



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

# LICENCIATURA EN CIENCIAS AMBIENTALES

Escuela Nacional de Estudios Superiores,  
Unidad Morelia

La quema agrícola en Vertisols y  
Cambisols: cambios en el color y  
propiedades químicas

# TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

**LICENCIADO EN CIENCIAS AMBIENTALES**

P R E S E N T A

VANESA HERNÁNDEZ GONZÁLEZ

DIRECTOR(A) DE TESIS: Dr. Francisco Bautista Zúñiga

MORELIA, MICHOACÁN

NOVIEMBRE, 2021



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



ESCUELA  
NACIONAL  
DE ESTUDIOS  
SUPERIORES  
UNIDAD MORELIA

10  
AÑOS  
1961-2021

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS SUPERIORES UNIDAD MORELIA  
SECRETARÍA GENERAL  
SERVICIOS ESCOLARES

**MTRA. IVONNE RAMÍREZ WENCE**  
DIRECTORA  
DIRECCIÓN GENERAL DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR  
**PRESENTE**

Por medio de la presente me permito informar a usted que en la **sesión ordinaria 04 del Comité Académico** de la Licenciatura en Ciencias Ambientales de la Escuela Nacional de Estudios Superiores (ENES) Unidad Morelia, celebrada el día **12 de abril del 2021**, se acordó poner a su consideración el siguiente jurado para la presentación del Trabajo Profesional de la alumna **Vanesa Hernández González** de la Licenciatura en Ciencias Ambientales, con número de cuenta **313066311**, con el trabajo titulado: **"La quema agrícola en Vertisols y Cambisols: cambios en el color y propiedades químicas"**, bajo la dirección como tutor del Dr. Francisco Bautista Zúñiga.

El jurado queda integrado de la siguiente manera:

**Presidente:** Dra. Mayra Elena Gavito Pardo  
**Vocal:** Dr. Luciano Chi Serrano  
**Secretario:** Dr. Francisco Bautista Zúñiga  
**Suplente:** Mtro. José Francisco Sánchez Espinoza  
**Suplente:** Dr. José de Jesús Alfonso Fuentes Junco

Sin otro particular, quedo de usted.

Atentamente  
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"  
Morelia, Michoacán a 02 de febrero de 2022.



**DRA. YESENIA ARREDONDO LEÓN**  
SECRETARIA GENERAL

---

CAMPUS MORELIA

Antigua Carretera a Pátzcuaro N° 8701, Col. Ex Hacienda de San José de la Huerta  
58190, Morelia, Michoacán, México. Tel: (443)689.3500 y (55)5623.7300, Extensión Red UNAM: 80614  
[www.enesmorelia.unam.mx](http://www.enesmorelia.unam.mx)

## **AGRADECIMIENTOS INSTITUCIONALES**

A la Universidad Nacional Autónoma de México, a la Escuela Nacional de Estudios Superiores, a la Licenciatura en Ciencias Ambientales por aceptarme en su programa de estudios y por brindarme las herramientas necesarias para formarme como licenciada en ciencias ambientales. Me siento sumamente orgullosa de ser parte de esta comunidad.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada durante la elaboración de mi tesis de licenciatura a través del Proyecto “Las propiedades magnéticas de los suelos y sus aplicaciones: contaminación, clasificación y uso del fuego en agricultura” clave 283135.

A mi tutor, el Dr. Francisco Bautista Zúñiga y a los miembros del Jurado de Examen: la Dra. Mayra Elena Gavito Pardo, el Dr. Luciano Chi Serrano, el Mtro. José Francisco Sánchez Espinoza y el Dr. José de Jesús Alfonso Fuentes Junco. Por aceptar ser parte de mi formación como licenciada y sus valiosas aportaciones en el enriquecimiento y mejoramiento de mi trabajo de tesis.

## **AGRACECIMIENTOS PERSONALES**

Agradezco a todas las personas que me apoyaron durante mis estudios de licenciatura, especialmente a mis papas que tanto amo, Armando y Soledad, quienes incondicionalmente han estado conmigo paso a paso, por motivarme a superarme profesionalmente y como persona, a ustedes debo lo que soy. A mis hermanos Armando y Ángeles, por quienes también me he esforzado en ser un ejemplo a seguir.

A mis profesores por compartir sus conocimientos y experiencias adquiridas durante su carrera, proporcionándome las bases necesarias para desarrollarme en el ámbito académico y profesional.

Al Dr. Francisco Bautista, quien me dio la oportunidad de trabajar en su equipo y darme todas las facilidades para llevar a cabo este trabajo, por compartirme su experiencia y conocimiento, por su paciencia y su insistencia en continuar con mis estudios, me llevo una gran experiencia en haber colaborado con usted.

A los autores de artículos, libros y documentos consultados, gracias a los cuales pude desarrollar satisfactoriamente este trabajo, así como aprender y comprender de mejor manera los temas aquí abordados.

A mis compañeros de laboratorio, a Dante quien me integró de la manera más amena al equipo de trabajo y hacerme sentir cómoda en él, por su apoyo en los tramites iniciales de mi tesis y en el uso del colorímetro, gracias por ser un gran compañero y amigo; a Fer, quien además de ser una gran amiga, formó parte esencial de mi proyecto, enseñándome a hacer paso a paso los análisis químicos correspondientes a mi trabajo, gracias por tomarte el tiempo y ser solidaria conmigo; a Monse, Gabriel, Toño y Ana, por sus consejos durante este proceso, me ayudaron mucho a mejorar.

A mis amigas Viri, Ani, Mitzi, Dani, Mariana, Itzel, Raquel y Azucena, quienes desde que las conozco han estado ahí, de ustedes también he aprendido mucho, y me motivan a ser mejor persona, agradezco profundamente su amistad sincera, vamos juntas en este camino.

Al Sr. Delfino Martínez, quien me ha permitido tomarme días para concluir esta fase de mis estudios, por su paciencia en capacitarme en su ardua labor en la agricultura y prácticas agroecológicas, son cosas que valoro mucho y que sé me serán de mucha utilidad en mi vida profesional y personal.

Al resto de personas que han sido parte de este proceso, brindándome su tiempo, compartiendo vivencias y alegrías; a mis compañeros de la licenciatura, de quienes aprendí mucho, sobre todo a valorar las cosas pequeñas de la vida.

## ÍNDICE

1.	RESUMEN .....	8
1.	ABSTRACT .....	9
2.	INTRODUCCIÓN .....	10
2.1	Justificación .....	11
3.	Objetivos.....	12
3.1	Objetivo general.....	12
3.2	Objetivos específicos .....	12
4.	Antecedentes.....	12
4.1	Las quemas como parte del manejo y sus efectos en el suelo .....	12
4.2	Color .....	13
5.	MARCO TEÓRICO .....	14
5.1	El suelo y sus propiedades .....	14
5.1.1	Textura.....	15
5.1.2	La materia orgánica .....	16
5.1.3	Los óxidos de hierro .....	17
5.1.4	Carbonatos .....	18
5.1.5	pH y conductividad eléctrica .....	19
5.2	Color del suelo .....	21
5.2.1	La materia orgánica y el color .....	21
5.2.2	Los óxidos de hierro y el color .....	22
5.3	Color y sistemas de color.....	22
5.3.1	Sistema CIEL*a*b* .....	23
5.3.2	Sistema RGB .....	23
5.3.3	Índices de color.....	24
5.4	El fuego y sus efectos en el suelo .....	25
6.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	27
6.1	Zona de estudio .....	27
6.2	La quema agrícola y el muestreo .....	28
6.3	Análisis de propiedades del suelo .....	29
6.3.1	Propiedades químicas .....	29
6.3.2	Color .....	29
6.4	Análisis estadístico de datos .....	31
7.	RESULTADOS .....	32
7.1	Quema agrícola .....	32
7.2	Propiedades químicas .....	33
7.2.2	Materia orgánica del suelo.....	35

7.2.3	pH .....	36
7.2.4	Conductividad eléctrica .....	37
7.3	Color - Sistema CIE-L*a*b* .....	37
7.3.1	Luminosidad (CIE-L*a*b*) .....	38
7.3.2	Coordenada a* (CIE-L*a*b*) .....	39
7.3.3	Coordenada b* (CIE-L*a*b*) .....	40
7.3.4	Índice de enrojecimiento (CIE-L*a*b*) .....	40
7.3.5	Índice de enrojecimiento relativo (CIE-L*a*b*) .....	41
7.4	Color - Sistema RGB .....	42
7.4.1	Variable R (RGB) .....	43
7.4.2	Variable G (RGB) .....	44
7.4.3	Variable B (RGB) .....	44
7.4.4	Índice de enrojecimiento (RGB) .....	45
7.4.5	Índice de saturación (RGB) .....	46
7.4.6	Índice de hue (RGB) .....	46
8.	DISCUSIÓN .....	46
9.	CONCLUSIONES .....	51
10.	Referencias .....	53
11.	ANEXOS .....	59
11.1	Muestras .....	59
11.2	Prueba de carbonatos .....	61
11.3	Propiedades del suelo .....	62

## ILUSTRACIONES

Ilustración 1.	Características principales de un perfil de suelo .....	15
----------------	---	----

## FIGURAS

Figura 1.	Área de estudio en Belice y distribución de parcelas de muestreo dentro del área. ....	28
Figura 2.	Método de análisis de suelo en el colorímetro. ....	31
Figura 3.	Temperatura promedio alcanzada por el fuego agrícola en la superficie de un Vertisol. ....	32
Figura 4.	Temperaturas alcanzadas por el fuego agrícola en la superficie de un Cambisol. ....	33
Figura 5.	Propiedades químicas de un Vertisol en los primeros 20 cm de profundidad, antes y después de la quema. ....	35
Figura 6.	Propiedades químicas de un Cambisol en los primeros 20 cm de profundidad, antes y después de la quema. ....	36
Figura 7.	Variables e índices del sistema CIE-L*a*b* de un Vertisol en los primeros 20 cm de profundidad, antes y después de la quema. ....	39

Figura 8. Variables e índices del sistema CIE-L*a*b* de un Cambisol en los primeros 20 cm de profundidad, antes y después de la quema.....	41
Figura 9. Variables e índices del sistema RGB de un Vertisol en los primeros 20 cm de profundidad, antes y después de la quema. ....	43
Figura 10. Variables e índices del sistema RGB de un Cambisol en los primeros 20 cm de profundidad, antes y después de la quema. ....	45
Figura 11. Comportamiento de las propiedades químicas de Cambisol y Vertisol, antes y después de la quema. ....	47
Figura 12. Comportamiento de las variables L*, a*, b* e índice de enrojecimiento del sistema CIE-L*a*b* de Cambisol y Vertisol, antes y después de la quema. ....	49
Figura 13. Comportamiento del índice de enrojecimiento e índice de saturación del sistema RGB de Cambisol y Vertisol, antes y después de la quema. ....	50

## TABLAS

Tabla 1. Fechas de muestreo de suelo. ....	28
Tabla 2. Valores generales de las propiedades químicas de un Cambisol y un Vertisol (media ± desviación estándar y mediana).....	34
Tabla 3. Valores generales de las propiedades de color de un Cambisol y un Vertisol en el sistema CIE-L*a*b*(media ± desviación estándar y mediana).....	37
Tabla 4. Valores generales de las propiedades de color en el sistema RGB de un Cambisol y un Vertisol (media ± desviación estándar y mediana). ....	42

## ANEXOS

Anexo 1. Muestras de una Vertisol de 0 a 20 cm de profundidad, antes y después de la quema. ....	60
Anexo 2. Muestras de un Cambisol de 0 a 20 cm de profundidad, antes y después de la quema. ....	61
Anexo 3. Gráfico de clases calcáreas antes y después de la quema agrícola de un Cambisol y un Vertisol. ....	62
Anexo 4. Tabla de pruebas ANOVA de dos vías en Vertisol, en parámetros químicos; MOS, pH y CE (Medias ± Desviación estándar). ....	63
Anexo 5. Tabla de pruebas ANOVA de dos vías en Cambisol, en parámetros químicos; MOS, pH y CE (Medias ± Desviación estándar). ....	64
Anexo 6. Tabla de pruebas ANOVA II en Vertisol, para los parámetros de color e índices en el sistema CIEL*a*b* (Medias ± Desviación estándar). ....	65
Anexo 7. Tabla de pruebas ANOVA II en Cambisol, para los parámetros de color e índices en el sistema CIEL*a*b* (Medias ± Desviación estándar). ....	66
Anexo 8. Tabla de pruebas ANOVA II en Vertisol, para los parámetros de color e índices en el sistema rgb (Medias ± Desviación estándar). ....	67
Anexo 9. Tabla de pruebas ANOVA II en Cambisol, para los parámetros de color e índices en el sistema rgb (Medias ± Desviación estándar). ....	68



## 1. RESUMEN

El fuego juega un papel importante en la agricultura, es un elemento común en los cultivos de caña de azúcar alrededor del mundo, no obstante, existen posturas encontradas en cuanto al efecto de las quemas agrícolas sobre las propiedades físicas, químicas y biológicas, sin tener en cuenta que los suelos funcionan como aislantes térmicos. Aún existe poca información al respecto, pues no se conocen los efectos en la gran diversidad edáfica.

Existen diversos trabajos que han evaluado el impacto del fuego en el suelo, especialmente en las propiedades químicas, sin embargo, una forma de conocer el efecto de las quemas agrícolas sobre el suelo de manera sencilla, rápida y económica es mediante la evaluación del color del suelo, ya que es una característica que permite hacer un diagnóstico simple sobre su estado; a la vez se ha identificado que ocurre un cambio inmediato en el color posterior a la quema.

El objetivo fue evaluar el efecto del fuego en las propiedades químicas y físicas de dos grupos de suelo, así como utilizar los parámetros e índices de color del suelo como indicador.

El muestreo se realizó en dos parcelas donde se cultiva caña de azúcar, una parcela con Cambisol y la otra con Vertisol. Se seleccionaron cinco sitios de muestreos por cada grupo de suelo, en cada uno se colectaron muestras cada 2 cm hasta una profundidad máxima de 20 cm. Posteriormente las muestras se secaron a la sombra y tamizaron a una malla de 2 mm para los análisis químicos y físicos. Para la medición de color, las muestras se tamizaron a un tamaño de partícula de 0.590 – 0.210 mm y se retiró la hojarasca, posteriormente se utilizó un Colorímetro (Konica Minolta Instruments Ltd), obteniendo datos en los sistemas CIE-L\*a\*b\* y X, Y, Z, este último se transformó al sistema de color RGB.

Los análisis estadísticos se realizaron mediante las pruebas de ANOVA II y Kruskal-Wallis de acuerdo con su normalidad. Por efecto de la quema el Cambisol presentó un aumento significativo en la **materia orgánica** (MO) y del valor del **pH**. Sobre el color, se observó una disminución significativa en **L\***, **a\*** y **b\***, en cuanto a los índices, el **índice de enrojecimiento** ( $IR_{CIE-L^*a^*b^*}$  e  $IR_{RGB}$ ) presentó un aumento significativo en los primeros 2 cm, mientras que el **Índice de saturación** ( $IS_{RGB}$ ) presenta una disminución significativa después de la quema en todo el perfil de Cambisol. En el Vertisol se observó un aumento en la **conductividad eléctrica** (CE) después de la quema. En los parámetros del color se observaron disminuciones en **L\***. En cuanto a los **índices de enrojecimiento**, solo el  $IR_{CIE-L^*a^*b^*}$  presentó un aumento significativo en los primeros dos centímetros. El efecto del fuego agrícola de baja intensidad y tiempo fue benéfico en ambos suelos. El color del suelo mediante el **IR** puede ser utilizado como indicador en ambos grupos de suelo de los cambios directos ocasionados por una quema agrícola bien controlada, ya que no se apreciaron más allá de los primeros 2 cm de profundidad.

## 1. ABSTRACT

Fire plays an important role in agriculture, it's a common element in sugarcane crops around the world, however, there are conflicting positions regarding the effect of agricultural burning on physical, chemical, and biological properties, without having Keep in mind that soils work as thermal-insulators. There is still little information in this regard since the effects on the great soil diversity are not known.

There are several works that have evaluated the impact of fire on the soil, especially in chemical properties, however, a way to know the effect of agricultural burning on the soil in a simple, fast and economical way is by evaluating the color of the soil, because it's a characteristic that allows a simple diagnosis of its state; at the same time, it has been identified that after burning occurs a change in color.

The objective was to evaluate the effect of fire on the chemical and physical properties of two soil groups, as well as using the parameters and indices of soil color as an indicator.

Sampling was carried out in two plots where sugarcane is grown, one patch with Cambisol and the other with Vertisol. Five sampling sites were selected for each soil group; each soil samples were collected every 2 cm to a maximum depth of 20 cm. Subsequently, the samples were dried in the shade and sieved to a 2 mm mesh for chemical and physical analysis. The soil samples were sieved to a particle size of 0.590 - 0.210 mm, and the litter was removed. Later a Colorimeter was used, obtaining data in the CIE-L\*a\*b\* and X, Y, Z systems, the latter transformed to the RGB color system.

Statistical analyzes were performed using ANOVA II and Kruskal-Wallis tests according to their normality. Due to the burning effect, Cambisol presented a significant increase in organic matter and in the pH value. Regarding color, a significant decrease was observed in L\*, a\*, and b\*, as for the indices, the redness index presented a significant increase in the first 2 cm, while the saturation index shows a significant decrease after burning throughout the Cambisol profile. In Vertisol, an increase in electrical conductivity was observed after burning. In the color parameters, decreases were observed in L\*. Regarding the redness indices, only presented a significant increase in the first two centimeters. The effect of the agricultural fire of low intensity and time was beneficial in both soils. IR can be used as an indicator in both soil groups of direct changes caused by well-controlled agricultural burning since they were not seen beyond the first 2 cm of depth.

## 2. INTRODUCCIÓN

La agricultura es un proceso de producción que resulta de la manipulación humana sobre el ambiente, el uso de herramientas y conocimientos para el desarrollo de un cultivo. Mesoamérica y el Medio Oriente son los centros de origen y domesticación de plantas cultivadas más antiguos, donde el desarrollo de la agricultura fue un proceso paulatino y que eventualmente surgió de manera independiente en ambos centros (Casas & Caballero, 1995).

La agricultura permitió el establecimiento de las diferentes culturas y su desarrollo tecnológico e intelectual. Entre los sistemas agrícolas prehispánicos más antiguos se encuentran: las terrazas, las chinampas y el sistema de roza-tumba-quema con base en el manejo del fuego (Díaz-Hernández, *et al.*, 2011; Sanchez, 2016).

El uso del fuego, ha sido una práctica común en la historia de la humanidad, fue utilizado por nuestros ancestros para reducir la tupida vegetación, adecuar el ambiente para la caza, así como para dar apertura a campos de cultivo. El fuego ocurre de diferentes formas y con fines distintos, como son: los incendios naturales en bosques y áreas silvestres, quemas como parte del manejo forestal o para cambio de uso de suelo, en la renovación de pastizales, así como en quemas agrícolas, por ejemplo, en las milpas o los cultivos de caña de azúcar. A pesar de que el fuego es un elemento fundamental en la historia de la humanidad, su uso es asociado comúnmente a daños ambientales, teniendo impactos negativos en: la calidad del aire, la fauna silvestre, el crecimiento de los cultivos y árboles, la pérdida de bosques naturales, así como en el suelo y la biota edáfica, provocando la pérdida de nutrimentos, pérdida de materia orgánica y degradación del suelo. No obstante, en el caso del suelo, esto no siempre es así, pues los efectos del fuego dependen de factores específicos, como son la pendiente del terreno, la textura de suelo, la frecuencia de lluvias, la frecuencia de las quemas (Ladrach, 2009), así como su intensidad y duración (Lázaro. *et al.*, 2021), de las diversas características que posee cada grupo de suelo (Bautista, *et al.*, 2014) como sus propiedades térmicas (Rojas, *et al.*, 2007).

Las posturas a favor, han aceptado que el fuego es un constante natural de los ecosistemas. Hoy en día las quemas controladas en bosques y campos de cultivo han disminuido el riesgo a que ocurran incendios descontrolados por la presencia de material seco en el suelo. En la agricultura, el fuego resulta ser un agente que facilita el reciclaje de nutrimentos; aunado a ello representa un método sencillo y económico para el manejo de diferentes sistemas, optimizando el trabajo de los agricultores, especialmente en los cultivos de caña de azúcar (Chaves & Bermúdez, 2006; Ladrach, 2009).

La caña de azúcar, *Saccharum officinarum* L., es una gramínea originaria de Nueva Guinea cultivada por primera vez en el Sureste Asiático y la India occidental. Alrededor del 647 D.C., fue introducida en Egipto; un poco más de un siglo más tarde (755 D.C.) fue llevado a España, extendiéndose posteriormente a casi todas las regiones tropicales y subtropicales. Con la llegada de Cristóbal Colón a América, este cultivo fue trasladado a las islas del Caribe y de ahí pasó a la parte continental americana, particularmente a la zona tropical (Camacho, 1961).

A nivel mundial, la caña de azúcar es cultivada en un amplio rango de condiciones topográficas y climáticas y los métodos de cosecha empleados son igual de diversos, sin embargo, a pesar de los avances tecnológicos en la mecanización agrícola y el rendimiento de los cultivos, la técnica utilizada más común para optimizar la productividad de la mano de obra y de la maquinaria, es la quema de los cañaverales antes de la cosecha (Ortiz, *et al.*, 2012).

Este cultivo ha tomado fuerza en el sector agrícola de Belice, donde representa una divisa que contribuye significativamente a la economía del país.

Belice es un país ubicado en América Central, que limita al norte con México, al oeste y sur con Guatemala y al este con el mar Caribe. Su clima se clasifica como subtropical, con una temporada lluviosa entre junio y noviembre, y una temporada seca entre marzo y mayo (Gardi, *et al.*, 2014).

A través de los años, este país ha tenido una considerable transformación económica. Para el año 2019, de acuerdo al Statistical Institute of Belice (SIB) la agricultura aportó el 8.7% del producto interno bruto (PIB), mientras que, en los primeros meses del 2020, la agricultura ha aportado el 10.6% del PIB nacional (SIB, 2020). Sin embargo, es oportuno mencionar que este sector se ha visto vulnerable ante fenómenos naturales, principalmente hidrometeorológicos, como huracanes y tormentas tropicales (Idalicia, 2019). De acuerdo a datos de SIB (2016), la actividad agrícola se ha distribuido de la siguiente manera: Banano (33%), caña de azúcar (12%), cítricos (7%), y la horticultura y otros cultivos (47%). Señalando el caso de la caña de azúcar, su producción en el país beliceño, tan solo en la última década representó en promedio el 7.8% del producto interno bruto (PIB) y el 34% del total de divisas como porcentaje de las exportaciones agrícolas, además de proporcionar el 15% de empleo en mano de obra, así como otros beneficios sociales y ambientales (SIB, 2015; Chi, *et al.* 2017; Idalicia, 2019). Por ello, siguiendo a Martín & Manzano (2010), el gobierno de Belice está apostando por el sector agrícola para impulsar el crecimiento económico, el desarrollo y la reducción de la pobreza, siendo la producción de caña de azúcar un contribuyente significativo a tales objetivos.

## **2.1 Justificación**

En la ciencia, la calidad de un suelo se ha evaluado bajo métodos laboriosos, largos, y costosos, sin mencionar la generación de residuos tóxicos de difícil manejo. Sin embargo, histórica y empíricamente, el color ha sido una cualidad de suma importancia en la determinación de la fertilidad del suelo debido a que es un reflejo inmediato de su composición, por lo que puede considerarse una herramienta útil para interpretar distintos procesos que ocurren en el suelo de manera natural o por contaminación.

Dada la importancia que representa el suelo para la agricultura y para las diferentes posturas que existen en torno a los efectos de las quemas agrícolas sobre este recurso, y que además la quema agrícola es una práctica fundamental en los cultivos de caña de azúcar, el presente trabajo propone generar información precisa, representativa y significativa de los cambios que sufre el suelo agrícola por el uso del fuego mediante el

uso de técnicas proxy como la colorimetría. Esto permitirá obtener resultados rápidos, económicos y amigables con el ambiente que faciliten la toma de decisiones.

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1 Objetivo general**

Evaluar los cambios de color y propiedades químicas en un Vertisol y un Cambisol por la quema agrícola, así como determinar su efecto en la fertilidad y/o degradación del suelo.

#### **3.2 Objetivos específicos**

Evaluar los cambios en las propiedades de color, materia orgánica, pH y conductividad eléctrica, en dos grupos de suelo por uso del fuego agrícola.

Evaluar si el grupo de suelo es un factor que determina los cambios que ocurren en el color y las propiedades químicas de los suelos por uso del fuego agrícola.

Determinar la profundidad a la que pueden ocurrir los cambios en color y propiedades químicas de los grupos de suelo por uso del fuego agrícola.

### **4. ANTECEDENTES**

En este apartado se presentan de manera general los trabajos referentes al efecto de las quemaduras prescritas en diferentes ejes ambientales, enfatizando los estudios realizados en torno al suelo y los cultivos de caña; así mismo se abordan los estudios en la aplicación del color como herramienta de análisis de suelos.

#### **4.1 Las quemaduras como parte del manejo y sus efectos en el suelo**

El uso del fuego en la agricultura y el manejo forestal han sido estudiados desde perspectivas y con propósitos diferentes. Se ha abordado su impacto en la contaminación del aire (Omi, 2005), en la fauna silvestre (Mobley, 1976; Long, 2006), en el crecimiento de árboles y plantas (Seubert, 1974; Grelen, 1975), así como en el suelo y la biota (Stone, 1971; Mobley, *et al.*, 1973; Seubert, 1974; Grelen, 1975; Ulery & Graham, 1993; Celis, *et al.*, 2013; Thomaz, *et al.*, 2014; Parada, *et al.*, 2016). Estos estudios concluyeron en su mayoría que las quemaduras controladas no tienen mayores impactos ambientales, sin embargo, en la medida de lo posible deben evitarse estas prácticas si no son necesarias, pues se debe tener en cuenta que a largo plazo podrían generarse desequilibrios ecológicos de manera directa o indirecta.

Se ha determinado que las quemaduras a largo plazo pueden disminuir la fertilidad natural del suelo, afectar la actividad microbiana, favorecer la erosión del suelo y la pérdida de humedad, entre otros efectos adversos. No obstante, también se ha dispuesto, que debido a la combustión del material orgánico por efecto del fuego, aumenta la fertilidad, por los aportes de fósforo y cenizas, así como por el incremento en el estado de las bases y el contenido de calcio, magnesio y potasio intercambiable, de manera que incorpora nutrientes esenciales al suelo; o bien, que el contenido de materia orgánica del suelo, bases y nutrientes minerales no se ven afectados con las quemaduras (Mobley, *et al.*, 1973; Seubert, 1974; Stone, 1971; Ladrach, 2009; Aguilar, *et al.*, 2013; Thomaz, *et al.*, 2014). Otros beneficios del uso del fuego en el suelo, es que mejora la estructura del suelo

incrementando la agregación y estabilidad de los agregados; en la agricultura resultan en el control de plagas, enfermedades y plantas de malezas (Ketterings, *et al.*, 2000; Minervini, *et al.*, 2018). En el caso específico de la quema de cañaverales, se considera que representa grandes ventajas en lo que concierne a la optimización de la mano de obra, especialmente en el corte y la cosecha, además de mejorar la calidad de la materia prima. Por ello, aunque las quemas agrícolas son consideradas prácticas ambientalmente degradantes, en el caso de la caña de azúcar son consideradas comercialmente necesarias (Chavez & Bermúdez, 2006), especialmente en sitios donde la cosecha con maquinaria especializada es inaccesible (Ortiz, *et al.*, 2012).

