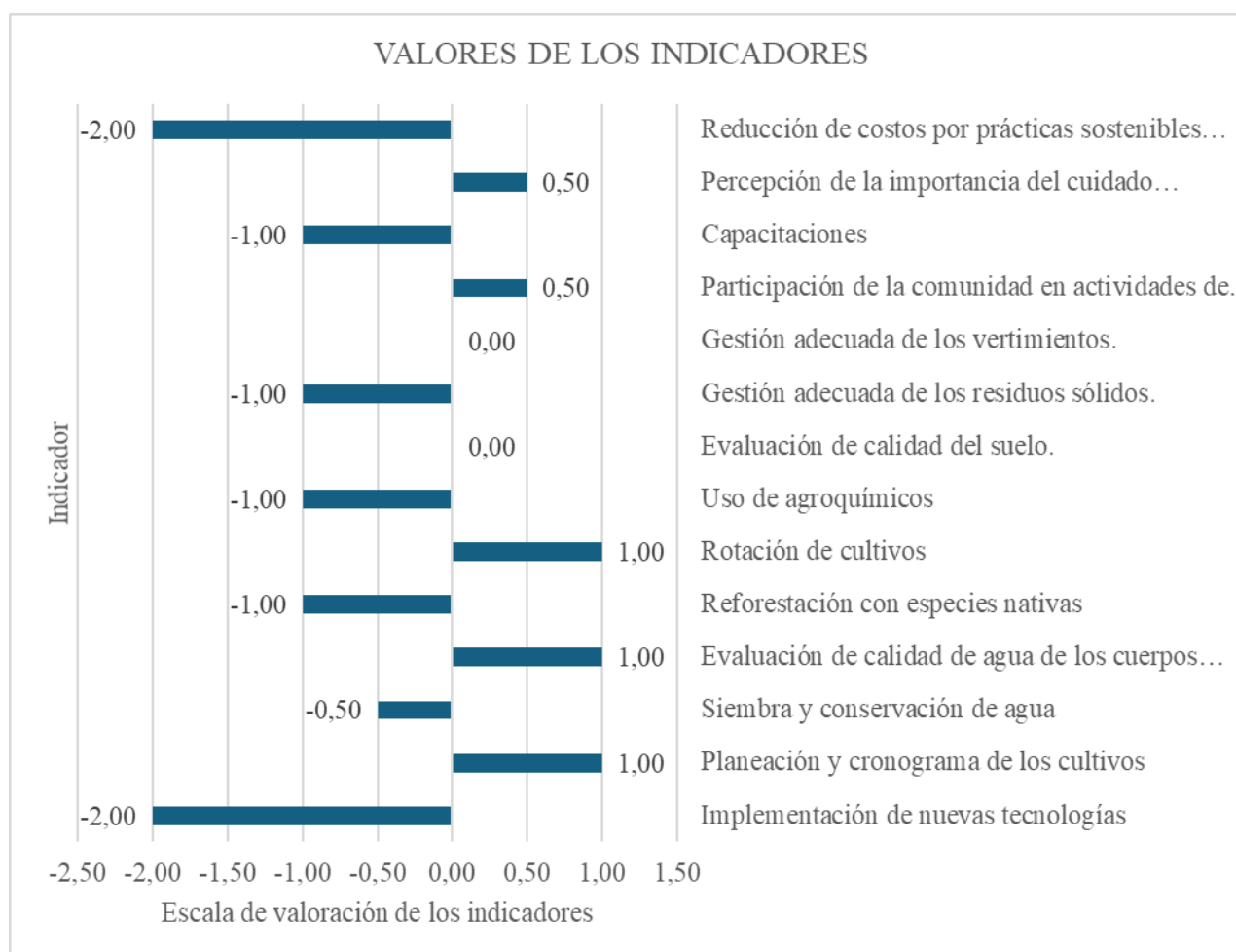
Una opción para representar los datos es mediante gráficos de barras, en los cuales el eje vertical, con la posición cero en el horizontal, muestra si los indicadores tienen un impacto positivo o negativo en la sostenibilidad. Además, permite analizar la distancia de cada indicador respecto a los extremos -2 y +2, como se ilustra en la

Figura

15:

### Figura 15.

*Resultados de la evaluación realizada en la aplicación de la MESILPA.*

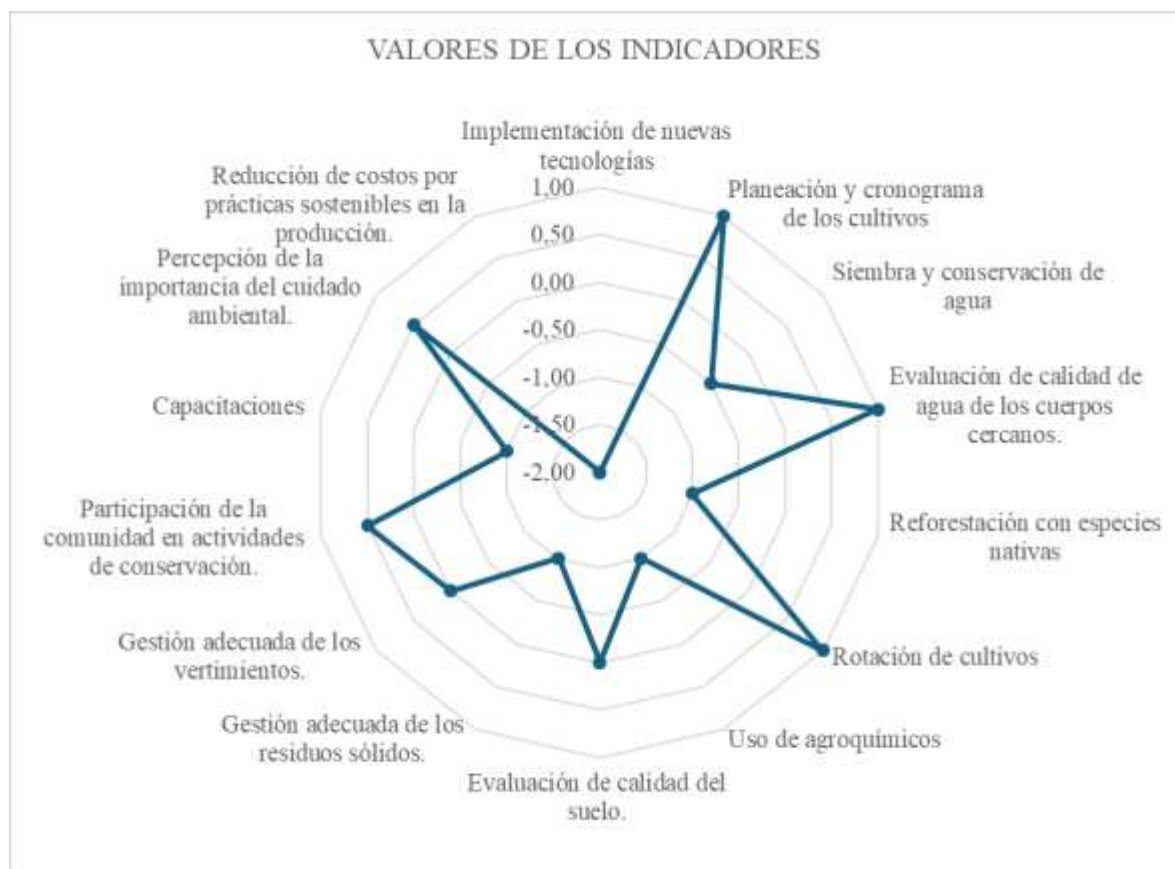


Otra opción para la diagramación es el uso del esquema radial, comúnmente conocido como diagrama tipo "cometa," "ameba" o "telaraña." Este esquema se compone de una serie de ejes (tantos como indicadores se seleccionen para la evaluación) que parten de un origen común, correspondiente al valor mínimo de la escala utilizada para estandarizar los indicadores (-2), y se extienden hasta el valor ideal máximo (+2). En cada eje se señalan los valores obtenidos y corregidos en la evaluación, y la conexión de todos estos puntos conforma lo que se denomina diagrama de sostenibilidad (Acevedo et al., 2013).

En el diagrama, se representa el valor alcanzado por cada indicador y se conectan estos puntos, formando una figura irregular que muestra el grado de cumplimiento en relación con el valor ideal de +2. De este modo, es posible observar en un solo esquema el desempeño general de los indicadores, identificando aquellos con mayores avances y los de menor rendimiento, como se ilustra en la Figura 16:

**Figura 16.**

Representación gráfica tipo “telaraña” de la evaluación de sostenibilidad a partir de indicadores.



El análisis de ambas gráficas muestra el impacto positivo de ciertos indicadores en la sostenibilidad, especialmente en relación con la “participación de la comunidad en actividades de conservación” (0,5), la “percepción de la importancia del cuidado ambiental” (0,5), la “rotación de cultivos” (1), la “evaluación de la calidad del agua de cuerpos cercanos” (1) y la “planeación y cronograma de los cultivos” (1). Estos indicadores reflejan un interés activo por parte de los agricultores en la conservación y la gestión adecuada del suelo y el agua, así como una creciente conciencia sobre la importancia del cuidado ambiental. Este interés por la conservación del embalse por parte de los involucrados en el sistema productivo de la finca evaluada es evidente, aunque la participación comunitaria se ve limitada por la falta de apoyo de los entes

gubernamentales. Aunque la comunidad reconoce la relevancia del cuidado ambiental, su conocimiento en este ámbito es limitado y su compromiso esporádico. La planificación y rotación de cultivos no solo mejora la calidad del suelo al prevenir el agotamiento de nutrientes y la erosión, sino que también contribuye al equilibrio general del sistema productivo, fortaleciendo así la sostenibilidad. Además, la calidad del agua en los cuerpos cercanos, como el embalse Mancilla, se mantiene en niveles aceptables, lo que indica que estas prácticas ayudan a mitigar los impactos negativos sobre este recurso vital.

