

INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE OCCIDENTE
Departamento de Procesos Tecnológicos e Industriales

Sostenibilidad y Tecnología

PROYECTO DE APLICACIÓN PROFESIONAL (PAP)

Apoyo a la investigación I y II



**ITESO, Universidad
Jesuita de Guadalajara**

4G03 Programa de Apoyo a la Investigación I y II

**Análisis de color y su correlación con parámetros fisicoquímicos de
muestras de suelo del huerto del ITESO, Instituto Tecnológico y de Estudios
Superiores de Occidente, Guadalajara, Jalisco.**

PRESENTAN

Programas educativos y Estudiantes

Ing. Química Alondra Saraí Delgadillo Villalobos

Ing. Química Itzel Cuencas Pelayo

Ing. Químico David Alberto Rivera Rodríguez

Profesor PAP: Dr. Fernando Hernández Ramírez

Tlaquepaque, Jalisco, mayo de 2026

ÍNDICE

Contenido

REPORTE PAP	2
Presentación Institucional de los Proyectos de Aplicación Profesional	2
Resumen	4
1. Ciclo participativo del Proyecto de Aplicación Profesional.....	4
1.1 Entendimiento del ámbito y del contexto	6
1.2 Caracterización de la organización	8
1.3 Identificación de la(s) problemática(s)	9
1.4. Planeación de alternativa(s), objetivo(s) particular(es) y formalización de acuerdos de colaboración.....	9
1.5. Desarrollo de la propuesta de mejora	13
1.6. Valoración de productos, resultados e impactos	33
1.7. Bibliografía y otros recursos	35
1.8. Anexos generales	36
2. Productos	36
3. Reflexión crítica y ética de la experiencia.....	40
3.1 Sensibilización ante las realidades	40
3.2 Aprendizajes logrados	42
3.3 Congruencia con perfil de egreso	45

REPORTE PAP

Presentación Institucional de los Proyectos de Aplicación Profesional

[Este texto deberá aparecer en todos los RPAP]

Los Proyectos de Aplicación Profesional (PAP) son experiencias socio-profesionales de los alumnos que desde el currículo de su formación universitaria- enfrentan retos, resuelven problemas o innovan una necesidad sociotécnica del entorno, en vinculación (colaboración) (co-participación) con grupos, instituciones, organizaciones o comunidades, en escenarios reales donde comparten saberes.

El PAP, como espacio curricular de formación vinculada, ha logrado integrar el Servicio Social (acorde con las Orientaciones Fundamentales del ITESO), los requisitos de dar cuenta de los saberes y del saber aplicar los mismos al culminar la formación profesional (Opción Terminal), mediante la realización de proyectos profesionales de cara a las necesidades y retos del entorno (Aplicación Profesional).

El PAP es un proceso acotado en el tiempo en que estudiantes, actores sociales y profesores se asocian colaborativamente y en red, en un proyecto, e incursionan en un mundo social, como actores que enfrentan verdaderos problemas y desafíos traducibles en demandas pertinentes y socialmente relevantes. Frente a éstas transfieren experiencia de sus saberes profesionales y demuestran que saben hacer, innovar, co-crear o transformar en distintos campos sociales.

El PAP trata de sembrar en los estudiantes una disposición permanente de encargarse de la realidad con una actitud comprometida y ética frente a las disimetrías sociales. En otras palabras, se trata del reto de “saber y aprender a transformar”.

El Reporte PAP consta de tres componentes:

El primer componente refiere al ciclo participativo del PAP, en donde se documentan las diferentes fases del proyecto y las actividades que tuvieron lugar durante el desarrollo de éste y la valoración de las incidencias en el entorno.

El segundo componente presenta los productos elaborados de acuerdo con su tipología.

El tercer componente es la reflexión crítica y ética de la experiencia, el reconocimiento de las competencias y los aprendizajes profesionales que el estudiante desarrolló en el transcurso de su labor.

Resumen

El presente PAP *Análisis de color y su correlación con parámetros fisicoquímicos de muestras de suelo del huerto del Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente, Guadalajara, Jalisco*, forma parte de una línea de investigación enfocada en el análisis fisicoquímico y colorimétrico de suelos para el desarrollo futuro de herramientas digitales accesibles orientadas a la evaluación de la calidad del suelo. El propósito del proyecto consiste en generar una base de datos que relacione el contenido de materia y carbono orgánicos del suelo con parámetros colorimétricos obtenidos mediante imágenes digitales.

Este trabajo da continuidad al PAP otoño 2025, *Análisis fisicoquímico de muestras de suelo del huerto del ITESO*, ampliando el número de muestras analizadas integrando análisis químicos, gravimétricos y colorimétricos. Durante el periodo de trabajo se realizaron actividades de muestreo de suelo en distintas áreas del campus del ITESO, acondicionamiento y procesamiento de muestras, titulaciones mediante el método de Walkley-Black, análisis de materia orgánica por pérdida por ignición (LOI) y registro fotográfico de las muestras utilizando dispositivos móviles. Asimismo, se realizó un análisis colorimétrico utilizando coordenadas del espacio de color CIELAB (L^* , a^* y b^*), identificando tendencias entre la luminosidad del suelo y el contenido de materia orgánica.

Como resultado principal, se logró integrar una base de datos preliminar que relaciona propiedades fisicoquímicas y visuales de diferentes muestras de suelo, generando una base sólida para futuras etapas orientadas al desarrollo de herramientas digitales para el análisis accesible de suelos.

1. Ciclo participativo del Proyecto de Aplicación Profesional

El PAP es una experiencia de aprendizaje y de contribución social integrada por estudiantes, profesores, actores sociales y responsables de las organizaciones, que de manera colaborativa aplican sus conocimientos y generan alternativas para dar respuesta a problemáticas de un contexto específico y en un tiempo delimitado. Por tanto, la experiencia PAP supone un

proceso en lógica de proyecto, así como de un estilo de trabajo participativo y recíproco entre los involucrados.

Este Proyecto de Aplicación Profesional (PAP) se desarrolla en el instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente (ITESO), continuando con la línea de investigación previa enfocada en el estudio de la materia orgánica del suelo y su relación con propiedades fisicoquímicas observables, como el color. La problemática que aborda el proyecto es la falta de herramientas accesibles, confiables y de fácil aplicación para evaluar la calidad del suelo, particularmente su contenido de materia orgánica, lo cual limita la toma de decisiones informadas en contextos agrícolas y agroecológicos.

El proyecto contempla la existencia de métodos estandarizados para la cuantificación del carbono orgánico, a pesar de esto, los métodos suelen requerir infraestructura de laboratorio especializada y no siempre son accesibles para su aplicación directa en campo. Ante esta situación, el PAP se plantea como una investigación de carácter experimental y de desarrollo de prototipo, se busca integrar metodologías fisicoquímicas confiables con herramientas de análisis colorimétrico y el uso de tecnologías digitales, con el fin de generar información útil y transferible [3].

El objetivo general del PAP es analizar la materia orgánica presente en el suelo del huerto del ITESO mediante métodos fisicoquímicos, con el fin de generar información cuantitativa que permita su aplicación en el desarrollo de una herramienta digital para la evaluación de la calidad del suelo.

Objetivos específicos

- Realizar muestreo de suelos en distintas áreas del huerto del ITESO.
- Cuantificar el contenido de carbono y materia orgánica en muestras reales mediante métodos gravimétricos y colorimétricos.
- Analizar la relación entre el contenido de carbono orgánico y las características colorimétricas del suelo.

- Generar una base de datos a partir de los resultados obtenidos que sirva como fundamento para el desarrollo de una aplicación móvil.

1.1. Entendimiento del ámbito y del contexto

En México, la agricultura representa una de las principales actividades productivas, ya que no solamente genera alimentos, sino también empleo y flujo económico en todo el país. No obstante, en varios estados se ha intensificado el uso de prácticas poco sostenibles, derivadas principalmente de la necesidad de combatir plagas, aumentar la productividad o del desconocimiento en el uso adecuado de los productos agrícolas. Entre estas prácticas destaca el uso excesivo de agroquímicos, lo que ha provocado efectos negativos, como la pérdida de fertilidad de los suelos, el incremento de la salinidad y el deterioro de sus propiedades físicas y biológicas, afectando así la sostenibilidad de los sistemas agrícolas [1].

El interés por estudiar la materia orgánica del suelo surgió a inicios del siglo XX, cuando se reconoció que esta desempeña un papel fundamental en la productividad agrícola y en la conservación del suelo como factor clave. La materia orgánica del suelo (MOS) se compone de residuos vegetales y animales, así como de organismos vivos y muertos presentes en el suelo. Dentro de esta fracción, el carbono orgánico total (COT) se considera uno de los indicadores más importantes de la calidad del suelo, ya que influye en diversas propiedades físicas, químicas y biológicas, como la retención de agua, la estructura del suelo y la disponibilidad de nutrientes para las plantas [2].

Con el objetivo de cuantificar el carbono orgánico presente en los suelos, en 1934 se desarrolló el método de Walkley-Black, el cual se consolidó como una técnica estándar para la determinación de carbono orgánico oxidable. Este método se basa en la oxidación química del carbono mediante dicromato de potasio en medio ácido, seguida de un proceso de titulación que permite determinar la cantidad de carbono presente en la muestra. Debido a que es un procedimiento relativamente accesible, reproducible y de amplia aceptación, continúa siendo utilizado en diversos laboratorios de análisis de suelo. Estudios posteriores han mostrado que mediante este método se puede recuperar entre el 75 % y el 90 % del carbono total, por lo que se emplea un factor de corrección de 1.3 para compensar la fracción no oxidada [3].

A pesar de la existencia de otros métodos analíticos para la determinación del carbono orgánico del suelo, muchos de estos requieren equipos altamente especializados, costos elevados o tiempos de análisis prolongados. Esto los vuelve poco accesibles para pequeños productores agrícolas o para estudios de monitoreo extensivo [2], [3]. Por esta razón, el método de Walkley-Black continúa siendo una alternativa viable para la generación de información confiable sobre la calidad del suelo, especialmente cuando se utiliza dentro de programas de análisis sistemáticos [3], [4].

Ante este panorama, en agosto de 2025 el ITESO buscó integrar análisis fisicoquímicos y microbiológicos que permitieran recolectar y procesar datos de diferentes suelos, con el objetivo de generar una base de información confiable que posteriormente pueda utilizarse para el desarrollo de herramientas tecnológicas, como una aplicación móvil [4]. La finalidad de esta herramienta es que pueda ser utilizada por estudiantes, agricultores, investigadores y otras personas interesadas en conocer la calidad de los suelos de manera accesible [4], [5].

Para ello, el enfoque fisicoquímico adoptado en el proyecto consistió en la estandarización del método de Walkley-Black para la determinación del carbono orgánico en suelos, lo que permitió comenzar a recolectar datos que formarían parte de la base de información en desarrollo. Asimismo, este método se complementó con la técnica gravimétrica de pérdida por ignición (Loss on Ignition, LOI), la cual permite estimar el contenido de materia orgánica mediante la diferencia de masa antes y después de la calcinación de la muestra [2]. Estas metodologías permitieron generar curvas de calibración y obtener estimaciones del contenido de carbono en distintos tipos de suelo.