## 4.2 Color

Tradicionalmente, el color ha sido una herramienta empírica utilizada para determinar la aptitud de un terreno al establecer un cultivo, sin embargo, la ciencia ha desarrollado diversas escalas de medida y herramientas cuantitativas de colorimetría que se adaptan a situaciones específicas.

En 1905, fue desarrollada la escala de medición de Munsell por el pintor Albert Henry Munsell, la cual tiempo después fue adoptada por el USDA como el sistema de color oficial en la descripción de perfiles de suelo en campo, debido a que permite generar información directa sobre las características básicas del color de un suelo. No obstante, debido a que esta herramienta está sujeta a la subjetividad (Salinas, 2019), diversos estudios científicos han evaluado la precisión del sistema Munsell, así como la de otros sistemas de color en el estudio de la calidad del suelo y sus propiedades. Los primeros trabajos enfocados a estudiar las propiedades del suelo con base en el color se dieron en los años 80's haciendo uso de datos de reflectancia infrarroja espacial para medir materia orgánica (Krishnan, *et al.*, 1981; Pitts, *et al.*, 1986), o bien, empleando equipos espectrofotométricos para estimar el contenido de óxidos de hierro, principalmente goethita y hematita (Torrent, *et al.*, 1983; Barron & Torrent, 1986). Más tarde se emplearon imágenes satelitales (Landsat TM, SPOT) (Escadafal, *et al.*, 1994; Madeira, *et al.*, 1997; Mathieu, *et al.*, 1998), así como cámaras digitales (Levin, *et al.*, 2005)

Dada la necesidad de generar información precisa del suelo a través del color, diversos autores se han dado a la tarea de desarrollar, evaluar y mejorar índices de color en los sistemas Munsell, CIE-L\*a\*b\*, RGB (los cuales se describen más adelante), entre otros, basándose en las propiedades de reflectancia de los minerales, así como en su poder de pigmentación en la matriz del suelo (Torrent, *et al.*, 1983; Torrent & Barron, 1986; Escadafal, *et al.*, 1994; Madeira, *et al.*, 1997; Mathieu, *et al.*, 1998; Levin, *et al.*, 2005; Kirillova, *et al.*, 2015; Vodyanitskii & Savichev, 2017). De esta manera se han evaluado diferentes índices, así como las variables propias de cada sistema, con respecto a los componentes minerales del suelo como son los óxidos de hierro y la materia orgánica, principalmente. En gran medida se ha dado lugar a distintos índices de enrojecimiento, los cuales han sido fuertemente relacionados con la concentración de óxidos de hierro, particularmente el contenido de hematita debido al efecto directo que ésta tiene en el enrojecimiento del suelo. Así mismo, el comportamiento de variables o índices asociadas a la claridad de un suelo, han sido atribuidas al contenido de materia orgánica debido a su capacidad de oscurecimiento en el suelo. De este modo se ha establecido la utilidad del color como fuente de información en los estudios mineralógicos del suelo.

Debido a que la materia orgánica y los oxihidróxidos de hierro son particularmente responsables del color del suelo, también hacen evidentes los efectos de la vegetación quemada en el color del horizonte superficial del suelo, por lo que esta característica ha

resultado ser indicador de la severidad de los incendios, lo que a su vez ha sido asociado a las condiciones en que ocurre el fuego y las características de los suelos (Minervini, *et al.*, 2018).

Los métodos de análisis mencionados anteriormente, han hecho uso de la tecnología disponible. Actualmente los sistemas de captación y procesamiento de imagen han evolucionado al punto de convertirse en una fuente de información significativa en diversos campos. En la agricultura y la edafología, con la ayuda de imágenes aéreas, satelitales, fotografías y videos, los científicos y productores logran determinar variables como la calidad de la tierra, riego, índices verdes, densidades y áreas de siembra, variables topográficas, etc. Todo esto respaldado desde la comparación de patrones de color de bases de datos previamente establecidas (Bengiovanni, *et al.*, 2006). Con base en la teoría e importancia, es que se han creado equipos capaces de medir el color de manera numérica, eliminando la subjetividad de su medición. Trabajos recientes han utilizado el color como indicador de metales pesados en suelos y polvos urbanos (Bautista, *et al.*, 2014; Cortés, *et al.*, 2015; García, *et al.*, 2020; Bautista, *et al.*, 2021) a través del uso de colorímetros que generan bases de datos numéricos en diferentes sistemas de color, siendo esta una técnica de diagnóstico rápido que ha permitido identificar sitios contaminados con metales pesados, y que también pueden ser utilizados como indicadores de calidad.

Por lo anterior, tecnologías como los sensores, escáneres, cámaras, colorímetros, etc., toman un papel importante en el análisis de color, pues rompen la subjetividad mediante escalas de medición preestablecidas como son: CIEL\*a\*b\* y RGB.

## 5. MARCO TEÓRICO

En este punto se desglosa, en primera instancia el funcionamiento del suelo a nivel general, así como sus propiedades químicas y físicas; posteriormente se describen las propiedades de color del suelo y su relación con sus componentes sólidos. Cerrando con el efecto de las quemas agrícolas en las propiedades del suelo.

### 5.1 El suelo y sus propiedades

El suelo es uno de los recursos naturales más importantes que proveen vida a todo tipo de seres vivos, como plantas, animales y organismos (Mandal, 2016). Es un sistema complejo que resulta de la meteorización de la roca madre, y que adquiere rasgos y características particulares durante su formación, mismas que son reflejadas en su morfología y propiedades. Se compone de elementos minerales y orgánicos como producto de continuos procesos químicos, físicos y biológicos, esto es, es un sistema abierto y dinámico (Hernández, *et al.*, 2010; Quiroga & Romano, 2012; Gardi, *et al.*, 2014), dicho de otro modo: “*El suelo es el espejo de la naturaleza, pues constituye un bloque de memoria en el que están plasmados los fenómenos antiguos y actuales que han tenido lugar durante su formación*” (Hernández, *et al.*, 2010). Desde el punto de vista agrícola, es definido como la capa de material fértil que recubre la superficie de la Tierra y de la cual las plantas obtienen nutrientes y agua (Krasilnikov, *et al.*, 2013).

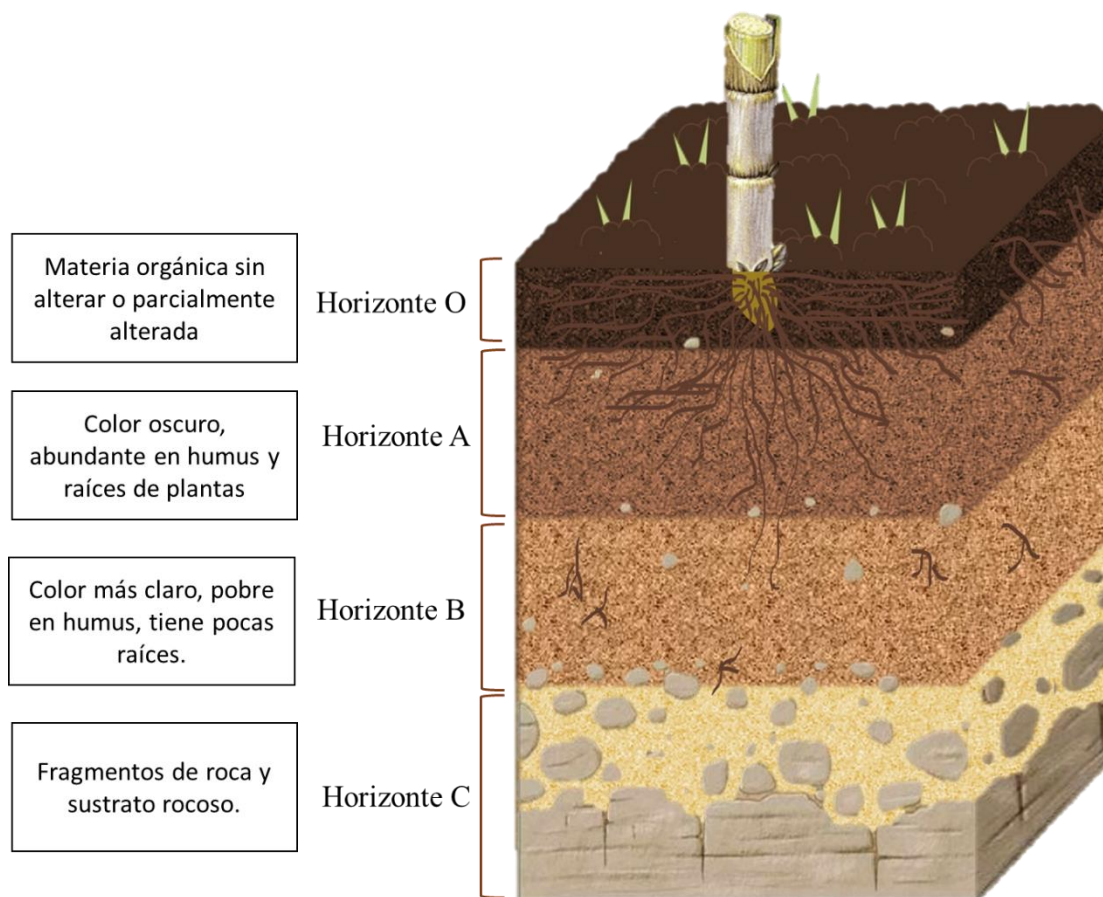
La importancia del suelo radica en la gran influencia que tiene sobre el medio ambiente, la economía local, regional y mundial, así como en la supervivencia y bienestar de la población. El suelo, proporciona (directa o indirectamente) más de un 95% de la producción mundial de alimentos (Gardi, *et al.*, 2014), de manera que es el recurso básico para la agricultura, cuyo manejo determina en gran parte su productividad.

El suelo visto como un sustrato de desarrollo vegetal, es analizado e interpretado de acuerdo a sus funciones de edafotransferencia, como son el movimiento del agua, la retención hídrica, el drenaje, la aireación, la penetración o desarrollo de las raíces, el ciclo de nutrientes, nutrientes asimilables, conductividad del calor, intercambio gaseoso, etc., las cuales, en gran medida, son influenciadas por la estructura del suelo y sus fracciones texturales ( (Zapata, 2002; Zapata, 2006; Hernández, *et al.*, 2010).

La estructura se constituye en la fase sólida y es un atributo inherente a cada grupo de suelo y sus horizontes. Su formación está dada por propiedades que intervienen en la agregación, como son: la cantidad de materia orgánica, actividad biológica, compuestos cementantes orgánicos e inorgánicos, el contenido y tipo de arcilla, cationes intercambiables dominantes y el manejo del suelo, pues cada uno de estos da lugar a distintos arreglos que determinan el espacio poroso dentro de los agregados y entre los agregados a causa del diámetro (Hernández, *et al.*, 2010; Quiroga & Romano, 2012).

### 5.1.1 Textura

La textura es una de las propiedades más estables y permanentes de suelo que mejor lo caracteriza desde el punto de vista físico. De manera general, define cada uno de los grupos de partículas menores de 2mm de diámetro, correspondientes a las fracciones granulométricas: arenas, limos y arcillas. Éstas han sido relacionadas con los principales componentes del suelo debido a la capacidad que tiene cada fracción para retener agua y nutrimentos, de drenar, así como su nivel de erosionabilidad. A pesar de ser una propiedad estable, puede verse alterada a causa del manejo o fenómenos naturales que desplazan las partículas de un lugar a otro (Quiroga & Romano, 2012).



*Ilustración 1. Características principales de un perfil de suelo*



### 5.1.2 La materia orgánica

La materia orgánica del suelo (MOS) es considerada el principal indicador de la fertilidad del suelo y su productividad (Quiroga, Bono & Fraiser, 2012). Se constituye de la suma de plantas y residuos animales en diferentes etapas de descomposición, así como células y tejidos de organismos del suelo y sustancias bien descompuestas (Brady & Weil, 1999). La materia orgánica tiene un ciclo de descomposición en el cual los organismos vivos son fundamentales en su formación, principalmente los microorganismos del suelo; consta de cuatro etapas principales: 1) descomposición de residuos orgánicos; 2) mineralización de nutrientes; 3) transferencia de carbono orgánico y nutrientes de un grupo de MOS a otro y; 4) liberación continua de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) a través de la respiración microbiana y la oxidación química (McCauley, Jones, & Jacobsen, 2009).

Las materia orgánica del suelo se divide en tres grupos principales determinados por su tiempo de descomposición completa: **activa**, cuya tasa de descomposición es de 1-2 años, y se compone de residuos vegetales y animales frescos (Brady & Weil, 1999); **lenta**, la cual consiste principalmente en detritos (células y tejidos de material recalcitrante en descomposición) y tarda alrededor de 15 a 100 años en descomponerse, pues es parcialmente resistente a la descomposición microbiana (Wander, Traina, Stinner, & Peters, 1994); y la MOS **pasiva** o humus, una mezcla oscura y compleja de sustancias orgánicas modificadas a partir del tejido orgánico original, sintetizada por varios organismos del suelo y resistente a una mayor descomposición microbiana, por lo que su tiempo de descomposición es de entre 500 y 5000 años. Esta representa entre el 35 y 50% de la MOS total y es la fuente responsable de muchas de las propiedades químicas y físicas del suelo asociadas con la MOS y la calidad del suelo. Cabe mencionar que dentro de los depósitos activos y pasivo existe una fracción intermedia de MOS denominada materia orgánica particulada (MOP), la cual puede considerarse un subgrupo, ésta es más estable que las formas de MOS activa, y menos que la MOS lenta, por lo que sirve como un importante suministro de nutrimentos a largo plazo. Tanto la MOS activa como la lenta son biológicamente activas, de manera que los microorganismos las descomponen continuamente, liberando nutrientes esenciales a la solución de suelo (Prasad & Power, 1997; McCauley, *et al.*, 2009).

Químicamente, la MOS en forma de humus contribuye en gran medida a la capacidad de los suelos para retener nutrimentos en los sitios de intercambio, suministra químicos orgánicos a la solución del suelo que pueden servir como quelatos y aumentar la disponibilidad de metales para las plantas. A su vez, se ha demostrado que tales productos químicos orgánicos inhiben la precipitación de minerales de fosfato de calcio, manteniéndolo en forma soluble durante un período de tiempo más largo en el suelo (Prasad & Power, 1997; Hernández, *et al.*, 2010; Mandal, 2016).

Físicamente, existe una estrecha relación entre el humus y la estructura de un suelo, pues los químicos orgánicos disueltos estimulan la unión de las partículas del suelo, participando en la agregación, la infiltración y retención de agua y la resistencia a la erosión y la formación de costras. Así mismo, la materia orgánica determina la actividad microbiana, la cual disminuye los valores de la densidad de la fase sólida de suelo, de la compactación y aumenta la porosidad, fomentando la aireación del suelo. De este modo, se puede inferir que una buena estructuración equivale a un suelo fértil (McCauley *et al.*, 2009; Hernández *et al.*, 2010; Mandal, 2016). Cabe mencionar que la consistencia oscura del humus hace que los suelos con alto contenido de MOS sean de color marrón oscuro o negro, aumentando la cantidad de radiación solar absorbida por el suelo, lo que por consiguiente aumenta la temperatura del suelo (McCauley, *et al.*, 2009).

Por otra parte, se ha señalado que la presencia de materia orgánica es frecuentemente asociada a la fracción de arcillas, ya que los suelos con alto contenido de arcilla y limo generalmente poseen contenidos de MOS más altos que los suelos arenosos. Esto se atribuye a su tamaño (partículas finas) que restringe la aireación, reduciendo la tasa de oxidación de la materia orgánica, y a su grado y estabilidad de agregación, donde el humus se une a las arcillas y por tanto protege la MOS aún más de la descomposición. Aunado a ello, la MOS y su relación con las arcillas evita la pérdida de carbono orgánico de suelo (COS), sin embargo, este puede verse reducido por el laboreo (McCauley, *et al.*, 2009; Hernández, *et al.*, 2010).

De este modo, la materia orgánica del suelo (MOS) es uno de los controles de la productividad más valiosos de los cultivos al proporcionar nutrimentos en los sistemas agrícolas, pues son esenciales para aumentar la fertilidad del suelo, requerida para el crecimiento y desarrollo de las plantas (Mandal, 2016).

### **5.1.3 Los óxidos de hierro**

El hierro tiene una frecuencia del 5% en la corteza terrestre (Olmedo, 1971) y se presenta principalmente como óxido e hidróxido de Fe (3+) en forma de pequeños granos de mineral o revestimientos amorfos sobre otros minerales (Acevedo, *et al.*, 2004). Los óxidos de hierro son minerales de neoformación originados de la alteración de rocas y suelos que ocurren como óxidos libres, por lo que están presentes en todos los suelos en distintas proporciones (Schwertmann & Taylor, Chapter 8. Iron Oxides, 1989). Suelen encontrarse entre las partículas más pequeñas del suelo junto con los aluminosilicatos de baja cristalinidad y los compuestos húmicos, donde el tamaño de los cristales de óxidos de hierro generalmente oscila entre 10 y 100 nm (Olmedo, 1971). Gran parte de su importancia, se debe a que los sesquióxidos de hierro, junto con los de aluminio, están entre los principales cementantes inorgánicos del suelo, pues forman coloides, irreversibles o lentamente reversibles, que con la acción del agua ayudan a formar agregados estables. El hierro libre aumenta la cohesión al envolver los agregados con capas rígidas que detiene la influencia de los coloides arcillosos, frenan su estallido y disminuye su grado de humedad (Hernández, *et al.*, 2010). Su forma y proporción de contenido resultan ser factores que influyen en la fertilidad de suelo, y en la edafogénesis, por lo que son considerados indicadores de diversos procesos edáficos.

El óxido de hierro químicamente consiste de simples compuestos en la forma pura de Fe, O e H, siendo los dos grupos principales: los óxidos ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) y los oxihidróxidos ( $\text{FeOOH}$ ). Por cada grupo se forman paquetes cerrados de oxígeno hexagonal (hematita,  $\bullet\text{-Fe}_2\text{O}_3$  y goethita,  $\bullet\text{-FeOOH}$ ) y paquetes cerrados de forma cúbica (magnetita,  $\bullet\text{-Fe}_2\text{O}_3$  y lepidocrocita  $\bullet\text{-FeOOH}$ ). Tales formas se correlacionan con el distinto grado de cristalización y difieren entre sí en el arreglo espacial de la unidad estructural básica. Los óxidos de hierro conocidos son: la goethita, lepidocrocita, magnetita, maghemita y ferrihidrita, y cualquiera como producto final o precursor de goethita y/o hematita (Schwertmann & Taylor, 1989; Acevedo, *et al.*, 2004).

Las formas frecuentes de hierro son como: ión ferroso ( $\text{Fe } 2+$ ) e ión férrico ( $\text{Fe } 3+$ ). El primero es la forma reducida capaz de formar compuestos solubles en agua, mientras que el segundo es la forma oxidada que forma compuestos insolubles, como los hidróxidos. Su estado depende de factores como: el potencial estándar de reducción (Eh), del pH, de las condiciones oxidativas (aerobias o anaerobias), así como de la concentración del hierro (Bodek, *et al.*, 1988). La formación del Fe (3+) en el suelo depende, además de las condiciones anteriores, de la materia orgánica presente y de las bacterias, pues el hierro

forma quelatos metálicos con la materia orgánica y algunas bacterias participan en el ciclo del hierro (Duxbury, *et al.*, 1989).

La presencia del ión férrico, es resultado de la precipitación del ión ferroso, la cual permite la formación de un gel voluminoso de color pardo (oxihidróxido férrico amorfo), mismo que se transforma lentamente por envejecimiento a hidróxido cristalino, es decir, se origina goethita, hematita e hidrohematita, así como mezclas de dos o tres de estos componentes. Los factores que participan en el envejecimiento del gel férrico son: la temperatura y el pH; bajas temperaturas y pH elevados favorecen la formación de goethita; altas temperaturas y pH bajo estimulan la formación de hematita; bajas temperaturas y pH neutro conducen a la formación de hidrohematita, que es una forma amorfa y parda precursora de la hematita. El envejecimiento es acelerado por temperaturas elevadas, pero también es retardado por la presencia de aniones, como los fosfatos que pueden reemplazar al grupo hidroxilo (Olmedo, 1971; Schwertmann & Taylor, 1989).

Los compuestos férricos pueden predominar en la parte media y baja del perfil cuando se originan en la alteración del material original, haciendo que la parte media del perfil presente colores brillantes en contraste con los de la parte superior (Moreno, *et al.*, 2010). Por otro lado, en ambientes tropicales, debido a que la formación de óxidos de hierro es favorecida por las condiciones oxidativas, minerales como la hematita también pueden formarse en horizontes superficiales del suelo a partir de la deshidratación interna de hidróxidos amorfos como la ferrihydrita, a causa de la exposición que tiene el suelo al cambio de humedad (Olmedo, 1971; Duxbury, *et al.*, 1989).

Los óxidos de hierro en suelos han sido utilizados para: el estudio de la pedogénesis, puesto que participan en los procesos de formación del suelo (ferralitización, gleización, podzolización, iluviación, ferrolisis; procesos de adsorción de iones -fosfatos- relevantes en la fertilidad); la caracterización química de suelos (evaluando el contenido total de hierro en suelos provenientes de diferentes materiales de origen y condiciones de formación); la determinación de su participación en las características del suelo (color – que está en función del tipo y contenido de compuestos de hierro- y estructura); la clasificación de suelos (por contenido total de óxidos de hierro y/o contenido de formas de baja cristalinidad, color y estructura), etc. (Olmedo, 1971).

#### **5.1.4 Carbonatos**

Los carbonatos tienen su origen principalmente en el material parental, siendo la roca madre la fuente inicial; también son resultado de la neoformación (carbonatos secundarios), donde el relieve puede intervenir de manera importante, pues la circulación de agua subsuperficial de regiones calizas transporta los carbonatos desde las zonas más altas de las colinas hacia las partes más bajas; a ellos, puede sumarse la vegetación, ya que las raíces de las plantas absorben agua y concentran la solución del suelo con la consiguiente precipitación de las sales, además de que es capaz de formar cristales de carbonatos alrededor de sus raíces cuando reacciona el CO<sub>2</sub> que expelen con el Ca<sup>+2</sup> de la solución y después al morir, los carbonatos sintetizados se incorporan al suelo; y factores como el clima y el tiempo, los cuales influyen en su formación (Zapata, 2006; FAO, 2009). Pueden encontrarse en forma de cal polvorienta suave, barnices o revestimiento en los agregados, concreciones, costras superficiales o en el subsuelo, o bancos sólidos. Las concentraciones de carbonatos suaves se consideran iluviales, mientras que las concreciones duras se consideran de naturaleza hidrogénica. La presencia de carbonato de calcio (CaCO<sub>3</sub>) se establece a través de la adición al suelo de

gotas de HCl (ácido clorhídrico) al 10%, dónde el grado de efervescencia del gas de CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono) es indicativo de la cantidad de carbonato de calcio presente en el suelo, clasificándose desde no calcáreo hasta extremadamente calcáreo (FAO, 2009).

El proceso de carbonatación en el suelo es resultado de la insolubilidad de los carbonatos. En el agua del suelo, existe CO<sub>2</sub> a una presión parcial mayor que la que se encuentra en la atmósfera y puede disolver los carbonatos pasándolos a bicarbonatos que pueden lavarse y profundizar en el suelo donde se precipitan, produciendo acumulaciones de carbonatos, generalmente constituidos por calcita. La translocación de carbonatos se debe al balance de reacción entre carbonatos y bicarbonatos. La temperatura también afecta el equilibrio, ya que el CaCO<sub>3</sub> es menos soluble en agua caliente que en agua fría. La solubilidad de los carbonatos decrece cuando aumenta la temperatura, por lo que la movilidad de los carbonatos será mayor en climas fríos que en climas cálidos. De este modo, la acumulación de carbonatos por la precipitación de soluciones en el suelo tiene lugar por la pérdida de agua por evaporación o transpiración, disminución de la presión de CO<sub>2</sub>, aumento del pH, así como el aumento de la temperatura (Zapata, 2006).

La translocación de carbonatos en los suelos puede ser vertical, descendente y ascendente, y lateral o inclinada. La primera se da por acción de la infiltración de agua de lluvia, depositando los carbonatos de los horizontes superiores a los horizontes más profundos. La translocación vertical ascendente se debe a la existencia de agua rica en bicarbonatos y una capilaridad ascendente causada por la evaporación y succión por las raíces de las plantas. El agua se evapora, o se absorbe por la vegetación, produciendo la precipitación de los carbonatos al concentrarse en la solución del suelo (Zapata, 2006).

### **5.1.5 pH y conductividad eléctrica**

El pH y la Conductividad Eléctrica (CE) son propiedades que proporcionan información valiosa para evaluar la aptitud de un suelo en el crecimiento de las plantas y el ciclo de nutrientes. A su vez pueden ser indicadores de la actividad biológica cuando ciertos procesos mediados por microbios se ven afectados por cambios en el pH o la CE. Las prácticas de manejo del suelo y los cultivos pueden tener un efecto significativo sobre el pH y la CE en períodos de tiempo relativamente cortos, lo que hace que estos parámetros sean buenos indicadores de cambio. En general, valores de CE (1:1) entre 0 y 1,5 dS/m y los valores de pH entre 6 y 7,5 son aceptables para el crecimiento general de las plantas y la actividad microbiana; sin embargo, la interpretación para la calidad del suelo dependerá del uso específico de la tierra y la tolerancia de los cultivos a diferentes pH's y CE.

#### **5.1.5.1 pH**

Por definición, el pH es un logaritmo negativo de la concentración de ión hidrógeno, siendo el pH del agua pura igual al -log de  $1 \times 10^{-7}$  o 7. De este modo, cualquier solución con un pH inferior a siete se considera ácida, y con un pH superior a siete se define como básica. En sistemas naturales los valores de pH se hallan en un intervalo de 4.5 a 10 (Thomas, 1996; McCauley, *et al.*, 2009; Azcarate, *et al.*, 2012). Existen diversos factores que influyen en el valor del pH, como el tipo de material parental; las precipitaciones, que tienden a acidificar el suelo a causa de la lixiviación de las bases disueltas en solución e intercambio de bases adsorbidas al complejo de intercambio por H<sup>+</sup>; la mineralización de los residuos orgánicos, pues genera amonio, cuya oxidación a nitrato ocurre con liberación de H<sup>+</sup>, así mismo, los ácidos húmicos poseen grupos reactivos, carboxilos y fenólicos, que se comportan como ácidos débiles; la extracción de bases por los cultivos, ya que generalmente es mayor que el aporte de fertilización, causando la acidificación del

suelo; el uso de fertilizantes, los cuales pueden acidificar o alcalinizar un suelo de acuerdo al carácter débil de los iones constituyentes, o de su posibilidad para tener reacciones de óxido-reducción (Azcarate, *et al.*, 2012).

El pH es un indicador de la disponibilidad de nutrientes esenciales como el P y otros elementos menores (Zn, Cu, B, Mn, Fe y Mo), además de que permite estimar la presencia de otros elementos debido a su relación conocida con el pH, por lo que los valores de pH particulares en el agua pueden usarse para predecir los cationes dominantes en los coloides del suelo en el momento del muestreo y análisis del suelo (Thomas, 1996; Azcarate, *et al.*, 2012).