Los indicadores que se encuentran en un punto neutral, es decir, que no influyen ni positiva ni negativamente en la sostenibilidad, son la “evaluación de la calidad del suelo” y la “gestión adecuada de los vertimientos”, este último recibe esta puntuación, ya que en la zona rural solo hay un pozo séptico de más de 60 años sin mantenimiento. Estos representan áreas con potencial de mejora, donde se podrían implementar estrategias para optimizar la gestión de residuos y mejorar la salud del suelo. La falta de un efecto significativo en estos indicadores sugiere que las acciones actuales son insuficientes para generar cambios relevantes; sin embargo, con un esfuerzo coordinado entre los agricultores y las autoridades pertinentes, es posible mejorar rápidamente la sostenibilidad del sistema productivo.

Por otro lado, los indicadores que afectan negativamente a la sostenibilidad son: “implementación de nuevas tecnologías” (-2), “siembra y conservación de agua” (-0,5), “reforestación con especies nativas” (-1), “uso de agroquímicos” (-1), “gestión adecuada de los residuos sólidos” (-1), “capacitaciones” (-1), “reducción de costos por prácticas sostenibles en la producción” (-2). La puntuación negativa en estos indicadores indica una deficiencia en la

adopción de prácticas sostenibles, lo que refleja la necesidad urgente de mejorar la gestión del recurso suelo y agua.

El análisis sugiere que estas áreas problemáticas están relacionadas con una falta de inversión y adopción de tecnologías avanzadas que optimicen la producción y reduzcan el impacto ambiental, así como con prácticas de conservación de agua insuficientes. Esta carencia podría agravarse en épocas de sequía, afectando tanto la producción como la sostenibilidad a largo plazo. La implementación de técnicas de siembra que favorezcan la retención de agua y el uso de sistemas de riego eficientes podría mejorar significativamente el equilibrio hídrico de la finca.

La falta de reforestación representa una oportunidad para incrementar la biodiversidad y mejorar la calidad del suelo. La siembra de especies nativas no solo beneficia la salud del suelo y facilita la retención de agua, sino que también contribuye a un ecosistema más resiliente, capaz de reducir el impacto de plagas y enfermedades. Aunque el propietario tiene la intención de plantar especies nativas, se desanima debido a las restricciones impuestas sobre su manejo, como no poder removerlas una vez plantadas. Por esta razón, ha decidido no realizar la reforestación con especies nativas. Por su parte, el acueducto tampoco ha llevado a cabo ningún proceso de reforestación en la zona. Asimismo, el uso inadecuado de agroquímicos puede estar afectando negativamente la salud del suelo, el agua y la biodiversidad local. Reducir el uso de estos productos mediante prácticas agroecológicas o biológicas podría mitigar el impacto ambiental y mejorar la calidad del suelo y del agua.

La gestión ineficaz de los residuos sólidos indica la necesidad de implementar un sistema adecuado de tratamiento y disposición de estos materiales. Incorporar una gestión eficiente mediante reciclaje, compostaje y reducción de desechos no solo contribuiría a la sostenibilidad, sino que también disminuiría la contaminación. Durante la visita de campo, se observó un manejo deficiente de los residuos sólidos, particularmente por los cultivos de fresa, donde había plástico disperso en el suelo de las áreas. El propietario mencionó no haber recibido capacitación sobre manejo de residuos y vertimientos, lo que evidencia una falta de control y acompañamiento.

La falta de capacitación en prácticas sostenibles refleja que los trabajadores no cuentan con el conocimiento necesario sobre su importancia y técnicas específicas. Ofrecer programas de formación continua en temas como manejo sostenible del suelo y agua podría fomentar una adopción más generalizada de prácticas sostenibles en la finca.

Por último, la reducción de costos a través de prácticas sostenibles presenta un valor negativo, lo cual sugiere que aún no se implementan estas prácticas. Identificar aquellas prácticas sostenibles que generen ahorro, como el uso eficiente de insumos, podría beneficiar tanto al entorno como a la economía de la finca.

En conjunto, estos indicadores reflejan la necesidad urgente de avanzar en la adopción de prácticas y tecnologías sostenibles, destacando la importancia de mejorar la gestión de recursos esenciales como el suelo y el agua. Abordar estas áreas mediante políticas de capacitación,

inversión en tecnologías y optimización de recursos resulta esencial para lograr una mejora significativa en la sostenibilidad de la finca evaluada.

### *Índice de sostenibilidad.*

Para completar el análisis de los resultados de cada evaluación de indicadores, es necesario establecer los Índices de Sostenibilidad (I.S). En este caso de estudio no se hará un ajuste de los valores obtenidos considerando la importancia relativa de cada indicador, pues a todos los indicadores se les asignó el mismo valor de importancia (1) de acuerdo con lo manifestado por los actores locales, pues consideraron que todos los indicadores poseen la misma importancia en la sostenibilidad del sistema productivo, por ende, el IS será el mismo del promedio ponderado.

A continuación, en la Tabla 27, se muestra el IS de la finca evaluada:

**Tabla 27.**

*Valores de indicadores y coeficientes de ponderación para obtener el I.S, correspondiente a la finca evaluada.*

<b>INDICADORES</b>	<b>RESULTADO INDICADOR</b>	<b>COEFICIENTE DE PONDERACION</b>
<b>Implementación de nuevas tecnologías</b>	-2.00	1
<b>Planeación y cronograma de los cultivos</b>	1.00	1
<b>Siembra y conservación de agua</b>	-0.50	1
<b>Evaluación de calidad de agua de los cuerpos cercanos.</b>	1.00	1
<b>Reforestación con especies nativas</b>	-1.00	1
<b>Rotación de cultivos</b>	1.00	1
<b>Uso de agroquímicos</b>	-1.00	1
<b>Evaluación de calidad del suelo.</b>	0.00	1
<b>Gestión adecuada de los residuos sólidos.</b>	-1.00	1

<b>INDICADORES</b>	<b>RESULTADO INDICADOR</b>	<b>COEFICIENTE DE PONDERACION</b>
<b>Gestión adecuada de los vertimientos.</b>	0.00	1
<b>Participación de la comunidad en actividades de conservación.</b>	0.50	1
<b>Capacitaciones</b>	-1.00	1
<b>Percepción de la importancia del cuidado ambiental.</b>	0.50	1
<b>Reducción de costos por prácticas sostenibles en la producción.</b>	-2.00	1
<b>SUMA</b>	-4.50	14
<b>PROMEDIO</b>	-0.321428571	
<b>PROMEDIO PONDERADO</b>	-0.321428571	

*Fuente. Elaboración propia.*

Un Índice de Sostenibilidad (IS) de cero indica un efecto neutro, lo que significa que el sistema productivo no afecta ni contribuye significativamente a la sostenibilidad según los indicadores evaluados. Por el contrario, un valor positivo refleja un impacto favorable en la sostenibilidad del sistema, mientras que un valor negativo, como el registrado en el caso actual (-0,32), evidencia un desequilibrio que compromete tanto la estabilidad del sistema productivo como el estado de los recursos naturales.

En la evaluación realizada, siete indicadores presentan valores negativos, destacando áreas críticas que afectan directamente la sostenibilidad de la finca. Entre ellos se encuentran: “implementación de nuevas tecnologías”, “siembra y conservación de agua”, “reforestación con especies nativas”, “uso de agroquímicos”, “gestión adecuada de los residuos sólidos”, “capacitaciones”, y “reducción de costos por prácticas sostenibles en la producción”. Estos indicadores, ponderados de manera uniforme con un coeficiente de 1, contribuyen significativamente al resultado negativo del índice.

El indicador más crítico, “implementación de nuevas tecnologías” (-2), evidencia una deficiencia considerable en la adopción de prácticas modernas. Esta situación limita no solo la eficiencia del sistema productivo, sino que también afecta negativamente la calidad del suelo y de los recursos hídricos. La ausencia de tecnologías adecuadas dificulta la implementación de prácticas sostenibles, mientras que el uso inadecuado de agroquímicos incrementa los riesgos de lixiviación y escorrentía, lo que podría agravar la contaminación del suelo y, a largo plazo, afectar la calidad del agua en el embalse.

Por su parte, la gestión ineficiente de residuos sólidos podría contribuir al deterioro ambiental al favorecer la acumulación de desechos no biodegradables y la contaminación del medio ambiente. Estos problemas, combinados con la falta de estrategias para la siembra y conservación de agua y la ausencia de programas efectivos de reforestación, aumentan la vulnerabilidad del territorio frente a la degradación de los recursos naturales.

Sin embargo, la también evaluación identificó cinco indicadores con valores positivos, que reflejan aspectos talentosos en el sistema evaluado: “participación de la comunidad en actividades de conservación ambiental”, “percepción de la importancia del cuidado”, “rotación de cultivos”, “evaluación de la calidad del agua en cuerpos cercanos”, y “planeación y cronograma de los cultivos”. Aunque en menor cantidad, estos indicadores evidencian un compromiso inicial hacia la sostenibilidad, mostrando el interés de los actores locales en promover cambios positivos y generar conciencia ambiental.

La participación activa de la comunidad en actividades de conservación y la rotación de cultivos contribuye a reducir la presión sobre los recursos naturales y fomentar la resiliencia del sistema productivo. Asimismo, la evaluación regular de la calidad del agua ayuda a identificar posibles afectaciones en etapas tempranas, favoreciendo la implementación de medidas

correctivas. Estas acciones representan una oportunidad valiosa para contrarrestar los impactos negativos y avanzar hacia un modelo más sostenible.

Para mitigar los efectos adversos identificados, es crucial fortalecer las estrategias sostenibles mediante la adopción de tecnologías modernas, la capacitación constante de los actores locales y la implementación de programas enfocados en la conservación del suelo, el agua y la biodiversidad. Asimismo, la reforestación con especies nativas y una gestión integral de los residuos sólidos son acciones prioritarias que, de llevarse a cabo adecuadamente, no solo mejorarían el índice de sostenibilidad del territorio, sino que también garantizarían beneficios a largo plazo para la comunidad y los ecosistemas. asociados, especialmente en relación con el embalse cercano.