En el presente PAP (primavera, 2026), se dará continuidad al trabajo de otoño 2025 mediante la realización de titulaciones de carbono orgánico utilizando el método de Walkley-Black en diferentes muestras de suelo. El objetivo principal es ampliar la base de datos previamente generada, incorporando nuevas muestras provenientes de diversos tipos de suelos. Además, se busca generar un registro fotográfico de las muestras analizadas que pueda relacionarse con los datos obtenidos, con el fin de explorar posibles correlaciones colorimétricas entre el color del suelo y su contenido de carbono orgánico. De esta manera, se espera contar con un conjunto de datos más amplio que permita facilitar futuros análisis y correlaciones entre propiedades del suelo. Por lo tanto, el proyecto contribuirá al desarrollo de herramientas

accesibles y aplicables en el contexto agrícola, promoviendo un mejor manejo del suelo y apoyando a pequeños agricultores mediante el acceso a información que favorezca prácticas agrícolas más sustentables.

1.2. Caracterización de la organización

El Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente (ITESO) se encuentra ubicado en Periférico Sur Manuel Gómez Morín #8585, en Tlaquepaque, dentro de la zona metropolitana de Guadalajara, Jalisco. Es una universidad privada de inspiración jesuita que fue fundada en 1957. Desde su creación ha buscado ofrecer una formación integral a sus estudiantes, con el objetivo de formar profesionistas capaces, libres y comprometidos con la sociedad. Su misión se enfoca en proponer y desarrollar soluciones viables a distintos problemas sociales y ambientales a través de la docencia, la investigación y la vinculación con la sociedad [5]. La visión del ITESO plantea consolidarse como una comunidad universitaria reconocida por su compromiso ético, social y ambiental, orientada al bien común y a la construcción de una sociedad más justa y sostenible, en concordancia con los principios de la Compañía de Jesús [5].

El ITESO se organiza en diferentes departamentos académicos. Dentro del área de ingenierías se encuentra el Departamento de Procesos Tecnológicos e Industriales (DPTI), que es donde se desarrolla el presente Proyecto de Aplicación Profesional (PAP). Este departamento impulsa la investigación aplicada y el desarrollo tecnológico en áreas como procesos químicos, alimentos, energía, medio ambiente, materiales y biotecnología, promoviendo el trabajo interdisciplinario y la búsqueda de soluciones sostenibles [5].

Una de las frases más representativas del ITESO es “libres para transformar”. Esta idea se refleja especialmente en los PAP, los cuales buscan conectar el aprendizaje académico con problemáticas reales del entorno social y ambiental. Gracias a este modelo, los estudiantes pueden aplicar los conocimientos adquiridos durante la carrera y desarrollar propuestas que aporten soluciones a distintos problemas.

El Presente proyecto forma parte del área del PAP llamada “Apoyo a la Investigación”. En este caso, el Dr. Cristóbal Camarena Bernard es el director del proyecto, mientras que el Dr.

Fernando Hernández Ramírez se encarga de coordinar y supervisar directamente las actividades realizadas, asegurando que el trabajo se lleve a cabo correctamente y con sustento científico.

De esta manera, el ITESO busca que la investigación tenga un impacto real en la sociedad. Bajo este enfoque, el PAP enfocado en el análisis fisicoquímico de suelos del huerto universitario no solo representa una actividad académica, sino también una oportunidad para generar información que pueda contribuir al manejo y aprovechamiento adecuado de los suelos dentro de la universidad y en otros contextos similares.

1.3. Identificación de la(s) problemática(s)

A partir del diagnóstico realizado en el PAP de otoño 2025, y del análisis de suelos en el huerto del ITESO, se identificó como problemática principal la falta de herramientas accesibles, confiables y de fácil aplicación para evaluar la calidad del suelo, particularmente su contenido de materia orgánica. Aunque existen métodos fisicoquímicos estandarizados para la cuantificación del carbono orgánico [3], estos requieren una infraestructura de laboratorio especializada o presentan altos costos, mientras que las alternativas utilizadas en campo suelen ser imprecisas y poco confiables [1]. Esta situación limita la toma de decisiones informadas en prácticas agrícolas y agroecológicas, así como la transparencia en la transferencia del conocimiento científico sobre los datos requeridos a usuarios no especializados, ante ello, el proyecto se enfoca en generar información experimental mediante métodos fisicoquímicos y la construcción de una base de datos que permita el desarrollo posterior de una herramienta digital accesible para la evaluación de la calidad del suelo.

1.4. Planeación de alternativa(s), objetivo(s) particular(es) y formalización de acuerdos de colaboración

Para poder entender la problemática identificada relacionada con la falta de herramientas accesibles para evaluar la calidad del suelo y su contenido de materia orgánica, se plantearon diversas alternativas metodológicas que permitieran generar información confiable y útil para el desarrollo de una herramienta digital de análisis de suelos. El proyecto se estructura en distintas etapas de trabajo que incluyen la recopilación de antecedentes del PAP previo, el

muestreo y procesamiento de suelos en diferentes áreas del campus del ITESO, la aplicación de métodos fisicoquímicos para la determinación de materia orgánica, el registro fotográfico de las muestras de suelos y el análisis de los datos obtenidos para la construcción de una base de datos que permita identificar posibles correlaciones entre el color del suelo y el contenido de materia orgánica.

Alternativas metodológicas consideradas

Durante la planeación del proyecto, se consideraron tres alternativas principales para la evaluación de la materia orgánica del suelo. La primera corresponde al método gravimétrico por calcinación, que permite estimar la materia orgánica mediante la pérdida de masa del suelo después de un proceso de combustión controlada [2]. La segunda alternativa es el método de oxidación química Walkley-Black, que determina el carbono orgánico del suelo mediante la oxidación con dicromato de potasio en medio ácido y la posterior titulación del dicromato no consumido [3]. Finalmente, la tercera alternativa considerada, está basada en el análisis colorimétrico del suelo, mediante el registro de imágenes digitales de las muestras y la medición de su color y reflectancia, con el propósito de explorar la relación entre el color del suelo y su contenido de materia orgánica.

Alternativa seleccionada

Para el desarrollo del presente PAP se seleccionó principalmente el método Walkley-Black, complementado con el registro fotográfico de las muestras de suelo y el análisis de color. Esta alternativa se eligió debido a que el método Walkley-Black es una técnica reconocida y utilizada en los estudios de suelos, el cual permite obtener valores cuantitativos del carbono orgánico, lo cual proporciona una referencia confiable para el análisis posterior [3]. A partir de los valores obtenidos experimentalmente, se busca identificar patrones entre el contenido de materia orgánica y el color del suelo, utilizando fotografías tomadas con dispositivos móviles, con el fin de construir una base de datos que posteriormente servirá para desarrollar una herramienta digital que facilite la estimación de la calidad del suelo a partir de imágenes.

Formalización de acuerdos de colaboración

El desarrollo del proyecto se realiza en colaboración con el equipo de investigación responsable del estudio de suelos en el campus del ITESO, bajo la coordinación del Dr. Fernando Hernández Ramírez y el Dr. Cristóbal Camarena Bernard. El acuerdo de colaboración se formalizó mediante reuniones de trabajo en las que se definieron los objetivos del proyecto, las metodologías a emplear y la participación del equipo PAP en las actividades de campo, análisis de laboratorio y procesamiento de datos, utilizando la infraestructura del laboratorio y los espacios del huerto universitario y otras áreas del campus para la obtención de muestras.

Plan de Trabajo

En la tabla 1 se presenta el cronograma de actividades previsto para el desarrollo del PAP. En esta tabla se describen las principales actividades del proyecto, los recursos humanos y materiales involucrados, así como las semanas en las que se planea realizar cada actividad a lo largo del semestre. Entre las actividades consideradas se encuentran la revisión de los antecedentes del PAP anterior, el muestreo y la preparación de suelo, aplicando la metodología descrita en la alternativa principal, el registro fotográfico de las muestras, el análisis de los resultados obtenidos y la presentación del avance del proyecto.

Tabla 1. Cronograma de actividades previstas para la realización del PAP.

Nombre de la actividad	Recursos	Tiempo (días/semana)	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4	Semana 5	Semana 6	Semana 7	Semana 8	Semana 9	Semana 10	Semana 11	Semana 12	Semana 13	Semana 14	Semana 15	Semana 16
Recapitulación del PAP pasado y fijación de actividades	AL TP	2																
Toma de diversas muestras de suelo	AL	1																

1.5. Desarrollo de la propuesta de mejora

Fundamento del método

Dando seguimiento a los resultados obtenidos durante el semestre otoño 2025, se retomó el método previamente estandarizado para la determinación de materia orgánica en suelo, correspondiente al método de Walkley-Black. Este método se fundamenta en una reacción de oxidación-reducción, en la cual el carbono orgánico presente en la muestra es oxidado por dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$) en medio fuertemente ácido, transformándose en dióxido de carbono (CO_2) y agua (H_2O), mientras que el cromo pasa del estado de oxidación +6 a +3. El dicromato que no reaccionó se cuantifica posteriormente mediante una titulación redox con una solución estándar de sulfato ferroso amoniacal $[Fe(NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot 6H_2O]$, utilizando o-fenantrolina como indicador [3].

Con el objetivo de corroborar que el método Walkley-Black estandarizado funcionaba adecuadamente bajo las condiciones del laboratorio, se prepararon nuevamente las soluciones requeridas para el procedimiento: dicromato de potasio, solución indicadora de o-fenantrolina y solución de sulfato ferroso de amonio (Figura 1). A partir de estas soluciones, se realizaron corridas de referencia y, posteriormente, el análisis de las muestras de suelo.



Figura 1. Preparación de la solución de o-fenantrolina.

Preparación de soluciones para el método Walkey-Black

- **Solución de dicromato de potasio 0.161 M (1 L)**

Se pesaron 49.13 g de $K_2Cr_2O_7$. Dado el carácter fuertemente oxidante del reactivo, esta operación se realizó con equipo de protección personal y en campana de extracción. El sólido se transfirió a un vaso de precipitados, donde se adicionaron aproximadamente 500 mL de agua destilada para favorecer su disolución. Una vez disuelto, la solución se transfirió cuantitativamente a un matraz aforado de 1 L, enjuagando el vaso con porciones de agua destilada. El volumen se completó hasta la marca de aforo, se homogenizó por inversión y se etiquetó indicando concentración, fecha de preparación y advertencias de manejo.

- **Solución indicadora de o-fenantrolina 0.025 M (25 ml)**

Se pesaron 0.125 g de o-fenantrolina y 0.175 g de $FeSO_4 \cdot 7H_2O$. Ambos sólidos se transfirieron a un matraz aforado de 25 mL y se adicionaron aproximadamente 10 mL de agua destilada para promover su disolución. Una vez disueltos, el volumen se ajustó hasta la marca de aforo con agua destilada, se homogenizó por inversión y se etiquetó como solución indicadora o-fenantrolina para su correcta identificación durante la titulación.