De acuerdo a Porta Casanellas *et al.*, (1999), las propiedades físicas y químicas del suelo son influenciadas por el pH, siendo las propiedades físicas más estables a pH neutro; cuando el pH es muy ácido se presenta una intensa alteración de minerales y la estructura se vuelve inestable; mientras que, a pH alcalino, puede destruirse la estructura y haber malas condiciones físicas, ya que las arcillas suelen dispersarse. La asimilación de nutrientes del suelo y su disponibilidad para las plantas, son determinadas por el pH, donde la mayor disponibilidad de nutrientes se da a pH entre 6-7,5 (Azcarate, *et al.*, 2012).

Thomas *et al.* (1996) ha documentado que la disponibilidad de P suele estar más disponible dentro de un rango de pH de 6 a 7, así como la mayoría de los micronutrientes (B, Cu, Fe, Mn, Ni y Zn) que están más disponibles dentro de un rango de pH de 5 a 7, pues su disponibilidad disminuye a medida que los valores de pH del suelo se acercan a 8, debido a que los cationes se unen más fuertemente al suelo y no son tan fácilmente intercambiables. Por el lado contrario, la disponibilidad de los macronutrientes (N, K, Ca, Mg y S) suelen encontrarse dentro de un rango de pH de 6,5 a 8 (Thomas, *et al.*, 1996).

Los suelos con valores de pH de 7,6 a 8,3 son calcáreos, donde suele dominar  $\text{CaCO}_3$ . En general, se considera que las condiciones son buenas, pero existen algunos problemas potenciales pues podrían presentarse deficiencias de Zn y Fe. Cuando los valores de pH se desvían hacia nueve, se puede inferir que el  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  está dominando. Cuando esto ocurre, el Na no solo es un catión importante en los intercambiadores de suelo, sino que el Ca deja de ser muy importante debido a su precipitación como  $\text{CaCO}_3$ , volviéndose tan insoluble que ahora es el  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  quien amortigua el suelo. Al ser una sal soluble, el sistema está inundado de Na a expensas de Ca. Su aparición es una advertencia de degradación del suelo (Thomas, *et al.*, 1996).

Cabe mencionar que cada planta adquiere mayor vigor y productividad dentro de ciertos intervalos de pH, pero esto no implica que el cultivo no pueda vivir fuera del intervalo indicado dado que el mismo presenta cierta capacidad de adaptación (Azcarate, *et al.*, 2012).

#### 5.1.5.2 Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica (CE) es una propiedad generalmente asociada a la presencia de sales solubles en el suelo, por lo que suele utilizarse para determinar su salinidad, cualidad que tiene gran influencia en las propiedades y procesos físicos, químicos y biológicos del suelo. Sin embargo, ésta también tiene una estrecha relación con los cationes o aniones totales en la solución:  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{H}^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{CO}_3^-$ ,  $\text{OH}^-$ , por lo que, en este sentido, además de ser un indicador de salinidad, también es una medida de nutrientes solubles. Los cationes que predominan en los suelos son  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ , debido a que, en los comienzos de la formación de arcillas, la solución formada por la disolución de los silicatos contiene estos iones (Quiroga & Romano, 2012).

De este modo, dentro de cierto rango la CE puede indicar buena disponibilidad de nutrientes para las plantas, mientras que valores extremos bajos podrían indicar un suelo pobre en nutrientes con inestabilidad estructural y que se dispersa fácilmente; al otro extremo, valores muy altos son indicadores de problemas de salinidad. Cabe mencionar que puede presentarse el caso en el que exista un rango de conductividad eléctrica adecuada pero que el suelo tenga condiciones ácidas, las cuales no son aptas para el crecimiento de las plantas, por lo que es recomendable medir tanto el pH como la CE. La unidad internacional de conductividad es Siemens por metro (S/m) o deciSiemens por metro (dS/m) (Smith & Doran, 1996).

Diversos estudios realizados en suelos agrícolas con manejo intensivo, han encontrado valores de CE (1:1) en un rango aproximado de entre 0.6 a 5 dS/m, los cuales pueden tener efectos importantes en procesos microbianos como la respiración, descomposición de compuestos orgánicos, amonificación, nitrificación y desnitrificación, y procesos químicos como la volatilización del amoníaco y degradación de pesticidas, tomando en cuenta que los microorganismos varían en su tolerancia a la salinidad, siendo los actinomicetos y los hongos más tolerantes a una CE del suelo más alta que la mayoría de las bacterias; sin embargo, también hay bacterias halófilas con altos niveles de tolerancia a la salinidad (Smith & Doran, 1996). Además, se ha encontrado que la salinidad disminuye la absorción de  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{++}$  y Mg por parte de las plantas (Caderón, *et al.*, 2001; Villa-Castorena, *et al.*, 2006).

## 5.2 Color del suelo

El color del suelo es una característica asociada a los sólidos que lo componen (Jaramillo, 2002), y representa información directa y de fácil acceso en campo, de manera que es uno de los parámetros que más se utiliza en el estudio del suelo, y como criterio básico en diferentes niveles de clasificación del suelo (Mathieu, *et al.*, 1998).

Los patrones de color están relacionados a características físicas y químicas en el suelo. No obstante, aunque un mineral posea un color característico, al encontrarse en un perfil desarrollado y maduro, puede presentar variaciones en su color gracias a los agentes cromógenos, los cuales en conjunto proyectan en el suelo un color determinado que varía a medida que se profundiza en el perfil, debido a la distribución de los pigmentos (Moreno, *et al.*, 2010).

Entre los agentes cromógenos se encuentran los componentes orgánicos como el carbono y la materia orgánica (coloración parda, gris o negra, color oscuro); los óxidos férricos, como son las hematitas (rojo intenso); los oxihidróxidos, como la goetita (amarillo), el manganeso (color negro); así como los carbonatos, el yeso y sales (color blanco, que además diluyen el color) (Schulze, *et al.*, 1993; Schwertmann, 1993; Moreno, *et al.*, 2010).

### 5.2.1 La materia orgánica y el color

El tono oscuro del suelo se debe en gran medida a la presencia de la materia orgánica, el cual es más intenso en la parte superior y decrece conforme se profundiza en el perfil. Los primeros componentes húmicos del proceso de polimerización y condensación que se lleva a cabo en la materia orgánica para transformarse en humus son los que se conocen como ácidos fúlvicos y son amarillos, y cuanto más intensas son la polimerización y condensación van apareciendo los ácidos húmicos, mismos que aumentan la coloración hasta el pardo; en el último nivel de polimerización aparecen grises y muy oscuros.

Cuando la transformación es deficiente, se produce una carbonización con formación de carbón de humus de color negro (Schulze, *et al.*, 1993; Moreno *et al.*, 2010).

En términos de colorimetría, la materia orgánica tiene una estrecha influencia en la reflectancia del suelo que afecta significativamente el color del suelo, donde la onda corta generalmente decrece cuando aumenta el contenido de materia orgánica (Mandal, 2016).

### **5.2.2 Los óxidos de hierro y el color**

La forma y composición de los depósitos de óxidos e hidróxidos de hierro son los que permiten la diferenciación visual de los horizontes de un perfil, dando lugar al color del suelo (Acevedo, *et al.*, 2004). Según Schwertmann (1993) los óxidos de hierro incluyen algunos minerales, tienen diferentes colores y el tipo de mineral formado se ve influenciado por el medio ambiente, por lo que son empleados como indicadores del medio ambiente pedogénético. Los óxidos de hierro presentan colores entre rojos, amarillos y pardos.

La hematita en el suelo es de color rojo, la goethita es de color amarillo, la lepidocrocita es de color anaranjado. La ferrihidrita se distingue de la goethita porque es más roja y de la lepidocrocita por tener valores menores o iguales a 6 en el sistema Munsell (Schwertmann, 1993). Scheinost y Schwertmann (1999), (citados por Acevedo, *et al.*, 2004) concluyeron que las muestras de goethita, acaganeita y la hematita se separan claramente por el hue, mientras que la maghemita y la jarosita pueden ser distinguidas por su luminosidad, y la lepidocrocita por su alta saturación. En cuanto a los demás óxidos de hierro (feroxita, ferrihidrita, akaganeita y schwertmannita), éstos no pueden ser identificados mediante su color, ya que este suele ser similar o bien, son minerales que presentan una mayor variabilidad en el color debido al tamaño de la partícula y su forma, a la agregación de partículas y a los defectos cristalinos o impurezas. Los suelos que contienen hematita o lepidocrocita pueden ser diferenciados con seguridad de los suelos que contienen únicamente goethita.

El color del suelo puede ser alterado por el contenido de cada óxido, por el tamaño de los cristales, el grado de cristalinidad, el grado de cementación y por las posibles sustituciones isomórficas que se presenten en ellos. Esto es que, la pobre cristalinidad, la baja cantidad, el tamaño pequeño de los cristales y la cementación hacen los colores más claros que las condiciones opuestas; los colores oscuros en suelos con bajo contenido de materia orgánica, pueden indicar la presencia de complejos de materia orgánica con óxidos de hierro, de carbón, de óxidos de manganeso y/o magnetita. Mientras que los colores rojos indican buen drenaje y buena aireación, y la mayoría de veces, una meteorización y evolución intensa (Schwertmann, 1993; Jaramillo, 2002).

Cabe mencionar que las condiciones de solubilidad (influenciadas por el potencial redox) influyen en la distribución (heterogénea u homogénea) de los óxidos de hierro y color. Por lo que en campo sucede que los colores débiles son enmascarados en una mezcla de colores fuertes: como en el caso del amarillo de la goethita por el rojo sangre de la hematita (Scheinost y Schwertmann, 1999, citados por Acevedo, *et al.*, 2004).

### **5.3 Color y sistemas de color**

El color forma parte de un espectro sumamente amplio, conocido como espectro de radiación electromagnética. Éste comprende desde las ondas largas de radio, pasando por las ondas infrarrojas hasta los ultravioletas y los rayos gamma, estando en el medio el espectro visible por el ojo humano, que da lugar al color (Salinas, 2019).

Pese a que el color es un fenómeno natural que obedece a una serie de normas físicas que condicionan su expresión (relación entre el espectro electromagnético y la luz), es a su vez resultado de la percepción, la cual es única para cada individuo y en ella intervienen variables como la intensidad de luz, saturación y causas patológicas (Salinas, 2019). Por ello, una manera de estandarizar el color es a través de la tecnología y las escalas de medición del color (sistemas RGB, hexagesimal, CIE L\*a\*b\*, CIE L\*u\*v\*, CIE XYZ, cromaticidad de Helmholtz, etc.), las cuales en el presente trabajo pueden adaptarse al estudio del suelo y sus cambios por el uso del fuego.

El color es un fenómeno psicofísico tridimensional, representado en modelos de espacio de color. A continuación, se describen los sistemas que vinculan el perfil espectral de colores con las unidades básicas de percepción del color (colorimetría tricromática) (Viscarra, *et al.*, 2006), y que han sido empleados para el desarrollo de este trabajo.

### **5.3.1 Sistema CIE L\*a\*b\***

El sistema CIE (L \*, a \*, b \*) es un espacio de color "uniforme" y universal en las coordenadas cartesianas, que permite una mejor discriminación de color que la notación Munsell. Es extensamente utilizado para la caracterización de color en análisis espectrométricos bajo condiciones de laboratorio y en la evaluación de los pigmentos para la clasificación de suelos. Fue desarrollado por el Comité Óptico Internacional en 1976 con el propósito de linealizar las diferencias de color perceptibles por el ojo basándose en el espacio de color CIE XYZ-1931. Este sistema consta de tres variables (Torrent & Barrón, 1986; Viscarra, *et al.*, 2006; Azores, 2014; Kirillova, *et al.*, 2015).

L \* es la variable que mide la luminosidad y se separa del componente de color cromático (tono, saturación). Toma valores de 0 a 100, es decir, que varía del negro más oscuro al blanco más claro. En las condiciones del suelo, depende inversamente del contenido de pigmentos negros (como el humus) en el suelo (Torrent & Barrón, 1986; Kirillova, *et al.*, 2015).

a \* es la variable que indica la posición entre verde y rojo, en una escala de -60 a +60, esto es, mide el enrojecimiento cuando es positivo, el gris cuando es cero y el verde cuando es negativo, de manera que es directamente proporcional al contenido del pigmento color rojo, el cual está asociado a la presencia de hematita ( $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) en el suelo (Torrent & Barrón, 1986; Al-Hooti, *et al.*, 2000; Kirillova, *et al.*, 2015).

b \* es la variable que representa la posición entre azul y amarillo, en una escala de -60 a +60, es decir, mide el color amarillo cuando es positivo, gris cuando es cero, mientras que los valores negativos indican el color azul, de manera que el valor es directamente proporcional al contenido del pigmento amarillo, tono asociado a la presencia de goethita ( $\alpha$ -FeOOH) en el suelo (Torrent & Barrón, 1986; Al-Hooti, *et al.*, 2000; Kirillova, *et al.*, 2015)

Cabe mencionar que las coordenadas cartesianas a\* y b\*, son perpendiculares entre sí; las cuales representan los componentes cromáticos del sistema, cuyo valor cuanto más alto es, determina una mayor saturación del color (Levin, *et al.*, 2005; Kirillova, *et al.*, 2015).

### **5.3.2 Sistema RGB**

El espacio de color RGB fue desarrollado en 1861 por James Clerk Maxwell y es el más común en sistemas electrónicos y en fotografía. Es utilizado para generar cualquier color a partir de la intensidad del tricoma rojo (R), verde (G) y azul (B), cuyos estímulos



primarios monocromáticos correspondientes se producen a 700, 546 y 436 nanómetros (nm), respectivamente. En un sistema digital de 8 bits, es cuantificado mediante valores triestímulo numérico R, G, B, en una escala de 0 (negro) a 255 (blanco), valores que están en función de su longitud de onda. La gama de colores del sistema forma un cubo que comprende coordenadas cartesianas RGB ortogonales, donde cada color está representado por un punto dentro del cubo. Todos los colores grises están presentes en la diagonal principal desde el negro ( $R = G = B = 0$ ) hasta el blanco ( $R = G = B = 255$ ) (Viscarra, *et al.*, 2006).

Cabe mencionar que el modelo RGB no describe los colores de forma lineal respecto a cómo lo capta el ojo humano, así mismo, no define por sí mismo lo que significa rojo, verde y azul, por lo que se conoce como un espacio de color no absoluto al depender del dispositivo en el que se reproduzca (Levin, *et al.*, 2005; Azores, 2014).

### 5.3.3 Índices de color

#### 5.3.3.1 Índice de enrojecimiento (IRCIEL\*a\*b\*; IRRGB)

El índice de enrojecimiento en el suelo, es una expresión sintética del color y explica la intensidad del enrojecimiento del suelo; permite determinar la relación que puede existir entre el color rojo y el contenido de óxido de hierro libre, ya que ha sido determinado en torno a la adición de la cantidad fija de hematita sintética a la matriz de suelo libre de hierro. Siguiendo a Buol *et al.* (1973), este óxido recubre las partículas de cuarzo en los suelos con una película delgada de color rojizo, etapa de la pedogénesis en la que el hierro se libera de los minerales primarios. A este proceso se le conoce como rubificación (Torrent & Barron, 1986; Levin, *et al.*, 2005).

Diversos estudios han determinado la precisión de este índice en la estimación de contenido de hematita en el suelo. En el sistema CIEL\*a\*b\*, presentó una correlación  $r=0.93$  (Kirillova *et al.*, 2015), mientras que en el sistema RGB tuvo un valor lineal  $r$  superior a 0.85, con relación al contenido de óxido de hierro libre (Levin, *et al.*, 2005).

#### 5.3.3.2 Índice de enrojecimiento relativo (IRRCIEL\*a\*b\*)

La relación  $a^*/b^*$  o índice de enrojecimiento relativo es comúnmente utilizada en el estudio de la calidad de alimentos de acuerdo con su color, verificando el cambio de color de amarillo a rojo (Al-Hooti, *et al.*, 2000). En el caso del suelo, esta relación de colores representa la proporción de la hematita sobre la goethita. En general, cuanto mayor es el enrojecimiento relativo, mayor es la proporción de hematita roja. Para ello se considera una escala de 0 a 1, donde el enrojecimiento relativo de los suelos es alto cuando es  $>0.45$ , moderado cuando es 0.25 a 0.45 y bajo cuando es  $<0.25$ . Sin embargo, cabe mencionar que existe una heterogeneidad del color de las partículas de los óxidos de Fe- (hidr). En la hematita, esta heterogeneidad de color se expresa en el hecho de que las partículas de hematita fina son más amarillentas que en las más grandes, por lo que, el alto valor del enrojecimiento relativo puede ser el resultado no solo de la abundancia de hematita, sino también la evidencia de su gran tamaño, que es típico de la hematita litogénica de depósitos pérmicos de color rojo (Vodyanitskii & Savichev, 2017). Es empleado como un índice de cambio aparente en el enrojecimiento (Souri, *et al.*, 2006)

### 5.3.3.3 Índice de Saturación y Color (Hue)

Los índices de saturación y color (hue), SI (TM) y HI (TM), fueron propuestos por Escadafal *et al.* (1994) con base en principios colorimétricos. Estos índices resultan de una simplificación de las ecuaciones generales de saturación y tono definidas por Liu y Moore (1990), quienes se basaron en las características específicas del suelo, pues las curvas de reflectancia del suelo son típicamente monótonas y aumentan en el rango visible, además de que existe un rango limitado de colores del suelo en la naturaleza (Liu & Moore, 1990; Mathieu, *et al.*, 1998).

#### 5.3.3.3.1 Índice de saturación (SIRGB)

El índice de saturación en términos generales representa la intensidad del color o la pureza del color en una muestra (Al-Hooti, *et al.*, 2000), mide la pendiente general de un espectro, de rojo a azul, en otras palabras, su desviación con respecto a un espectro plano característico de un color neutro como el gris (Escadafal, *et al.*, 1994; Mathieu, 1998). Por ejemplo, en un matiz constante como el rojo, se pueden generar píxeles rojos, que van del rojo intenso al rojo apagado como resultado de diferentes valores de la saturación, así mismo, cuando la saturación es muy baja, la naturaleza del píxel es principalmente acromática (negro, blanco o grisáceo), con una intensidad de gris que depende del componente “luminosidad” (Angulo & Serra, 2005).

#### 5.3.3.3.2 Índice de color (hue, HIRGB)

El índice de color denominado hue representa la proporción relativa de los tres colores primarios, rojo, verde y azul (Escadafal, *et al.*, 1994; Mathieu, *et al.*, 1998). Dicho de otro modo, se refiere a lo que comúnmente conocemos como “color o tono”.

## 5.4 El fuego y sus efectos en el suelo

El uso del fuego como parte del manejo, por un lado, se asocia a cuestiones de restauración y mantenimiento del estado deseado de un ecosistema o los productos y servicios deseados del ecosistema en las áreas de conservación; así como al uso tradicional por parte de la población rural para mantener el sustento; de modo que la gente juega un papel importante en la creación, el mantenimiento o el cambio de los ecosistemas deseados y sus componentes. El fuego prescrito es definido como la aplicación de quemas en forma experta, bajo condiciones específicas del clima y del combustible, con objetivos claros escritos, los cuales incluyen los efectos deseados del fuego en cada quema, ya sea en el suelo o a nivel ecológico. La quema controlada se define de manera similar, la diferencia es que en ella no hay un plan escrito, pues generalmente, el agricultor comprende estos factores y los mantiene en la memoria (Myers, 2006).

En el caso específico del suelo, los efectos del fuego varían de un grupo de suelo a otro, ya que cada grupo posee características diferentes, aunado a ello, factores como el clima, la biota, el relieve, la roca parental, el manejo (como la agricultura), y el tiempo, determinan su estado (Zapata, 2002). Por ello, debe tomarse en cuenta que los posibles cambios que en él ocurran dependerán del grupo al que pertenece (Bautista, *et al.*, 2014; Minervini, *et al.*, 2018) y de factores específicos como: la pendiente, la textura, las lluvias, la frecuencia de las quemas (Ladrach, 2009; Minervini, *et al.*, 2018), así como su intensidad y duración (Lázaro, *et al.*, 2021).

Algunos estudios han determinado que cuando la pendiente es abrupta, la erosión por efecto de la quema tiende a ser mayor que en los suelos planos (Scotter, 1972; Mobley *et*

*al.*, 1973; Ladrach, 2009). La textura, por su parte, representa una característica del suelo en su susceptibilidad a la erosión, pues se ha determinado que los suelos arenosos, después de haber sido “aclarados” por quemas u otra actividad humana, se suelen erosionar fácilmente ante lluvias fuertes debido a que no forman agregados estables, así mismo, los suelos arcillosos, tienden a la erosión superficial después de las lluvias, pues a causa de su baja capacidad de absorción de agua, la escorrentía suele ser mayor; aunado a ello, la quema de desperdicios agrícolas puede dañar tales suelos en pendientes fuertes (Stone, 1971; Mobley, *et al.*, 1973; Grelen, 1975). Finalmente, la frecuencia de las quemas influye en el nivel de erosión, pues si son continuas puede ocasionar una alta degradación del suelo, no obstante, el efecto del fuego en el suelo por la quema está íntimamente relacionada a la pendiente, encontrándose que las quemas continuas en pendientes fuertes, causan erosión (Scotter, 1972; Afif Khouri & Oliveira Prendes, 2006), mientras que en suelos planos las quemas anuales practicadas durante 20 años no han reducido la materia orgánica ni el contenido de nitrógeno (Stone, 1971; Afif Khouri & Oliveira Prendes, 2006).

En cuanto a la biota edáfica, estudios como el de Jorgensen & Hodges (1971), encontraron que las quemas anuales y periódicas durante 20 años en suelos forestales comparadas con suelos sin quemas no presentaban diferencias significativas en las poblaciones de hongos a profundidades de 0 a 5 centímetros, o de 13 a 18 cm. Del mismo modo, la población de bacterias y actinomicetos no fue significativamente distinta en suelos sin quema, con respecto a suelos quemados cada tres o cuatro años. Simultáneamente Metz y Farrier (1971) determinaron que las quemas controladas no producen mayores cambios cualitativos en la composición de la población de mesofauna en el suelo (Stone, 1971; Ladrach, W. 2009). Parada, *et al.* (2016) determinaron que, en la quema de cascarilla de arroz, ocurren cambios abruptos en las propiedades del suelo después de la quema de manera inmediata, donde la población de esporas de hongos formadores de micorrizas arbusculares (HFMA) asociados al cultivo, así como la colonización de raíces, disminuyó de manera significativa a causa de las altas temperaturas. Sin embargo, después de un periodo de 220 días estos resultados cambiaron, pues se observó una recuperación significativa en la población de esporas de HFMA y un aumento en la colonización de raíces (Parada, *et al.*, 2016).

Por su parte, el efecto sobre los niveles de nutrientes, Seubert (1974) realizó un estudio en la selva amazónica de Perú, donde comparó el sistema tradicional de tala y quema con el sistema de eliminación del material vegetal con buldózer. Los resultados de la prueba fueron que el estado de las bases aumentó diferencialmente con las quemas; el contenido de calcio, magnesio y potasio intercambiable se triplicó después de la quema mientras que en el área aclarada con el buldózer permaneció igual; el fósforo disponible aumentó dramáticamente con la quema; el contenido de materia orgánica no disminuyó con la quema, pero el carbono orgánico y el nitrógeno disminuyeron en el área aclarada con buldózer debido a que fue arrastrada la capa superior del suelo (humus) a las pilas de desperdicio. Mobley *et al.* (1973), por su parte han concluido que la quema prescrita en bosques de coníferas normalmente causa poco o ningún cambio en el contenido de materia orgánica en los suelos superficiales, al igual que Stone (1971) deja en claro que las cantidades de bases y nutrientes minerales en los bosques por las quemas controladas tampoco se ven muy afectadas (Ladrach, 2009). Parada, *et al.* (2016), determinaron que los valores de las propiedades como el pH, carbono orgánico y fósforo, aumentaron de manera significativa, a causa de la carbonización de la materia orgánica, y al pasar 220 días estas propiedades regresaron a su estado inicial (antes de la quema); esto es, gran parte de los cambios que ocurren por las quemas controladas, son efímeros. Cabe

mencionar el tipo y calidad del material vegetal que ha sido quemado, también influye en los cambios que ocurren en las propiedades antes mencionadas (Afif Khouri & Oliveira Prendes, 2006).

En lo que concierne a las temperaturas que alcanza el fuego en el suelo, especialmente por quemas controladas, el efecto es solo superficial y leve (Stone, 1971). Velazco *et al.*, (1968) encontraron que en Cuba las temperaturas alcanzadas por las llamas en la quema fueron de entre 600 y 750°C, mientras que la temperatura máxima en el suelo en los dos primeros centímetros de profundidad no fue mayor a 34°C; del mismo modo, Arnal (1976) en Venezuela, encontró que el aumento máximo por la quema de caña en los primeros dos centímetros de profundidad fue de 6°C, misma que solo se mantuvo durante 20 minutos, mientras que a los cinco centímetros la temperatura alcanzó solamente 1.5°C (Ladrach, 2009). De acuerdo a Wright y Bailey (1982), en fuegos de pastizales, la temperatura solo aumenta en el primer centímetro del suelo, mientras que los cambios a mayor profundidad son despreciables. Este comportamiento se asocia directamente a la baja conductividad térmica del suelo, dependiente del calor específico de los materiales que lo componen y de la humedad (Porta-Casanellas, *et al.*, 2003; Portillo-Arreguín, *et al.*, 2018), a su vez que se ha encontrado que la temperatura del suelo desciende de forma brusca con la profundidad (Kunst & Bravo, 2003), de esta manera el suelo es considerado un aislante térmico.

## 6. MATERIALES Y MÉTODOS

### 6.1 Zona de estudio

El presente trabajo fue realizado en dos parcelas de caña de azúcar de temporal ubicadas al norte de Belice, las cuales han estado bajo este sistema de producción durante 4 años, siendo anteriormente bosques secundarios (Fig. 2). En cada parcela domina un grupo de suelo distinto: Vertisol y Cambisol. Los muestreos se llevaron a cabo antes y después de la quema agrícola durante la zafra 2018-2019.

El sitio 1, con coordenadas 18°13' 44" N, 88°32' 05 " W, corresponde al Distrito Corozal, posee una precipitación anual promedio de 1,365 mm y una temperatura media de 25.3°C. El clima de esta zona es considerado tropical, con veranos lluviosos (Aw de acuerdo al sistema Koppen-Geiger) (Belize weather station Phillip Goldson Airp, 2020). El suelo de este sitio fue clasificado como Vertisol, de acuerdo al USDA Soil Taxonomy. Este grupo de suelo se caracteriza por tener un horizonte vértico a  $\leq 100$  cm de la superficie del suelo y  $\geq 30\%$  de arcilla expandible, principalmente esmécticas o tipo montmorillonita. Presentan compactación y grietas durante el periodo seco, mientras que en estaciones lluviosas suelen ser muy plásticos (WRB, 2014).

Por su parte, el sitio 2, con coordenadas 18°07'40" N, 88°33'45" W, se localiza en el Distrito Orange Walk, cuya precipitación anual promedio es de 1,504 mm y su temperatura media de 25°C. El clima de esta zona es considerado tropical, con veranos lluviosos (Aw de acuerdo al sistema Koppen-Geiger) (Belize weather station Phillip Goldson Airp, 2020). De acuerdo al USDA Soil Taxonomy, el suelo de esta parcela fue clasificado como Cambisol, grupo omnipresente caracterizado por ser joven en desarrollo que consta de un horizonte Cámbico. Se definen por tener menos del 8% de arcilla en la fracción de tierra fina, lo que deriva en poca o nula acumulación iluvial y componentes solubles, así como poca acumulación de materia orgánica o compuestos de Al y/o Fe (IUSS Working Group WRB, 2015).