Es importante generar un análisis por dimensión, para analizar que dimensiones aportan más a la sostenibilidad de la finca evaluada (tabla 22):

**Tabla 28.**

*Índice de sostenibilidad por dimensión de la finca evaluada.*

<b>DIMENSIÓN</b>	<b>INDICADORES</b>	<b>RESULTADO INDICADOR</b>	<b>RESULTADO IS</b>
<b>PRODUCTIVIDAD</b>	Implementación de nuevas tecnologías	-2	
	Planeación y cronograma de los cultivos	1	-0,5
	Siembra y conservación de agua	-0,5	
<b>AMBIENTAL</b>	Evaluación de calidad de agua de los cuerpos cercanos.	1	-0,19
	Reforestación con especies nativas	-1	
	Rotación de cultivos	1	

<b>DIMENSIÓN</b>	<b>INDICADORES</b>	<b>RESULTADO INDICADOR</b>	<b>RESULTADO IS</b>
	Uso de agroquímicos	-1	
	Evaluación de calidad del suelo.	0	
	Gestión adecuada de los residuos sólidos.	-1	
	Gestión adecuada de los vertimientos.	0	
<b>SOCIAL</b>	Participación de la comunidad en actividades de conservación.	0,5	0,5
	Capacitaciones	-1	
<b>CULTURAL</b>	Percepción de la importancia del cuidado ambiental.	0,5	-0,25
<b>ECONÓMICA</b>	Reducción de costos por prácticas sostenibles en la producción.	-2	-2

Esto también indica que en cuatro de las cinco dimensiones —productiva, ambiental, social, cultural y económica— las actividades orientadas a la sostenibilidad son insuficientes, ya que todos sus índices de sostenibilidad son negativos. La dimensión con la menor valoración es la productiva (-0,5), debido a la limitada implementación de nuevas tecnologías que podrían mejorar la sostenibilidad de los recursos suelo y agua.

La única dimensión con una puntuación positiva es la social, ya que se observa una participación activa de la comunidad en actividades de conservación, orientadas a la preservación de los recursos naturales de la finca. Esta participación comunitaria destaca un interés por mantener el entorno y contribuir al bienestar a largo plazo de la finca evaluada.

Finalmente, aunque el cultivo tiene un índice de sostenibilidad bajo (-0,32), indicando una sostenibilidad limitada, no parece afectar la calidad del agua del embalse. Los resultados obtenidos

muestran que las condiciones de calidad del agua en el embalse son aceptables y que las actividades realizadas en la finca evaluada no influyen significativamente en estos niveles.

Sin embargo, es importante señalar que ciertas condiciones naturales de la zona, como la erosión y la pendiente pronunciada del área de cultivo de fresa, junto con las altas concentraciones de elementos como nitrógeno, fósforo y potasio y el alto contenido de materia orgánica en los cultivos, podrían contribuir a la afectación del embalse debido a la esorrentía. Estos factores podrían facilitar el arrastre de nutrientes y sedimentos hacia cuerpos de agua cercanos. Además, el uso inadecuado de agroquímicos en prácticas no sostenibles podría, con el tiempo, representar un riesgo para la calidad del agua y otros recursos naturales de la región si no se implementan prácticas de manejo más sostenibles.

## **FASE 7. Planeación de acciones de mejora.**

A continuación, se proponen los planes de acción orientados a mejorar el desempeño de los indicadores con menor valoración en la evaluación. Los planes de acción que se presentan están organizados según cada indicador:

### **Implementación de nuevas tecnologías.**

Para mejorar la implementación de nuevas tecnologías y fomentar la innovación tecnológica hacia la sostenibilidad, se proponen diversas acciones. En primer lugar, es fundamental realizar un diagnóstico para identificar áreas donde la tecnología puede optimizar los procesos productivos. A partir de esto, se debe llevar a cabo una investigación de tecnologías apropiadas, seleccionando aquellas que se alineen con prácticas agroecológicas, como sistemas de monitoreo de cultivos y gestión de recursos hídricos (Méndez, P., Tierra, L., Ureta, R., & Flores, Á. 2023).

Además, es crucial organizar talleres de capacitación para agricultores sobre el uso y beneficios de estas nuevas tecnologías, así como implementar proyectos piloto que permitan evaluar su efectividad antes de una adopción a gran escala. Para facilitar este proceso, se recomienda establecer alianzas con universidades y centros de investigación que puedan contribuir al desarrollo y la transferencia de tecnología adaptada a las necesidades locales.

Finalmente, es importante crear un sistema de incentivos para la adopción de tecnologías sostenibles, como descuentos en equipos, con el objetivo de estimular su implementación. A través

de estas acciones, se espera lograr una mayor innovación tecnológica en el sistema productivo, mejorando su sostenibilidad y eficiencia.

Para mejorar las prácticas sostenibles de uso del agua y avanzar hacia la sostenibilidad, se propone adoptar tecnologías de riego eficiente, como riego por goteo, y establecer sistemas de captación de agua pluvial para reutilizarla. Es fundamental implementar un programa de monitoreo del consumo de agua para identificar oportunidades de mejora, así como ofrecer capacitación a los agricultores sobre conservación y manejo del riego (Velasco, J., Aznar, J., Belmonte, L., & Román, I. 2018).

#### **Planeación y cronograma de los cultivos.**

Para mejorar la planeación y cronograma de los cultivos en la finca evaluada, se propone un plan de acción que incluye la evaluación de la situación actual, la capacitación del personal en técnicas de planificación agrícola y el uso de tecnología para optimizar la gestión de recursos. Se implementarán prácticas como la rotación de cultivos y la siembra escalonada, además de establecer un sistema de monitoreo y evaluación para ajustar el plan según sea necesario. Fomentar la participación comunitaria y realizar revisiones periódicas del plan permitirán adaptar las estrategias a las condiciones cambiantes, con el objetivo de aumentar la eficiencia de producción y la sostenibilidad agrícola. Por último, es crucial establecer una planificación adecuada en la aplicación de agroquímicos, tomando en cuenta sus compuestos, como el nitrógeno, fósforo y potasio presente en concentraciones altas en la finca, para evitar efectos adversos en el suelo y en el ecosistema (Ramírez-Valencia, V., Cárdenas-Aguirre, D. M., & Ruiz-Herrera, S. 2018).

La planificación y cronograma de los cultivos en la finca evaluada debe considerar diversos factores clave para optimizar la producción y la rentabilidad. Entre los aspectos más relevantes se encuentran el ciclo de cultivo de cada especie, la época de siembra, la rotación de cultivos y la sincronización con los recursos hídricos y laborales.

*Ciclo de cultivo de cada especie:*

Maíz: El ciclo varía según la variedad. Las variedades de ciclo corto tienen un periodo de 90-120 días, mientras que las de ciclo largo se extienden entre 150-180 días.

Papa: El ciclo de cultivo de la papa es de 90-120 días, dependiendo de las condiciones del clima y del manejo agronómico.

Fresa: Es un cultivo perenne, pero requiere rotación cada 2-3 años debido al agotamiento del suelo, lo cual permite mantener la calidad del cultivo y optimizar el uso de nutrientes.

*Época de siembra:*

Maíz: La siembra del maíz depende principalmente de las lluvias. Generalmente, se realiza en las temporadas húmedas, lo que permite aprovechar la humedad natural del suelo.

Papa: Puede sembrarse en las temporadas secas, tomando precauciones para evitar las heladas, ya que las bajas temperaturas pueden afectar el desarrollo del cultivo.

Fresa: Se establece al inicio de la temporada seca, asegurando el acceso al riego durante este período, lo cual es esencial para su crecimiento y producción.

*Referencias técnicas:*

Para una planificación más detallada, se puede consultar el Manual técnico para el manejo integrado del cultivo de la papa de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (CORPOICA), el cual ofrece orientaciones metodológicas para el análisis económico del cultivo

y proporciona tablas sobre costeo, además de alternativas para mejorar la rentabilidad. Para el cultivo de maíz, se puede hacer referencia al documento "Aspectos técnicos de la producción de maíz en Colombia" de la Federación Nacional de Cultivadores de Cereales (FENALCE), 2011. Y para el cultivo de fresa, el Manual de fresa de la Cámara de Comercio de Bogotá (Vicepresidencia de Fortalecimiento Empresarial, 2015) ofrece valiosa información técnica sobre su manejo y optimización.

Con esta información, se puede elaborar un plan de siembra y cosecha más eficiente, alineado con las condiciones locales y las mejores prácticas agrícolas.

### **Siembra y conservación de agua.**

En cuanto a la implementación de nuevas técnicas de conservación, una de las primeras medidas sería introducir tecnologías de captación y almacenamiento de agua, como zanjas de infiltración y cosecha de agua de lluvia, que pueden ayudar a mejorar la recarga de acuíferos y la conservación del recurso (Abdullah, et al., 2020). Además, el uso eficiente del riego, implementando sistemas de riego por goteo o aspersión, es clave para evitar el desperdicio de agua en actividades agrícolas. También se puede considerar la instalación de sistemas de reciclaje de aguas grises para reutilizar este recurso en tareas como el riego (Ebrahim, 2020). En primer lugar, se sugiere la instalación de un sistema automatizado de sensores que mida características clave como el pH, la turbidez, la temperatura y los niveles de oxígeno disuelto. Este sistema permitirá un monitoreo en tiempo real, facilitando la toma de decisiones informadas sobre la gestión del recurso hídrico (Carriazo, 2021). Además, la capacitación del personal local para interpretar los

datos del monitoreo es fundamental para el éxito de esta estrategia. Involucrar a las comunidades locales mediante programas de monitoreo participativo también puede fortalecer la sostenibilidad a largo plazo (UICN, 2018).

Respecto al indicador de siembra y conservación del agua, se deben implementar sistemas de tratamiento de aguas residuales para su reutilización en el riego, así como promover el uso de coberturas vegetales que mejoren la infiltración de agua en el suelo. Mejorar la captación de agua de lluvia, también contribuiría a la conservación del recurso (Navarro, 2021).

Por último, es fundamental aumentar la frecuencia de los análisis y abarcar una mayor gama de características de calidad del agua, como la presencia de contaminantes biológicos y químicos. El uso de tecnologías de teledetección, como drones o satélites, permitiría un monitoreo más eficiente y preciso, complementando los análisis físicos y químicos realizados en el lugar (Bazán, et al., 2005; Vera, et al., 2021).