- **Solución de sulfato ferroso de amonio 0.5 M (1 L)**

Se pesaron 196.01 g de sulfato ferroso de amonio $[Fe(NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot 6H_2O]$ y se colocaron en un vaso de precipitados con 700 mL de agua destilada, agitando hasta disolución parcial. Posteriormente se adicionaron 20 mL de ácido sulfúrico concentrado (H_2SO_4) para estabilizar el ion ferroso Fe^{2+} y prevenir su oxidación. Debido al carácter exotérmico de esta reacción, se permitió el enfriamiento de la solución antes de continuar. La mezcla se transfirió a un matraz aforado de 1 L, se completó el volumen con agua destilada, se homogenizó por inversión y se etiquetó para su uso en las titulaciones.

Preparación y acondicionamiento de muestras de suelo

Previo al análisis químico, se recolectaron 13 muestras de suelo en distintos puntos geográficos dentro de las instalaciones de la universidad. Las muestras se dejaron secar a temperatura ambiente y posteriormente se tamizaron utilizando un tamiz No. 8 para remover partículas de mayor tamaño y obtener una fracción más uniforme. Las muestras fueron recolectadas a una profundidad aproximada de 10–20 cm en distintas zonas dentro del campus, bajo diversas condiciones de suelo, incluyendo áreas con y sin vegetación, así como suelos húmedos y secos.

A continuación, se determinó el contenido de humedad de cada muestra tamizada mediante termobalanza OHAUS (Tabla 1). Se colocó una porción de cada muestra en el equipo y se sometió a calentamiento controlado hasta alcanzar peso constante (Figuras 2 y 4), en la Tabla 1 se presenta el porcentaje de humedad de cada muestra. Las muestras secas se almacenaron en bolsas herméticas tipo Ziploc (Figura 3) para evitar la reabsorción de humedad del ambiente y así conservarlas hasta los análisis posteriores.



Figura 2. Termobalanza utilizada para determinar porcentaje de humedad.



Figura 3. Muestras de suelo almacenadas en bolsas herméticas tipo Ziploc para su conservación.

Tabla 1. Contenido de humedad de las muestras de suelo (% en base húmeda).

No. de muestra	Humedad (%)
1	3.24
2	4.85
3	3.77
4	2.48
5	2.12
6	3.60
7	10.58
8	4.92
9	0.06
10	7.26
11	4.46
12	6.35
13	2.97

Corridas de referencia con sacarosa y arena

Con las soluciones preparadas para el método de Walkley-Black, se realizaron corridas de referencia empleando mezclas de sacarosa y arena, con el propósito de comparar el comportamiento teórico y experimental del consumo de sulfato ferroso y verificar el funcionamiento del método. La sacarosa actúa como fuente de materia orgánica con contenido de carbono conocido, mientras que la arena funge como matriz prácticamente inerte [3].

Se trabajó con muestras de suelo de aproximadamente 2 g, variando la cantidad de sacarosa mientras la masa de arena se mantuvo entre 2.01 y 2.02 g. Para cada corrida se registró el volumen de sulfato teórico y experimental consumido durante la titulación (Tabla 2).

Tabla 2. Corridas de calibración con mezcla sacarosa–arena para validación del método Walkley-Black.

No. de corrida	Sacarosa (g)	Arena (g)	Sulfato teórico (mL)	Sulfato experimental (mL)
1	0.00	2.01	20	17.2
3	0.04	2.01	12	12.1
5	0.06	2.02	4	5.5

Análisis de muestras de suelo

Una vez corroborado el funcionamiento del método mediante las corridas de referencia, se procedió al análisis de las 13 muestras de suelo. Cada muestra fue procesada en duplicado (dos corridas independientes) con el fin de asegurar la confiabilidad de los datos.

Para cada corrida se pesó una porción de 0.49 a 0.51 g de muestra seca tomada de las bolsas Ziploc, registrándose el volumen de sulfato ferroso de amonio consumido durante la titulación. El análisis por duplicado permitió calcular la media y la desviación estándar de cada muestra como indicadores de reproducibilidad (Tabla 3).

Tabla 3. Resultados experimentales del consumo de sulfato en muestras de suelo (método Walkley-Black, corridas por duplicado).

No. de muestra	No. de corrida	Masa de muestra (g)	Muestra con factor de humedad (g)	Sulfato experimental gastado (mL)
1	1	0.490	0.474	17.10
1	2	0.500	0.484	16.80
2	1	0.500	0.476	18.10
2	2	0.490	0.466	17.00
3	1	0.510	0.491	20.20
3	2	0.490	0.472	20.05
4	1	0.490	0.478	18.50
4	2	0.510	0.497	18.95
5	1	0.500	0.489	18.15
5	2	0.500	0.489	18.70
6	1	0.500	0.482	18.00
6	2	0.490	0.472	16.20

7	1	0.510	0.456	18.40
7	2	0.490	0.438	18.40
8	1	0.500	0.475	18.15
8	2	0.490	0.466	17.95
9	1	0.480	0.480	20.35
9	2	0.510	0.510	20.50
10	1	0.510	0.473	15.35
10	2	0.500	0.464	17.60
11	1	0.500	0.478	18.50
11	2	0.510	0.487	18.45
12	1	0.500	0.468	18.30
12	2	0.510	0.478	18.50
13	1	0.500	0.485	18.45
13	2	0.490	0.475	17.90

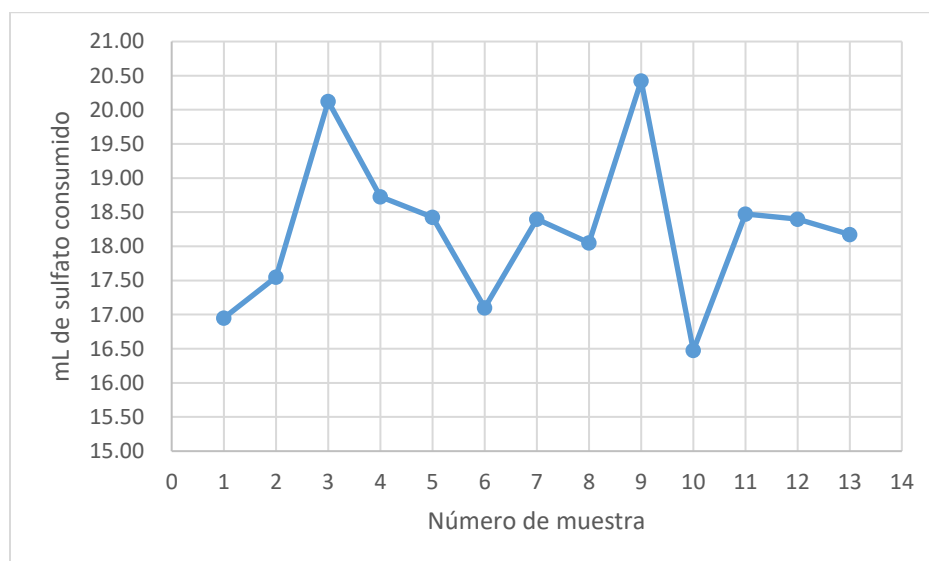


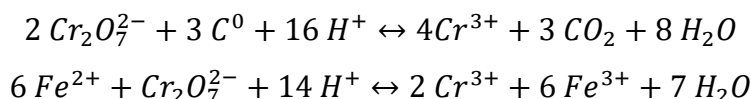
Figura 4. Consumo promedio de sulfato ferroso en las muestras de suelo

En la Figura 4 se observa la variabilidad en el volumen de sulfato consumido durante la titulación para cada muestra. Estas diferencias reflejan cambios en el contenido de carbono orgánico entre los distintos suelos analizados (Tabla 3).

Corroboración estequiométrica de materia Orgánica determinado por el método Walkley-Black

Con el objetivo de validar experimentalmente los resultados obtenidos mediante las titulaciones del método de Walkley-Black, se realizaron cálculos estequiométricos para

estimar la cantidad total de carbono oxidado presente en las muestras de suelo. El procedimiento se fundamenta en las reacciones de oxidación-reducción entre el carbono orgánico de la muestra, el dicromato de potasio y el sulfato ferroso utilizado durante la titulación [3]:



Como ejemplo representativo, se tomó la muestra 1, para la cual se utilizaron 0.490 g de suelo húmedo. Después de corregir el contenido de humedad de la muestra, se obtuvo una masa seca aproximada de 0.474 g. Durante la titulación correspondiente, esta muestra consumió 17.1 mL de sulfato ferroso 0.5 M. En primer lugar, se calcularon los moles de dicromato no reaccionado a partir del volumen de sulfato ferroso consumido durante la titulación:

$$0.0171 L FeSO_4 \times \frac{0.5 mol FeSO_4}{1 L_{soln}} \times \frac{1 mol Cr_2O_7^{2-}}{6 mol FeSO_4} = 0.001425 mol Cr_2O_7^{2-} \text{ no reaccionados}$$

Posteriormente, considerando que durante el análisis se adicionaron 10 mL de dicromato de potasio 0.167 M, se calcularon los moles iniciales de dicromato presentes en la reacción:

$$0.010 L Cr_2O_7^{2-} \times \frac{0.167 mol Cr_2O_7^{2-}}{1 L_{soln}} = 1.67 \times 10^{-3} mol Cr_2O_7^{2-} \text{ iniciales}$$

La cantidad de dicromato que reaccionó con el carbono orgánico de la muestra se obtuvo mediante diferencia:

$$1.67 \times 10^{-3} mol Cr_2O_7^{2-} \text{ iniciales} - 1.425 \times 10^{-3} mol Cr_2O_7^{2-} \text{ no rxn} = 2.45 \times 10^{-4} mol Cr_2O_7^{2-}$$

A partir de la relación estequiométrica entre dicromato y carbono, se estimaron los gramos de carbono oxidado:

$$2.45 \times 10^{-4} mol Cr_2O_7^{2-} \times \frac{3 mol C}{2 mol Cr_2O_7^{2-}} \times \frac{12 g C}{1 mol de C} = 4.41 \times 10^{-3} g Carbon.$$

Finalmente, el contenido de carbono relativo en la muestra se expresó como mg C/g de muestra seca:

$$\frac{4.41 \times 10^{-3} \text{ g C}}{0.474 \text{ g muestra}} = 9.30 \times 10^{-3} \text{ g C/g}$$
$$\therefore 9.30 \text{ mg C/g muestra}$$

Este resultado presenta una concordancia adecuada con el valor experimental obtenido mediante la correlación lineal previamente desarrollada para el método de Walkley-Black (tabla 4), donde para la misma muestra se estimó un valor aproximado de 9.25 mg C/g de muestra. La similitud entre los resultados teóricos y experimentales permitió corroborar que la metodología experimental fue aplicada de manera consistente y que los cálculos derivados de las titulaciones presentan coherencia estequiométrica dentro del procedimiento analítico [3].