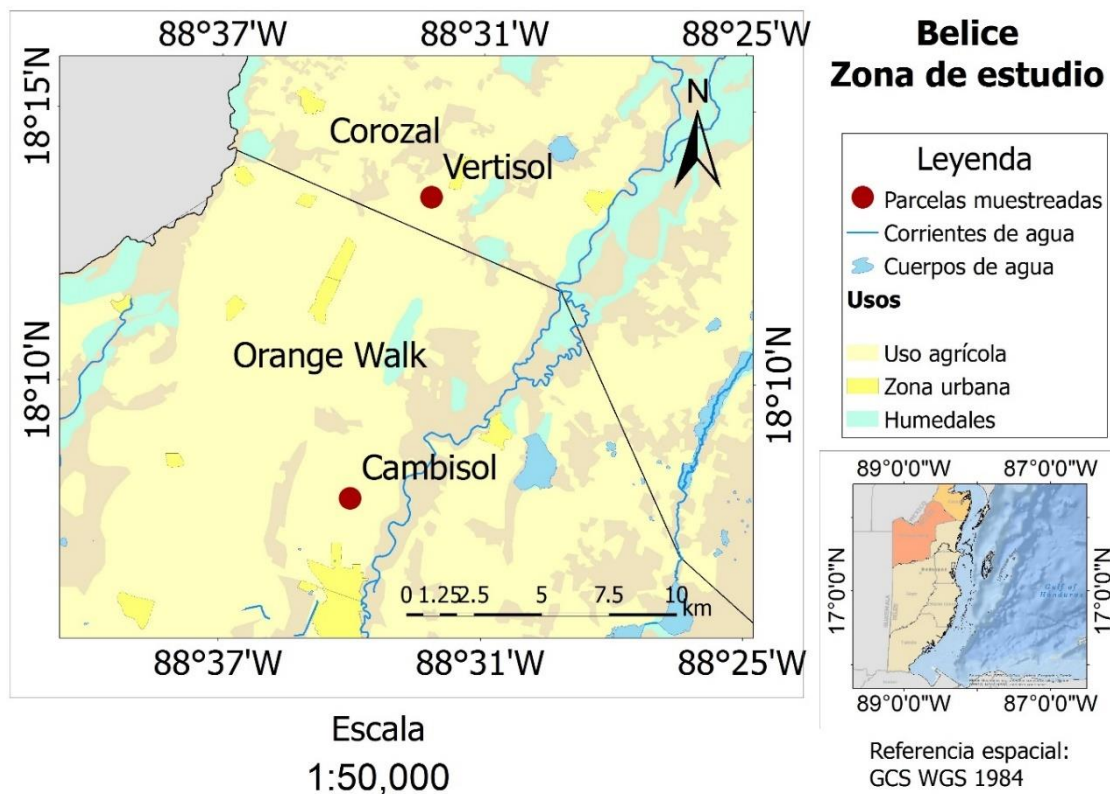


Figura 1. Área de estudio en Belice y distribución de parcelas de muestreo dentro del área.

En general en la zona cañera, los suelos son ligeramente ácidos a alcalinos (Chi, *et al.*, 2017) con elevado contenido de carbonatos debido a su geología, poseen relativamente poca profundidad efectiva, se caracterizan por tener un drenaje deficiente, compactación e hidromorfía (FAO-Unesco, 1976; Gardi, *et al.*, 2014)

## 6.2 La quema agrícola y el muestreo

Las quemas de cañaverales se realizan de manera anual, ya que es el ciclo normal de crecimiento del cultivo; tienen una duración aproximada de 1 minuto; éstas son realizadas por partes, de modo que la quema tuvo una duración total de 15 minutos en todo el canal. Con el propósito de realizar un registro representativo, se midieron las temperaturas mínimas, medias y máximas alcanzadas durante la quema con un termómetro infrarrojo de la marca AMPROBE® modelo IR-750 50:1, colocado a 5 metros de distancia a partir del fuego en diferentes puntos de las parcelas. En el caso del sitio 1, se midieron tres puntos, mientras que en el sitio 2, se midieron cuatro puntos.

Tabla 1. Fechas de muestreo de suelo.

Parcela	Muestreo antes de la quema	Quema	Muestreo después de la quema
Sitio 1 (Vertisol)	29 de mayo 2019	2 de julio de 2019	3 de julio de 2019
Sitio 2 (Cambisol)	30 de mayo de 2019	16 de junio de 2019	17 de junio de 2019

El muestreo se realizó con el método de “Bandera Inglesa (X)”, seleccionando 5 puntos de muestreo dentro de la parcela. Los perfiles, antes y después de la quema, se realizaron con una distancia de 2 m entre sí. A partir del horizonte mineral, con materiales de madera, plástico y PVC, se colectaron muestras de suelos cada dos centímetros hasta llegar a los 20 cm de profundidad. De este modo de extrajeron 10 muestras por punto y 100 muestras por parcela. Para asegurar las profundidades correctas, y no mezclar las capas, se utilizaron reglas de madera marcadas con las profundidades, revisando detalladamente hasta llegar a la profundidad requerida, antes de pasar a la siguiente profundidad.

Posteriormente las muestras se secaron a la sombra y fueron tamizadas, a 2 mm para su análisis en laboratorio.

### 6.3 Análisis de propiedades del suelo

#### 6.3.1 Propiedades químicas

Las propiedades químicas de suelo analizadas fueron pH y conductividad eléctrica (ambos con el método de (Schoeneberger, *et al.*, 2002), materia orgánica (método de Walkley & Black, 1947 contenido en la NOM-021-SEMARNAT-2000). De manera adicional, se evaluó la reacción de carbonatos al ácido clorhídrico (FAO, 2009).

#### 6.3.2 Color

El análisis de color requirió un tratamiento de las muestras de suelo, basado en el método de (González, *et al.*, In press) para obtener datos más precisos y representativos de los cambios por efecto de la quema agrícola. Este proceso consistió en tamizar cada muestra a un tamaño de partícula de 0.590 – 0.210 mm con un tamiz de malla #30 y retirar la hojarasca presente, ya que este elemento afecta la precisión de los datos que se generan con el colorímetro utilizado. La remoción de hojarasca se realizó con el uso de artefactos como pinzas de acero para separar las piezas de mayor tamaño, y con generación de electricidad estática mediante la fricción de una tela de lana y una superficie plástica como medio aislante de las partículas más pequeñas. Una vez teniendo las muestras de suelo libres de hojarasca y a una luz de 0.590-0.210 mm, se procedió a la medición de color.

Para la medición de color de las muestras de suelo, se utilizó un Colorímetro (Konica Miltona Instruments Ltd), calibrado con una placa blanca estándar con una iluminación de D65 y observación de 2°. Este equipo genera datos numéricos en el sistema de color Munsell, CIE-L\*a\*b\* y X, Y, Z, entre otros sistemas.

Debido a las necesidades del proyecto, se tomaron los parámetros de CIE-XYZ para ser transformados al sistema de color RGB decimal aplicando las siguientes ecuaciones (Stokes, Anderson, Chandrasekar, & Motta, 1996):

En primera instancia, se utilizó la relación lineal:

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3.240479 & -1.537150 & -0.498535 \\ -0.969256 & 1.875992 & 0.041556 \\ 0.055648 & -0.204043 & 1.057311 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}$$

De la cuales se obtienen valores lineales de triestímulos sRGB, sin embargo, éstos deben ser transformados en valores sRGB no lineales, para lo cual utilizamos el segundo de los siguientes algoritmos:

Si  $R_{sRGB}, G_{sRGB}, B_{sRGB} \leq 0.003015$ , entonces:

$$\begin{aligned} R'_{sRGB} &= 12.92 \times R_{sRGB} \\ G'_{sRGB} &= 12.92 \times G_{sRGB} \\ B'_{sRGB} &= 12.92 \times B_{sRGB} \end{aligned}$$

o sí  $R_{sRGB}, G_{sRGB}, B_{sRGB} > 0.003015$ , entonces:

$$\begin{aligned} R'_{sRGB} &= 1.055 \times R_{sRGB}^{(1.0/2.4)} - 0.055 \\ G'_{sRGB} &= 1.055 \times G_{sRGB}^{(1.0/2.4)} - 0.055 \\ B'_{sRGB} &= 1.055 \times B_{sRGB}^{(1.0/2.4)} - 0.055 \end{aligned}$$

Posteriormente, los valores RGB no lineales se adaptaron a la escala 0 a 255 de acuerdo con las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} R_{8bit} &= ((255.0 - 0.0) \times R'_{sRGB}) + 0.0 \\ G_{8bit} &= ((255.0 - 0.0) \times G'_{sRGB}) + 0.0 \\ B_{8bit} &= ((255.0 - 0.0) \times B'_{sRGB}) + 0.0 \end{aligned}$$

Mismas que se simplifican en:

$$\begin{aligned} R_{8bit} &= 255.0 \times R'_{sRGB} \\ G_{8bit} &= 255.0 \times G'_{sRGB} \\ B_{8bit} &= 255.0 \times B'_{sRGB} \end{aligned}$$

Una vez obtenidos los parámetros necesarios, se calcularon los índices de color de derivados de los sistemas: CIE-L\*a\*b\* y RGB.

A partir del sistema CIE-L\*a\*b\*, se obtuvo el Índice Óptimo de enrojecimiento (IR) desarrollado por Barron & Torrent (1986), y el Índice de enrojecimiento relativo (IRR) (Vodyanitskii, 2017). Siendo las siguientes ecuaciones:

$$IR = [10^{10} \times a (a^2 + b^2)^{0.5}] / (bL^6).$$

$$IRR = a/b$$

Donde L corresponde a la Luminosidad, misma que oscila entre 0 (negro) y 100 (blanco difuso); a\* corresponde a la posición entre rojo y verde; y b\* a la posición entre amarillo y azul.

Mientras que con el sistema RGB se obtuvieron los índices de color: **matiz** (IH), **enrojecimiento** (IR) y **saturación** (IS), calculado con las siguientes ecuaciones (Madeira, *et al.*, 1997; Escadafal, *et al.*, 1994; Mathieu, *et al.*, 1998; Levin, *et al.*, 2005):

$$IH = (2 * R - G - B) / (G - B)$$

$$IR = R^2 / (B * G^3)$$

$$IS = (R - B) / (R + B)$$

Dónde R, G y B corresponden a rojo, verde y azul, respectivamente.

## 6.4 Análisis estadístico de datos

Los datos de las propiedades químicas y de color (en los sistemas CIE-L\*a\*b\* y RGB), se evaluaron mediante pruebas paramétricas (ANOVA II) y no paramétricas (Kruskal Wallis) de acuerdo a la normalidad de los datos, con un nivel de confianza del 95%, para los cuales se utilizó el software STATGRAPHICS Centurion XVIII. De manera descriptiva, se realizaron gráficas de caja y bigote de manera comparativa, antes y después de la quema y por profundidad. Cada caja representa el rango intercuartílico (IQR=Q3-Q1) del 50% de los datos. El límite superior del bigote está dado por el valor más alto que no excede el límite superior ( $Q3+1.5*IQR$ ), mientras que el bigote inferior está definido por el valor más bajo que no excede el límite inferior ( $Q1-1.5*IQR$ ). El estrechamiento de la caja representa la mediana y los círculos los valores atípicos.

Se consideró como factores independientes: el grupo de suelo, la quema agrícola y la profundidad (cm), mientras que, tanto las propiedades químicas como las de color fueron consideradas como variables dependientes, esto con el propósito de determinar los efectos del fuego en estas propiedades y como varían por grupo de suelo, así como su comportamiento a lo largo del perfil.

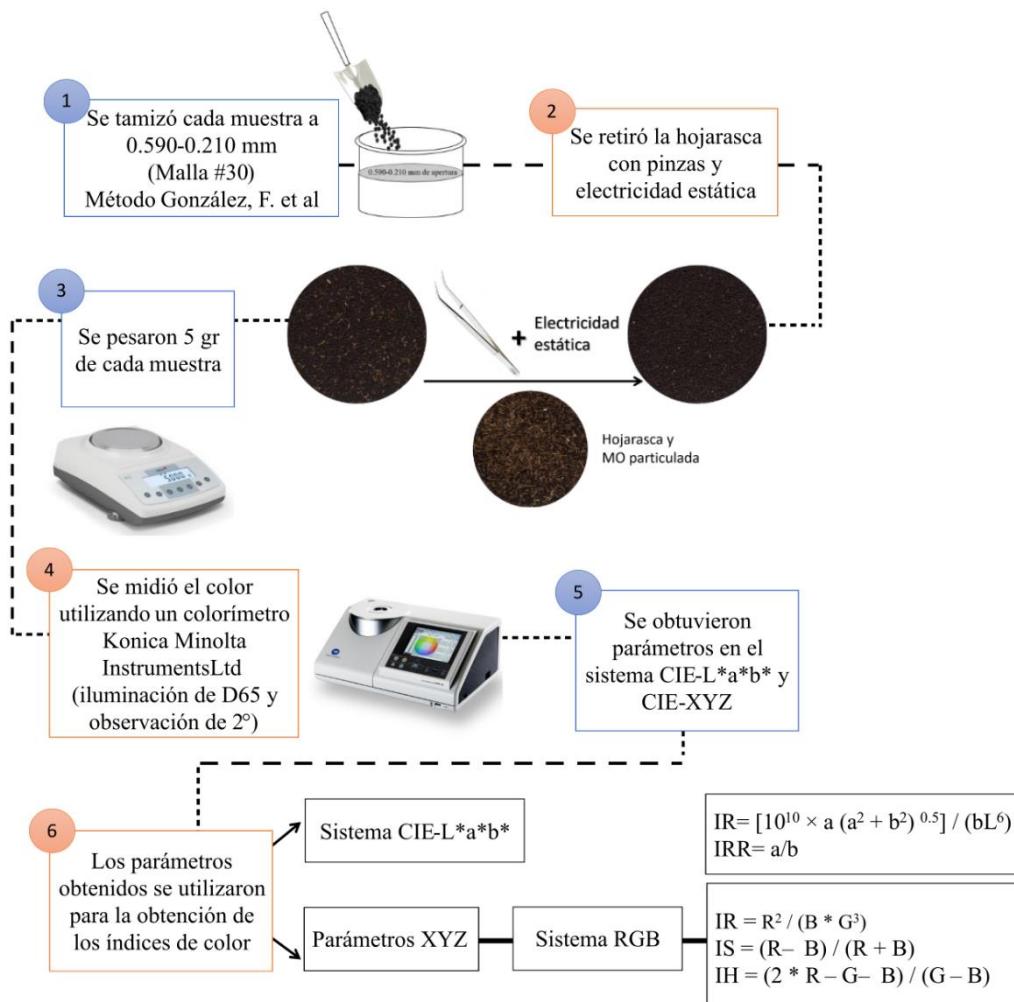


Figura 2. Método de análisis de suelo en el colorímetro.



## 7. RESULTADOS

Los resultados de este estudio presentan las temperaturas alcanzadas durante la quema agrícola en cada una de las parcelas. Posteriormente se muestran los resultados obtenidos para los análisis químicos. Cerrando esta sección con los sistemas de color CIE-L\*a\*b\* y RGB.

### 7.1 Quema agrícola

La quema de la caña de azúcar es un evento que ocurre rápidamente, alcanzando altas temperaturas al poco tiempo de iniciar; el combustible presente en un metro cuadrado se consume en alrededor de un minuto (Lázaro, *et al.*, 2021)

Las siguientes figuras presentan los umbrales de temperaturas alcanzadas durante la quema agrícola sobre la superficie del suelo.

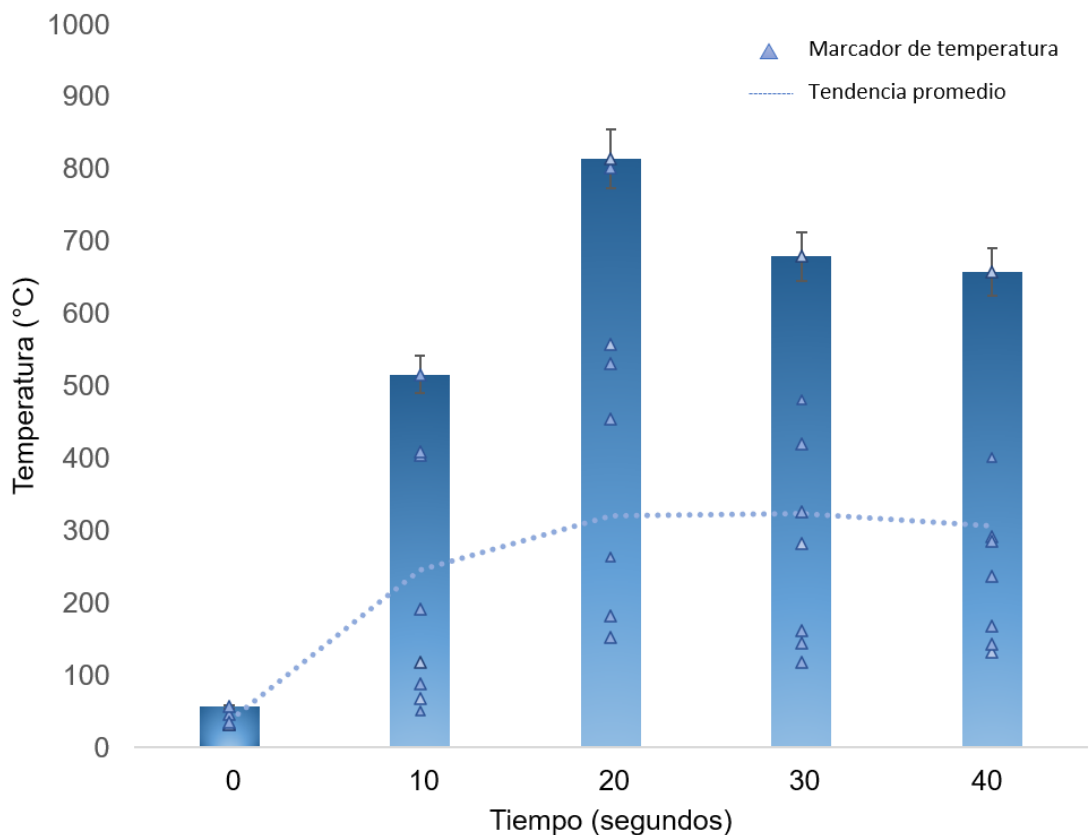
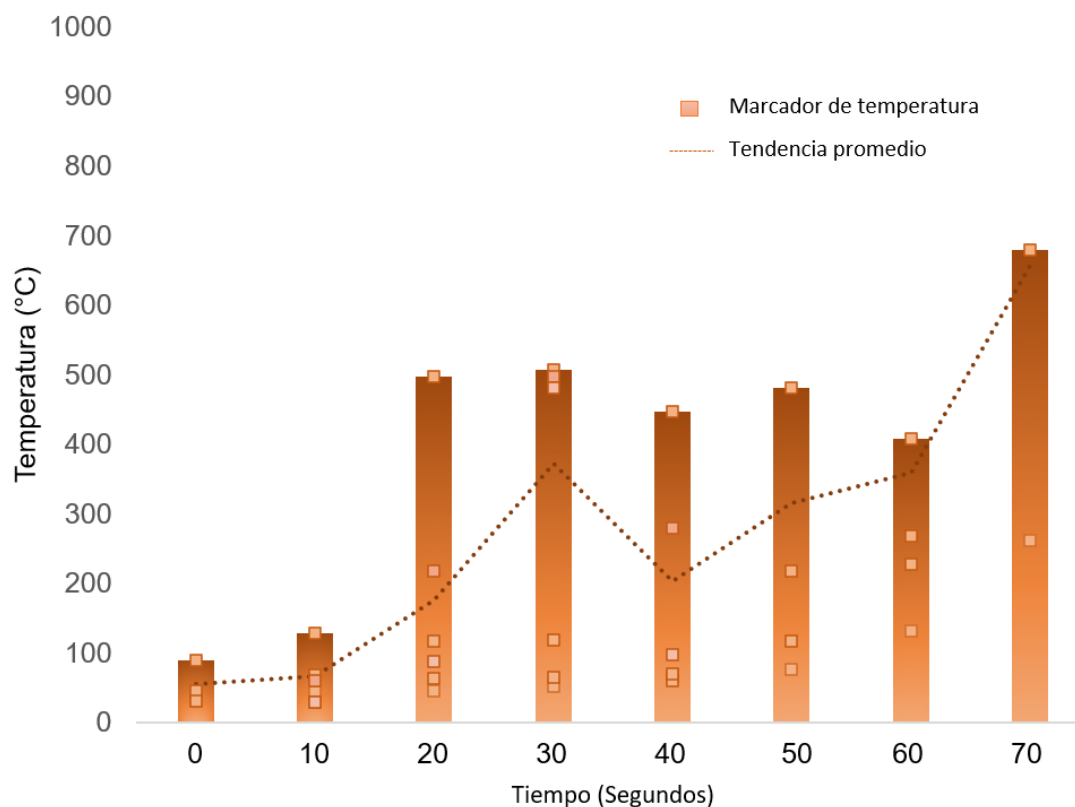


Figura 3. Temperatura promedio alcanzada por el fuego agrícola en la superficie de un Vertisol.

Durante la quema agrícola en el Vertisol, la temperatura promedio más baja se presentó al segundo 0 con 32 °C; mientras que el pico más alto se alcanzó a los 20 segundos con 814.6 °C. El promedio general de la quema fue de 246.76 °C.



*Figura 4. Temperaturas alcanzadas por el fuego agrícola en la superficie de un Cambisol.*

El Cambisol, presentó una temperatura de 30.1 °C al segundo 10, siendo la más baja de la quema; mientras que a los segundos 30 y 70 segundos presentó dos picos de temperatura, logrando el pico más alto a los 70 segundos con 680 °C. El promedio general de la quema fue de 217 °C.

## 7.2 Propiedades químicas

A continuación, se presentan los valores promedio obtenidos por propiedad química en cada grupo de suelo, así como los efectos que tuvo la quema agrícola de acuerdo al grupo de suelo y en cada grupo de suelo.

La tabla 2 muestra el rango de valores generales, la media y la mediana de las propiedades químicas, tanto de Vertisol como de Cambisol, las diferencias estadísticamente significativas ( $p < 0.05$ ) de acuerdo al grupo de suelo (GRS), así como la significancia del efecto que representa el fuego agrícola por GRS en estas propiedades, a su vez que las figuras 5 y 6 muestran los diagramas de caja y bigote del comportamiento de las propiedades químicas, antes y después de la quema, por profundidad.

Tabla 2. Valores generales de las propiedades químicas de un Cambisol y un Vertisol (media  $\pm$  desviación estándar y mediana).

Propiedades químicas		MOS	pH	CE		
Grupo de suelo (GRS)	Vertisol	Valor general	R= 0.27 – 8.39 <b>4.85<math>\pm</math>1.83 a</b> Me=5.21	R= 7.1 – 8.2 <b>7.74<math>\pm</math>0.26 a</b> Me=7.9	R= 0.197 – 0.425 <b>0.298<math>\pm</math>0.04 a</b> Me=0.296	
		Quema	Antes	5.02 $\pm$ 2.00 a	7.75 $\pm$ 0.23 a	<b>0.288<math>\pm</math>0.03 a</b>
			Después	4.68 $\pm$ 1.65 a	7.74 $\pm$ 0.30 a	<b>0.308<math>\pm</math>0.05 b</b>
	Cambisol	Valor general	R= 0.68 – 4.46 <b>2.34<math>\pm</math>0.76 b</b> Me=2.38	R= 6.5 – 8.0 <b>7.39<math>\pm</math>0.44 b</b> Me=7.6	R= 0.069 – 0.211 <b>0.140<math>\pm</math>0.039 b</b> Me=0.14	
		Quema	Antes	<b>2.17<math>\pm</math>0.88 a</b>	<b>7.26<math>\pm</math>0.38 a</b>	0.134 $\pm$ 0.04 a
			Después	<b>2.51<math>\pm</math>0.58 b</b>	<b>7.53<math>\pm</math>0.45 b</b>	0.146 $\pm$ 0.03 a
	Significancia	Diferencias entre GRS		<b>p&lt;0.05</b>	<b>p&lt;0.05</b>	<b>p&lt;0.05</b>
		Interacción GRS-Quema		<b>p&lt;0.05</b>	<b>p&lt;0.05</b>	p>0.05

Media  $\pm$  Desviación estándar; R= Rango; Me= Mediana; MOS= Materia orgánica del suelo; pH= Potencial de Hidrógeno; CE= Conductividad Eléctrica.

\*Las medias seguidas de la misma letra no son significativamente diferentes según las pruebas estadísticas.

### 7.2.1.1

De acuerdo con los análisis estadísticos (Tabla 2), las propiedades químicas fueron estadísticamente diferentes por grupo de suelo, aunado a ello, en el caso de la MOS y el pH los cambios después del fuego agrícola ocurrieron de manera distinta en cada GRS (esto es detallado más adelante).

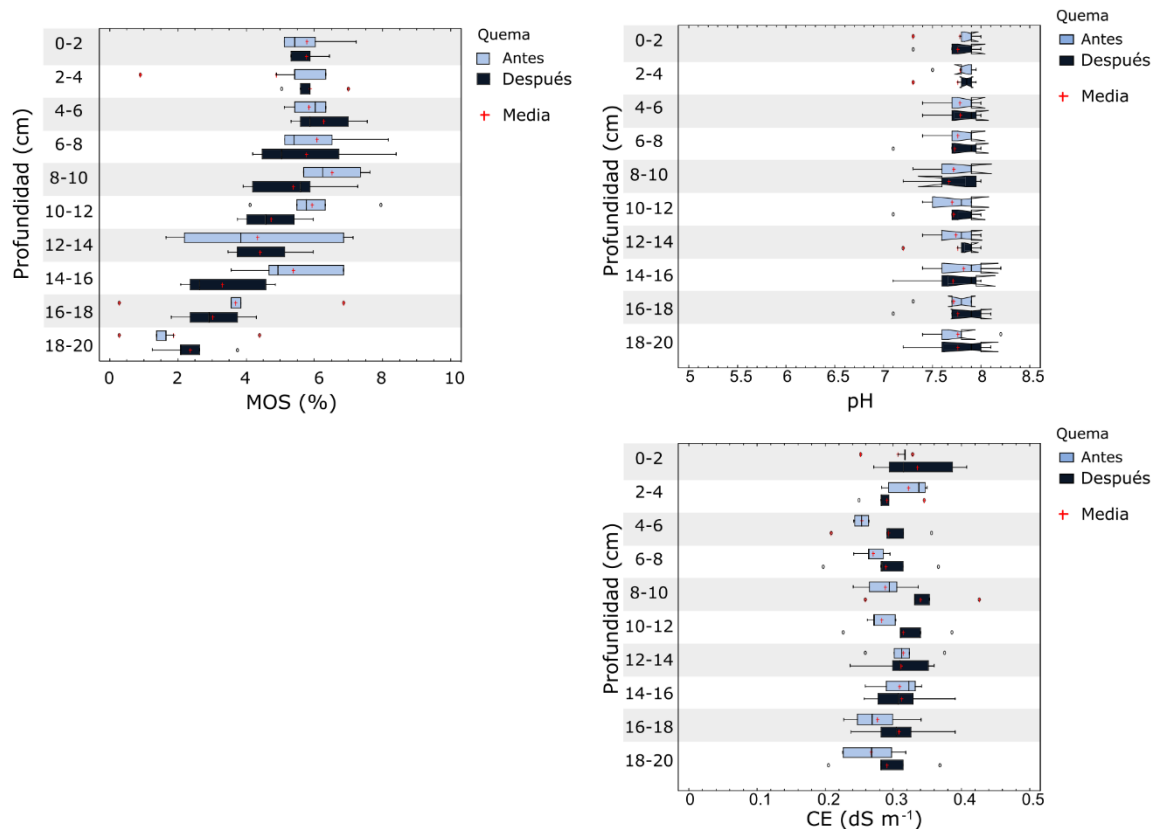


Figura 5. Propiedades químicas de un Vertisol en los primeros 20 cm de profundidad, antes y después de la quema.