### **Evaluación de calidad de agua de los cuerpos cercanos.**

A pesar de que la evaluación de la calidad del agua del embalse Mancilla ha mostrado un grado aceptable en esta ocasión, es fundamental implementar acciones para conservar esta condición. Esto se logrará mediante la mejora de las actividades que tienen un mayor impacto negativo en la sostenibilidad del sistema. Algunas de estas acciones incluyen la adopción de nuevas técnicas para el uso sostenible del suelo y el agua, así como la reducción del uso de agroquímicos y la implementación de prácticas agrícolas más responsables. Estas medidas no solo ayudarán a

mantener la calidad del agua, sino que también contribuirán a la sostenibilidad general de la finca y la salud del ecosistema circundante (Márquez-Pacheco, H., Leyva-Morales, J. B., Davizón-Castillo, Y. A., Ontiveros-García, L. A., & Amillano-Cisneros, J. M. 2023).

### **Reforestación con especies nativas.**

La reforestación con especies nativas es una estrategia clave para la restauración de áreas degradadas, particularmente en ecosistemas tropicales donde la biodiversidad y los servicios ecosistémicos son altamente valorados. Este enfoque se basa en la utilización exclusiva de especies locales, que están mejor adaptadas a las condiciones ambientales del área y contribuyen de manera significativa a la recuperación de la biodiversidad. Además, las plantas nativas ayudan a mejorar la estructura del suelo y facilitan la infiltración de agua, lo cual es fundamental para la regulación del ciclo hidrológico y la reducción de la erosión en áreas afectadas por la deforestación o degradación (Catterall, et al., 2005). Se pueden utilizar especies como el roble (*Quercus humboldtii*), una especie forestal que favorece la regeneración natural y contribuye a la estabilización de suelos, o el arrayán (*Myrtaceae*), que se adapta bien a suelos húmedos y es eficaz en la protección de cuencas hídricas. Para conocer otras especies adecuadas para la reforestación, se recomienda contactar a la Empresa Aguas de Facatativá, que proporcionará información detallada y orientaciones sobre el proceso de reforestación, además de suministrar las plantas necesarias.

La inclusión de un programa de monitoreo periódico en las iniciativas de reforestación es esencial para asegurar la efectividad del proceso a largo plazo. Este monitoreo permite evaluar el

progreso y realizar los ajustes necesarios en función de factores como la tasa de supervivencia de las especies plantadas, el aumento de la cobertura vegetal y la reaparición de fauna local que depende de la vegetación nativa. Así, un sistema de seguimiento bien diseñado no solo garantiza la sostenibilidad del proyecto, sino que también permite documentar el impacto positivo de la reforestación con especies nativas en la biodiversidad y los recursos hídricos (Shimamoto, et al., 2018).

### **Rotación de cultivos.**

En cuanto a la rotación de cultivos, es fundamental establecer un calendario detallado de siembra y cosecha que incluya un sistema rotativo con cultivos de cobertura y leguminosas para mejorar la fertilidad del suelo y reducir la dependencia de fertilizantes químicos. Además, se debe capacitar a los agricultores sobre los beneficios de la rotación y las prácticas agroecológicas (Bolaños Sigcho, E. M. 2020).

### **Uso de agroquímicos.**

Para optimizar el uso de agroquímicos en la agricultura, es fundamental implementar un plan de reducción progresiva que sustituya los productos químicos por alternativas biológicas y prácticas de manejo integrado de plagas. Esto no solo ayudará a minimizar el impacto ambiental, sino que también permitirá a los agricultores manejar sus cultivos de manera más sostenible (Islam, et al., 2024). Además, es esencial capacitar a los agricultores en el uso adecuado y responsable de agroquímicos para evitar sobredosis y garantizar una aplicación eficiente. La presencia de

nutrientes nocivos en el suelo, resultado del uso intensivo de agroquímicos, ha deteriorado la calidad de este y ha modificado desfavorablemente su pH, haciéndolo más ácido y provocando la pérdida de nutrientes esenciales para su conservación. En cuanto a la fertilización, se recomienda reducir la aplicación de fertilizantes nitrogenados o aquellos con alto contenido de nitrógeno para evitar la sobrecarga en el suelo y las posibles lixiviaciones (Verma, et al., 2023). Realizar análisis periódicos del suelo permitirá monitorear los niveles de nutrientes y ajustar el uso de biofertilizantes de acuerdo a las necesidades específicas de los cultivos.

### **Evaluación de calidad del suelo.**

Es fundamental fomentar estrategias que mejoren la salud del suelo, ya que, como se evidenció en esta evaluación, los suelos presentan un pH muy ácido y altas concentraciones de nitrógeno, fósforo y potasio. Esto resulta en una baja disponibilidad de otros elementos esenciales. Para abordar esta problemática, es crucial promover la adopción de prácticas agroecológicas, tales como la labranza mínima, que mejora la estructura del suelo; el compostaje, que enriquece el suelo con nutrientes; y el uso de biofertilizantes, que pueden aumentar la biodiversidad del suelo y mejorar su fertilidad.

Además, se deben implementar planes de acción que incluyan la realización de análisis de suelo regulares para monitorear el pH y la concentración de nutrientes, lo que permitirá ajustar las prácticas de manejo. La educación y capacitación de los agricultores sobre técnicas sostenibles también es esencial para asegurar la correcta implementación de estas prácticas. Al fomentar una gestión adecuada de los suelos y la adopción de enfoques agroecológicos, se espera no solo mejorar

la salud del suelo, sino también aumentar la productividad agrícola y contribuir a la sostenibilidad del ecosistema en su conjunto (Wezel, et al., 2014).

### **Gestión adecuada de los residuos sólidos.**

En primer lugar, respecto a la gestión adecuada de los residuos sólidos, se observó que existe un manejo deficiente, con plásticos dispersos en las áreas de cultivo. Para abordar este problema, se propone implementar un sistema de segregación de residuos establecido en la resolución 2184 del 2019, que permita clasificar los materiales en reciclables, orgánicos y no reciclables, con contenedores adecuados en puntos estratégicos (MADS, 2019). Además, es fundamental establecer puntos de acopio temporal para la recolección y almacenamiento de plásticos y otros residuos no biodegradables, asegurando que estos no afecten las áreas de cultivo. Para reforzar esta acción, se sugiere la implementación de un programa de reciclaje, en alianza con empresas o cooperativas locales. Finalmente, será clave sensibilizar a los trabajadores y al propietario a través de talleres periódicos sobre la importancia de una correcta gestión de los residuos sólidos en las áreas rurales (DNP, 2022).

### **Gestión adecuada de los vertimientos.**

En lo que respecta a la gestión adecuada de los vertimientos, se observó que el único pozo séptico disponible tiene más de 60 años sin recibir mantenimiento. Esto representa un riesgo importante de contaminación. Para solucionarlo, se recomienda realizar una inspección técnica del pozo séptico para evaluar su estado y, si es necesario, proceder con su mantenimiento o

rehabilitación. Si el pozo no puede ser restaurado adecuadamente, se deberá considerar la instalación de un nuevo sistema de tratamiento de aguas residuales más moderno y adecuado a las necesidades de la finca. Además, es importante implementar un plan de monitoreo periódico de la calidad de las aguas residuales para prevenir posibles contaminaciones, junto con capacitaciones para el personal sobre el mantenimiento básico de estos sistemas.

En cuanto a la capacitación en el manejo de residuos peligrosos y vertimientos, se detectó una falta de control y conocimiento sobre cómo gestionar estos residuos. El propietario mencionó no haber recibido formación en esta materia, lo cual es un problema serio. Se plantea la creación de programas de capacitación especializados que cubran la identificación, almacenamiento y disposición segura de los residuos peligrosos, así como buenas prácticas para prevenir la contaminación del suelo y del agua. Además, será útil entregar material educativo, como folletos y guías, para facilitar la comprensión de los temas tratados en las capacitaciones. Involucrar a las autoridades ambientales locales también será esencial, ya que estas pueden ofrecer apoyo técnico y asegurar el cumplimiento de las normativas vigentes.

### **Participación de la comunidad en actividades de conservación.**

Para fomentar la participación de la comunidad en actividades de conservación del embalse, es fundamental promover su involucramiento activo mediante incentivos como certificaciones o reconocimientos. Además, se deben crear espacios de diálogo con las entidades gubernamentales para incluir a la comunidad en la planificación y ejecución de proyectos de conservación, lo que aumentará la percepción sobre la importancia del cuidado ambiental. Esto

puede complementarse con programas de concientización en escuelas y comunidades vecinas para fortalecer la cultura de protección ambiental (USAID, 2022).

### **Capacitaciones.**

Para llevar a cabo las actividades planificadas, como la implementación de nuevas tecnologías y la promoción de la innovación tecnológica hacia la sostenibilidad, así como la conservación del agua, del suelo, y la gestión adecuada de residuos, es crucial establecer un programa integral de capacitaciones. Estas capacitaciones deben abordar temas específicos, como el uso responsable de agroquímicos y el manejo de vertimientos, con el objetivo de preparar a los participantes y garantizar la efectividad de las acciones propuestas (Camacho Marín, R., Rivas Vallejo, C., Gaspar Castro, M., & Quiñonez Mendoza, C. 2020).

Además de las capacitaciones, se debe crear un sistema de seguimiento que evalúe el impacto de las tecnologías implementadas y la adopción de prácticas sostenibles en la finca. Esto incluirá la realización de talleres prácticos y sesiones de intercambio de experiencias entre los participantes, fomentando un ambiente de aprendizaje colaborativo. Al empoderar a los agricultores con conocimientos y habilidades en estas áreas, se logrará una mayor adopción de prácticas sostenibles que no solo beneficiarán a la finca evaluada, sino que también contribuirán a la protección del medio ambiente y la salud de la comunidad.

### **Percepción de la importancia del cuidado ambiental.**

Para mejorar la percepción de la comunidad sobre la importancia del cuidado ambiental en la calidad del agua y el suelo, es fundamental desarrollar estrategias educativas que sensibilicen y

motiven a la población hacia prácticas sostenibles. Según Cáceres Vizarreta et al. (2023), la percepción ambiental influye en las actitudes y comportamientos hacia el entorno, lo cual resalta la importancia de programas de educación ambiental que fortalezcan la comprensión de los efectos de la contaminación y la degradación del suelo. Estos programas pueden incluir talleres en escuelas y comunidades vecinas, así como materiales educativos que expliquen cómo el uso de productos contaminantes y prácticas insostenibles afectan la calidad del agua y el suelo. Asimismo, se sugiere que las instituciones y organizaciones locales implementen sistemas de monitoreo comunitario, en los que los ciudadanos puedan participar activamente en la recolección de datos y análisis, promoviendo así un sentido de responsabilidad compartida en la protección ambiental (Calixto & Herrera, 2010).