Estimación de carbono orgánico a partir del consumo de sulfato

Para transformar los datos obtenidos durante las titulaciones en una evaluación química comparable, se utilizó una correlación lineal generada en el PAP otoño 2025 a partir de corridas de referencia con cantidades conocidas de carbono. Esta relación permite estimar el contenido de carbono orgánico en función del volumen de sulfato ferroso 0.5 M consumido durante la titulación. La ecuación utilizada fue:

$$y = -0.602x + 19.547$$

Donde x representa el volumen de sulfato ferroso 0.5 M gastado en la titulación, expresado en mL, y y corresponde a los mg de carbono por gramo de muestra.

En esta correlación se presenta un coeficiente de determinación de $R^2 = 0.9807$, lo que indica un ajuste lineal adecuado para su uso como referencia experimental preliminar.

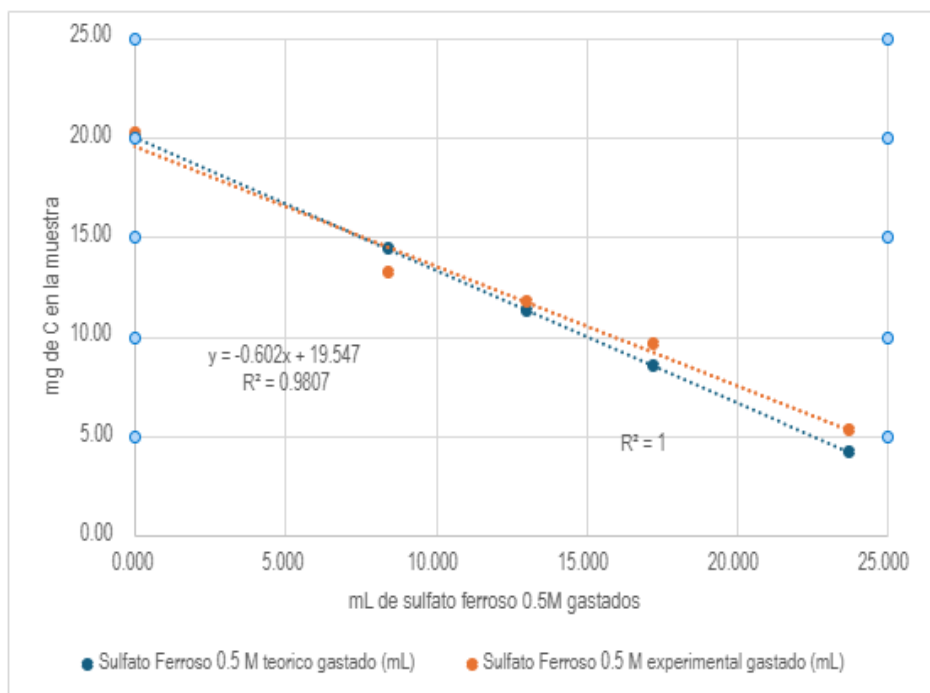


Figura 5. Correlación experimental entre el volumen de sulfato ferroso 0.5 M gastado y los gramos de carbono por gramo de muestra.

A partir de esta relación se calculó el contenido estimado de carbono para cada corrida experimental. Estos valores permitieron comparar las muestras entre sí y posteriormente relacionar el contenido de carbono en los parámetros colorimétricos del suelo.

Los resultados fueron consistentes con el valor obtenido mediante la correlación experimental desarrollada previamente. Esta comparación permitió corroborar que la metodología experimental aplicada durante las titulaciones presenta coherencia estequiométrica y produce resultados del mismo orden de magnitud tanto en la aproximación experimental como en la teórica.

Asimismo, a partir de los valores estimados de mg C/g de muestra, fue posible obtener un porcentaje aproximado de carbono presente en cada muestra analizada. Estos resultados son congruentes con valores reportados para suelos con contenidos moderados de materia orgánica [2], [3].

Tabla 4. Correlación experimental entre sulfato ferroso gastado y los gramos de carbono por gramos de muestra.

No. de muestra	Sulfato experimental gastado (ml)	g carbón / Gramos de muestra	g de Carbono Totales (Experimentales)	% de Carbono en muestra
1	17.1	9.2528	0.00439	1.95
1	16.8	9.4334	0.00456	1.95
2	18.1	8.6508	0.00412	1.82
2	17	9.313	0.00434	2.00
3	20.2	7.3866	0.00363	1.51
3	20.05	7.4769	0.00353	1.59
4	18.5	8.41	0.00402	1.76
4	18.95	8.1391	0.00405	1.64
5	18.15	8.6207	0.00422	1.76
5	18.7	8.2896	0.00406	1.69
6	18	8.711	0.00420	1.81
6	16.2	9.7946	0.00463	2.07
7	18.4	8.4702	0.00386	1.86
7	18.4	8.4702	0.00371	1.93
8	18.15	8.6207	0.00410	1.81
8	17.95	8.7411	0.00407	1.88
9	20.35	7.2963	0.00350	1.52
9	20.5	7.206	0.00367	1.41
10	15.35	10.3063	0.00487	2.18
10	17.6	8.9518	0.00415	1.93
11	18.5	8.41	0.00402	1.76
11	18.45	8.4401	0.00411	1.73
12	18.3	8.5304	0.00399	1.82
12	18.5	8.41	0.00402	1.76
13	18.45	8.4401	0.00409	1.74
13	17.9	8.7712	0.00417	1.84

Los valores obtenidos mediante el método de Walkley-Black fueron utilizados posteriormente para compararse con los resultados obtenidos mediante pérdida por ignición (LOI), con el propósito de analizar la relación entre el contenido de carbono orgánico, la materia orgánica y las propiedades colorimétricas del suelo.

Determinación de cenizas

Tras la etapa de secado de las muestras de suelo, se determinó el contenido de cenizas para cuantificar la fracción inorgánica que contenían. El análisis se realizó por duplicado para cada una de las 13 muestras. Para cada porción se registraron los siguientes parámetros:

- Masa del crisol (g)
- Masa de muestra seca (g)
- Masa final tras ignición (crisol + ceniza, g)
- Masa de cenizas (g)
- Porcentaje de cenizas en base seca (%)

Las porciones de muestra se colocaron en crisoles previamente tarados e introducidos en una mufla a 500 °C durante 2 horas (Figura 6), condiciones bajo las cuales la materia orgánica se oxida y volatiliza, quedando únicamente el residuo mineral. Concluido el tratamiento térmico, los crisoles se transfirieron a un desecador, se dejaron enfriar y se pesaron para determinar la masa de ceniza remanente (Tabla 4).



Figura 6. Colocación de crisoles en la mufla para determinar cenizas.

Tabla 5. Determinación de cenizas en muestras de suelo.

No. de muestra	W crisol (g)	W muestra seca (g)	W crisol + ceniza (g)	Masa de ceniza (g)
M1-1	18.5229	2.5402	20.7274	2.2045
M1-2	13.9776	2.5036	16.1398	2.1622
M2-1	16.0680	2.4930	18.2783	2.2103
M2-2	14.0422	2.5644	16.3116	2.2694
M3-1	18.2179	2.5149	20.5902	2.3723
M3-2	17.8887	2.5052	20.2541	2.3654
M4-1	16.2783	2.5149	18.5584	2.2801
M4-2	14.2667	2.5791	16.5965	2.3298
M5-1	17.7019	2.4431	19.9202	2.2183
M5-2	19.5757	2.5455	21.8481	2.2724
M6-1	16.2236	2.541	18.393	2.1694
M6-2	15.3047	2.6608	17.5711	2.2664
M7-1	8.5334	2.384	10.6905	2.1571
M7-2	18.8174	2.2057	20.8019	1.9845
M8-1	15.0084	2.2407	17.0049	1.9965
M8-2	14.584	2.5575	16.8676	2.2836
M9-1	16.6969	2.7076	19.4003	2.7034
M9-2	14.3671	2.4924	16.8555	2.4884
M10-1	18.5169	2.6509	20.856	2.3391
M10-2	18.8625	2.77	21.3135	2.451
M11-1	13.964	2.7061	16.4055	2.4415
M11-2	16.7883	2.1485	18.714	1.9257
M12-1	13.6381	2.5214	15.8512	2.2131
M12-2	14.1887	2.4908	16.3661	2.1774
M13-1	14.3949	2.6235	16.694	2.2991
M13-2	11.1212	2.8376	13.625	2.5038

En la figura 7 podemos observar gráficamente el contenido de materia orgánica presente en las distintas muestras mediante la pérdida por ignición (LOI).

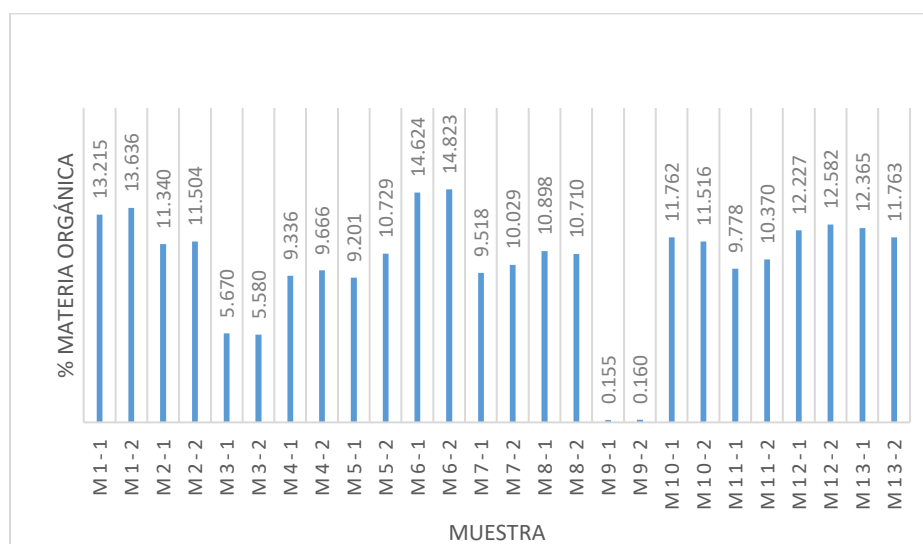


Figura 7. Porcentaje de materia orgánica determinado por pérdida por ignición (LOI).

Determinación de materia orgánica por pérdida por ignición (LOI)

A partir de los datos de la determinación de cenizas en las muestras de suelo, se estimó el contenido de materia orgánica mediante el método de pérdida por ignición (Loss on Ignition, LOI) [2]. El cálculo se basa en la diferencia de masa entre la muestra seca inicial y la masa del residuo obtenido tras el tratamiento térmico en mufla (Tabla 6).

Tabla 6. Contenido de cenizas y materia orgánica por pérdida por ignición en muestras de suelo.