## 7.2.2 Materia orgánica del suelo

### 7.2.2.1 Grupo de suelo

El contenido de materia orgánica fue significativamente diferente en cada grupo de suelo presentando una concentración de materia orgánica (MOS) más alta en Vertisol, con respecto a Cambisol. La MOS en Vertisol se presentó en un rango de entre 0.27 – 8.39, con una media general de  $4.85 \pm 1.83$ . Para el caso de Cambisol, el porcentaje de MOS se mostró en un rango de entre 0.068 y 4.46, con una media general de  $2.34 \pm 0.76$ . (Ver Tabla 2).

### 7.2.2.2 Quema agrícola

Poserior a la quema agrícola, ocurrieron comportamientos distintos en cada grupo. De acuerdo a la prueba ANOVA II, no hubo cambios significativos generales en Vertisol después de la quema, y tampoco entre profundidades (prueba LSD de Fisher) (Ver Anexo 4); mientras que en Cambisol, los estadísticos indican que el porcentaje de MOS en Cambisol aumentó de manera significativa después de la quema, teniendo una media de  $2.17 \pm 0.88$  antes de la quema y una media de  $2.51 \pm 0.58$  posterior a la quema. Cabe mencionar que, de acuerdo a la prueba de múltiples rangos (LSD) de Fisher, las diferencias significativas después de la quema ocurrieron principalmente entre los 4 y 6 cm con una disminución del porcentaje de MOS, y entre los 12 y 20 cm de profundidad, dónde el porcentaje de MOS aumenta (Ver Figura 6). Para mayor detalle, Ver anexo 5.

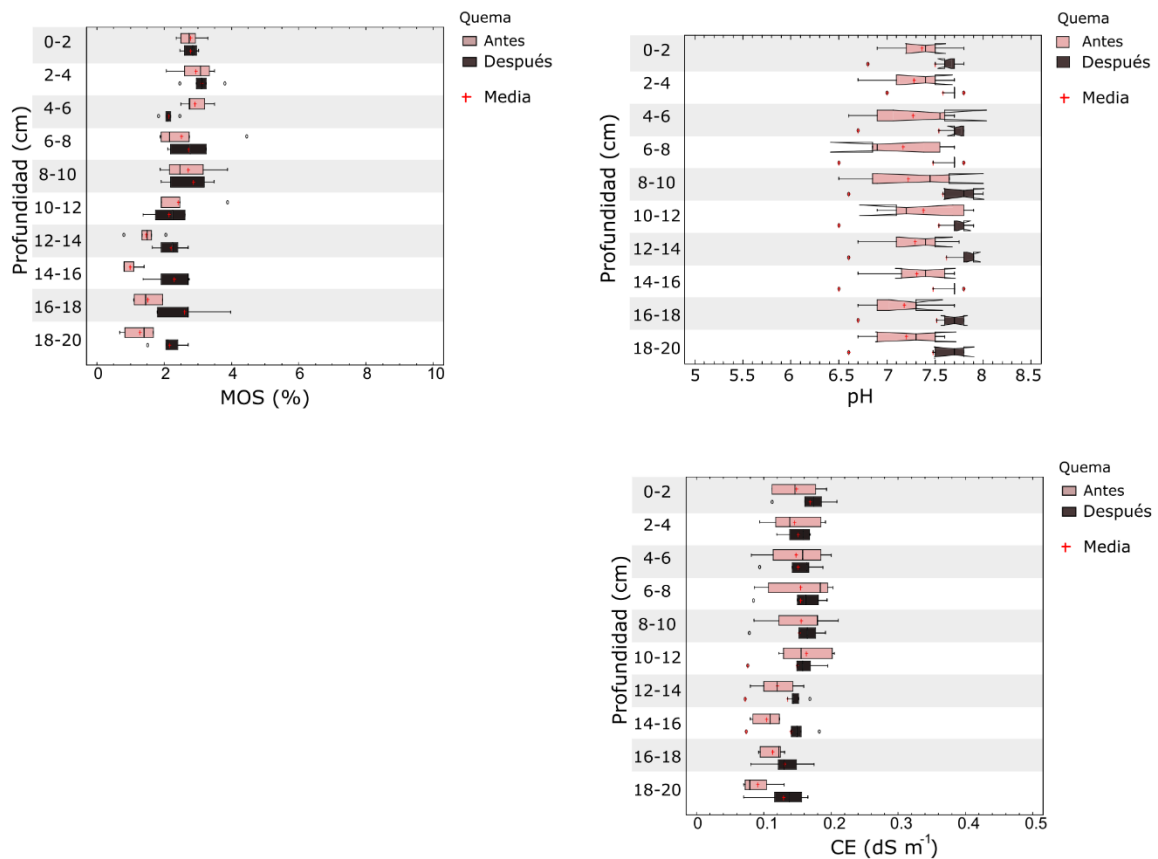


Figura 6. Propiedades químicas de un Cambisol en los primeros 20 cm de profundidad, antes y después de la quema.

### 7.2.3 pH

#### 7.2.3.1 Grupo de suelo

Por su parte, el pH fue significativamente diferente en cada grupo de suelo. Vertisol presentó valores en un rango de 7.1 a 8.2, definiéndolo como un suelo que varía de neutro a moderadamente alcalino, aunado a ello tuvo una dispersión muy baja a diferencia de Cambisol. El pH de Cambisol se encuentra en un rango de 6.5 a 8, caracterizándolo como un suelo que varía de ligeramente ácido a moderadamente alcalino.

#### 7.2.3.2 Quema agrícola

Así mismo, los análisis indican que la quema tuvo un efecto diferente en el pH después de la quema en cada GRS. En el caso de Vertisol, la prueba de Kruskal-Wallis revela que no se generan cambios significativos por efecto de la quema; por su parte, en Cambisol ocurrió un aumento significativo después de la quema en todo el perfil, teniendo una mediana inicial de 7.3 y una mediana de 7.7 después de la quema, es decir, ocurre una ligera alcalinización (Ver Tabla 2). No obstante, de acuerdo a la prueba LSD de Fisher, no se considera que existan cambios significativos por la quema agrícola entre profundidades. Para mayor detalle, ver anexo 5.

## 7.2.4 Conductividad eléctrica

### 7.2.4.1 Grupo de suelo

En el caso de la conductividad eléctrica (CE), se estimó una diferencia estadísticamente significativa en cada grupo de suelo. La CE de Vertisol se encuentra en un rango de 0.197 a 0.425 dSm<sup>-1</sup>, con una media general de **0.298±0.04**; mientras que la conductividad eléctrica (CE) de Cambisol se dispone en un rango de 0.069 a 0.211 dS m<sup>-1</sup>, con una media general de **0.140±0.039**.

### 7.2.4.2 Quema agrícola

De acuerdo a los análisis de varianza ANOVA II, no hubo diferencias significativas en la CE del efecto de la quema agrícola por grupo de suelo. En Vertisol, se obtuvo una media inicial de 0.288 dS m<sup>-1</sup> y una media de 0.308 dS m<sup>-1</sup> después de la quema, considerándose un aumento estadísticamente significativo. Este cambio se hace más evidente entre los 4 y 12 cm de profundidad (Ver figura 5), no obstante, de acuerdo a la prueba (LSD) de Fisher, no hubo una interacción significativa entre la profundidad y la quema (Ver anexo 4). Por su parte, en Cambisol se presenta una media de 0.134 dS m<sup>-1</sup> (antes de la quema) y una media de 0.146 dS m<sup>-1</sup> (después de la quema) (Ver Figura 6), sin embargo, la prueba estadística indica que el aumento no es significativo después de la quema, además de tampoco presentar interacción entre la profundidad y la quema de acuerdo a la prueba (LSD) de Fisher. Para mayor detalle, ver anexo 5.

## 7.3 Color - Sistema CIE-L\*a\*b\*

A continuación, se presentan los valores promedio obtenidos por variable e índice de color en el sistema CIE-L\*a\*b\* en cada grupo de suelo, así como los efectos que tuvo la quema agrícola de acuerdo al grupo de suelo y en cada grupo de suelo.

La tabla 3 muestran las diferencias estadísticamente significativas (p<0.05) en cada una de estas propiedades por grupo, antes y después de la quema, a su vez que las figuras 7 y 8, presentan el comportamiento de las propiedades de color a lo largo del perfil.

Estadísticamente las propiedades de color en el sistema CIE-L\*a\*b\* fueron diferentes por grupo de suelo, a excepción de L\*; aunado a ello, los efectos del fuego agrícola ocurrieron de manera distinta en cada GRS en el caso de L\*, a\* e IR (Ver Tabla 3).

Tabla 3. Valores generales de las propiedades de color de un Cambisol y un Vertisol en el sistema CIE-L\*a\*b\*(media ± desviación estándar y mediana).

Variables/índices de color		L*	a*	b*	IR	IRR	
Grupo de suelo (GRS)	Vertisol	R= 35.45 – 72.57	R= 0.72 – 1.23	R= 2.77 – 5.21	R= 0.05 – 5.07	R= 0.186 – 0.296	
		43.08±7.24 a	<b>0.95±0.08</b> b	<b>3.96±0.55</b> a	<b>2.18±1.32</b> b	<b>0.246±0.026</b> b	
		Me=40.66	Me=0.96	Me=3.87	Me=2.22	Me= 0.253	
	Quema	Antes	<b>44.85±8.67</b> a	0.96±0.09 a	4.05±0.53 a	<b>1.87±1.22</b> a	0.23±0.02 a
		Después	<b>41.27±4.88</b> b	0.95±0.08 a	3.86±0.56 a	<b>2.49±1.35</b> b	0.248±0.02 a

Cambisol	Valor general		R= 38.6 – 52.05	R= 0.93 – 1.95	R= 3.96 – 7.47	R= 0.782 – 4.108	R= 0.206 – 0.286
			43.9±2.90 a	1.3±0.19 a	5.16±0.75 b	2.01±0.66 a	0.254±0.013 a
			Me=43.41	Me=1.27	Me=4.97	Me=1.893	Me= 0.254
	Quema	Antes	44.48±2.78 a	1.34±0.22 a	5.35±0.84 a	1.92±0.57 a	0.254±0.013 a
		Después	43.34±2.93 b	1.26±0.14 b	4.97±0.60 b	2.11±0.73 b	0.255±0.013 a
Significancia	<b>Diferencias entre (GRS)</b>		P>0.05	p<0.05	p<0.05	p<0.05	p<0.05
	<b>Interacción GRS-Quema</b>		p<0.05	p<0.05	P>0.05	p<0.05	P>0.05

R= Rango; Me= Mediana; L\*= Luminosidad; IR= Índice de enrojecimiento; IRR= Índice de enrojecimiento relativo.

\*Las medias seguidas de la misma letra no son significativamente diferentes según las pruebas estadísticas.

### 7.3.1 Luminosidad (CIE-L\*a\*b\*)

#### 7.3.1.1 Grupo de suelo

La luminosidad no fue significativamente diferente en cada grupo de suelo. Los valores de L\* para Vertisol se encuentran en un rango de entre 35.45 y 72.57, teniendo una media general de 43.08±7.24; mientras que los valores de Cambisol encuentran en un rango de entre 38.6 – 52.05, y una media general de 43.9±2.90.

#### 7.3.1.2 Quema agrícola

Estadísticamente, después de la quema agrícola, la Luminosidad cambió de manera distinta en cada grupo. En Vertisol, se obtuvo una media general antes de la quema de 44.85±8.67 y una media después de la quema de 41.27±4.88, reduciendo significativamente la Luminosidad y la desviación estándar; tal diferencia de (3.58) se adjudica a la gran heterogeneidad de las muestras, especialmente las de los últimos 6 cm antes de la quema, que influyen en la media general del perfil (Ver figura 7). No obstante, de acuerdo a la prueba (LSD) de Fisher, el ennegrecimiento del suelo esperado después de la quema entre profundidades, no es estadísticamente significativo. En Cambisol la media antes de la quema es de 44.38±2.78 y la media después de la quema es de 43.34±2.93, cuya disminución es estadísticamente significativa, pero la desviación estándar aumenta ligeramente. Con base en la prueba de (LSD) de Fisher, no hubo cambios significativos después de la quema entre profundidades. Para mayor detalle, ver anexo 7.

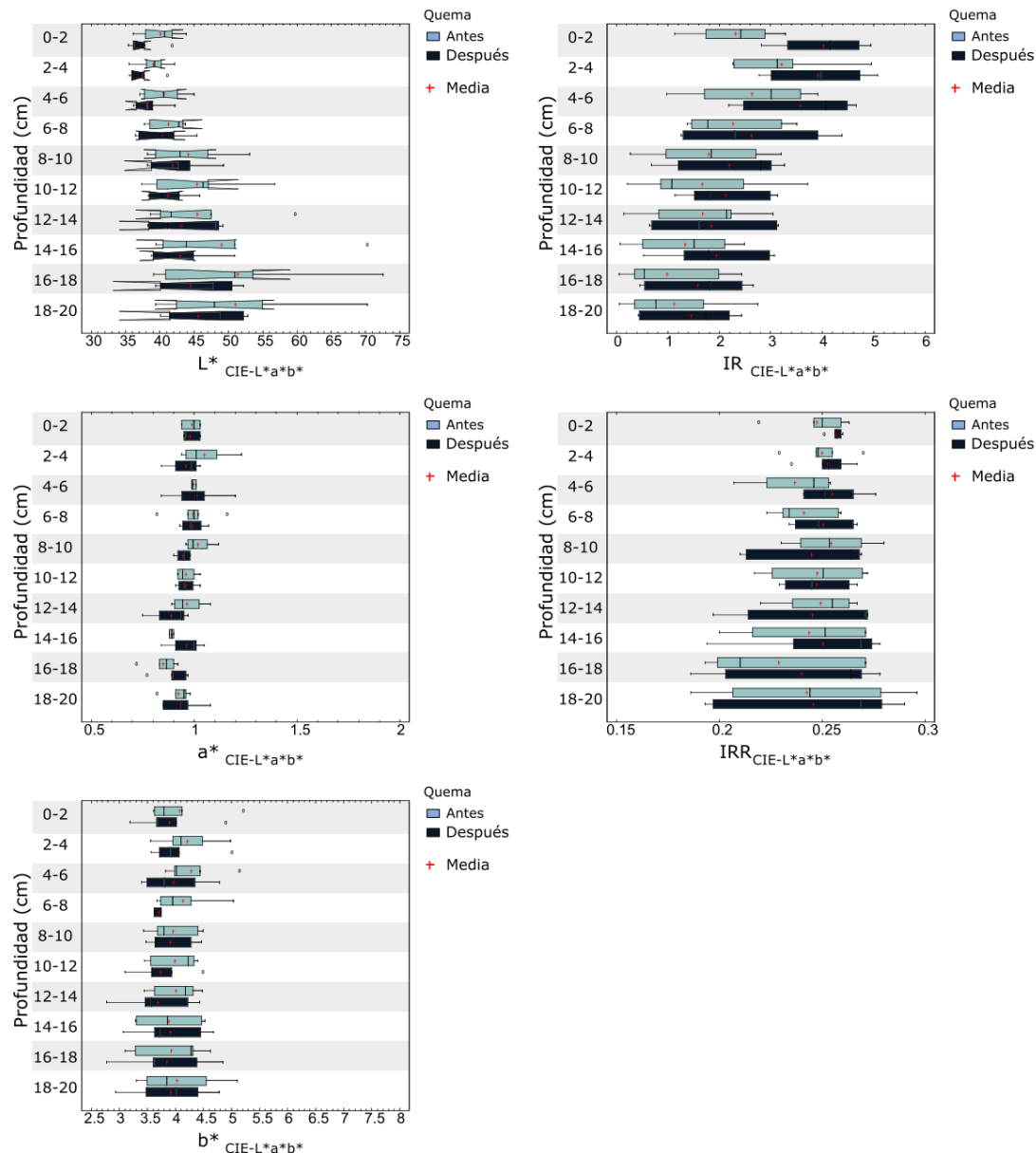


Figura 7. Variables e índices del sistema CIE-L\*a\*b\* de un Vertisol en los primeros 20 cm de profundidad, antes y después de la quema.

### 7.3.2 Coordenada a\* (CIE-L\*a\*b\*)

#### 7.3.2.1 Grupo de suelo

Por su parte, la variable a\* sí presentó diferencias estadísticamente significativas de acuerdo al grupo de suelo. Los valores obtenidos para Vertisol en a\* tienen un rango de 0.72 – 1.23 en el eje de los positivos, con una media general de  $0.95 \pm 0.08$ ; mientras que en Cambisol tenemos valores obtenidos entre 0.93 – 1.95 en el eje positivo, con una media general de  $1.3 \pm 0.19$ .

#### 7.3.2.2 Quema agrícola

Estadísticamente la quema agrícola afectó de manera distinta este parámetro a cada grupo analizado. Vertisol no sufrió cambios significativos; mientras que en el caso de Cambisol



hubo una importante disminución en los valores de este parámetro después de la quema (Ver Tabla 3) habiendo cambios significativos entre profundidades en los últimos 6 cm, de acuerdo con la prueba de (LSD) de Fisher (ver figura 8). Para mayor detalle, ver anexo 7.

### **7.3.3 Coordenada $b^*$ (CIE-L\*a\*b\*)**

#### *7.3.3.1 Grupo de suelo*

La variable  $b^*$  fue significativamente diferente en cada grupo de suelo siendo mayor la concentración de pigmentos amarillos en Cambisol que en Vertisol. Los valores obtenidos para Vertisol en  $b^*$  se encontraron en un rango de entre 2.77 – 5.21 unidades con una media de  $3.96 \pm 0.55$ ; en Cambisol, se presentaron en un rango de 3.96 – 7.47 unidades, con una media de  $5.16 \pm 0.75$ .

#### *7.3.3.2 Quema agrícola*

La quema agrícola no tuvo efectos estadísticamente diferentes con base en el GRS, pues en ambos casos ocurre una disminución de los valores  $b^*$ . En Vertisol tenemos una media antes de la quema de  $4.05 \pm 0.53$  y una media después de quema de  $3.86 \pm 0.56$ , sin embargo, este cambio no es considerado estadísticamente significativo. En Cambisol, tenemos una media antes de la quema de  $5.35 \pm 0.84$  y una media de  $4.96 \pm 0.60$  después de quema, siendo estadísticamente una disminución significativa de la media y de la desviación estándar. De acuerdo a la prueba (LSD) de Fisher, esta diferencia está dada principalmente entre los 12 y 20 centímetros de profundidad (Ver Figura 8).

### **7.3.4 Índice de enrojecimiento (CIE-L\*a\*b\*)**

#### *7.3.4.1 Grupo de suelo*

El índice de enrojecimiento (CIE-L\*a\*b\*) fue significativamente diferente en cada grupo de suelo. El IR en Vertisol se encuentra en un rango de entre 0.05 – 5.07, con una media general de  $2.18 \pm 1.38$ ; mientras que el IR de Cambisol se encuentra en un rango de valores entre 0.782 – 4.108, y una media general de  $2.01 \pm 0.66$ .

#### *7.3.4.2 Quema agrícola*

La quema agrícola tuvo efectos estadísticamente diferentes de acuerdo al tipo de suelo; en ambos suelos presentó un aumento significativo de la media general de IR (CIE-La\*b\*) después de la quema, sin embargo, el cambio y la dispersión fue mayor en Vertisol, donde la media antes de la quema fue de  $1.87 \pm 1.22$  y de  $2.49 \pm 1.35$  después de la quema; mientras que en Cambisol la media antes de la quema fue de  $1.92 \pm 0.53$  y la media después de la quema de  $2.11 \pm 0.73$ . De acuerdo con la prueba (LSD) de Fisher, el enrojecimiento posterior a la quema fue significativo principalmente en los primeros dos cm del perfil, en ambos grupos de suelo (ver figuras 7 y 8). Para mayor detalle, ver anexos 6 y 7.

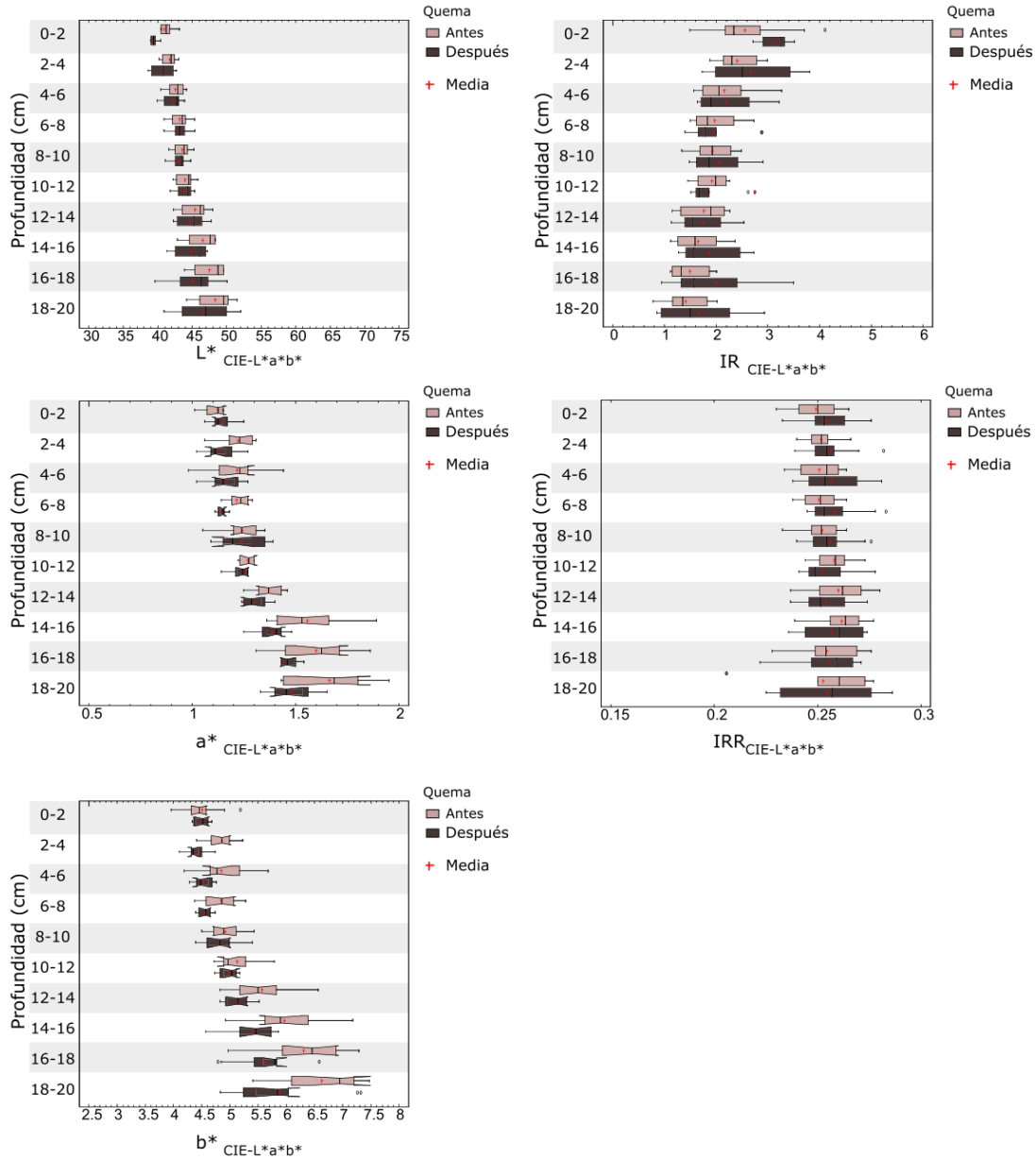


Figura 8. Variables e índices del sistema CIE-L\*a\*b\* de un Cambisol en los primeros 20 cm de profundidad, antes y después de la quema.

### 7.3.5 Índice de enrojecimiento relativo (CIE-L\*a\*b\*)

Finalmente, el índice de enrojecimiento relativo (CIE-L\*a\*b\*) fue significativamente diferente en cada grupo de suelo, habiendo un mayor nivel de rojez relativa en Cambisol y menor dispersión de valores (Ver Tabla 3).

La quema agrícola no tuvo efectos significativamente diferentes de acuerdo con el grupo de suelo, sin haber un cambio importante de los valores del IRR (CIE-La\*b\*) después de la quema para cada suelo.

## 7.4 Color - Sistema RGB

A continuación, se presentan los valores promedio obtenidos por variable e índice de color en el sistema RGB en cada grupo de suelo, así como los efectos que tuvo la quema agrícola de acuerdo al grupo de suelo y en cada grupo de suelo.

La tabla 4 muestra las diferencias estadísticamente significativas ( $p < 0.05$ ) en cada una de estas propiedades por grupo, antes y después de la quema, a su vez que las figuras 9 y 10, presentan el comportamiento de las propiedades de color a lo largo del perfil.

Tabla 4. Valores generales de las propiedades de color en el sistema RGB de un Cambisol y un Vertisol (media  $\pm$  desviación estándar y mediana).