Además, la creación de incentivos, como reconocimientos o certificaciones, puede aumentar la participación comunitaria en iniciativas de conservación. Estos incentivos pueden ser acompañados de alianzas con entidades gubernamentales para el diseño de políticas y proyectos de reforestación y restauración en áreas estratégicas, especialmente en zonas de captación de agua. La inclusión de espacios de diálogo entre la comunidad y las entidades gubernamentales contribuye a que los proyectos de conservación se adapten mejor a las necesidades locales, incrementando la eficacia de las acciones de preservación y el compromiso de los ciudadanos (Calixto & Herrera, 2010; Cáceres, et al., 2023).

### **Reducción de costos por prácticas sostenibles en la producción.**

Para mejorar el indicador de "reducción de costos por prácticas sostenibles en la producción", se propone implementar un plan de acción que incluya la evaluación de los costos actuales de producción y la identificación de áreas donde se pueden aplicar prácticas sostenibles que generen ahorro. Esto puede lograrse mediante la adopción de técnicas de cultivo más eficientes, como la rotación de cultivos y el uso de biofertilizantes, que reduzcan la necesidad de insumos costosos. Además, se fomentará la capacitación del personal en la gestión de recursos y la eficiencia energética, así como la implementación de tecnologías que optimicen el uso de agua y reduzcan la dependencia de agroquímicos. Se establecerá un sistema de monitoreo para medir el impacto de estas prácticas en la reducción de costos y la mejora de la rentabilidad, asegurando que se realicen ajustes continuos para maximizar los beneficios económicos y ambientales (Roffé, MA, & González, FAI. 2023).

## CONCLUSIONES

La evaluación realizada en esta investigación ha permitido concluir que, aunque la fertilidad del suelo es adecuada para los cultivos de papa, maíz y fresa, según los índices de factibilidad del suelo (IFS), existen condiciones preocupantes en los suelos, como las altas concentraciones de nitrógeno, potasio y materia orgánica. Estos niveles elevados podrían afectar la sostenibilidad de los cultivos y la salud del suelo a largo plazo. En este contexto, el índice de sostenibilidad negativo de -0,32 en la finca evaluada sugiere que el sistema productivo actual no es completamente sostenible y requiere ajustes en las prácticas de manejo agrícola. Sin embargo, a pesar de estos indicios negativos en la calidad del suelo, no se ha observado un impacto directo en la calidad del agua del embalse Mancilla. El análisis de la calidad del agua, realizado mediante el cálculo del Índice de Calidad del Agua (ICA), ha determinado que la calidad es aceptable, con un estado trófico oligotrófico, lo que indica bajos niveles de nutrientes y una adecuada conservación del agua en su fase actual.

Es importante tener en cuenta que las condiciones naturales del área, como la erosión y la pendiente pronunciada en las zonas de cultivo de fresa, junto con las altas concentraciones de nutrientes en el suelo y el constante uso del suelo para cultivos transitorios, podrían facilitar el arrastre de sedimentos y nutrientes hacia el embalse, especialmente durante eventos de lluvia. Además, el uso inadecuado de agroquímicos representa un riesgo potencial para la calidad del agua y otros recursos naturales de la región, en caso de no implementarse prácticas de manejo más sostenibles tanto a corto como a largo plazo.

La comunidad local es consciente de la necesidad de realizar cambios en sus prácticas agrícolas, orientándolas hacia la sostenibilidad. Están comprometidos con el cuidado ambiental y reconocen la importancia de la conservación de los recursos hídricos y del suelo. Aunque, actualmente, el sistema productivo de la finca evaluada no influye negativamente en la calidad del agua del embalse, las características del suelo actúan como un amortiguador, lo que podría cambiar en el futuro si las actividades agrícolas no se manejan de manera sostenible. De no adoptarse prácticas más responsables, es probable que, a largo plazo, el embalse y otros recursos naturales como el suelo se vean afectados, lo cual tendría implicaciones negativas para la comunidad, como la disminución de la fertilidad del suelo y la degradación de los ecosistemas locales.

Por ello, es fundamental adoptar planes de mejora que garanticen la conservación de la calidad del agua del embalse y la protección de los recursos naturales. Para lograrlo, se deben implementar prácticas sostenibles en la finca, como la conservación del agua mediante sistemas de riego por goteo, que son más eficientes, y fortalecer otras prácticas, como la rotación de cultivos, que, aunque ya se lleva a cabo, podría optimizarse. Además, es crucial fomentar la participación de la comunidad en estas iniciativas.

Las metodologías de evaluación de sostenibilidad, utilizando indicadores locales, son herramientas esenciales para la planificación de programas agroecológicos y para empoderar a la comunidad campesina en la adopción de estrategias de conservación. Asimismo, es necesario integrar a todos los actores involucrados, incluidos los agricultores y las entidades responsables del manejo del embalse, para garantizar la sostenibilidad de los recursos hídricos y preservar la calidad del agua como un recurso vital para las generaciones futuras.



## REFERENCIAS

- Acevedo, A & Angarita, A. (2013). Metodología para la evaluación de sustentabilidad a partir de indicadores locales para el diseño y desarrollo de programas agroecológicos - MESILPA. Bogotá: Corporación Universitaria Minuto de Dios.
- Akinnawo, S. O. (2023). Eutrophication: Causes, consequences, physical, chemical and biological techniques for mitigation strategies. *Environmental Challenges*, 12, 100733.  
<https://doi.org/10.1016/j.envc.2023.100733>
- Aldana, G & Rojas C. (2022). Plan De Ordenamiento Territorial – POT. Alcaldía Municipal de Facatativá
- Altieri, M. A. (1995). *Agroecology: The Science of Sustainable Agriculture*. Boulder, CO: Westview Press.  
[https://www.researchgate.net/publication/327101237\\_Agroecology\\_The\\_Science\\_of\\_Sustainable\\_Agriculture](https://www.researchgate.net/publication/327101237_Agroecology_The_Science_of_Sustainable_Agriculture)
- Álvarez Villada, D. M., Estrada Iza, M., & Cock, J. H. (2010). RASTA: Rapid Soil and Terrain Assessment. Guía práctica para la caracterización del suelo y del terreno.  
<https://hdl.handle.net/10568/69682>

Astier, M., M. Maass-Moreno, y J. Etchevers-Barra. 2002. Derivación de indicadores de calidad de suelos en el contexto de la agricultura sustentable. *Agrociencia* 36: 605-620.

Astier, M. Masera, O y Galván-Miyoshi, Y. (2008. ). Evaluación de sustentabilidad. un enfoque dinámico y multidimensional. En Astier, M y González, C. *Formulación de indicadores socio-ambientales para evaluaciones de sustentabilidad de sistemas de manejo complejos*. Valencia - España: SEAE. CIGA. ECOSUR. CIEco. UNAM. GIRA.

Baveye, P. C., J. Baveye, & J. Gowdy. (2016). Soil “ecosystem” services and natural capital: Critical appraisal of research on uncertain ground. *Frontiers in Environmental Science*, 4.

<https://doi.org/10.3389/fenvs.2016.00041>

Bazán, R., Corral, M., Pagot, M., Rodríguez, A., Oroná, C., Rodríguez, M., & Larrosa, N. (2005).

Teledetección y modelado numérico para el análisis de la calidad de agua del embalse Los Molinos, Córdoba, Argentina. *Ingeniería Hidráulica en México*, 20(2), 121-135.

<https://www.researchgate.net/publication/228669812>

Benavides, L., Sanabria, C., & Silva, P. (2020). Evaluación de la calidad del agua en el embalse hidroeléctrico El Quimbo. *Entre Ciencia e Ingeniería*, 14(27), 107-116.

<https://doi.org/10.31908/19098367.1800>

Berli, M. 2001. Compaction of agricultural subsoils by tracked heavy construction machinery, 141pp.,

Tesis (en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas), Instituto Federal Suizo de Tecnología de Zurich, Zurich, Suiza.

Betancourt, C., Suárez, R., & Jorge, F. (2012). Influencia de los procesos naturales y antrópicos sobre la calidad del agua en cuatro embalses

cubanos. [https://ddd.uab.cat/pub/limnetica/limnetica\\_a2012v31n2/limnetica\\_a2012v31n2p193.pdf](https://ddd.uab.cat/pub/limnetica/limnetica_a2012v31n2/limnetica_a2012v31n2p193.pdf)

Binkley, D., & Vitousek, P. (1989). Soil nutrient availability. In R. W. Pearcy, J. R. Ehleringer, H. A.

Mooney, & P. W. Rundel (Eds.), *Plant physiological ecology: Field methods and instrumentation* (pp. 75–96). [https://doi.org/10.1007/978-94-009-2221-1\\_5](https://doi.org/10.1007/978-94-009-2221-1_5)

Bolaños Sigcho, E. M. (2020). Impacto de las prácticas agroecológicas sobre la conservación,

incremento o interacción de servicios ecosistémicos en suelos agrícolas: Revisión de Literatura.

<https://bdigital.zamorano.edu/server/api/core/bitstreams/b4e2023a-a0b8-40e3-a65f-638921b822e4/content>.

- Borzi, E. (2018). Influencia de la actividad antrópica en la geohidrología de la cuenca del Río Samborombón. <https://repositorioslatinoamericanos.uchile.cl/handle/2250/4327769>
- Boyd, C. E. (2015). Water Quality: An Introduction. Springer.  
<https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-23335-8>
- Bremer, E., and K. Ellert. 2004. Soil quality indicators: A review with implications for agricultural ecosystems in Alberta. Alberta Environmentally Sustainable Agriculture. Soil Quality Program. Alberta Agricultura, Food and Rural Development. Symbio AG Consulting. Lethbridge, Alberta. Canada.
- Brenes, R., & Rojas, L. (2005). El agua: sus propiedades y su importancia biológica. Acta Académica, 37(noviembre), 167-196.
- Caballero Mamani, A. R. (2012). Comportamiento del nitrógeno y biomasa microbiana en suelos con diferente manejo, en la localidad de Villa Patarani (Altiplano Central). Universidad Mayor de San Andrés.
- Cáceres, A., Sota, A., & Tapia, T. (2023). Percepciones sobre la conservación del medio ambiente de los estudiantes del centro de idiomas de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco.

LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades, 4(1), 1208–1226.

<https://doi.org/10.56712/latam.v4i1.332>

Cairo P. 1995. La Fertilidad Física de suelo y la Agricultura Orgánica en el Trópico. UNA - Managua, Nicaragua. 228p.

California State Water Resources Control Board. (2018). Conductivity as a Water Quality Parameter.

SWAMP Program Document, 3130sp. Recuperado de

[https://www.waterboards.ca.gov/water\\_issues/programs/swamp/docs/cwt/guidance/3130sp.pdf](https://www.waterboards.ca.gov/water_issues/programs/swamp/docs/cwt/guidance/3130sp.pdf)

Calixto, R., & Herrera, L. (2010). Estudio sobre las percepciones y la educación ambiental. Tiempo de Educar, 11(22), 227–249. Recuperado de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=31121072004>.

Camacho Marín, R., Rivas Vallejo, C., Gaspar Castro, M., & Quiñonez Mendoza, C. (2020). Innovación y tecnología educativa en el contexto actual latinoamericano. Revista de Ciencias Sociales (Ve), 26, 460-472. Universidad del Zulia. Universo <https://doi.org/10/rcs.v26i0.3562>

Cámara de Comercio de Bogotá. (2015). Manual Fresa. Programa de apoyo agrícola y agroindustrial.

[https://bibliotecadigital.ccb.org.co/server/api/core/bitstreams/0b48d772-4858-4a9a-8809-](https://bibliotecadigital.ccb.org.co/server/api/core/bitstreams/0b48d772-4858-4a9a-8809-641a22870f6e/content)

[641a22870f6e/content.](https://bibliotecadigital.ccb.org.co/server/api/core/bitstreams/0b48d772-4858-4a9a-8809-641a22870f6e/content)

- Camargo, J. A., & Alonso, Á. (2006). Ecological and toxicological effects of inorganic nitrogen pollution in aquatic ecosystems: A global assessment. *Environment International*, 32(6), 831-849. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0160412006000602>
- Cantú, M. P., Becker, A., y Bedano, J. C. (2007). Evaluación de la calidad de suelos mediante el uso de indicadores e índices. <https://www.scielo.org.ar/pdf/cds/v25n2/v25n2a08.pdf>
- Cárdenas Calvachi, Gloria Lucia, & Sánchez Ortiz, Iván Andrés. (2013). Nitrógeno en aguas residuales: orígenes, efectos y mecanismos de remoción para preservar el ambiente y la salud pública. *Universidad y Salud*, 15(1), 72-88. Retrieved December 04, 2024, from [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0124-71072013000100007&lng=en&tlng=es](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0124-71072013000100007&lng=en&tlng=es).
- Cárdenas, M. F., Vahos Mesa, G., Zapata, C., Botero Rivera, T. A., Tobón, D., Rincón Grajales, C. L., Vásquez, Á., Pérez Rojas, J., Contreras, J., Silva, A., & Cortés Traslaviña, D. (2023). Reflexiones y aprendizajes sobre el ordenamiento territorial de embalses. Tragaluz Editores. ISBN 978-628-01-0281-8.
- Carriazo, Y. P. (2021). Propuesta de estrategias para el manejo de las aguas residuales en la finca La Esmeralda [Universidad Autónoma de Bucaramanga]. Repositorio Institucional UNAB. [https://repository.unab.edu.co/bitstream/handle/20.500.12749/15481/2021\\_Tesis\\_Yulieth\\_paola](https://repository.unab.edu.co/bitstream/handle/20.500.12749/15481/2021_Tesis_Yulieth_paola)

[Carriazo\\_Regino.pdf?sequence=1](#)

- Castañeda, P., Sánchez, T. (2024). Determinación de la Productividad Primaria y el Estado de Eutrofización del Embalse Mancilla de Facatativá. Universidad de Cundinamarca.
- Castillo, X., Etchevers, J., Hidalgo, C., & Aguirre, A. (2021). Evaluación de la calidad de suelo: generación e interpretación de indicadores. *Terra Latinoamericana*, 39.  
<https://www.redalyc.org/journal/573/57366066002/57366066002.pdf>
- Castrejón, M., Sánchez, E., & Ortiz, L. (2014). Plaguicidas: generalidades, usos e impactos sobre el ambiente y la salud.
- Catterall, C., Kanowski, J., Lamb, D., Wardell, G & Erskine, P. (2005). Reforestation for biodiversity recovery: opportunities and limitations.
- Cedeño Barén, E. C., y Mendoza Bermeo, M. Y. (2016). Incidencia de las actividades agropecuarias del sitio La Bóveda, en la calidad del agua de Escorrentía al embalse Sixto Durán Ballén. Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López.
- Chapa, C. (2010). Eutrofización: Abundancia que mata. *Como ves*. 22-25.

Cuéllar, D. (2018). Caracterización hidrobiológica y fisicoquímica del humedal embalse Mancilla, Facatativá. Universidad de Cundinamarca.

Departamento Nacional de Planeación. (2022). Guía Nacional para la adecuada separación de residuos sólidos.

[https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Vivienda%20Agua%20y%20Desarrollo%20Urbano/Guia\\_Residuos%20Solidos\\_Digital.pdf](https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Vivienda%20Agua%20y%20Desarrollo%20Urbano/Guia_Residuos%20Solidos_Digital.pdf)

Díaz, J., & Granada, C. (2018). Efecto de las actividades antrópicas sobre las características fisicoquímicas y microbiológicas del río Bogotá a lo largo del municipio de Villapinzón, Colombia. <https://chooser.crossref.org/?doi=10.15446%2Frevfacmed.v66n1.59728>

Dodds, W. K., & Whiles, M. R. (2010). Freshwater Ecology: Concepts and Environmental Applications of Limnology. Academic Press.

<https://www.sciencedirect.com/book/9780123747242/freshwater-ecology>

Domínguez, J. (2019). La construcción de presas en México. Evolución, situación actual y nuevos enfoques para dar viabilidad a la infraestructura hídrica. Ciudad de México.

[https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1405-10792019000100003](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-10792019000100003)

Doran, J. W., and T. B. Parkin. 1996. Quantitative indicators of soil quality: a minimum data set. In: Doran, J. W., and A. Jones J. (eds.). *Methods for Assessing Soil Quality*. SSSA Special Publication Number 49. Soil Science Society of America, INC. Madison. Wisconsin, USA. pp: 25-37.

EL TIEMPO. (15 de diciembre de 2014). Inauguran embalse Mancilla en Facatativá. EL TIEMPO.

Environment and Science, Queensland Government. (2018). *Monitoring and sampling manual 2018: Environmental Protection (Water) Policy 2009*. Queensland Government.  
[https://environment.des.qld.gov.au/\\_data/assets/pdf\\_file/0031/89914/monitoring-sampling-manual-2018.pdf](https://environment.des.qld.gov.au/_data/assets/pdf_file/0031/89914/monitoring-sampling-manual-2018.pdf)

Empresa Aguas De Facatativá Acueducto Alcantarillado Aseo y Servicios Complementarios E.A.F. S.A.S. E.S.P. (2023). *Plan de emergencia y contingencia para el manejo de desastres y emergencias de acueducto y alcantarillado*.  
[https://aguasfacatativa.micolombiadigital.gov.co/sites/aguasfacatativa/content/files/000630/31466\\_pec-plan-de-emergencia-y-contingencia-de-desastres-eaf-2023.pdf](https://aguasfacatativa.micolombiadigital.gov.co/sites/aguasfacatativa/content/files/000630/31466_pec-plan-de-emergencia-y-contingencia-de-desastres-eaf-2023.pdf)

Escobar, M., Panadero, A., Medina, C., Álvarez, J. Tenjo, A., & Sandoval, L. (2020). Efecto de prácticas agroecológicas sobre características del suelo en un sistema de lechería especializada del trópico alto colombiano. *Development*, 32(4).

FAO. (2016). Propiedades físicas del suelo. <https://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/propiedades-del-suelo/propiedades-fisicas/es/>

FAO. (2017). The Future of Food and Agriculture – Trends and Challenges.

<https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/2e90c833-8e84-46f2-a675-ea2d7afa4e24/content>

Federación Nacional de Cultivadores de Cereales (FENALCE). (2011). ASPECTOS TÉCNICOS DE LA PRODUCCIÓN DE MAÍZ EN COLOMBIA. Bogotá (Colombia).

Fernández, M. T. (2007). Phosphorus: Friend or foe. ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar, 41(2), 51–57. Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar, Ciudad de La Habana, Cuba. <https://www.redalyc.org/pdf/2231/223114970009.pdf>

Garrido, M. (1994). Interpretación de análisis de suelos. Instituto Nacional de Reforma y Desarrollo Agrario. Madrid, España.

Ghaemi, M., A. R. Astaraei, H. Emami, M. Nassiri M., and S. H. Sanaeinejad. 2014. Determining soil indicators for soil sustainability assessment using principal component analysis of Astan Quds-east of Mashhad- Iran. J. Soil Sci. Plant Nut. 14: 987-1004.

Gisbert, J., Ibáñez, S., & Moreno, H (2010). La textura de un suelo.

<https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/7775/Textura.pdf>

Gracia, J. P. (2015). Desarrollo sostenible: origen, evolución y enfoques. (Documento de docencia No. 3). Bogotá: Ediciones Universidad Cooperativa de Colombia.

<http://dx.doi.org/10.16925/greylit.1074>

Gysi, M., Maeder, V., y Weiskopf, P. (2001). Pressure distribution underneath tires of agricultural vehicles. Transactions of ASA.

Hernández, M. (2019). Análisis territorial de la problemática ambiental urbana: el caso del municipio de Facatativá, Cundinamarca, Colombia (1980-2010). *Perspectiva Geográfica*, 24(1), 92-115.

<https://doi.org/10.19053/01233769.9074>

Herrera Heredia, C. A., Fierro Guzmán, L. H., & Moreno Mendoza, J. D. (2000). Manual técnico para el manejo integrado del cultivo de la papa. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria.