No. de muestra	% Cenizas (base seca)	Materia orgánica (g)	% Materia orgánica (LOI)
M1-1	86.78	0.3357	13.215
M1-2	86.36	0.3414	13.636
M2-1	88.66	0.2827	11.340
M2-2	88.50	0.295	11.504
M3-1	94.33	0.1426	5.670
M3-2	94.42	0.1398	5.580
M4-1	90.66	0.2348	9.336
M4-2	90.33	0.2493	9.666
M5-1	90.80	0.2248	9.201
M5-2	89.27	0.2731	10.729
M6-1	85.38	0.3716	14.624
M6-2	85.18	0.3944	14.823
M7-1	90.48	0.2269	9.518
M7-2	89.97	0.2212	10.029
M8-1	89.10	0.2442	10.898
M8-2	89.29	0.2739	10.710
M9-1	99.84	0.0042	0.155
M9-2	99.84	0.004	0.160
M10-1	88.24	0.3118	11.762
M10-2	88.48	0.319	11.516
M11-1	90.22	0.2646	9.778
M11-2	89.63	0.2228	10.370
M12-1	87.77	0.3083	12.227
M12-2	87.42	0.3134	12.582
M13-1	87.63	0.3244	12.365
M13-2	88.24	0.3338	11.763

La disminución de masa reportada en la Tabla 6 se atribuye principalmente a la combustión y volatilización de la materia orgánica presente en la muestra. Los resultados obtenidos por LOI se emplearon como referencia complementaria para contrastar los valores determinados mediante el método de Walkley-Black, permitiendo una evaluación más completa del contenido de materia orgánica en las muestras de suelo analizadas.

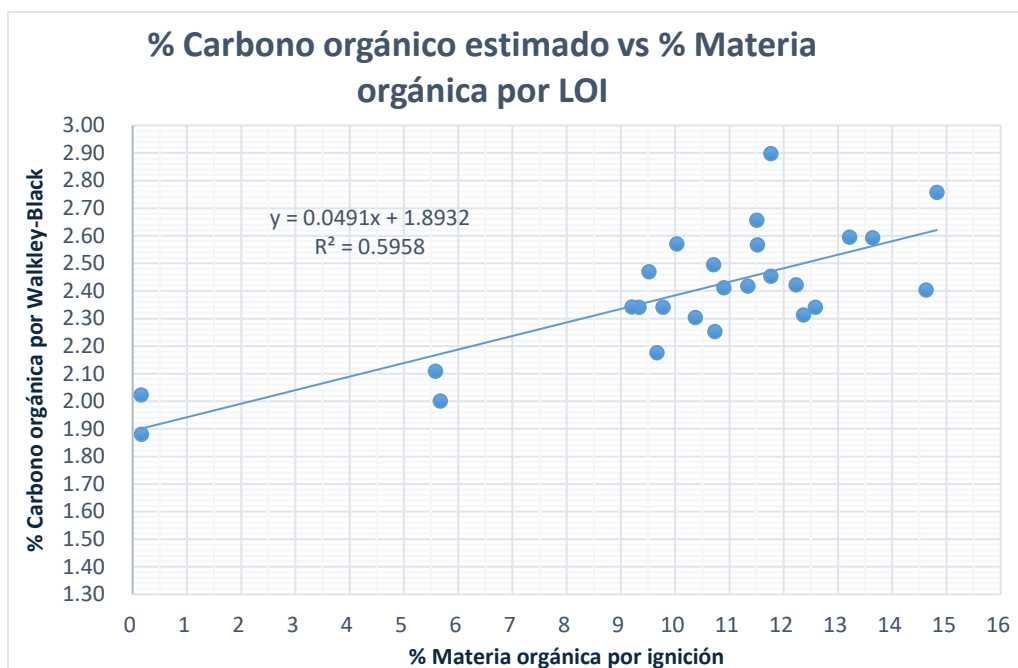


Figura 8. Correlación entre el porcentaje de carbono orgánico estimado por el método Walkley-Black y el porcentaje de materia orgánica por pérdida por ignición (LOI).

La Figura 8 permite visualizar la relación entre el método de Walkley-Black y el método de pérdida por ignición (Loss on Ignition, LOI) [3], mostrando una tendencia general entre las variables. Sin embargo, la dispersión de los datos sugiere la presencia de variabilidad experimental y la necesidad de un mayor número de muestras para establecer una correlación más robusta.

Colorimetría de suelos

Como parte complementaria del análisis fisicoquímico, se realizó un análisis de colorimétrico de las muestras de suelo con el objetivo de registrar cuantitativamente sus características visuales y explorar posibles relaciones entre el color del suelo y su contenido de materia orgánica. Para ello, se utilizó un colorímetro digital, procurando mantener condiciones similares de iluminación y referencia visual durante la captura de imágenes.

Para el procedimiento, en un recipiente de apoyo, en este caso una caja Petri, se colocó una porción de cada muestra seca, procurando cubrir uniformemente la superficie de análisis. Sobre la muestra se colocó una película plástica transparente con la finalidad de evitar el

contacto directo del equipo con el suelo (Figura 9) y se registraron al posicionar el colorímetro sobre la superficie preparada y se registraron los valores correspondientes para cada muestra. Previo a las mediciones mostradas, el equipo fue calibrado utilizando el estándar blanco suministrado por el fabricante, tomando esta referencia como blanco experimental para estandarizar las lecturas.

Posteriormente, las imágenes obtenidas fueron analizadas mediante parámetros del espacio de color CIELAB, registrando las coordenadas L^* , a^* y b^* para cada muestra [6]. El parámetro L^* representa la luminosidad del suelo, donde valores bajos corresponden a tonalidades más oscuras y valores altos a superficies más claras. Por otro lado, los parámetros a^* y b^* describen variaciones cromáticas relacionadas con tonalidades rojizas-verdosas y amarillas-azules, respectivamente [6]. La utilización de este modelo permitió comparar cuantitativamente las diferencias de color presentes entre las 13 muestras de suelo analizadas.



Figura 9. Colorímetro utilizado para la determinación de color en las muestras de suelo.

Los resultados obtenidos muestran diferencias importantes entre las muestras analizadas, particularmente en los valores de luminosidad. Algunas muestras presentaron tonalidades considerablemente más oscuras, mientras que otras mostraron colores más claros y mayor reflectancia. Este comportamiento podría estar relacionado con variaciones en el contenido de materia orgánica, composición mineralógica y condiciones particulares de cada zona de muestreo.

Tabla 7. Parámetros colorimétricos CIELAB obtenidos para las muestras de suelo promediadas de dos corridas.

Muestra	L*	a*	b*
Blanco	84.7	0.7	55.4
1	42.7	2.1	3.2
2	43.7	3.2	5.4
3	54.3	4.3	10
4	41.7	3.3	5.6
5	45	2.9	5.4
6	39.6	4	6.4
7	43.2	4.2	7.8
8	41.1	3.8	5.1
9	71.9	4.7	11.5
10	44.3	4.5	8.6
11	44.1	4.9	9.1
12	42.2	4.2	8.5
13	39.6	4	6.8

La Tabla 7 presenta los parámetros colorimétricos del sistema CIELAB obtenidos para las muestras de suelo, considerando el promedio de dos corridas experimentales. Los valores de L* representan la luminosidad de las muestras, donde valores cercanos a 100 indican mayor claridad; mientras que los parámetros a* y b* describen las tonalidades hacia rojo-verde y amarillo-azul.

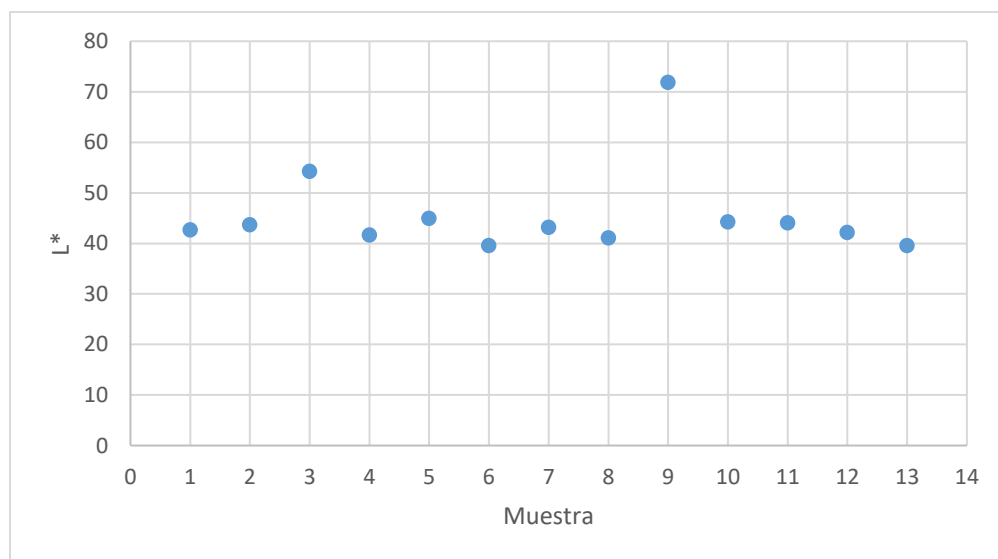


Figura 10. Comparación de los valores de luminosidad (L) obtenidos para las muestras de suelo promediadas de dos corridas.

La Figura 10 muestra la comparación de los valores de luminosidad (L^*) obtenidos para las diferentes muestras de suelo analizadas, utilizando el sistema colorimétrico CIELAB y considerando el promedio de dos corridas experimentales. El parámetro L^* indica el grado de claridad u oscuridad de las muestras, donde valores más altos representan superficies más claras y valores más bajos corresponden a tonalidades más oscuras. La muestra 9 presentó un valor de luminosidad significativamente mayor respecto al resto de las muestras analizadas, indicando una tonalidad considerablemente más clara. Este comportamiento coincide con los menores contenidos de carbono y materia orgánica observados experimentalmente.

Los datos colorimétricos obtenidos representan una herramienta complementaria para el análisis del suelo, ya que permiten incorporar variables visuales cuantificables al estudio fisicoquímico. Esta información será utilizada posteriormente para realizar análisis de correlación entre las propiedades colorimétricas y el contenido de carbono orgánico estimado experimentalmente.

Integración de datos y análisis de correlación

Con el propósito de integrar los resultados obtenidos mediante las distintas metodologías aplicadas durante el PAP, se construyó una tabla resumen que relaciona el porcentaje de carbono orgánico estimado por el método de Walkley-Black, el porcentaje de materia orgánica determinado por pérdida por ignición (LOI) y el parámetro de luminosidad L^* obtenido mediante colorimetría.