Variables/índices de color		R	G	B	IR	IS	IH		
Grupo de suelo	Vertisol	Valor general	R=88-187 <b>106.74<math>\pm</math>18.98</b> b Me=100	R=83-179 101.51 $\pm$ 18.52 a Me=95	R=78-167 95.59 $\pm$ 17.47 a Me=90	R=3.7x10 <sup>-5</sup> – 17.4 x10 <sup>-5</sup> <b>12.2x10<sup>-5</sup></b> <b><math>\pm</math>3.2x10<sup>-5</sup> b</b> Me=12.8 x10 <sup>-5</sup>	R=0.04 – 0.073 <b>0.055<math>\pm</math>0.006</b> b Me=0.054	R=2.33 – 3.5 2.81 $\pm$ 0.29 a Me=2.71	
		Quema	Antes	<b>111.39<math>\pm</math>23.02</b> b	<b>106.02<math>\pm</math>22.43</b> a	<b>98.46<math>\pm</math>19.15</b> b	<b>11.5 E-5<math>\pm</math></b> <b>3.4 E-5 a</b>	0.054 $\pm$ 0.006 a	2.77 $\pm$ 0.29 a
			Después	<b>102<math>\pm</math>12.23 a</b>	<b>96.92<math>\pm</math>11.99</b> b	<b>91.32<math>\pm</math>11.33</b> a	<b>13 E-5 <math>\pm</math> 2.8</b> <b>E-5 b</b>	0.055 $\pm$ 0.006 a	2.85 $\pm$ 0.29 a
	Cambisol	Valor general	R=95-132 <b>109.71<math>\pm</math>7.97</b> a Me= 108	R=90-123 102.85 $\pm$ 7.16 a Me= 102	R=83-112 95.38 $\pm$ 6.13 a Me= 95	R=8.4x10 <sup>-5</sup> – 15.2x10 <sup>-5</sup> <b>11.7x10<sup>-5</sup></b> <b><math>\pm</math>1.4x10<sup>-5</sup> a</b> Me= <b>11.7x10<sup>-5</sup></b>	R=0.05 – 0.092 <b>0.069<math>\pm</math>0.007</b> a Me=0.069	R=2.42 – 3.33 2.85 $\pm$ 1.88 a Me=2.81	
		Quema	Antes	<b>111.15<math>\pm</math>7.98</b> b	<b>104.07<math>\pm</math>7.01</b> b	<b>96.3<math>\pm</math>5.82 a</b>	<b>11.4E-5 <math>\pm</math></b> <b>1.2E-5 a</b>	<b>0.071<math>\pm</math>0.008</b> a	<b>2.83<math>\pm</math>0.19</b> a
			Después	<b>108.26<math>\pm</math>7.73</b> a	<b>101.62<math>\pm</math>7.14</b> a	<b>94.45<math>\pm</math>6.33</b> b	<b>11.9E-5 <math>\pm</math></b> <b>1.5E-5 b</b>	<b>0.067<math>\pm</math>0.005</b> b	<b>2.86<math>\pm</math>0.18</b> a
Significancia	Diferencias entre GRS	<b>p&lt;0.05</b>	p>0.05	p>0.05	<b>p&lt;0.05</b>	<b>p&lt;0.05</b>	p>0.05		
	Interacción GRS-Quema	<b>p&lt;0.05</b>	<b>p&lt;0.05</b>	<b>p&lt;0.05</b>	<b>p&lt;0.05</b>	<b>p&lt;0.05</b>	p>0.05		

R= Rango; Me= Mediana; IR= Índice de enrojecimiento; IS= Índice de saturación; IH= Índice de hue.  
\*Las medias seguidas de la misma letra no son significativamente diferentes según la prueba de múltiples rangos (LSD) de Fisher con un nivel de confianza del 95%.

De acuerdo con los análisis estadísticos (Tabla 4), las propiedades de color en el sistema RGB, fueron estadísticamente diferentes por grupo de suelo en los parámetros R, IR e IS. Por su parte, los efectos del fuego agrícola ocurrieron de manera distinta en cada GRS en la mayoría de los parámetros, a excepción de IH. A continuación, estos comportamientos son explicados a detalle.

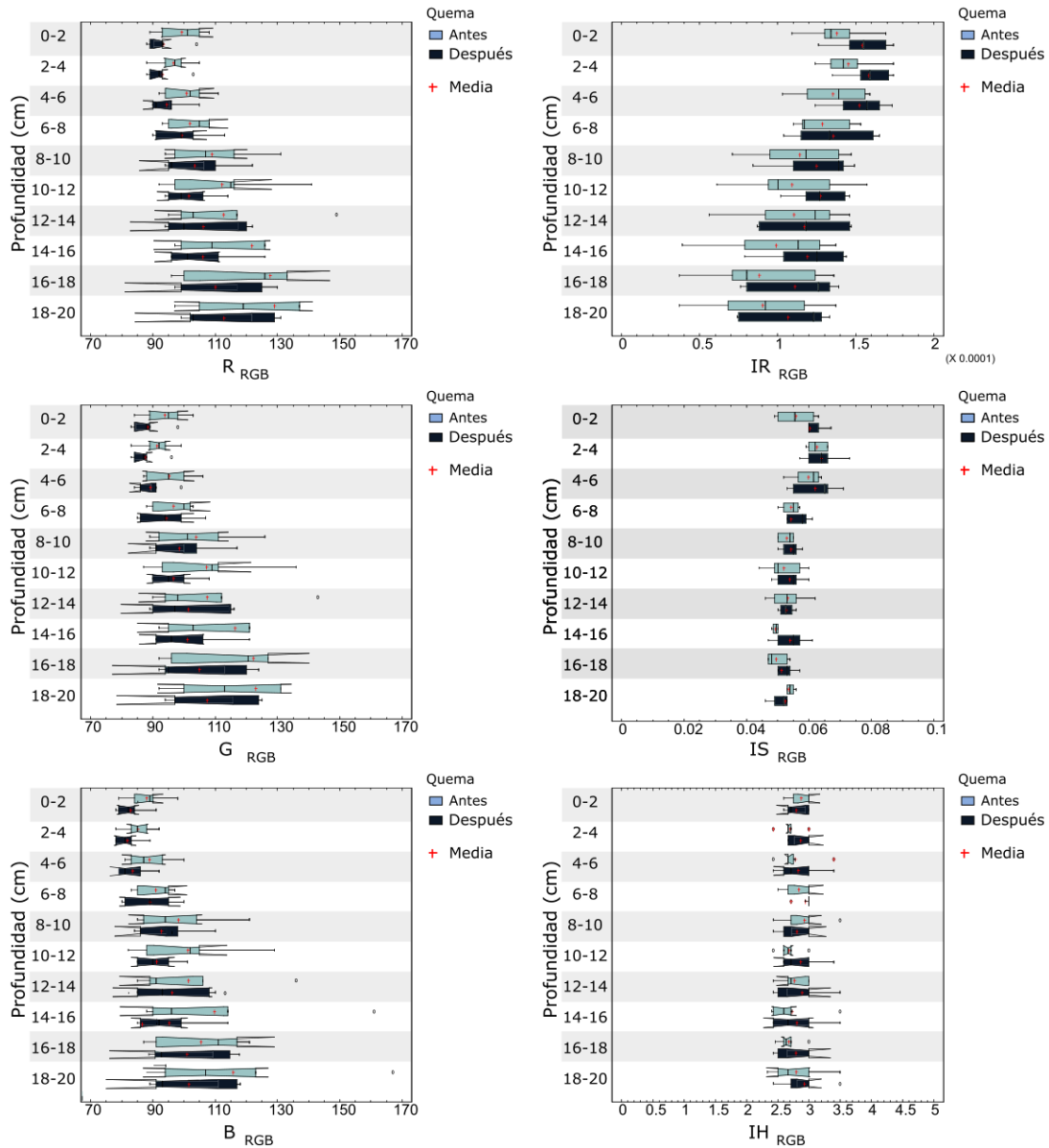


Figura 9. Variables e índices del sistema RGB de un Vertisol en los primeros 20 cm de profundidad, antes y después de la quema.

### 7.4.1 Variable R (RGB)

#### 7.4.1.1 Grupo de suelo

La variable R fue significativamente diferente en cada grupo de suelo. Vertisol tuvo una media general de  $106.74 \pm 18.98$ , mientras que Cambisol tuvo una media general de  $109.71 \pm 7.97$ . Diferencialmente la media R en Cambisol es más alta y con menor dispersión de valores (Tabla 4).

#### 7.4.1.2 Quema agrícola

Estadísticamente la quema agrícola afectó de manera distinta este parámetro a cada grupo analizado (Tabla 4). Vertisol sufrió una disminución en los valores de  $R_{RGB}$ , teniendo una media inicial de  $111.39 \pm 23.02$ , y una media después de la quema de  $102 \pm 12.23$ , no

obstante, según la prueba LSD de Fisher, no hay cambios después de la quema entre profundidades. Por su parte, en Cambisol también hubo una disminución de la media general de  $R_{RGB}$  después de la quema. Siendo de  $111.15 \pm 7.98$  antes de la quema y  $108.26 \pm 7.73$  después de la quema; de acuerdo con la prueba (LSD) de Fisher, hubo cambios significativos después de la quema por profundidad en los últimos 6 cm de profundidad (Ver figura 10). Para mayor detalle, ver anexo 9.

## **7.4.2 Variable G (RGB)**

### *7.4.2.1 Grupo de suelo*

En el caso de la variable G, los análisis de varianza indican que no hubo un comportamiento de medias significativamente diferente en cada grupo de suelo (Tabla 5).

### *7.4.2.2 Quema agrícola*

Estadísticamente en ambos grupos de suelo hubo una disminución significativa de los valores de  $G_{RGB}$ , sin embargo, el efecto no fue igual, pues la disminución de los valores de G post quema, fueron mayores en Vertisol que en Cambisol (Tabla 4). Vertisol tuvo una media antes de la quema de  $106.02 \pm 22.43$  y una media después de la quema de  $96.92 \pm 11.99$ , sin embargo, de acuerdo con la prueba (LSD) de Fisher no hay cambios significativos después de la quema por profundidad; por su parte, Cambisol tuvo una media inicial de  $104.07 \pm 7.01$  y una media después de la quema de  $101.62 \pm 7.14$ , de acuerdo con la prueba (LSD) de Fisher, no hubo cambios significativos después de la quema por profundidad, a excepción de la profundidad entre los 16 y 18 cm. Para mayor detalle, ver anexos 8 y 9.

## **7.4.3 Variable B (RGB)**

### *7.4.3.1 Grupo de suelo*

En tanto a la variable B, los análisis de varianza indican que su comportamiento no fue significativamente diferente en cada grupo de suelo (Ver Tabla 4).

### *7.4.3.2 Quema agrícola*

Estadísticamente la quema agrícola afectó de manera distinta este parámetro a cada grupo de suelo analizado (Tabla 4), pues la disminución de los valores de  $B_{RGB}$  post quema, como la dispersión de datos, fueron significativamente mayores en Vertisol que en Cambisol. La media general de Vertisol antes de la quema fue de  $98.46 \pm 19.15$ , y de  $91.32 \pm 11.33$  después de la quema, sin embargo, no hay cambios después de la quema por profundidad de acuerdo con la prueba (LSD) de Fisher. Por su parte, la media inicial de Cambisol fue de  $96.3 \pm 5.82$ , y de  $94.45 \pm 6.33$  después de la quema, considerándose una disminución significativa, aunque de acuerdo con la prueba (LSD) de Fisher, el cambio más significativo por profundidad se presentó entre los 16 y 18 cm.

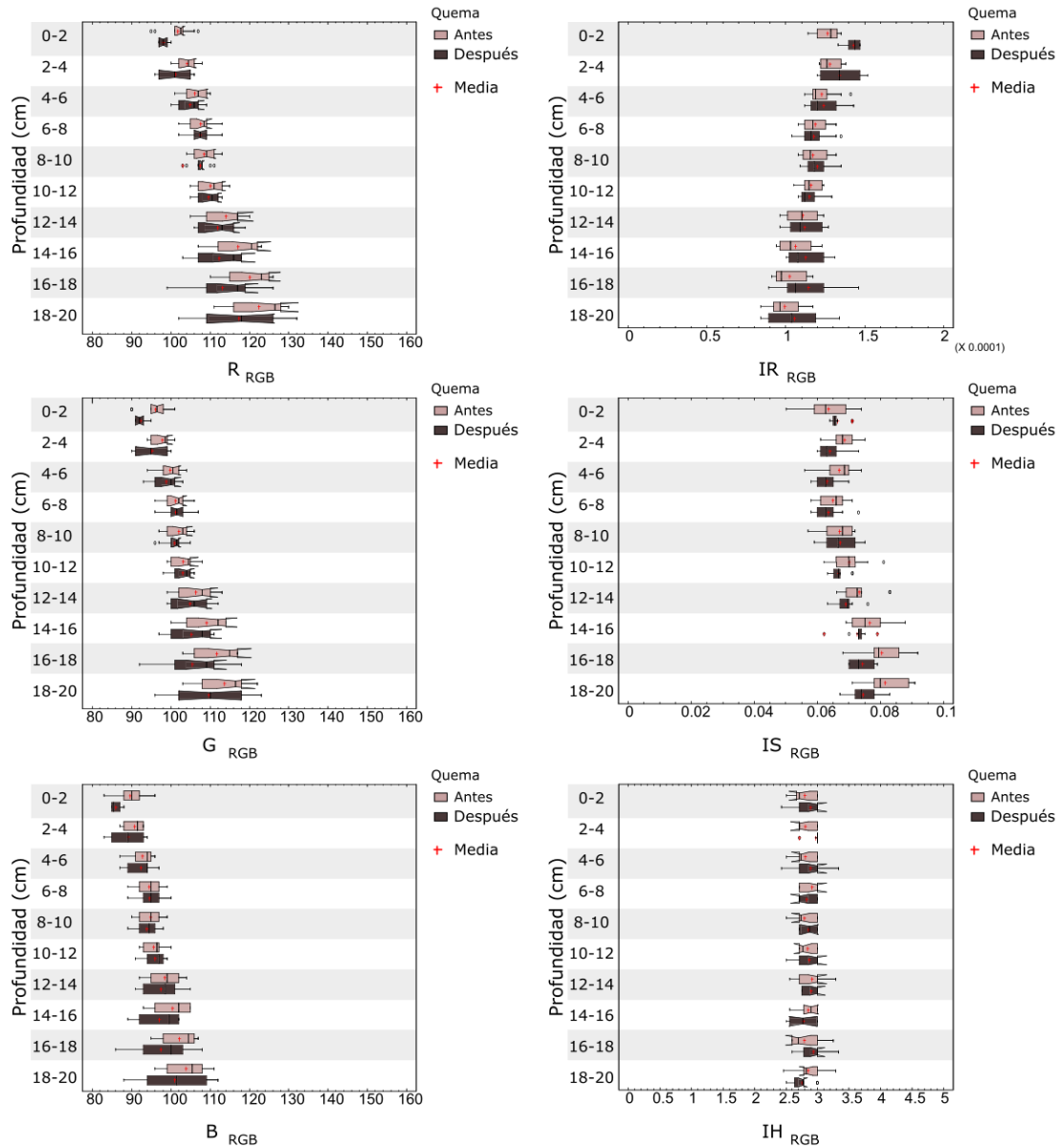


Figura 10. Variables e índices del sistema RGB de un Cambisol en los primeros 20 cm de profundidad, antes y después de la quema.

#### 7.4.4 Índice de enrojecimiento (RGB)

##### 7.4.4.1 Grupo de suelo

El índice de enrojecimiento (RGB) fue significativamente diferente en cada grupo de suelo. Vertisol tuvo una media total de  $12.2 \times 10^{-5} \pm 3.2 \times 10^{-5}$ , mientras que Cambisol una media total de  $11.7 \times 10^{-5} \pm 1.4 \times 10^{-5}$ , habiendo mayor rojez y heterogeneidad en Vertisol (Ver Tabla 4).

##### 7.4.4.2 Quema agrícola

Estadísticamente, la quema agrícola también afectó de manera distinta este parámetro a cada grupo analizado (Tabla 4). En ambos GRS hubo un aumento en el  $IR_{RGB}$ , sin embargo, éste fue mayor en Vertisol, el cual tenía una media inicial de  $11.5 E^{-5} \pm 3.4 E^{-5}$ ,

y una media después de la quema de  $13 \text{ E}^{-5} \pm 2.8 \text{ E}^{-5}$ ; sin embargo, de acuerdo con la prueba (LSD) de Fisher, no hubo cambios significativos entre profundidades después de la quema. Cambisol por su parte, tuvo una media antes de la quema de  $11.4 \text{ E}^{-5} \pm 1.2 \text{ E}^{-5}$  aumentando a  $11.9 \text{ E}^{-5} \pm 1.5 \text{ E}^{-5}$  después de la quema, cambio considerado estadísticamente significativo, así mismo, de acuerdo con la prueba (LSD) de Fisher, el aumento del IR fue significativo en los primeros dos cm de profundidad, teniendo un incremento en el enrojecimiento del suelo (Ver Figura 10). Para mayor detalle, ver anexos 8 y 9.

#### 7.4.5 Índice de saturación (RGB)

##### 7.4.5.1 Grupo de suelo

El índice de saturación (RGB) fue significativamente diferente en cada grupo de suelo, donde Vertisol presentó una saturación general más baja que Cambisol, siendo de  $0.055 \pm 0.006$  y  $0.069 \pm 0.007$ , respectivamente.

##### 7.4.5.2 Quema agrícola

Estadísticamente la quema agrícola también afectó de manera distinta este parámetro a cada grupo analizado. Vertisol no sufrió cambios después de la quema. Por su parte, Cambisol presentó una disminución en la saturación, pues la media general en el  $IS_{RGB}$  fue de  $0.071 \pm 0.008$  antes de la quema y de  $0.067 \pm 0.005$  después de la quema. Estadísticamente, los cambios significativos después de la quema por profundidad ocurrieron entre los dos y cuatro cm de profundidad, y los últimos 4 cm de profundidad, observándose una disminución en la saturación del suelo (Ver Figura 10). Para mayor detalle, ver anexo 9.

#### 7.4.6 Índice de hue (RGB)

Finalmente, los análisis de varianza indican que el  $IH_{RGB}$  no fue significativamente diferente en cada grupo de suelo, ni hubo cambios estadísticamente diferentes por la quema agrícola de acuerdo al GRS (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.4**), habiendo en ambos perfiles un hue homogéneo (Ver figuras 9 y 10).

## 8. DISCUSIÓN

Los cambios que ocurren en las propiedades del suelo son atribuidos a factores como la intensidad y duración de la quema, composición química de las cenizas generadas después de la quema, la cual a su vez depende del tipo de combustible vegetal, las propiedades específicas de cada grupo de suelo, entre otros (Afif Khouri, *et al.*, 2006; Lázaro, *et al.*, 2021). Es importante señalar que las quemas realizadas en las zonas de estudio son consideradas de bajo impacto, alcanzándose altas temperaturas sobre la superficie de suelo, pero con una duración de 60-70 segundos (Lázaro, *et al.*, 2021); y que, de manera general, elementos como el Fósforo, Potasio, Calcio y Magnesio, contenidos de manera esencial en la estructura de la caña de azúcar (Quintero, 1995) pueden influir de manera significativa en las diferentes propiedades del suelo después de haber sido liberados mediante la combustión (Thomaz, *et al.*, 2014). Mientras que los cambios ocurridos por grupo de suelo analizado, serán atribuidos a sus propiedades específicas (Afif Khouri, *et al.*, 2006).

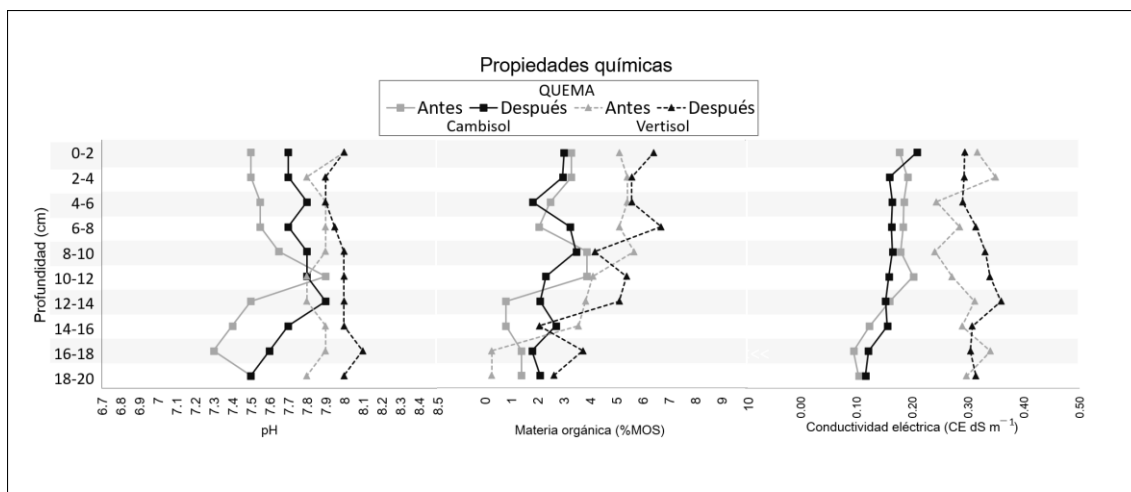


Figura 11. Comportamiento de las propiedades químicas de Cambisol y Vertisol, antes y después de la quema.

El Vertisol presentó valores altos en el contenido de materia orgánica (MOS) y en la conductividad eléctrica (CE), así como un pH de neutro a ligeramente alcalino, mientras que Cambisol tuvo valores significativamente más bajos en la MOS y CE, y su pH fue de ligeramente ácido a ligeramente alcalino. Teóricamente, estos valores son determinantes en la manera en que responde cada grupo de suelo a los efectos del fuego (González, *et al.*, 2001).

Posterior a la quema, el Vertisol no presentó cambios significativos en el porcentaje de materia orgánica ni en su valor de pH. Resultados similares con Seubert *et al.* (1974) y Mobley *et al.* (1973), quienes concluyeron que el contenido de MOS en los suelos superficiales sufre poco o ningún cambio por quemas prescritas y controladas; y con Chi *et al.* (2017), quien reportó que el pH del suelo de parcelas forestales con un tratamiento de 10 años en la zona norte de Belice, no presentó una correlación significativa con los años de cultivo de la caña de azúcar ( $r_2 = 0.073$ ,  $p < 0.527$ ) gracias al origen calcáreo del suelo en el sitio de estudio, pues se ha determinado que el incremento del pH no suele ser significativo en suelos alcalinos (Certini, 2005; McCauley, *et al.*, 2009; Azcarate, *et al.*, 2012). Aunado a ello, Vertisol es un grupo de suelo que se caracteriza por su alto contenido de arcillas expandibles (IUSS Working Group WRB, 2015), mismas que le proporcionan una alta capacidad de amortiguación a los cambios químicos y una alta capacidad aislante del calor (Recinos, 2015), puesto que su calor específico es más alto que el de las arenas (Porta-Casanellas, *et al.*, 2003); sumando a ello, posee un porcentaje considerable MOS, la cual le proporciona una buena estructura y estabilidad (Medina, *et al.*, 2017)

En el caso de la CE, después de la quema ocurrió un aumento significativo en la media de la general debido a la liberación de nutrientes procedentes de las cenizas (Menzies & Gillman, 2003, citado en (Celis, Jordán, & Zavala, 2013); gráficamente se observa un aumento de la CE entre los 4 y 12 cm de profundidad, probablemente por el K, pues de acuerdo con la literatura, este elemento se integra rápidamente al suelo y tiende a lixiviarse (Menzies y Gillman, 2003 citado en Thomaz, *et al.*, 2014), sin embargo es altamente retenido por arcillas del tipo 2:1. Este efecto a corto plazo suele ser una mejora de la fertilidad en la mayoría de los casos (Celis, *et al.*, 2013).



Por su parte, Cambisol presentó un aumento significativo en el contenido de MOS y en el valor del pH. El aumento de la MOS fue significativo entre los 12 y 20 cm de profundidad, de acuerdo a algunos autores (Ketterings, *et al.*, 2000; Zhao *et al.*, 2012) los cambios a profundidades mayores se asocian a la acumulación de finas raíces que quedan después del fuego, las cuales contribuyen al contenido de carbono orgánico, pues las pruebas de análisis de la materia orgánica en laboratorio no diferencian entre las formas de MOS, por lo que las formas activas y lentas podrían provocar fluctuaciones en los niveles totales del porcentaje de MOS aunque el contenido de humus sea el mismo (McCauley *et al.*, 2009) o bien, a la incorporación de compuestos húmicos al suelo, tomando en cuenta la propiedades típicas del Cambisol (IUSS Working Group WRB, 2015).

Mientras tanto, la alcalinización de Cambisol después de la quema se atribuye a que presenta intervalos amplios en el valor del pH, pasando de ligeramente ácido a ligeramente alcalino. Se ha reportado que el aumento del pH después de una quema es más significativo en suelos ácidos que en alcalino (Certini, 2005). Este aumento se debe a la destrucción de ácidos orgánicos, y al aporte de cationes básicos, óxidos y carbonatos procedentes de las cenizas (Ulery *et al.*, 1993; Parada, *et al.*, 2015), como puede ser el caso del  $\text{Ca}^{++}$ , pues debido a que su integración en el suelo es lenta, comparada con la del  $\text{K}^+$  y  $\text{Mg}^{++}$  (Menzies & Gillman, 2003), podría mantenerse un tiempo considerable en los primeros centímetros del suelo, dando esa característica alcalina. Cabe mencionar que, la presencia de carbonatos fue comprobada con la reacción al ácido clorhídrico antes y después de la quema (Ver anexo 3). Este cambio suele ser efímero a causa del lavado de iones básicos y formación de nuevo humus (Reyes, *et al.* 2013), fenómeno visto por Parada, *et al.* (2015), quien evaluó los efectos después de la quema en tres tiempos distintos, donde el valor del pH fue tomando el pH inicial después de 120 días.

Por su parte, la CE no presentó cambios estadísticamente significativos después de la quema, lo cual se adjudica a que el  $\text{K}^+$ , que contribuye de manera significativa a esta propiedad, se lixivia fácilmente (Menzies y Gillman, 2003), especialmente cuando la capacidad de retención de elementos es baja.

En cuanto a las propiedades de color, Vertisol y Cambisol poseen características distintas, por lo que los cambios ocurridos posteriores a la quema también lo son.

Después de la quema, tenemos que el parámetro de luminosidad presenta un oscurecimiento significativo en la media general del perfil de ambos grupos de suelo, este fenómeno (oscurecimiento del suelo) está asociado a la carbonización de la materia orgánica y a la formación de óxidos de hierro como la magnetita y maghemita (Sanmartín, *et al.*, 2010; Bautista, *et al.*, 2014). No obstante, al evaluar estadísticamente los cambios entre profundidades, no hay diferencias significativas, es decir, los cambios solo se observaron en la superficie del suelo.

El Vertisol no presentó cambios posteriores a la quema agrícola en las coordenadas  $a^*$  y  $b^*$  del sistema CIE-L $^*a^*b^*$ , ni en el IS del sistema RGB. De manera general esto podría deberse a que en el perfil dominan los tonos acromáticos como negro, gris y blanco, pigmentos asociados a la presencia de humus, formas de hierro reducidos y carbonatos (Díaz, Y. *et al.* 2013) y a que la quema tiene un efecto local ya que las arcillas funcionan como aislante térmico. Cabe mencionar que las variables R, G y B (RGB), reflejaron una reducción general en sus valores después de la quema, comportamiento similar al de

Luminosidad (CIE-L\*a\*b\*), sin embargo, estadísticamente no hay diferencias significativas entre profundidades.