Herrera, M.; Viviescas, J & Aguirre, J. (2021). Effect of the Ground Slope and Soil Infiltration on the Water Nitrate Ion Concentrations. *Revista EIA*, 18(35), Reia35015, 1-9.

<http://www.scielo.org.co/pdf/eia/v18n35/2463-0950-eia-18-35-200.pdf>

Ibáñez, M. (2022). Planificación agroecológica: Metodología para la gestión de recursos agroecológicos en zonas periurbanas. *Revista de Estudios Agroecológicos*, 1(2), 45-67. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/8658081.pdf>

Ibáñez, S., Moreno, H., Gisbert, J. (2010). Morfología de las cuencas hidrológicas. <http://hdl.handle.net/10251/10782>

IDEAM, 2006. IDEAM. Obtenido de

<https://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/Conductividad+El%C3%A9ctrica.pdf/f25e2275-39b2-4381-8a35-97c23d7e8af4>

IDEAM, 2010. Leyenda Nacional de Coberturas de la Tierra. Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia Escala 1:100.000. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Bogotá, D. C., 72p

IDEAM, U.D.C.A., 2015. Protocolo para la identificación y evaluación de la degradación de suelos por erosión. IDEAM - MADS -U.D.C. A Bogotá D.C., Colombia., 170 págs. Versión 2. Publicación aprobada por el IDEAM, diciembre de 2015, Bogotá D.C., Colombia.

IDEAM - Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2024). Informe de predicción climática a corto, mediano y largo plazo.

[https://bart.ideam.gov.co/wrfideam/new\\_modelo/CPT/informe/Informe.pdf](https://bart.ideam.gov.co/wrfideam/new_modelo/CPT/informe/Informe.pdf)

IGAC. 2008. Mapa de coberturas de la tierra cuenca Magdalena - Cauca metodología Corine Land Cover para Colombia escala 1:100.000. ONF Internacional. 24 pp.

IGAC. 2013. Descripción y corrección de productos Land Sat 8 LDCM (Land Sat 8 LDCM), (Land Sat Community Mission) Versión 1.0. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Bogotá D.C., Colombia. 46 pp.

IGAC. (2021). Clasificación de las tierras por su capacidad de uso.

[https://antiguo.igac.gov.co/sites/igac.gov.co/files/in-gag-pc05-02\\_clasificacion\\_de\\_las\\_tierras\\_por\\_su\\_capacidad\\_de\\_uso.pdf](https://antiguo.igac.gov.co/sites/igac.gov.co/files/in-gag-pc05-02_clasificacion_de_las_tierras_por_su_capacidad_de_uso.pdf)

Instituto Colombiano Agropecuario (ICA). (1992). Fertilización en diversos cultivos: Quinta aproximación. Bogotá, Colombia.

Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander Von Humboldt, (2006). Los Sistemas de Información Geográfica. Geoenseñanza. Universidad de los Andes. San Cristobal, Venezuela.

<https://www.redalyc.org/pdf/360/36012424010.pdf>

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2013). Hoja metodológica del indicador Índice de calidad del agua (Versión 1,00). Sistema de Indicadores Ambientales de Colombia - Indicadores de Calidad del agua superficial. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM 11 p.

Islam, M., Megharaj, M., Asaduzzaman, M., & Sudharsanam A (2024). Agrochemicals in agricultural and non-agricultural settings: fate, distribution, and potential human and environmental health hazards. *Front. Sustain. Food Syst.* 8:1461954. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2024.1461954>

Jáuregui, M., Jáuregui, L., Chacón, L., & Vílchez, J. (2006). La estéreo-ortofoto digital en la elaboración de mapas temáticos. *Revista Geográfica Venezolana*, 47 (1), 103-110. Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela. <https://www.redalyc.org/pdf/3477/347730363006.pdf>

Larson, W. E., and F. J. Pierce. 1991. Conservation and enhancement of soil quality. In: *Evaluation for Sustainable Land Management in the Developing World: proceedings of the International Workshop on Evaluation for Sustainable Land Management in the Developing World*, Chiang Rai, Thailand, 15-21 September 1991. (Bangkok, Thailand: International Board for Soil Resources and Management (IBSRAM), 1991)., pp: 175-203.

- Lozano, S., Aquino, J., Pérez, M. I., Castañeda, E., Díaz, G., & Santiago, G. (2020). Infiltración y escurrimiento de agua en suelos de una cuenca en el sur de México. *Revista Terra Latinoamericana*, 38(1), 57-66.
- Masera, O., Astier, M y López-Ridaura, S. (1999). *Sustentabilidad y Manejo de Recursos Naturales. El marco de evaluación MESMIS*. México: Grupo Interdisciplinario de Tecnología Rural Apropiada.
- Marín, J., Méndez, M., Urdaneta, G & Fernández, A. (2023). Estado trófico y nutriente limitante de la producción biológica en una laguna tropical somera. *Revista Amazónica de Ciencias Ambientales y Ecológicas*. 2. e502. 10.51252/reacae.v2i2.502.  
[https://www.researchgate.net/publication/372295598 Estado trofico y nutriente limitante de la a produccion biologica en una laguna tropical somera](https://www.researchgate.net/publication/372295598_Estado_trofico_y_nutriente_limitante_de_la_produccion_biologica_en_una_laguna_tropical_somera)
- Mariño, J. P., Flores, S., & Bonilla, J. (2018). Sostenibilidad versus sustentabilidad: Una propuesta integradora que desvirtúa su uso homólogo. *Opción*, 34(87), 1391-1422.  
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7341418>
- Márquez, H., Leyva, J., Belisario, Davinzón, Y., Ontiveros, L., Amillano, J. (2023). Análisis de tendencia de características indicadores de la calidad del agua en un embalse tropical.

Ecosistemas y recursos agropecuarios, 10(2), e3562. Epub 22 de septiembre de 2023.

<https://doi.org/10.19136/era.a10n2.3562>

Martínez, E., Cantú, E. U., Ruiz, L. M., & Yáñez, M. G. (2011). Efecto de la altitud sobre la solubilidad del oxígeno en el agua y su relación con el estrés oxidativo en organismos acuáticos. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 2(8), 1309-1323.

[https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-09342011000800016&script=sci\\_arttext](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-09342011000800016&script=sci_arttext)

Martínez, E., Fuentes, J. P., & Acevedo, E. (2008). Carbono orgánico y propiedades del suelo. *Revista de la ciencia del suelo y nutrición vegetal*, 8(1), 68-96.

Méndez, P., Tierra, L., Ureta, R., & Flores, Á. (2023). Technological Innovations for Agricultural Production from an Environmental Perspective: A Review. *Sustainability*.

<https://doi.org/10.3390/su152216100>

Menéndez, J., & Muñoz, S. (2021). Contaminación del agua y suelo por los relaves mineros. *Paideia*

XXI, 11(1), 141–154. <https://doi.org/10.31381/paideia.v11i1.3622>

Ministerio de Agricultura y Ganadería, Servicio Fitosanitario del Estado, & Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. (2017). *Manual de buenas prácticas agrícolas y de producción para el cultivo de la fresa*. San José, Costa Rica.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS). (2019). Resolución 2184 de 2019, por la cual se establecen los lineamientos para la gestión integral de los residuos peligrosos y otros aspectos relacionados. <https://www.minambiente.gov.co/documento-normativa/resolucion-2184-de-2019/>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS). (2022). Lineamientos y guía para la ordenación forestal en Colombia. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2022/03/Lineamientos-y-guia-para-la-ordenacion-forestal-en-Colombia.pdf>

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO). (2017). Anexo II estudios adicionales: evaluación del estado trófico en embalses de la cuenca del Guadiana. [https://www.chguadiana.es/sites/default/files/2023-02/Informe\\_Estado\\_Embalses\\_2017\\_18\\_Anexo%20II\\_Estado%20Tr%C3%B3fico\\_Embalses.pdf](https://www.chguadiana.es/sites/default/files/2023-02/Informe_Estado_Embalses_2017_18_Anexo%20II_Estado%20Tr%C3%B3fico_Embalses.pdf)

Molina, JD, Mairena Santos, B., & Aguilar B., L. (2004). Guía MIP en el cultivo de la papa. Instituto Nicaragüense de Tecnología Agropecuaria (INTA). Managua- Nicaragua.

Mora, D. (2019). Caracterización hidrobiológica y fisicoquímica del humedal embalse Mancilla, Facatativá. <https://repositorio.ucundinamarca.edu.co/handle/20.500.12558/2668#:~:text=El%20proyecto%20de%20grado%20%E2%80%9CCaracterizaci%C3%B3n%20hidrobiol%C3%B3gica%20y%20f>

[%C3%ADsico-  
qu%C3%ADmica,los%20cloruros%2C%20el%20ox%C3%ADgeno%20disuelto%2C%20la%20  
acidez%20carbon%C3%A1cea](#)

Muñoz, J., Capilla, M., Gordillo, X., & Muñoz, J. (2024). El impacto del uso inadecuado de agroquímicos y riego intensivo en la degradación del suelo: del cultivo al yermo. Instituto de Ciencias, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, México.

<https://repositorioinstitucional.buap.mx/server/api/core/bitstreams/0e326e09-1076-49f5-a2e2-4cdf6329ab8a/content>

NASA Glenn Research Center. (2021). Earth Atmosphere Model: Metric Units. NASA. Recuperado de <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/atmosmet.html>.

National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), National Aeronautics and Space Administration (NASA), & United States Air Force (USAF). (1976). U.S. Standard Atmosphere, 1976. Washington, D.C.: U.S. Government Printing Office.

<https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19770009539/downloads/19770009539.pdf>

Nienie, A. B., Sivalingam, P., Laffite, A., Ngelinkoto, P., Otamonga, J.-P., Matand, A., Mulaji, C. K., Mubedi, J. I., Mpiana, P. T., & Poté, J. (2017). Seasonal variability of water quality by physicochemical indexes and traceable metals in suburban area in Kikwit, Democratic Republic

of the Congo. *International Soil and Water Conservation Research*, 5(2), 158–165.

<https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2017.04.004>

Nilsson, C. (2009) Reservoirs. In: Gene E. Likens (ed.), *Encyclopedia of inland waters* (pp. 625-633).