Tabla 8. Relación entre porcentaje de carbono orgánico estimado por Walkley-Black, porcentaje de materia orgánica por LOI y luminosidad (L^*) de las muestras de suelo analizadas

Muestra	%C WB	%MO LOI	L^*
M1-1	1.9516	13.2155	42.5
M1-2	1.9499	13.6364	42.9
M2-1	1.8183	11.3398	43.5
M2-2	1.9975	11.5037	43.9
M3-1	1.5051	5.6702	54.1
M3-2	1.5857	5.5804	54.5
M4-1	1.7600	9.3364	41.5
M4-2	1.6365	9.6662	41.9

M5-1	1.7615	9.2014	44.8
M5-2	1.6938	10.7287	45.2
M6-1	1.8073	14.6242	39.4
M6-2	2.0735	14.8226	39.8
M7-1	1.8573	9.5176	43.0
M7-2	1.9331	10.0286	43.4
M8-1	1.8134	10.8984	40.9
M8-2	1.8762	10.7097	41.3
M9-1	1.5210	0.1551	71.7
M9-2	1.4138	0.1605	72.1
M10-1	2.1790	11.7620	44.1
M10-2	1.9305	11.5162	44.5
M11-1	1.7605	9.7779	43.9
M11-2	1.7322	10.3700	44.3
M12-1	1.8218	12.2273	42.0
M12-2	1.7608	12.5823	42.4
M13-1	1.7397	12.3652	39.4
M13-2	1.8448	11.7635	39.8

La Tabla 8 presenta la relación entre el porcentaje de carbono orgánico determinado mediante el método de Walkley-Black (%C WB), el porcentaje de materia orgánica obtenido por pérdida por ignición (%MO LOI) y la luminosidad (L^*) de las muestras de suelo analizadas. Estos parámetros permiten evaluar la influencia del contenido de materia orgánica sobre las propiedades colorimétricas del suelo. La integración de las variables %C WB, %MO LOI y L^* , permitió establecer comparaciones preliminares entre las propiedades fisicoquímicas y visuales de las muestras de suelo, sirviendo como base para el análisis de correlaciones entre el contenido de carbono orgánico, la materia orgánica y las características colorimétricas.

La Figura 11 muestra la relación entre la luminosidad del suelo (L^*) y el porcentaje de carbono orgánico estimado mediante el método de Walkley-Black. En términos generales, se observa una tendencia donde las muestras con menores valores de luminosidad presentan mayores porcentajes de carbono orgánico, mientras que las muestras más claras tienden a mostrar menores contenidos de carbono.

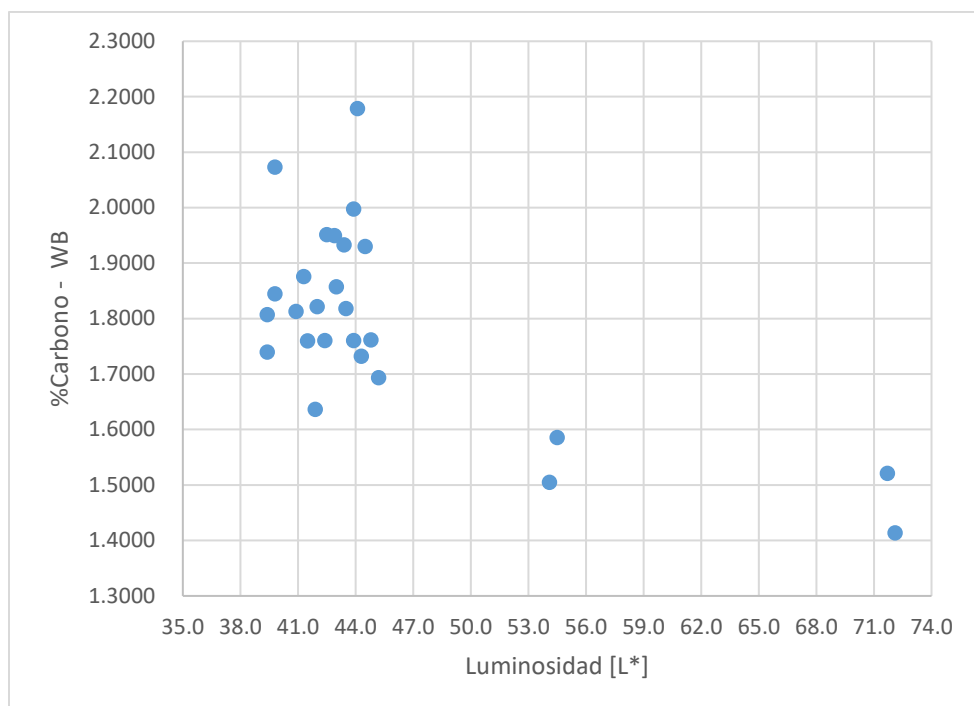


Figura 11. Relación entre la luminosidad del suelo (L) y el porcentaje de carbono orgánico estimado por el método Walkley-Black.

De manera similar, la Figura 12 presenta la relación entre la luminosidad del suelo y el porcentaje de materia orgánica obtenido mediante pérdida por ignición (LOI). Los resultados muestran una tendencia semejante a la observada en el método de Walkley-Black, donde las muestras más oscuras presentan mayores contenidos de materia orgánica.

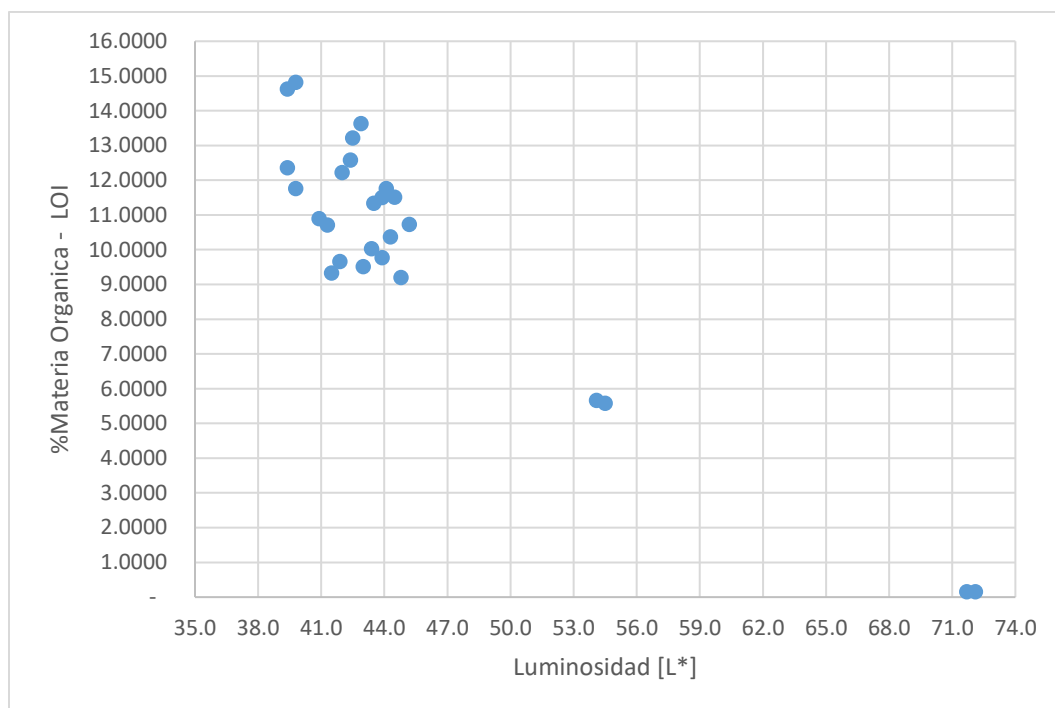


Figura 12. Relación entre la luminosidad del suelo (L) y el porcentaje de materia orgánica por pérdida por ignición (LOI).

En las figuras 11 y 12 destaca particularmente la muestra 9, la cual presentó valores de luminosidad significativamente mayores respecto al resto de las muestras, indicando una tonalidad considerablemente más clara. Este comportamiento coincide con los menores porcentajes de carbono y materia orgánicos obtenidos experimentalmente, sugiriendo una posible relación entre el color del suelo y su contenido orgánico.

Aunque las tendencias observadas no representan aún una correlación definitiva, los resultados obtenidos sugieren que la luminosidad del suelo podría utilizarse como una variable complementaria para estimar indirectamente propiedades fisicoquímicas asociadas a la materia orgánica. No obstante, será necesario ampliar el número de muestras analizadas y continuar estandarizando las condiciones de captura y análisis colorimétrico para reducir la variabilidad experimental observada.

Es importante considerar que los valores obtenidos mediante el método de Walkley-Black y por pérdida por ignición (LOI) presentan diferencias significativas entre sí, debido a que ambos métodos cuantifican componentes distintos asociados a la materia orgánica del suelo. El método de Walkley-Black estima principalmente el carbono orgánico oxidable presente en la muestra. Por ello, los resultados obtenidos representan una aproximación al contenido de carbono orgánico disponible con respecto a las condiciones específicas de la reacción química [3].

Por otro lado, el método de pérdida por ignición (LOI) estima la materia orgánica total a partir de la pérdida de masa de la muestra. En este procedimiento, además de compuestos orgánicos, pueden volatilizarse otras sustancias presentes en el suelo, como agua, o compuestos minerales sensibles a altas temperaturas, lo que puede generar diferencias respecto a los valores obtenidos químicamente [2].

Debido a estas diferencias metodológicas, no se esperaba obtener valores idénticos entre ambos métodos. Sin embargo, los resultados mostraron tendencias consistentes entre las muestras analizadas, particularmente en aquellas con mayores y menores contenidos relativos de materia orgánica. Esto sugiere que ambas metodologías pueden aportar de forma complementaria en la caracterización del suelo.

En conjunto, la integración de datos químicos, gravimétricos y colorimétricos permitió construir una base de datos preliminar que servirá como fundamento para futuras etapas del proyecto orientadas al desarrollo de herramientas digitales para el análisis accesible de suelos mediante imágenes.

1.6. Valoración de productos, resultados e impactos

Los resultados obtenidos durante el presente PAP permitieron ampliar la base de datos fisicoquímica y colorimétrica de muestras de suelo recolectadas en distintas áreas del campus del ITESO. Mediante la aplicación del método de Walkley-Black, fue posible estimar el contenido relativo de carbono orgánico presente en las muestras analizadas, mientras que el método gravimétrico por pérdida por ignición (LOI) permitió complementar la

caracterización de la materia orgánica del suelo. Adicionalmente, el análisis colorimétrico mediante coordenadas CIELAB permitió registrar parámetros visuales asociados al color del suelo, principalmente relacionados con la luminosidad de las muestras [6].

La incorporación de cálculos estequiométricos permitió corroborar experimentalmente la coherencia del método de Walkley-Black, observándose concordancia entre los valores teóricos y experimentales de carbono obtenidos a partir de las titulaciones. Esto permitió validar la metodología experimental aplicada y fortalecer la confiabilidad de los resultados obtenidos durante el análisis químico de las muestras [3].

Al comparar los resultados obtenidos con lo reportado en estudios previos sobre análisis de carbono orgánico del suelo [2], [3], se observó que el método de Walkley-Black continúa siendo una alternativa viable para la cuantificación relativa de materia orgánica debido a su reproducibilidad, accesibilidad y facilidad de implementación en laboratorio. De manera similar a lo reportado por GLOSOLAN [3], los resultados obtenidos permitieron identificar diferencias entre tipos de suelo mediante variaciones en el contenido estimado de carbono orgánico.