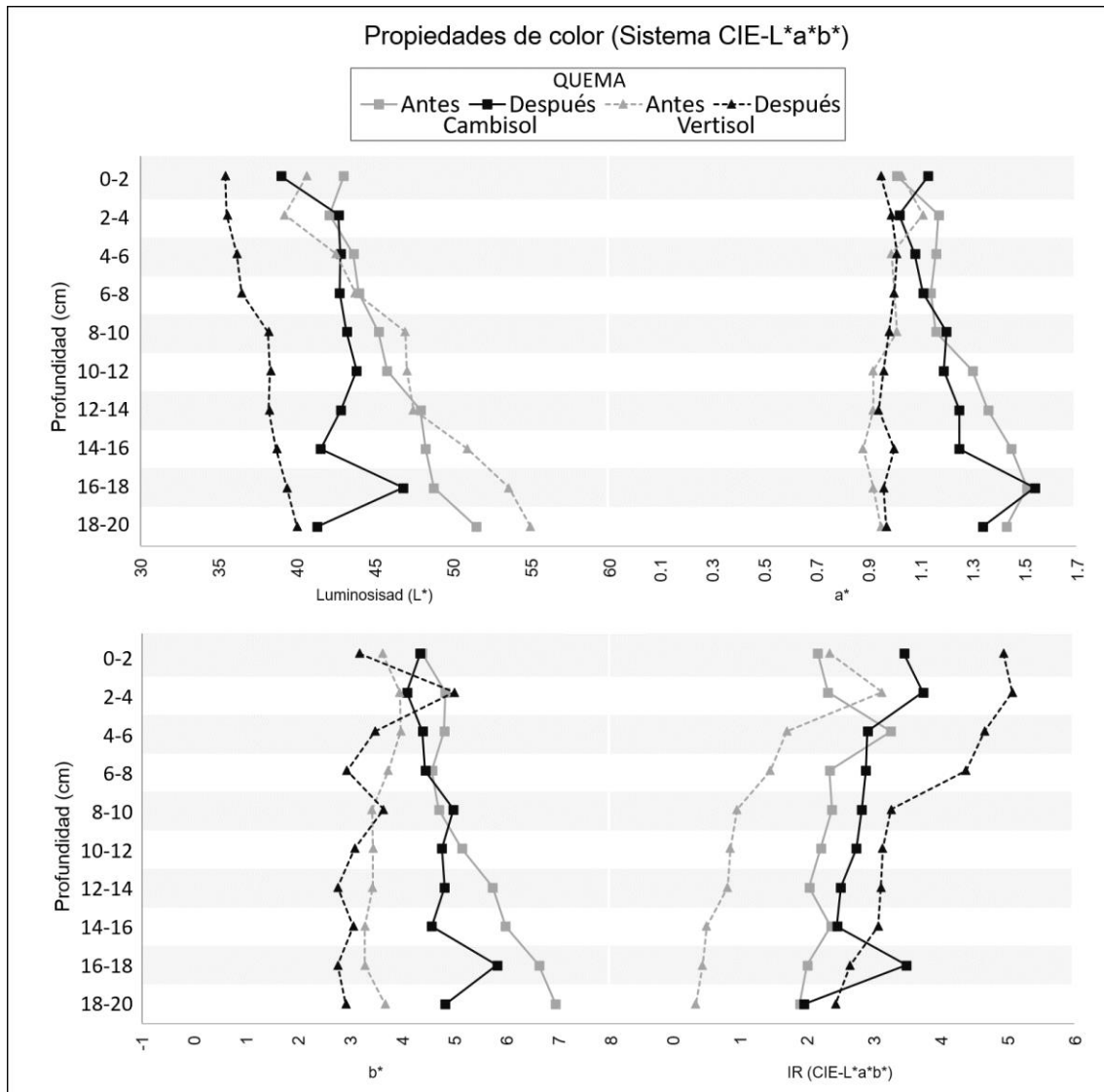


Figura 12. Comportamiento de las variables  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  e índice de enrojecimiento del sistema CIE-L\*a\*b\* de Cambisol y Vertisol, antes y después de la quema.

Por su parte, en el Cambisol las coordenadas  $a^*$  y  $b^*$  (CIE-L\*a\*b\*), así como las variables R, G, B y el IS (RGB) mostraron una reducción significativa en la media general después de la quema, donde los cambios se presentaron principalmente en los últimos cm del perfil de las variables  $a^*$ ,  $b^*$  y R. Estos cambios se atribuyen a factores que influyen en la lixiviación o presencia de pigmentos oscuros del suelo como el humus (fenómeno observado en los análisis de MOS), pues diferentes estudios dejan ver, con niveles de confianza altos y coeficientes de correlación significativos, que estos compuestos neutralizan la contribución de los pigmentos blancos, rojos, verdes, amarillos y azules, reduciendo el enrojecimiento y el color amarillo de los suelos (Viscarra, *et al.*, 2006; Vodyanitski, *et al.*, 2017), y por consiguiente, la saturación también puede verse reducida.

A diferencia del Vertisol, el Cambisol tiene una estructura de menor tamaño y una menor cantidad de arcillas por lo que sus propiedades de aislante térmico son menores. Al existir

una mayor conducción del calor el efecto de la quema agrícola se expresa con una magnitud mayor.

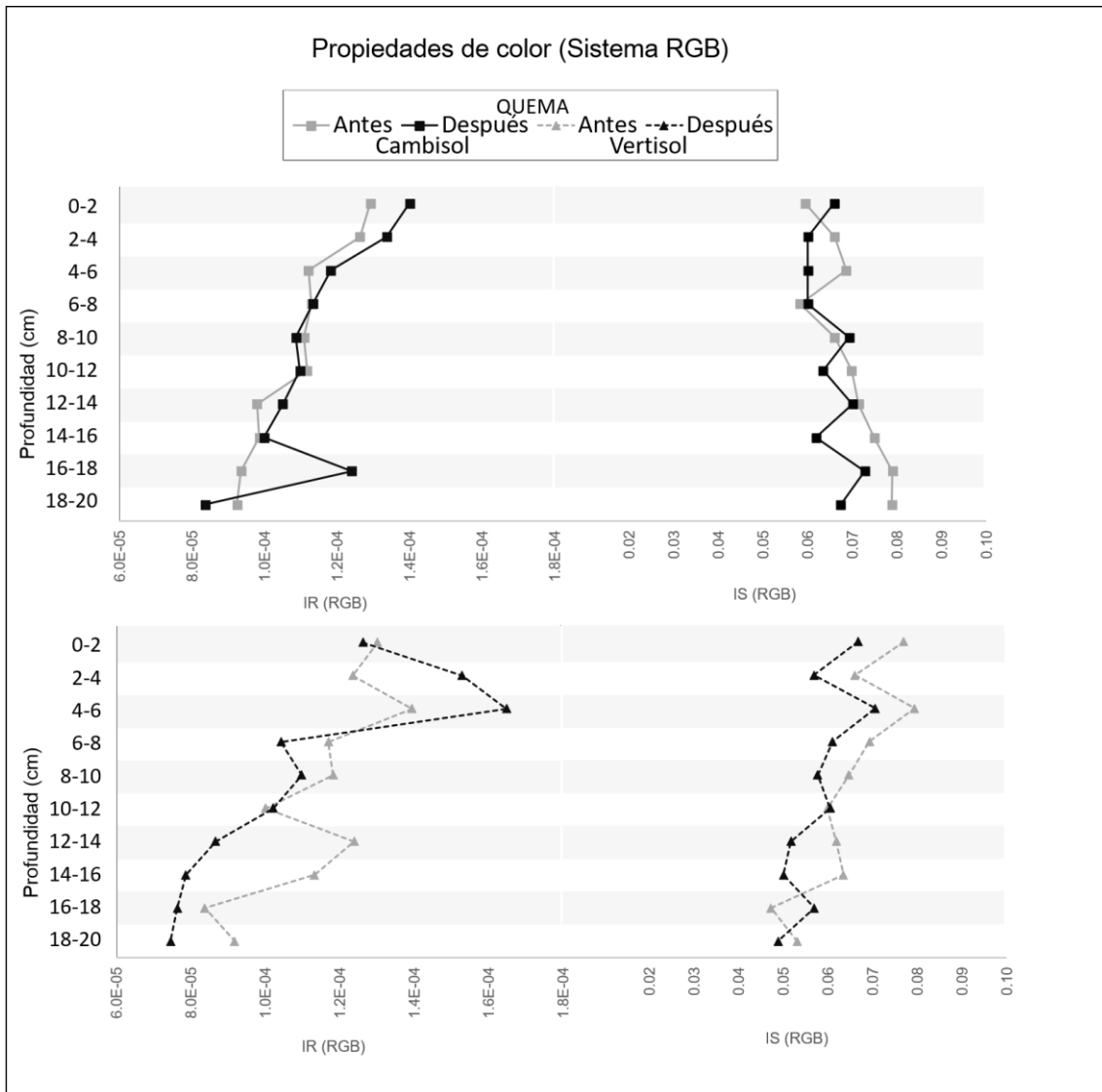


Figura 13. Comportamiento del índice de enrojecimiento e índice de saturación del sistema RGB de Cambisol y Vertisol, antes y después de la quema.

En cuanto a los índices  $IR_{CIE-L^*a^*b^*}$  e  $IR_{RGB}$ , en ambos grupos de suelo presentan un evidente enrojecimiento en los primeros 2 cm, alteración que se debe a la deshidratación interna de hidróxidos amorfos como la ferrihidrita, a causa de las altas temperaturas y al cambio de humedad, provocadas por el fuego, dando lugar a la formación de hematita (Olmedo, 1971; Acevedo, *et al.*, 2004). Este cambio, no se observa en el resto de ambos perfiles, lo cual coincide con datos ya documentados que aseguran que las temperaturas y el fuego no afectan gravemente las características del suelo a más de 5 cm de profundidad (Ladrach, 2009).

Cabe mencionar que Vertisol presentó un enrojecimiento mayor a Cambisol. Este efecto podría deberse por una parte a que Vertisol posee mayores concentraciones de MOS, dado que la formación del Fe (3+) en el suelo depende de la materia orgánica presente y de las bacterias, donde el hierro forma quelatos metálicos con la materia orgánica y algunas bacterias participan en el ciclo del hierro (Duxbury, *et al.*, 1989).

Finalmente, los índices IRR (CIE-L\*a\*b\*) y el IH (RGB) no reflejaron cambios significativos posterior a la quema. En el primer caso, debido a que a\* y b\* se comportan de manera similar y que a\* representa a la hematita y b\* a la goethita, se valora que existen otras formas de hierro que permiten la transformación simultánea de ambos óxidos de hierro mediante las altas temperaturas (Olmedo, 1971) provocadas por la quema, por lo que la proporción de ambos elementos se mantiene. Mientras que el IH, al registrar los colores primarios (rojo, verde y azul), los cuales no son tonos característicos de los grupos de suelo analizados, no resulta ser un índice representativo para evaluar los cambios por efecto de una quema.

## 9. CONCLUSIONES

Los suelos estudiados respondieron de manera distinta ante el uso del fuego agrícola, lo que evidencia que cada grupo de suelo presenta sistemas de comportamiento diferentes, asociados principalmente a su estructura y nivel de desarrollo, sin embargo, los resultados obtenidos suponen que las quemadas controladas como las que se realizan en los cultivos de caña de azúcar, no suelen tener impactos negativos en la fertilidad del suelo, incluso si estos son de bajo desarrollo; puesto que los cambios ocurridos en las propiedades químicas fueron positivos en ambos grupos de suelo.

En cuanto a las propiedades de color, los índices de enrojecimiento ( $IR_{CIE-L^*a^*b^*}$  e  $IR_{RGB}$ ), presentaron cambios en los primeros dos centímetros de profundidad, por lo que pueden definirse como parámetros de colorimetría confiables para determinar los efectos directos del fuego en un suelo.

Cabe mencionar que, tanto en las propiedades químicas como en las propiedades de color, ocurren cambios después de la quema en profundidades lejos de la superficie, especialmente en Cambisol, los cuales se atribuyen a fenómenos como la precipitación, la cual permite la incorporación de componentes a la matriz del suelo; de manera que se consideran efectos indirectos de la quema.

A través de los sistemas de color CIE-L\*a\*b\* y RGB, concluimos que la colorimetría es una herramienta confiable para evaluar el comportamiento en un suelo después de la incidencia del fuego.

## **Agradecimientos**

Al proyecto dirigido por el Dr. Francisco Bautista Zúñiga “Las propiedades magnéticas de los suelos y sus aplicaciones: contaminación, uso del fuego en la agricultura, clasificación y cartografía” (clave 283135), por su apoyo económico durante mi proceso de realización de mi tesis de licenciatura.

Al equipo técnico del Instituto de Investigación y Desarrollo de caña de azúcar (SIRDI) por su esfuerzo y dedicación durante los muestreos de suelo.

A mi tutor, el Dr. Francisco Bautista Zúñiga y a los miembros del comité sinodal: la Dra. Mayra Elena Gavito Pardo, al Dr. Luciano Chi Serrano, al Dr. José de Jesús Fuentes Junco y al Mtro. José Francisco Sánchez Espinoza, por aceptar ser mis guías durante mi proceso de formación.

## 10. REFERENCIAS

- Acevedo, O., Ortiz, E., Cruz-Sanchez, M., & Cruz-Chavez, E. (2004). El papel de los óxidos en los suelos. *TERRA Latinoamericana*, 22(4), 485-497. Retrieved from <http://redalyc.uaemex.mx/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=57311096013>
- Afif Khouri, E., & Oliveira Prendes, J. A. (2006). Efectos del fuego prescrito sobre matorral en las propiedades del suelo. *Invest Agrar: Sist Recur For*, 15(3), 252-270.
- Aguilar, B., Carrancho, A., Gogichaishvili, A., Quintana, P., Bautista, F., Morales, J., & Faust, B. (2013). Influence of agricultural Burning on magnetic properties in maya milpas. *Latinmag Letter*, 3, 1-4.
- Al-Hooti, S., Sidhu, J., & Al-Saqer, J. (2000). Utility of CIE tristimulus system in measuring the objective crumb color of high-fiber toast bread formulations. *Journal of Food Quality*, 103-116.
- Angulo, J., & Serra, J. (2005). Segmentación de imágenes en color utilizando histogramas Bi-Variables en espacios de color polares Luminancia/Saturación/Matiz. *Computación y Sistemas*, 8(4), 313-316.
- Aulakh, M. S., & Singh, B. (1995). Gaseous losses of N through denitrification from soil under different cropping systems.
- Azcarate, P., Kloster, N., & Pérez, G. (2012). Reacción del suelo: pH. In A. Quiroga, & A. Bono, *Manual de fertilidad y evaluación de suelos* (pp. 19-25). La Pampa, Argentina: EDICIONES INTA.
- Azores, J. (2014). *Segmentación y reconstrucción de suelo navegable mediante divergencia de color*. Universidad Carlos III de Madrid.
- Barron, V., & Torrentm, J. (1986). Use of the Kubelka-Munk theory to study the influence of iron oxides on soil colour. *Journal of soil science*, 37, 499-510. doi:10.1111/j.1365-2389.1986.tb00382.x
- Bautista, F., Cejudo, R., Aguilar-Reyes, B., & Gogichaishvili. (2014). El potencial del magnetismo en la clasificación de suelos: una revisión. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 66(2), 365-376.
- Bautista, F., Gogichaishvili, A., Delgado, C., Quintana, P., Aguilar, D., Cejudo, R., & Cortés, J. L. (2021). El color como indicador de contaminación por metales pesados en suelos de la Ciudad de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*. doi:10.18268/BSGM2020v73n1a210920
- Bengiovanni, R., Chartunni, E., Best, S., & Roel, A. (2006). Agricultura de precisión: integrando conocimientos para una agricultura moderna y sustentable. *Procisur*. Rio de Janeiro.
- Bodek, I., Lyman, W. J., Reehl, W. F., & Rosenblatt, D. (1988). *Environmental inorganic chemistry, properties, processes and estimation methods*. New York: Pergamon Press.
- Brady, N. C., & Weil, R. (1999). *The nature and properties of soils* (12 ed.). Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, Inc.
- Caderón, N., Estrada, A., & Martínez, J. (2001). Efecto de la salinidad en el crecimiento y absorción nutrimental de plantas micropropagadas de nopal (*Opuntia* spp.). *Revista Chapingo Series Ciencias Forestales y del Ambiente*, 7(2), 127-132.

- Camacho, G. (1961). *El cultivo de la caña de azúcar y la industria azucarera en Gran Canaria (1510-1535)*. Universidad de las Palmas de Gran Canaria. Retrieved from <https://mdc.ulpgc.es/utills/getfile/collection/aea/id/1273/filename/1274.pdf>
- Casas, A., & Caballero, J. (1995). *Domesticación de plantas y origen de la agricultura en Mesoamerica*. Retrieved from *Ciencias: Revista de cultura científica*: <https://www.revistacienciasunam.com/en/146-revistas/revista-ciencias-40/1196-domesticaci%C3%B3n-de-plantas-y-origen-de-la-agricultura-en-mesoam%C3%A9rica.html>
- Celis, R., Jordán, A., & Martínez, L. (2013). Effects of soil biological, physical and chemical properties. In *Grandes incendios forestales, erosión, degradación y medida de recuperación de los suelos*. Universidad de Sevilla, Departamento de Cristalografía, mineralogía y química agrícola.
- Celis, R., Jordán, A., & Zavala, L. (2013). Efecto del fuego en las propiedades biológicas, físicas y químicas del suelo. In A. Bento, & A. Vieira, *Grandes Incêndios Florestais, Erosão, Degradação e Medidas de Recuperação dos Solos* (pp. 145-160).
- Certini, G. (2005). Effects of fire on properties of forest soils: a review. *Oecologia* 143, 1-10. doi:<https://doi.org/10.1007/s00442-004-1788-8>
- Chavez, M., & Bermúdez, A. (2006). Motivos y Razones para quemar las plantaciones de caña de azúcar en Costa Rica. *XVI Congreso ATACA y XVI Congreso ATACORI*, (p. 10). Heredia, Costa Rica.
- Chi, L., Mendoza, J., Huerta, E., & Álvarez, J. (2017). Effect of Long-Term Sugarcane (*Saccharum* Spp.) Cultivation on Chemical and Physical Properties of Soils in Belize. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 48(7), 741-755. doi:10.1080/00103624.2016.1254794
- Cortés, J., Bautista, F., Quintana, P., Aguilar, D., & Goguichaishvili, A. (2015). The color of urban dust as an indicator of contamination by potentially toxic elements the case of Ensenada, Baja California, México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 21(3), 255-266. doi:10.5154/r.rchscfa.2015.02.003
- Díaz-Hernández, B. G., Díaz-Fuentes, V. H., Ruíz-Cruz, P. A., & Aguirre-Medina, J. F. (2011). *Agricultura migratoria en áreas tropicales de ladera: Un análisis histórico-ecológico*. AGROPRODUCTIVIDAD.15. Retrieved from [https://www.researchgate.net/publication/271765802\\_AGRICULTURA\\_MIGRATORIA\\_EN\\_AREAS\\_TROPICALES\\_DE\\_LADERA\\_UN\\_ANALISIS\\_HISTORICO-ECOLOGICO](https://www.researchgate.net/publication/271765802_AGRICULTURA_MIGRATORIA_EN_AREAS_TROPICALES_DE_LADERA_UN_ANALISIS_HISTORICO-ECOLOGICO)
- Duxbury, J. M., Smith, M. S., & Doran, J. W. (1989). Organic Matter as a source and a sink of plant nutrients. In D. C. Coleman, J. M. Oades, & G. Uehara, *Dynamics of soil organic matter in tropical ecosystems* (pp. 33-68). Honolulu, Hawaii: University of Hawaii Press.
- Escadafal, R., Belghith, A., & Ben Moussa, H. (1994). Indices spectraux pour la dégradation des milieux naturels en Tunisie aride. In ISPRS-CNES (Ed.), *6ème Symp. Int. Mesures Physiques et Signatures en Télédétection*, (pp. 253-259). Val d'Isère, France.
- FAO-Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación. (2009). *Guía para la descripción de suelos* (4 ed.). Roma, Italia.

- FAO-Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. (2009). *Guía para la descripción de suelos* (4 ed.). Roma, Italia: FAO.
- FAO-Unesco. (1976). *Mapa Mundial de Suelos*. Paris.
- García, R., Delgado, C., Cejudo, R., Aguilera, A., Gogichaishvili, A., & Bautista, F. (2020). The color of urban dust as an indicator of heavy metal pollution. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 26(1), 3-15. doi:10.5154/r.rchscfa.2019.01.002
- Gardi, C., Angelini, M., Barceló, S., Comerma, J., Cruz Gaistardo, C., Encina Rojas, A., . . . Vargas, R. (2014). *Atlas de suelos de America Latina y el Caribe, Comisión Europea*. Luxembourg: Oficina de Publicaciones de la Unión Europea. doi:10.2788/37334
- González, C., Studdert, G., Kunst, C., & Albanesi, A. (2001). Comportamiento de algunas propiedades del suelo en una sabana del haco Semiárido Occidental bajo distintas frecuencias de fuego. *Revista de la Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo*, 19(2), 92-100.
- González, F., Bautista, F., Sanchez, R., Hernández, V., Estrada, H., & Chi, L. (In press). Mejoramiento de la medición del color del suelo utilizando un espectrofotómetro de sólidos: efecto de la materia orgánica, tamaño de partícula y quema agrícola.
- Grelen, H. E. (1975). *Vegetative response to twelve years of seasonal burning on a Louisiana longleaf pine site*. USDA Forest Service.
- Hernández, A., Irán, J., Morell, F., Cabrera, A., Ascanio, M., García, J., . . . Nájera, O. (2010). *Fundamentos de la estructura de suelos tropicales*. Tepic, Nayarit: Universidad Autónoma de Nayarit: Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas.
- Idalicia, C. (2019). *Recomendaciones y guías específicas para la disminución del impacto de las inundaciones en el cultivo de caña de azúcar en la zona norte (Orange Walk y Corozal) de Belice*. Costa Rica: Ciudad Universitaria Rodrigo Facio.
- IUSS Working Group WRB. (2015). *Base referencial mundial del recurso suelo 2014*. Informe sobre recursos mundiales de suelos 106, FAO-Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Roma.
- Jaramillo, D. (2002). *Introducción a la ciencia del suelo*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias.
- Ketterings, Q. M., Bogham, J. M., & Laperche, V. (2000). Changes in soil mineralogy and texture caused by slash-and-burn fires in Sumatra, Indonesia. *Soil Science America Journal*, 64, 1108-1117.
- Kirillova, N. P., Vodyanitskii, Y. N., & Sileva, T. M. (2015). Conversion of soil color parameters from the Mubsell System to the CIE-L\*a\*b\* System. *Eurasian Soil Science*, 48(5), 468-475. doi:10.1134/S1064229315050026
- Krasilnikov, P., Gutiérrez-Castorena, M. d., Ahrens, R., Cruz-Gaistardo, C. O., Sedov, S., & Solleiro-Rebolledo, E. (2013). *The soils of México*. Dordrecht, Netherlandsnd: Springer.
- Krishnan, P., Butler, B., & Hummel, J. (1981). Close-Range Sensing of soil organic matter. *TRANSACTIONS of the ASAE*. doi:http://dx.doi.org/10.13031/2013.34246



- Kunst, C., & Bravo, S. (2003). Capítulo 4. Fuego Calor y Temperatura. In *Fuego en ecosistemas Argentinos*.
- Ladrach, W. (2009). *El efecto del fuego en los ecosistemas agrícolas y forestales*. Sociedad Internacional de Forestales Tropicales.
- Lázaro, G., Bautista, F., Goguitchaichvili, A., López, U., & Sánchez-Hernández, R. (2021). Efecto de la quema agrícola en un Vertisol de Tabasco, México: Fósforo, pH y Conductividad Eléctrica. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 24(26). Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/348833158>
- Levin, N., Ben-Dor, E., & Singer, A. (2005). A digital camera as a tool to measure colour indices and related properties of sandy soils in semi-arid environments. *International Journal of Remote Sensing*, 26(24), 5475-5492. doi:10.1080/01431160500099444
- Liu, J. G., & Moore, J. M. (1990). Hue image RGB colour composition. A simple technique to suppress shadow and enhance spectral signature. *International Journal of Remote Sensing*, 11(8), 1521-1530. doi:10.1080/01431169008955110
- Long, A. J. (2006). *Benefits of Prescribed Burning*. Institute of Food and Agricultural Sciences, Florida Cooperative Extension Service. University of Florida.
- Madeira, J. B., Cerville, B., Pouget, M., & Flay, N. (1997). Visible spectrometric indices of hematite (Hm) and goethite (Gt) content in lateritic soils: The application of a Thematic Mapper (TM) image for soil-mapping in Brasilia, Brazil. *International Journal of Remote Sensing*, 18(13), 2835-2852. doi:10.1080/014311697217369
- Mandal, U. (2016). Spectral color indices based geospatial modeling of soil organic matter in Chitwan District, Nepal. *XXIII ISPRS Congress. XLI-B2*, pp. 43-48. Prague, Czech Republic: The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. doi:10.5194/isprsarchives-XLI-B2-43-2016
- Martín, D., & Manzano, O. (2010). *Brief profile of the agriculture sector*. Food and Agriculture Organization (FAO). Retrieved from <http://www.fao.org/home/search/en/?q=Martin%2C%20D.Brief%20profile%20of%20the%20agriculture%20sector>
- Mathieu, R., Pouget, M., Cerville, B., & Escadafal, R. (1998). Relationships between Satellite-Based Radiometric Indices Simulated Using Laboratory Reflectance data and Typic Soil Color of an Arid Environment. *REMOTE SENSING ENVIRONMENT*, 66, 17-28.
- McCauley, A., Jones, C., & Jacobsen, J. (2009). Soil pH and Organic Matter. In *Nutrient Management*. Montana State University.
- Medina, R., Cantú, I., González, H., Pando, M., Kubota, T., & Gómez, M. (2017). Efectos del rodillo aireador y el fuego en las propiedades físicas e hidrológicas del suelo en matorrales de Coahuila, México. *AGROCIENCIA*, 51(5), 471-485.
- Menzies, N., & Gillman, G. (2003). Plant growth limitation and nutrient loss following piled burning in slash and burn agriculture. *Nutr. Cycl. Agroecosyst*, 65, 23-33.
- Minervini, M., Morrás, H., & Taboada, M. (2018). Efectos del fuego en la matriz del suelo. Consecuencias sobre las propiedades físicas y mineralógicas. *Ecología Austral*, 28, 12-27.

- Mobley, H. E. (1976). *Southern Forestry Smoke Management Guidebook*. Forest Service, Department of Agriculture. Asheville, NC U. S.: Southeastern Forest Experiment Station .
- Mobley, H. E., Jackson, R. S., Balmer, W. E., Ruziska, W. E., & Hough, W. A. (1973). A guide to prescribed fire in southern forests. *USDA Forest Service*.
- Moreno, H., Gisbert, J. M., & Ibáñez, S. (2010). *Color del suelo*. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos, Departamento de Producción Vegetal. Universidad Politécnica de Valencia.
- Myers, R. (2006). *Convivir con el fuego- Manteniendo los ecosistemas y los medios de subsistencia mediante el Manejo Integral del Fuego*. Tallahassee, FL, USA: The Nature Conservancy.
- Olmedo, J. (1971). Algunos aspectos de la distribución y formas del hierro en los suelos. In S. e. Lal, & C. S. (España) (Ed.), *Anales de Edafología y Agrobiología Tomo 30 Numero 5-6* (pp. 423-632). Retrieved from <http://hdl.handle.net/10261/216248>
- Omi, P. N. (2005). *Forest Fires, a reference handbook*. ABC-CLIO Inc.
- Ortiz, H., Salgado, S., Castelán, M., & Córdova, S. (2012). Perspectivas de la cosecha de la caña de azúcar cruda en México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*(4), 767-773. Retrieved from <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=263125299020>
- Ortiz, H., Salgado, S., Castelán, M., & Córdova, S. (2012). Perspectivas de la cosecha de la caña de azúcar cruda en México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*(4), 767-773.
- Parada, C., Rueda, S., Carrero, C., Quintero, N., & Cárdenas, D. (2016). Efecto de la quema en cultivos de hortalizas en Villa del Rosario, Norte de Santander , Colombia, sobre las micorrizas y propiedades del suelo. *Bioagro*, 28(3). Retrieved from <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=85749314004>
- Pitts, M. J., Hummel, J. W., & Butler, B. J. (1986). Sensors utilizing light reflection to measure soil organic matter. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 29(2), 422-428. doi:<http://dx.doi.org/10.13031/2013.30166>
- Porta-Casanellas, J., López-Acevedo, M., & Roquero, C. (2003). *Edafología para la agricultura y el medio ambiente* (3° ed.). Silsoe (UK).
- Portillo-Arreguín, D., López-Acosta, N., Barba-Galdámez, D., & Sanchez, M. (2018). Determinación de las propiedades térmicas de los suelos a partir del método de la aguja. *XXIX Reunión Nacional de Ingeniería Geotécnica*. León, Guanajuato: Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica A.C.
- Prasad, R., & Power, J. F. (1997). *Soil Fertility Management for Sustainable Agriculture*. Boca Raton, FL: CRC Press LLC.
- Quintero, R. (1995). Fertilización y nutrición. In *El cultivo de la Caña en la zona azucarera de Colombia* (pp. 153-177). Cali, Colombia: CENICAÑA.
- Quiroga, A., & Romano, N. (2012). Capítulo I. El sistema suelo y características del intercambio de iones. In A. Quiroga, & A. Bono, *Manual de fertilidad y evaluación de suelos* (p. 162). La Pampa, Argentina: Ediciones INTA Anguil.
- Quiroga, A., Bono, A., & Fraiser, I. (2012). Capítulo III. Materia orgánica del suelos. In A. Quiroga, & A. Bono, *Manual de fertilidad y evaluación de suelos* (pp. 26-38). La Pampa, Argentina: INTA Anguil.