Elsevier <http://dx.doi.org/10.1016/B978-012370626-3.00039-9>

NRCS-Natural Resources Conservation Service. 1996. *Indicators for Soil Quality Evaluation*. USDA.

[https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE\\_DOCUMENTS/nrcs142p2\\_053149.pdf](https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/nrcs142p2_053149.pdf)

Organización Internacional del Trabajo. (s.f.). ¿Qué son y cómo se construyen los indicadores en la evaluación de impacto? <https://test-guia.oitcinterfor.org/como-evaluar/como-se-construyen-indicadores>.

Orquera, E., & Cabrera, M. (2019). Caracterización del estado trófico de la Laguna de Yambo mediante análisis de fósforo. DOI: 10.26807/ia.v8i1.119.

<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7407203>

Osorio, N. W. (2012). pH del suelo y disponibilidad de nutrientes. *Manejo integral del suelo y Nutrición vegetal*, 1(4), 1-4.

Paz, A & Vázquez, V. (2004). Erosión y escorrentía.

[https://www.researchgate.net/publication/312371422\\_EROSION\\_Y\\_ESCORRENTIA](https://www.researchgate.net/publication/312371422_EROSION_Y_ESCORRENTIA)

Philippot, L., & Germon, J. C. (2005). Contribution of bacteria to initial input and cycling of nitrogen in soils. In F. Buscot & A. Varma (Eds.), *Microorganisms in soils: Roles in genesis and functions* (pp. 159–176). Springer-Verlag.

Pradenas, M. (2021). Evaluación del estado trófico y determinación de la capacidad de carga actual y carga crítica del lago Lanalhue. Universidad de Concepción.

<http://repositorio.udec.cl/jspui/bitstream/11594/9216/1/TESIS%20EVALUACION%20DEL%20ESTADO%20TROFICO.pdf>

Ramalho, R. (2003). *Tratamiento de Aguas Residuales*. Barcelona: España, Editorial Reverté, S.A.

Ramírez Restrepo, J., & Roldán Perez, G. (2008). *Fundamentos de limnología neotropical* (Segunda ed.). Medellín, Colombia: Universidad de Antioquia.

Ramírez-Valencia, V., Cárdenas-Aguirre, D. M., & Ruiz-Herrera, S. (2018). Programación o planeación de actividades o recursos en la agricultura: Una revisión de literatura. Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales. <https://doi.org/10.24050/reia.v15i30.1151>

Ramos, A. (2018). Evaluación del riesgo de eutrofización del embalse El Quimbo, Huila (Colombia).

Revista Logos, Ciencia & Tecnología, 10(2), 172-192. Recuperado de

<https://www.redalyc.org/journal/5177/517758004006/html/>

Real Academia Española (RAE). (2024). Definición de índice. <https://www.rae.es>.

Reyes Trujillo, A., Barroso, F. U., & Carvajal Escobar, Y. (2010). Guía básica para la

caracterización morfométrica de cuencas hidrográficas. Universidad del Valle,

Programa Editorial. <http://www.digitaliapublishing.com/a/39137/>

Reyes, C. (28 de abril de 2021). ¿Qué nos dice el color del suelo? The conversation. <https://el.com/que>

[-nos -d-el -color -del-suelo -158575](https://el.com/que-nos-d-el-color-del-suelo-158575)

Rodríguez, G. (2022). Calidad del agua para consumo humano y protección de la vida acuática en el

embalse Los Laureles de Tegucigalpa (2002-2016). Revista de Ciencias Ambientales, 56(1),

138-156.

Roffé, MA, & González, FAI (2023). El impacto de las prácticas sostenibles en el desempeño financiero de las empresas: Una revisión de la literatura. Universidad Nacional de Misiones, Argentina.

<https://doi.org/10.36995/j.visiondefuturo.2023.28.01.006.es>

Roldán, G, & Ramírez, J. (2008). Fundamentos de limnología neotropical. 2a ed. Medellín: Editorial

Universidad de Antioquia. <https://repositorio.accefyn.org.co/handle/001/71>

Roldan, G. (2016). Los macroinvertebrados como bioindicadores de la calidad del agua: cuatro décadas de desarrollo en Colombia y Latinoamérica. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, 254-274.

Romero Rojas, JA (1996). Acuiquímica (1ª ed.). Escuela Colombiana de Ingeniería, Editorial Presencia. Bogotá, Colombia.

Romero Rojas, JA (2002). Calidad del agua (1ª ed.). Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería. Bogotá, Colombia.

Rucks, L., García, F., Kaplán, A., Ponce de León, J., & Hill, M. (2004). Propiedades físicas del suelo. Universidad de la República: Facultad de agronomía. Montevideo, Uruguay.

Ruiz, SR y Sadzawka, RA (2005). Nutrición y fertilización potásica en frutales y vides. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA).

Rutherford, P. M., McGill, W. B., Arocena, J. M., & Figueiredo, C. T. (2007). Total nitrogen. In M. R. Carter & E. G. Gregorich (Eds.), *Soil sampling and method of analysis* (pp. 239–250). CRC Press.

Sandoval, W. (2018). Capítulo 1: Presas y Embalses.

[https://www.researchgate.net/publication/326560488\\_Capitulo\\_1\\_Presas\\_y\\_Embalses](https://www.researchgate.net/publication/326560488_Capitulo_1_Presas_y_Embalses)

Sarandón, S. J y Flores, C. (2009). Evaluación de la Sustentabilidad en Agroecosistemas: una propuesta metodológica. *Agroecología*. 4: 19-28.

Schaetzl, RJ, & Anderson, S. (2005). *Soils: Genesis and Geomorphology*. Cambridge University Press.

[https://assets.cambridge.org/97811070/16934/frontmatter/9781107016934\\_frontmatter.pdf](https://assets.cambridge.org/97811070/16934/frontmatter/9781107016934_frontmatter.pdf)

Segura, A., Torres, A. (2024). Evaluación ambiental del sistema de producción de panela en el municipio de Guayabal De Síquima. Universidad de Cundinamarca.

Seybold, C.A., M.J.Mausbach, D. L. Karlen, and H. H. Roger. 1997. Quantification of Soil Quality. In: Lal, R., J. M. Kimble, R. F. Follet, and B. A. Stewart (eds.). Soil Process and the Carbon Cycle. CRC Press, Boca Raton. Florida. USA. pp: 387-403.

Shimamoto, C., Padial, A., da Rosa, C., & Marques, M. (2018). Restoration of ecosystem services in tropical forests: A global meta-analysis. PLoS ONE, 13(12), e0208523.

<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC6307725/>

Siachoque, R., Cortés, C., Polo, S., Páramo, G., Acosta, C., Rolón, M., Gómez, J., García, L., Rodríguez, H., Lagos, L., Vergara, J., Velásquez, M., Gómez, K. (2023). Cultivo de maíz tradicional en Colombia. Unidad de Planificación Rural Agropecuaria (UPRA).

Soledad, M. (1994). Interpretación de análisis de suelos. Instituto Nacional de Reforma y Desarrollo Agrario. Madrid, España.

Stockholm Environment Institute (SEI). (2003). Indicators of Environment and Sustainable Development: Theories and Practical Experiences. SEI.

<https://mediamanager.sei.org/documents/Publications/Policy-institutions/INDIC.pdf>

Sullivan, D., Cogger, C., Bary, A., Bittman, S., & Brewer, L. (2021). Postharvest Soil Nitrate Testing for Manured Grass and Silage Corn (West of the Cascades). Oregon State University.

<https://extension.oregonstate.edu/sites/default/files/documents/em8832.pdf>

Tapia, G., & Beltrán, G. (2019). Estudio del comportamiento de una presa en tierra durante desembalse rápido. Caso: Presa Mancilla en Colombia. In *Geotechnical Engineering in the XXI Century: Lessons learned and future challenges* (pp. 1777-1785). IOS Press.

Toro, L. (2019). Aplicación de metodologías para la estimación de la eutrofización en embalses tropicales y selección del índice de estado trópico más adecuado para el embalse Peñol-Guatapé, Colombia.

Triviño, C., & Zambrano, Á. (2018). Actividades antropogénicas en la subcuenca del Río Carrizal y su incidencia en la calidad del agua (Bachelor's thesis, Calceta: ESPAM MFL).

<https://repositorio.espam.edu.ec/handle/42000/846>

UICN (2018). Guía de Monitoreo Participativo de la Calidad de Agua. Quito – Ecuador: UICN.

<https://waterandnature.org/download/guia-de-monitoreo-participativo-de-la-calidad-de-agua/>

UNESCO. (2021). The United Nations world water development report 2021: valuing water -

Bibliotheca Digital. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000375724>

USAID. (2022). Guía de participación comunitaria. Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional.

Velasco, J., Aznar, J., Belmonte, L., & Román, I. (2018). Sustainable Water Use in Agriculture: A Review of Worldwide Research. Sustainability. <https://doi.org/10.3390/su10041084>

Vera Laceiras, M. S., Kuna, H. D., De Miranda, N. G., Puchini, M., & Zamudio, E. (2021). Detección de la calidad del agua mediante imágenes satelitales: revisión sistemática de la literatura con análisis cuantitativo. En Memorias del Congreso Argentino en Ciencias de la Computación - CACIC 2021 (pp. 240-249). Red de Universidades con Carreras en Informática. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/130338>

Verma, K., Song, X., Degu, H., Guo, D., Joshi, A., Huang, R., Xu, L., Singh, M., Huang, D., Rajput, D., & Li, Y. (2023). Recent advances in nitrogen and nano-nitrogen fertilizers for sustainable crop production: a mini-review. Chemical and Biological Technologies in Agriculture. <https://doi.org/10.1186/s40538-023-00488-3>

Vitousek, P. M., Aber, J., Howarth, R. W., Likens, G. E., Matson, P. A., Schindler, D. W., Schlesinger, W. H., & Tilman, G. D. (1997). Human alteration of the global nitrogen cycle: Causes and consequences. *Ecological Applications*, 7(3), 737–750.

Wezel, A., Casagrande, M., Celette, F., Vian, J. F., Ferrer, A., & Peigné, J. (2014). Agroecological practices for sustainable agriculture. A review. *Agronomy for Sustainable Development*. <https://doi.org/10.1007/s13593-013-0180-7>.