Asimismo, se identificó una tendencia general entre la luminosidad del suelo (L^*) y los parámetros fisicoquímicos obtenidos experimentalmente. Las muestras con menores valores de luminosidad tendieron a presentar mayores contenidos relativos de carbono y materia orgánicos, mientras que muestras considerablemente más claras, como la muestra 9, presentaron los valores más bajos de carbono y materia orgánica dentro del conjunto experimental. Este comportamiento coincide con lo reportado en investigaciones relacionadas con caracterización visual y fisicoquímica de suelos, donde se establece que los suelos con mayor contenido de materia orgánica suelen presentar tonalidades más oscuras [4], [6].

Uno de los principales aportes del presente PAP fue la integración de resultados fisicoquímicos y colorimétricos dentro de una misma base de datos experimental. Esto permitió comenzar a construir un conjunto de información que podrá utilizarse en etapas

posteriores para desarrollar modelos de correlación entre parámetros visuales y propiedades químicas del suelo. Además, el registro fotográfico estandarizado de las muestras representa una herramienta importante para futuros análisis mediante procesamiento digital de imágenes.

Entre los impactos generados por el proyecto destaca la consolidación de una metodología de trabajo que integra análisis químicos, gravimétricos y colorimétricos para el estudio de suelos dentro del ITESO. Además, el proyecto fortaleció la continuidad de la línea de investigación enfocada en correlacionar parámetros visuales con propiedades fisicoquímicas del suelo, permitiendo ampliar el número de muestras disponibles y mejorar la organización de los datos experimentales.

Finalmente, hay algunas actividades que podrían desarrollarse en futuras etapas del PAP. Entre ellas se encuentra la ampliación del número de muestras analizadas, la incorporación de nuevos métodos de caracterización, la estandarización de las condiciones de captura fotográfica y el desarrollo de herramientas digitales capaces de estimar propiedades del suelo a partir del análisis de imágenes y modelos de correlación más robustos.

1.7. Bibliografía y otros recursos

- [1] R. Rendón-Medel, A. Aguilar-Ávila, E. Márquez-Berber, y M. Altamirano-Cárdenas, “Sustentabilidad de la agricultura intensiva en México: un análisis de prácticas y limitaciones,” *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, vol. 12, no. 8, pp. 1401–1417, 2021. Disponible en: https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-09342021000801401&script=sci_arttext
- [2] Anderson, J. M., & Ingram, J. S. I. (1993). Capítulo 6. Análisis químicos. En *Tropical soil biology and fertility: A handbook of methods* (pp. xx–xx). CAB International.
- [3] GLOSOLAN, “Carbono orgánico del suelo por el método de Walkley-Black: método de titulación y colorimétrico,” *Red Mundial de Laboratorios de Suelos* (FAO), SOP-02, 2019.
- [4] Protocolo de Investigación, Departamento de Procesos Tecnológicos e Industriales, ITESO, 2025.

[5] ITESO, “Conócenos,” *Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente*, Recuperado el 05 de marzo de 2026. Disponible en: <https://www.iteso.mx/conocenos>

[6] R. G. Kuehni, *Color Space and Its Divisions: Color Order from Antiquity to the Present*. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2003.

1.8. Anexos generales

[Este apartado es opcional, entendiendo por anexos generales todo lo que dé sustento al documento para su mejor comprensión, como planes de trabajo detallados, cronogramas, materiales elaborados, bitácoras, fichas de trabajo, fotografías, gráficas, estadísticas, etc.]

2. Productos

El producto desarrollado consistió en la integración de una base de datos preliminar que relaciona parámetros fisicoquímicos y colorimétricos de muestras de suelo recolectadas en distintas áreas del campus del ITESO. Para su elaboración se realizaron actividades de muestreo, acondicionamiento y procesamiento de muestras, titulaciones mediante el método de Walkley-Black, análisis gravimétrico por pérdida por ignición (LOI) y registro fotográfico estandarizado de las muestras utilizando dispositivos móviles.

A partir de los resultados experimentales obtenidos, se construyó una base de información que integra valores de carbono orgánico estimado, contenido de materia orgánica y parámetros colorimétricos del espacio CIELAB (L^* , a^* y b^*). Esta información permitirá dar continuidad al proyecto en futuras etapas orientadas al desarrollo de herramientas digitales para el análisis accesible de suelos mediante imágenes.

Tabla 8. Relación entre porcentaje de carbono orgánico estimado por Walkley-Black, porcentaje de materia orgánica por LOI y luminosidad (L^*) de las muestras de suelo analizadas.

Muestra	%C WB	%MO LOI	L^*
M1-1	1.9516	13.2155	42.5
M1-2	1.9499	13.6364	42.9
M2-1	1.8183	11.3398	43.5
M2-2	1.9975	11.5037	43.9
M3-1	1.5051	5.6702	54.1
M3-2	1.5857	5.5804	54.5
M4-1	1.7600	9.3364	41.5
M4-2	1.6365	9.6662	41.9

M5-1	1.7615	9.2014	44.8
M5-2	1.6938	10.7287	45.2
M6-1	1.8073	14.6242	39.4
M6-2	2.0735	14.8226	39.8
M7-1	1.8573	9.5176	43.0
M7-2	1.9331	10.0286	43.4
M8-1	1.8134	10.8984	40.9
M8-2	1.8762	10.7097	41.3
M9-1	1.5210	0.1551	71.7
M9-2	1.4138	0.1605	72.1
M10-1	2.1790	11.7620	44.1
M10-2	1.9305	11.5162	44.5
M11-1	1.7605	9.7779	43.9
M11-2	1.7322	10.3700	44.3
M12-1	1.8218	12.2273	42.0
M12-2	1.7608	12.5823	42.4
M13-1	1.7397	12.3652	39.4
M13-2	1.8448	11.7635	39.8

La tabla 8 muestra una versión resumida y promediada de las variables principales utilizadas para el análisis comparativo entre propiedades fisicoquímicas y colorimétricas del suelo. La base de datos completa incluye además coordenadas de ubicación, descripción del sitio de muestreo y registros fotográficos de cada muestra.

Ficha descriptiva del producto

Elemento	Descripción
Código y nombre del PAP	4G03 Programa de Apoyo a la Investigación
Nombre del proyecto	Análisis del color y su correlación con parámetros fisicoquímicos de muestras de suelo
Nombre del producto	Base de datos preliminar de propiedades fisicoquímicas y colorimétricas de muestras de suelo
Descripción	El producto consiste en una base de datos experimental que integra resultados obtenidos mediante titulaciones de carbono orgánico por el método de Walkley-Black, análisis de materia orgánica por pérdida por ignición (LOI) y parámetros colorimétricos CIELAB de muestras de suelo recolectadas en distintas zonas del campus del ITESO. La base de datos incluye información química, gravimétrica y visual de las muestras, así como registros fotográficos estandarizados.

Objetivo del producto	Generar una base de información experimental que permita analizar posibles correlaciones entre el color del suelo y su contenido de materia orgánica para futuras aplicaciones digitales de análisis de suelos.
Autores	Itzel Cuencas Pelayo, Alondra Saraí Delgadillo Villalobos y David Alberto Rivera Rodríguez.

En las figuras 13. 14 y 15 se muestran fragmentos de la base de datos.

Muestra	Ubicación	Descripción	Foto (Suelo)	FOTO TAMIZADO DIFERENTES TELEFONOS		
				No.1	No.2	No.3
1	20.60753°N, 103.41736°O	Arbol 470, atrás del edificio D, enfrente de las mesas				
2	20.60716°N, 103.41734°O	Afuera del edificio H, enfrente del arbol 475, cruzando la banqueta				
3	20.60690°N, 103.41674°O	Al lado atrás y derecho del arbol 501 atrás de los baños de la café.				
4	20.60605°N, 103.41606°O	Atrás del edificio de rectoría árbol 904 al lado de la biblio.				
5	20.60534°N, 103.41580°O	Atrás de la Cruz al lado del vivero				

Figura 13. Fragmento visual #1 de la base de datos con ubicación, descripción y fotografías de las muestras de suelo.

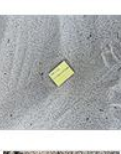
Muestra	Ubicación	Descripción	Foto (Suelo)	FOTO TAMIZADO DIFERENTES TELEFONOS		
				No.1	No.2	No.3
6	10.60556°N, 103.41446°O	Enfrente del edificio el barco, del árbol 586				
7	20.60514°N, 103.41422°O	En medio de los pinos, en el árbol 644				
8	20.60511°N, 103.41475°O	Enfrente del árbol 605 atrás del S.				
9	20.60497°N, 103.41385°O	Arena blanca atrás de las canchas de voleibol enfrente del árbol 1172				
10	20.60470°N, 103.41299°O	Atrás de la cancha de rugby, Fútbol todo al lado del árbol 1207				

Figura 14. Fragmento visual #2 de la base de datos con ubicación, descripción y fotografías de las muestras de suelo.

Muestra	Ubicación	Descripción	Foto (Suelo)	FOTO TAMIZADO DIFERENTES TELEFONOS		
				No.1	No.2	No.3
11	20.60585°N, 103.41255°O	Enfrente del árbol 1252, Por donde corren alrededor de la de fut.				
12	20.60644°N, 103.41230°O	Suelo de las coles al lado de la cancha de fútbol				
13	20.60784°N, 103.41319°O	Cercas del árbol que se está pudriendo por atrás del W árbol 1783				

Figura 15. Fragmento visual #3 de la base de datos con ubicación, descripción y fotografías de las muestras de suelo.

En particular, la muestra 9 presentó los valores más altos de luminosidad y simultáneamente los menores contenidos de carbono y materia orgánica dentro del conjunto experimental. Este comportamiento sugiere una posible relación entre la apariencia visual del suelo y sus propiedades fisicoquímicas.

Aunque los resultados obtenidos no constituyen todavía un modelo predictivo definitivo, sí representan una base experimental importante para futuras etapas del proyecto orientadas al desarrollo de herramientas digitales de análisis de suelo mediante imágenes.

3. Reflexión crítica y ética de la experiencia

El RPAP tiene también como propósito documentar la reflexión sobre los aprendizajes en sus múltiples dimensiones, las implicaciones éticas y los aportes sociales del proyecto para compartir una comprensión crítica y amplia de las problemáticas en las que se intervino.

[Este texto deberá aparecer en todos los RPAP]

3.1. Sensibilización ante las realidades

Itzel Cuencas Pelayo

Este PAP me mostró una problemática actual que enfrentan muchos agricultores mexicanos, lo cual me llevó a reflexionar sobre el impacto que tiene mi investigación dentro de la sociedad. A través de este proyecto pude comprender la magnitud de la problemática, los diversos factores que la afectan y todas las personas que se encuentran involucradas, ya que, aunque impacta principalmente a los agricultores, también afecta a la sociedad en general debido a la pérdida de fertilidad de los suelos y las consecuencias ambientales que esto conlleva.

A partir de ello, procuré realizar todas mis actividades de la manera más ética y responsable posible, comprendiendo que, más allá de una investigación, nuestra labor también consiste en influir de manera positiva en el manejo de los recursos naturales y en las prácticas agrícolas. Como futuro ingeniero químico, entendí que mi responsabilidad no solo radica en investigar y desarrollar soluciones, sino también en compartir conocimiento, educar y proporcionar herramientas que faciliten y optimicen procesos, haciéndolos más accesibles

para quienes los necesitan. Esta experiencia me ayudó a reflexionar sobre el impacto significativo que puede tener cada una de mis acciones dentro de mi profesión y en la sociedad.

Alondra Saraí Delgadillo Villalobos

Durante el desarrollo de este PAP pude comprender de una manera más cercana las problemáticas relacionadas con la degradación y pérdida de calidad de los suelos agrícolas, así como las consecuencias que esto genera tanto en el ámbito ambiental como social. A lo largo del proyecto entendí que detrás de cada muestra analizada existen personas que dependen directamente de la tierra para su sustento y bienestar, por lo que esta experiencia me permitió sensibilizarme respecto a las dificultades que enfrentan los productores agrícolas en la actualidad.

El involucrarme en las actividades experimentales y en el análisis de resultados me hizo reflexionar sobre la importancia de realizar el trabajo de manera responsable y ética, considerando que la información obtenida puede contribuir a una mejor comprensión del estado de los suelos y al desarrollo de estrategias más sostenibles. Además, esta experiencia despertó en mí un mayor interés por aplicar mis conocimientos no solo con fines académicos, sino también para generar un impacto positivo en la sociedad y en el cuidado de los recursos naturales.

Como futura ingeniera química, comprendí que el ejercicio de mi profesión implica una gran responsabilidad, ya que las decisiones y aportes que realicemos pueden influir en la calidad de vida de muchas personas y en la conservación del medio ambiente. Este proyecto me ayudó a fortalecer valores como la empatía, el compromiso y la conciencia social, entendiendo que la investigación científica también debe orientarse al beneficio colectivo y al desarrollo sostenible.

David Alberto Rivera Rodríguez

Durante el desarrollo del presente PAP pude comprender que el análisis de suelos no solamente representa un procedimiento químico o experimental, sino también una

herramienta con implicaciones sociales y ambientales importantes. A lo largo del proyecto fui entendiendo que la calidad del suelo influye directamente en actividades relacionadas con la producción de alimentos, el manejo sustentable de recursos y la toma de decisiones agrícolas, especialmente en contextos donde no siempre se cuenta con acceso a análisis especializados o herramientas tecnológicas avanzadas.

En particular, comprendí que para pequeños productores o personas fuera del ámbito académico, el análisis de suelo suele ser costosos, complejos o poco accesibles. Esto me hizo valorar la importancia de desarrollar herramientas más sencillas y accesibles que permitan acercar el conocimiento científico a otros sectores de la sociedad.

En distintos momentos del proyecto fue necesario repetir pruebas, revisar resultados inconsistentes y reconocer posibles errores experimentales. Esto me permitió entender que la honestidad en el manejo e interpretación de resultados es una parte fundamental del ejercicio profesional, ya que modificar, ocultar o ignorar errores puede afectar directamente la confiabilidad del trabajo científico.

Esta experiencia me permitió reflexionar sobre el papel actual de la ingeniería química y del análisis científico dentro de problemáticas relacionadas con sustentabilidad, agricultura y desarrollo tecnológico. Comprendí que incluso proyectos aparentemente pequeños, como la generación de una base de datos de suelos, pueden convertirse en el inicio de herramientas con aplicaciones sociales importantes si se desarrollan con responsabilidad ética, pensamiento crítico y enfoque interdisciplinario.

3.2. Aprendizajes logrados

Itzel Cuencas Pelayo

Esta experiencia me llevó a trabajar con mayor precisión, responsabilidad y seguridad dentro del laboratorio. Considero que una de las competencias que más fortalecí fue mi capacidad para la recolección de muestras y la duplicación de ensayos, demostrando mayor consistencia en mis procedimientos y aumentando mi confianza al momento de realizar distintos análisis.

Además, uno de los aprendizajes más importantes fue comprender la cuantificación de materia orgánica y la presencia de diferentes tipos de carbono, lo que me permitió entender con mayor profundidad la importancia de estos análisis dentro del proyecto.

De igual manera, fortalecí mis habilidades en el análisis e interpretación de datos experimentales, las cuales me ayudaron a relacionar resultados y comprender de mejor manera el comportamiento químico observado durante el desarrollo de las prácticas y experimentos.

Finalmente, mejoré mi organización personal, la gestión de tiempos en laboratorio y mi capacidad para colaborar de manera efectiva con otras personas dentro del proyecto. En conjunto, este PAP representó una experiencia importante para mi desarrollo académico y profesional, ya que no solo consolidó mi formación técnica como estudiante de ingeniería química, sino que también fortaleció competencias como la responsabilidad, el pensamiento crítico y el trabajo en equipo.

Alondra Saraí Delgadillo Villalobos

Participar en este PAP me permitió desarrollar competencias disciplinares, sociales y personales importantes para mi formación como ingeniera química. Durante el proyecto enfrenté retos relacionados con el análisis e interpretación de resultados experimentales, así como con la aplicación de conocimientos teóricos en una problemática real. Esto me ayudó a fortalecer mi autonomía, organización y capacidad para tomar decisiones de manera crítica y responsable, dándome cuenta de que puedo adaptarme y responder adecuadamente ante distintos desafíos académicos y profesionales.

Asimismo, el trabajo colaborativo fue fundamental durante el desarrollo del proyecto, ya que aprendí a comunicarme mejor con mis compañeros, escuchar diferentes opiniones y trabajar en equipo para alcanzar objetivos en común. Esta experiencia me permitió comprender que la construcción del conocimiento requiere diálogo, respeto y cooperación, además de reconocer la importancia de involucrarse socialmente en problemáticas que afectan tanto al medio ambiente como a la sociedad.

En el ámbito profesional y personal, este PAP amplió mi visión sobre la complejidad de los suelos y la importancia de factores químicos, biológicos y ambientales en su fertilidad. Aprendí que los microorganismos y la radiación solar desempeñan funciones esenciales en procesos como la degradación de materia orgánica y la disponibilidad de nutrientes. Finalmente, esta experiencia fortaleció mi compromiso ético y social, haciéndome más consciente de la responsabilidad que implica aplicar mis conocimientos para contribuir al cuidado del medio ambiente y al bienestar de las personas.

David Alberto Rivera Rodríguez

Durante el desarrollo del presente PAP logré fortalecer distintos aprendizajes profesionales y personales relacionados tanto con el análisis experimental como con la forma en que la ingeniería puede vincularse con problemáticas reales. Uno de los principales retos que enfrenté fue integrar distintas metodologías experimentales dentro de un mismo proyecto, relacionando análisis químicos, gravimétricos y colorimétricos para construir una base de datos coherente y útil para futuras aplicaciones digitales. Esto me permitió desarrollar una manera de trabajar más organizada, crítica y orientada a la resolución de problemas.

En el ámbito profesional, reforcé mis conocimientos relacionados con química analítica, análisis fisicoquímico de suelos y tratamiento de datos experimentales. Uno de los aspectos más importantes fue comprender la necesidad de validar y corroborar experimentalmente los resultados mediante cálculos estequiométricos y análisis crítico de los datos obtenidos.

En el ámbito personal, considero que uno de los aprendizajes más importantes fue desarrollar mayor paciencia y capacidad de adaptación frente a resultados experimentales inesperados. Durante el proyecto surgieron situaciones donde fue necesario repetir pruebas, revisar cálculos y replantear interpretaciones debido a resultados inconsistentes o muestras atípicas. Esto me ayudó a comprender que el proceso científico requiere constancia, análisis crítico y honestidad al momento de interpretar los datos. También me permitió confiar más en mi capacidad para integrar conocimientos de distintas áreas y enfrentar proyectos con un enfoque más autónomo y reflexivo.

Finalmente, el PAP me permitió reconocer que la ingeniería química no se limita únicamente a procesos industriales o cálculos teóricos, sino que también puede contribuir al desarrollo de herramientas interdisciplinarias con impacto ambiental y social. Esta experiencia fortaleció mi interés por integrar análisis experimental, procesamiento de datos y herramientas tecnológicas dentro de proyectos orientados a resolver problemáticas reales de manera accesible y sustentable.

3.3. Congruencia con perfil de egreso

Selecciona de cada una de la(s) carrera(s) que colaboraron en el desarrollo de este PAP la competencia que más se puso en práctica y/o se desarrolló:

Humanidades	☐ Arquitectura	Choose an item.
	☐ Arte y creación	Choose an item.
	☐ Ciencias de la comunicación	Choose an item.
	☐ Ciencias de la educación	Choose an item.
	☐ Comunicación y artes audiovisuales	Choose an item.
	☐ Derecho	Choose an item.
	☐ Desarrollo Inmobiliario Sustentable	Choose an item.
	☐ Diseño	Choose an item.
	☐ Diseño de indumentaria y moda	Choose an item.
	☐ Diseño urbano y arquitectura del paisaje	Choose an item.
	☐ Gestión Cultural	Choose an item.
	☐ Gestión Pública	Choose an item.
	☐ Nutrición	Choose an item.
	☐ Periodismo y comunicación pública	Choose an item.
	☐ Psicología	Choose an item.
	☐ Publicidad y comunicación estratégica	Choose an item.
	☐ Relaciones internacionales	Choose an item.
	☐ Traducción e interpretación	
Ingenierías	☐ Ingeniería ambiental/ y tecnologías sustentables	Choose an item.
	☐ Ingeniería Civil	Choose an item.
	☐ Ingeniería de Alimentos	Choose an item.
	☐ Ingeniería Electrónica	Choose an item.
	☐ Ingeniería en Biotecnología	Choose an item.
	☐ Ingeniería en Ciberseguridad	Choose an item.
	☐ Ingeniería en Desarrollo de Software	Choose an item.
	☐ Ingeniería en Inteligencia Artificial	Choose an item.
	☐ Ingeniería en Mecatrónica	Choose an item.
	☐ Ingeniería en Nanotecnología	Choose an item.
	☐ Ingeniería en Negocios y Servicios Digitales	Choose an item.
	☐ Ingeniería en Sistemas Computacionales	Choose an item.
	☐ Ingeniería en Sistemas Digitales Embebidos	Choose an item.
	☐ Ingeniería Financiera	Choose an item.
	☐ Ingeniería Industrial	Choose an item.
	☐ Ingeniería Mecánica	Choose an item.
	☒ Ingeniería Química	Desarrollar tecnología y ciencia básica, para contribuir a la mejora de procesos y productos químicos.
	☐ Ingeniería y Ciencia de Datos	Choose an item.
Negocios	☐ Administración de Empresas y Emprendimiento	Choose an item.
	☐ Comercio y Negocios Globales	Choose an item.
	☐ Contaduría y Gobierno Corporativo	Choose an item.
	☐ Finanzas	Choose an item.
	☐ Hospitalidad y Turismo	Choose an item.
	☐ Mercadotecnia y Dirección Comercial	Choose an item.
	☐ Negocios y Mercados Digitales	Choose an item.
	☐ Recursos Humanos y Talento Organizacional	Choose an item.