- Recinos, L. (2015). Tipos de arcillas y sus propiedades. Universidad Rafael Landívar.
- Rojas, A., Zúñiga, O., Sanchez, M., Pérez, J., & Gasco, J. M. (2007). Conductividad térmica del suelo, materia orgánica, actividad biomasa microbianas en sistemas de cultivo de maracuyá en Toro, Valle del Cauca. *Acta Agronómica*, 51(1), 17-21. Retrieved from <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=169920474004>
- Salinas, J. (2019). Procesamiento de imágenes de cromatografías de suelos enfocado a la interpretación de patrones de dispersión del color y su asociación con cualidades del suelo. Fusagasugá.
- Sanchez, C. (2016). *Sistemas y técnicas tradicionales de la agricultura en Tlaxcala desde la época prehispánica hasta el siglo XIX*. Retrieved from [http://www.economia.unam.mx/amhe/pdfs/giordano\\_pub\\_02.pdf](http://www.economia.unam.mx/amhe/pdfs/giordano_pub_02.pdf)
- Sanmartín, P., Cancelo, J., Rial, M., & Silva, B. (2010). El color como indicador de la intensidad de los incendios en los suelos de Galicia: Primeros resultados. *IX Congreso Nacional del Color* (pp. 429-432). ALICANTE.
- Schoeneberger, P. J., Wysocki, D. A., Benham, E. C., & Broderick, W. D. (2002). *Field book for describing and sampling soils Version 2.0*. Lincoln, NE: Natural Resources Conservation Service, National Soil Survey Center.
- Schulze, D., Nagel, J., Van Scoyoc, G., Henderson, T., Baumgardner, M., & Stott, D. E. (1993). Chapter 5. Significance of Organic Matter in Determining Soil Colors. In M. Bigham, & E. J. Ciolkosz, *Soil Color* (pp. 71-90). Madison, USA: SSSA Special Publications No. 31. doi:<https://doi.org/10.2136/sssaspecpub31.c5>
- Schwertmann, U. (1993). Relations between iron oxides, soil color and soil formation. In J. M. Bigham, & E. J. Ciolkosz, *Soil color* (pp. 51-69). Madison, USA: SSSA Special Publication No. 31.
- Schwertmann, U., & Taylor, R. (1989). Chapter 8. Iron Oxides. In S. S. America, *Minerals in Soil Environments* (2 ed.). SSSA Book Series, no 1.
- Scotter, G. W. (1972). Fire as an ecological factor in boreal forest ecosystems of Canada. *Proc. Fire in the Environment*, 15-24.
- Seubert, C. E. (1974). *Agronomic-economic research on tropical soils. Annual Report*. North Carolina State University. USAID.
- SIB - Statistical Institute of Belize. (2015). *Estimated mid-year population 2015 and merchandise trade, population and household*.
- Smith, J., & Doran, J. (1996). Measurement and Use of pH and Electrical Conductivity for Soil Quality Analysis. In S. S. America, *Methods for Assessing Soil Quality*. Madison, USA: SSSA Special Publication 29.
- Souri, B., Watanabe, M., & Sakagami, K. (2006). Contribution of Parker and Product indexes to evaluate weathering condition of Yellow Brown Forest soils in Japan. *Geoderma*, 130, 346-355. doi:10.1016/j.geoderma.2005.02.007
- Stokes, M., Anderson, M., Chandrasekar, S., & Motta, R. (1996). *A Standard Default Color Space for the Internet - sRGB*. Retrieved from <https://www.w3.org/Graphics/Color/sRGB>
- Stone, E. L. (1971). Effect of prescribed burning on long term productivity of Coastal Plain soils. *Prescribed burning Symposium proceedings*, (pp. 115-138). Asheville, N. C.

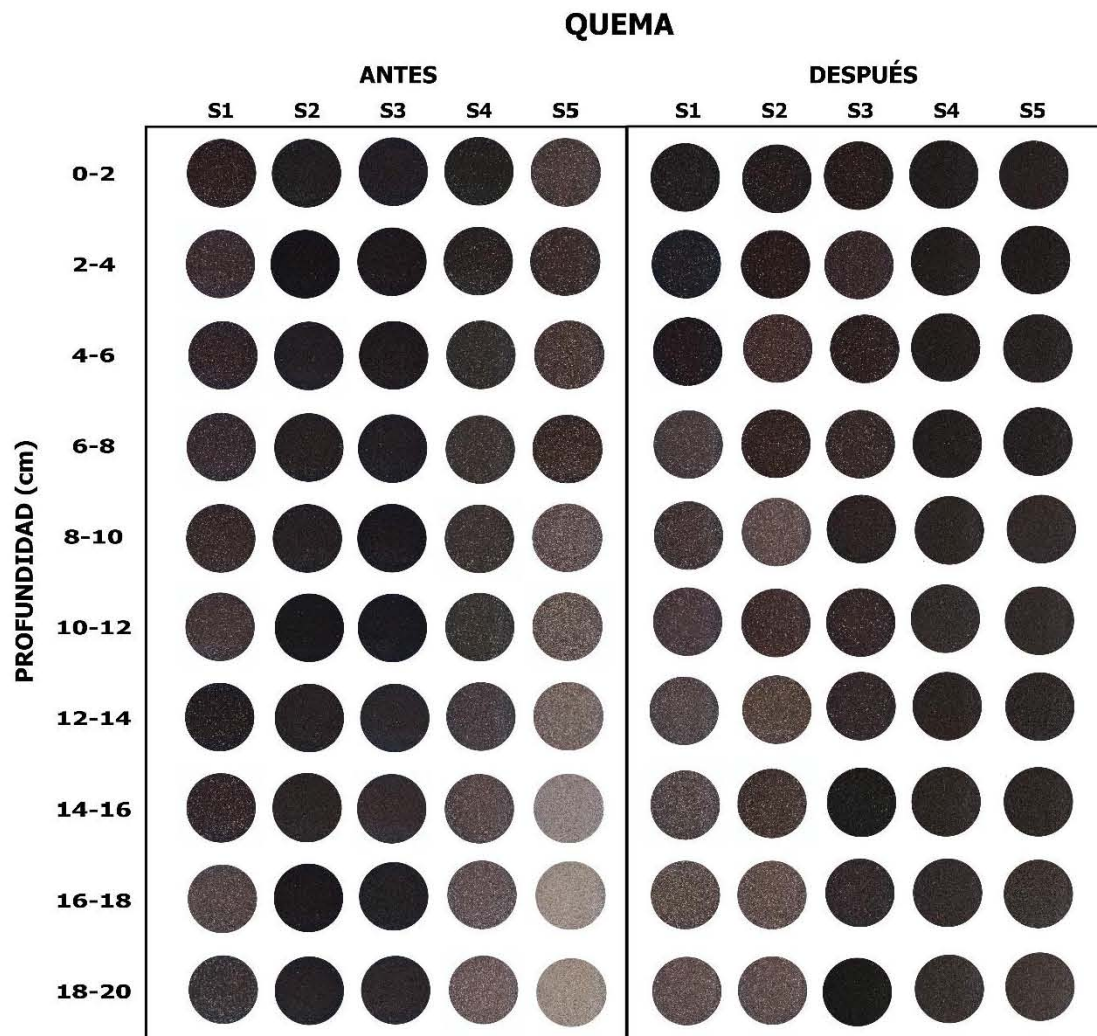
- Thomas, G. W. (1996). Chapter 16. Soil pH and Soil Acidity. In S. S. Agronomy, *Methods of Soil Analysis. Part 3. Chemical Methods*. Madison: SSSA Book Series no. 5.
- Thomaz, E., Antoneli, V., & Doerr, S. (2014). Effects of fire on the physicochemical properties of soil in a slash-and-burn agriculture. *ELSEVIER*, 209-215. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2014.06.016
- Torrent, J., Schwertmann, U., Fechter, H., & Alferez, F. (1983). Quantitative relationships between soil color and hematite content. *Soil science*, 136(6), 354-358.
- Ulery, A. L., & Graham, R. C. (1993). Forest Fire Effects on Soil Color and Texture. *Soil Science Society of America Journal*, 57, 135-140.
- Villa-Castorena, M., Catalán-Valencia, E., Inzunza-Ibarra, M. A., & Sánchez-Cohen, I. (2006). La fertilización nitrogenada y la salinidad del suelo afectan la transpiración u absorción de nutrientes en plantas de Chile. *TERRA Latinoamericana*, 24(3), 391-399.
- Viscarra, R., Minasny, B., Roudier, P., & McBratney, A. B. (2006). Colour Space models for soil science. *Geoderma*, 320-337. doi:10.1016/j.geoderma.2005.07.017
- Vodyanitskii, Y. N., & Savichev, A. T. (2017). The influence of organic matter on soil color using the regression equations of optical parameter in the system CIE-L\*a\*b\*. *Annals of Agrarian Science*, 1-6. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.aasci.2017.05.023
- Vodyanitskii, Y. N., & Savichev, A. T. (2017). The influence of organic matter on soil color using the regression equations of optical parameters in the system CIE-L\*a\*b\*. *Annals of Agrarian Science XXX*, 1-6. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.aasci.2017.05.023
- Wander, M. M., Traina, S. J., Stinner, B. R., & Peters, S. E. (1994). Organic and conventional management effects on biologically active soil organic matter pools. *Soil Science Society of America Journal*, 58, 1130-1139.
- Zapata, R. (2002). *Química de los procesos pedogenéticos del suelo*. Medellín, Colombia: Universidad Nacional de Colombia: Escuela de Geociencias, Facultad de Ciencias.
- Zapata, R. (2006). *Química de los procesos pedogenéticos*. Medellín, Colombia: Universidad Nacional de Colombia: Escuela de Geociencias, Facultad de Ciencias.

## 11. ANEXOS

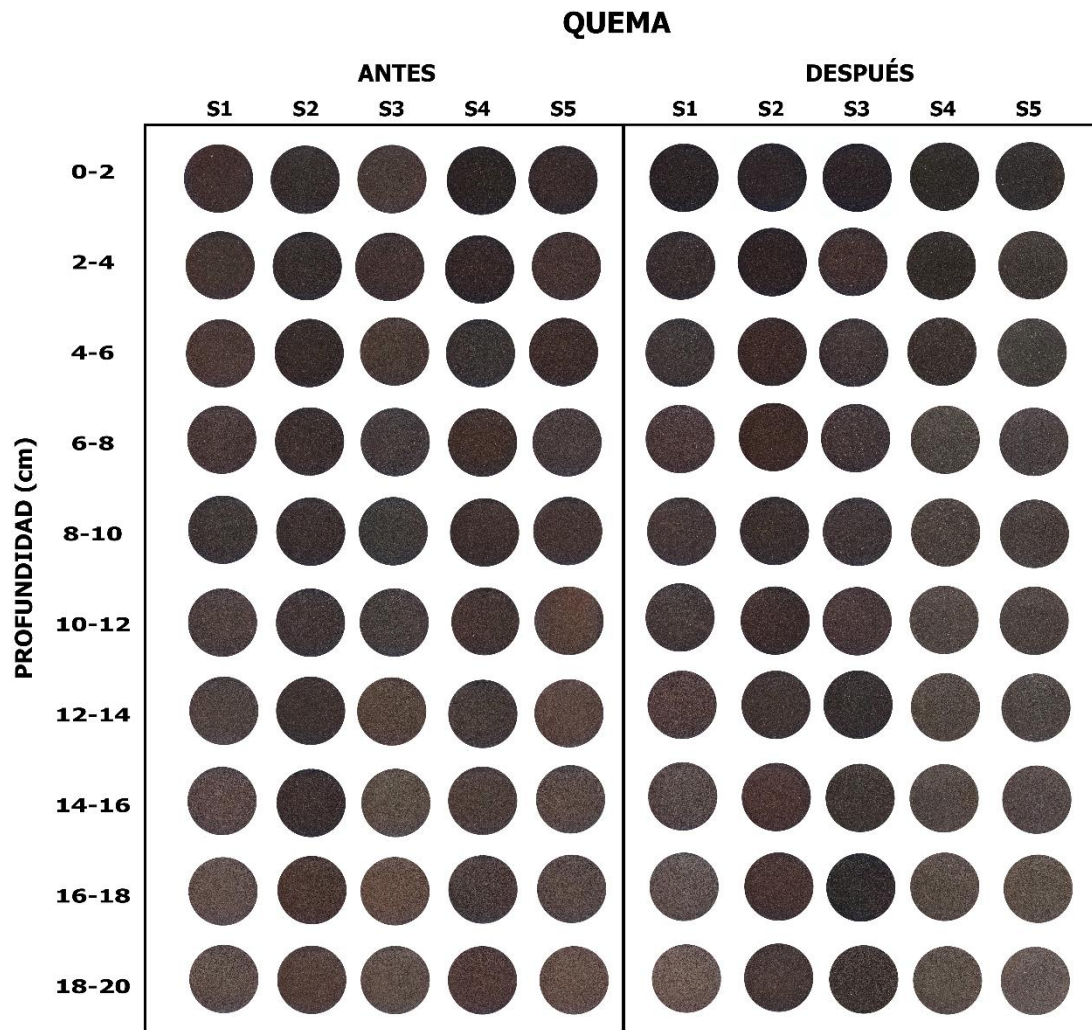
### 11.1 Muestras

Los anexos 1 y 2 corresponden a las muestras de suelo analizadas, las cuales se presentan cada dos centímetros de profundidad a partir del suelo mineral en 5 puntos de la parcela, antes y después de la quema. Cada uno de ellos permite observar un patrón de colores, con una tendencia a ser más claros a medida que aumenta la profundidad, siendo más evidente en Vertisol.

Anexo 1. Muestras de una Vertisol de 0 a 20 cm de profundidad, antes y después de la quema.



Anexo 2. Muestras de un Cambisol de 0 a 20 cm de profundidad, antes y después de la quema.



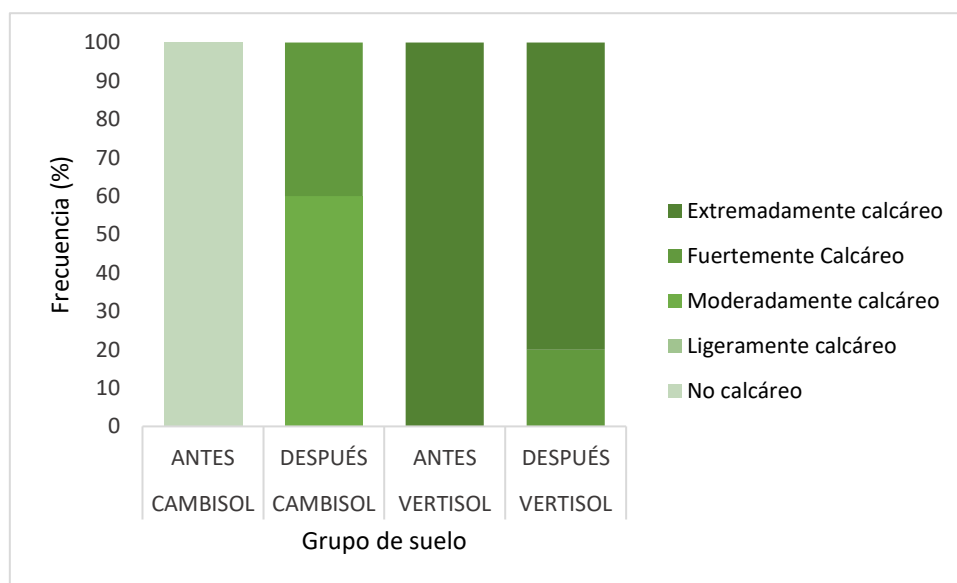
## 11.2 Prueba de carbonatos

La prueba de carbonatos se realizó como una medida adicional para constatar la presencia de este mineral en los grupos de suelos analizados. Esta prueba se analizó por perfil, antes y después de la quema. Estadísticamente, los resultados se evaluaron como variables categóricas, con la prueba estadística chi-cuadrada ( $X^2$ ), la cual permite contrastar la hipótesis de que los criterios de clasificación utilizados son independientes; si los datos son compatibles con la hipótesis de independencia, la probabilidad asociada al estadístico  $X^2$  será alta (mayor de 0.05), por el contrario, si es menor de 0.05 se concluye que las variables estudiadas tienen una relación alta. También se tomaron en cuenta el coeficiente de contingencia y la prueba de Lambda. El coeficiente de contingencia es una medida basada en chi-cuadrado ( $X^2$ ) que intenta corregir el valor del estadístico para hacerle tomar un valor entre 0 y 1, y para minimizar el efecto del tamaño de la muestra sobre la cuantificación del grado de asociación. Un coeficiente de 0 indica independencia, mientras que un coeficiente de 1 indica asociación perfecta. Por su parte, Lambda es una medida que expresa la proporción en que se consigue reducir la probabilidad de cometer un error de predicción. Un valor de 0 indica que la variable independiente no contribuye a reducir el error de predicción, mientras que un valor de 1 indica que el error de

predicción se ha conseguido reducir por completo y que la variable independiente permite predecir con toda precisión a que categoría de la variable dependiente pertenecen los casos clasificados.

Las clases calcáreas fueron definidas de acuerdo a la reacción que tiene el suelo al ácido clorhídrico (HCl), donde habiendo mayor efervescencia, es indicador de altas concentraciones de carbonatos.

*Anexo 3. Gráfico de clases calcáreas antes y después de la quema agrícola de un Cambisol y un Vertisol.*



De acuerdo a la prueba de  $X^2$  no hubo cambios significativos ( $P > 0.05$ ) en las clases calcáreas de Vertisol, teniendo un coeficiente de contingencia de 0.31 y un valor en la prueba de Lambda de 0.00; se clasificó como un suelo extremadamente calcáreo. En el caso de Cambisol, sí hubo cambios significativos ( $P < 0.05$ ) después de la quema en las clases calcáreas, teniendo un coeficiente de contingencia de 0.70 y un valor en la prueba de Lambda de 0.60; antes de la quema Cambisol se consideró no calcáreo, mientras que después de la quema se clasificó como de moderadamente calcáreo a fuertemente calcáreo.

### 11.3 Propiedades del suelo

Los anexos 4, 5, 6 y 7 corresponden a las tablas con las pruebas de ANOVA II o Kruskal-Wallis (según la distribución normal de los datos), y LSD de Fisher, para Vertisol y Cambisol respectivamente. En cada una de ellas se presentan las medias  $\pm$  desviación estándar y mediana, antes y después de la quema, hasta la por profundidad de 20 centímetros, donde las medias generales seguidas de la misma letra no son significativamente diferentes, mientras que los asteriscos indican diferencias estadísticamente significativas antes y después de la quema por profundidad de acuerdo a la prueba LSD de Fisher.

Anexo 4. Tabla de pruebas ANOVA de dos vías en Vertisol, en parámetros químicos; MOS, pH y CE (Medias  $\pm$  Desviación estándar).

Propiedades químicas	MOS (%)		pH		CE (dS m <sup>-1</sup> )		
	Antes	Después	Antes	Después	Antes	Después	
Profundidad (cm)	Quema						
	0-2	5.78 $\pm$ 0.88	5.76 $\pm$ 0.46	7.78 $\pm$ 0.27	7.76 $\pm$ 0.27	0.30 $\pm$ 0.03	0.33 $\pm$ 0.05
	2-4	4.87 $\pm$ 2.26	5.87 $\pm$ 0.71	7.79 $\pm$ 0.17	7.76 $\pm$ 0.26	0.32 $\pm$ 0.03	0.29 $\pm$ 0.03
	4-6	5.84 $\pm$ 0.54	6.26 $\pm$ 0.96	7.78 $\pm$ 0.23	7.79 $\pm$ 0.24	0.25 $\pm$ 0.01	0.29 $\pm$ 0.05
	6-8	6.06 $\pm$ 1.30	5.76 $\pm$ 1.76	7.76 $\pm$ 0.21	7.73 $\pm$ 0.37	0.27 $\pm$ 0.02	0.28 $\pm$ 0.06
	8-10	6.50 $\pm$ 0.91	5.37 $\pm$ 1.36	7.72 $\pm$ 0.26	7.67 $\pm$ 0.32	0.28 $\pm$ 0.03	0.33 $\pm$ 0.05
	10-12	5.92 $\pm$ 1.39	4.73 $\pm$ 0.93	7.7 $\pm$ 0.23	7.72 $\pm$ 0.36	0.28 $\pm$ 0.01	0.31 $\pm$ 0.05
	12-14	4.33 $\pm$ 2.56	4.40 $\pm$ 1.08	7.74 $\pm$ 0.24	7.76 $\pm$ 0.32	0.31 $\pm$ 0.04	0.31 $\pm$ 0.04
	14-16	5.37 $\pm$ 1.44	3.29 $\pm$ 1.30	7.82 $\pm$ 0.31	7.71 $\pm$ 0.37	0.30 $\pm$ 0.03	0.31 $\pm$ 0.05
	16-18	3.67 $\pm$ 2.33	3.01 $\pm$ 1.01	7.72 $\pm$ 0.24	7.76 $\pm$ 0.39	0.27 $\pm$ 0.04	0.30 $\pm$ 0.05
18-20	1.86 $\pm$ 1.51	2.35 $\pm$ 0.91	7.76 $\pm$ 0.29	7.76 $\pm$ 0.36	0.26 $\pm$ 0.04	0.29 $\pm$ 0.05	
<i>Media general</i>	5.02 $\pm$ 2.00 a	4.68 $\pm$ 1.65 a	7.75 $\pm$ 0.23 a	7.74 $\pm$ 0.30 a	<b>0.288<math>\pm</math>0.03 a</b>	<b>0.308<math>\pm</math>0.05 b</b>	
<i>Mediana (M<sub>e</sub>)</i>	5.42	4.94	7.8	7.9	<b>0.291</b>	<b>0.308</b>	
Significancia de la quema	p ANOVA II >0.05		p Kruskal-Wallis >0.05		p ANOVA II < <b>0.05</b>		
Significancia por profundidad	<b>P ANOVA II &lt;0.05</b>		P Kruskal-Wallis >0.05		P ANOVA II >0.05		
Significancia de la interacción: Quema-Profundidad	P ANOVA II >0.05		P >0.05		P ANOVA II >0.05		



Anexo 5. Tabla de pruebas ANOVA de dos vías en Cambisol, en parámetros químicos; MOS, pH y CE (Medias  $\pm$  Desviación estándar).

Propiedades químicas	MOS (%)		pH		CE (dS m <sup>-1</sup> )		
	Quema	Antes	Después	Antes	Después	Antes	Después
0-2		2.78 $\pm$ 0.30	2.79 $\pm$ 0.22	7.36 $\pm$ 0.33	7.5 $\pm$ 0.40	0.14 $\pm$ 0.03	0.16 $\pm$ 0.03
2-4		2.94 $\pm$ 0.54	3.11 $\pm$ 0.44	7.28 $\pm$ 0.38	7.58 $\pm$ 0.32	0.14 $\pm$ 0.04	0.15 $\pm$ 0.02
4-6		2.91 $\pm$ 0.36 *	2.13 $\pm$ 0.20 *	7.27 $\pm$ 0.48	7.54 $\pm$ 0.47	0.14 $\pm$ 0.04	0.15 $\pm$ 0.03
6-8		2.50 $\pm$ 0.90	2.72 $\pm$ 0.49	7.17 $\pm$ 0.41	7.48 $\pm$ 0.54	0.15 $\pm$ 0.05	0.15 $\pm$ 0.04
8-10		2.71 $\pm$ 0.81	2.86 $\pm$ 0.64	7.22 $\pm$ 0.51	7.58 $\pm$ 0.56	0.15 $\pm$ 0.05	0.15 $\pm$ 0.04
10-12		2.42 $\pm$ 0.85	2.14 $\pm$ 0.49	7.38 $\pm$ 0.44	7.54 $\pm$ 0.58	0.16 $\pm$ 0.03	0.14 $\pm$ 0.04
12-14		1.46 $\pm$ 0.41 *	2.20 $\pm$ 0.38 *	7.29 $\pm$ 0.40	7.62 $\pm$ 0.57	0.12 $\pm$ 0.03	0.13 $\pm$ 0.03
14-16		0.98 $\pm$ 0.26 *	2.29 $\pm$ 0.62 *	7.31 $\pm$ 0.40	7.48 $\pm$ 0.54	0.10 $\pm$ 0.02	0.14 $\pm$ 0.04
16-18		1.50 $\pm$ 0.38 *	2.59 $\pm$ 0.89 *	7.18 $\pm$ 0.38	7.52 $\pm$ 0.46	0.11 $\pm$ 0.01	0.13 $\pm$ 0.03
18-20		1.27 $\pm$ 0.42 *	2.15 $\pm$ 0.44 *	7.2 $\pm$ 0.38	7.48 $\pm$ 0.50	0.09 $\pm$ 0.02	0.12 $\pm$ 0.03
<i>Media general</i>		<b>2.17<math>\pm</math>0.88 a</b>	<b>2.51<math>\pm</math>0.58 b</b>	<b>7.26<math>\pm</math>0.38 a</b>	<b>7.53<math>\pm</math>0.45 b</b>	0.134 $\pm$ 0.04 a	0.146 $\pm$ 0.03 a
<i>Mediana (M<sub>e</sub>)</i>		2.07	2.46	<b>7.35</b>	<b>7.7</b>	0.123	0.143
Significancia de la quema		<b>P ANOVA II &lt;0.05</b>		<b>p Kruskal-Wallis &lt;0.05</b>		p ANOVA II p >0.05	
Significancia por profundidad		<b>P ANOVA II &lt;0.05</b>		P Kruskal-Wallis >0.05		<b>P ANOVA II &lt;0.05</b>	
Significancia de la interacción Quema-Profundidad		<b>P &lt;0.05</b>		P >0.05		P >0.05	

pH= Potencial de hidrógeno; MOS= Materia orgánica del suelo; CE= Conductividad Eléctrica  
n<sub>valor</sub> (profundidad) =5; n<sub>valor</sub> (quema)= 50

Anexo 6. Tabla de pruebas ANOVA II en Vertisol, para los parámetros de color e índices en el sistema CIEL\*a\*b\* (Medias ± Desviación estándar).

Profundidad (cm)	Parámetros CIE-L*a*b*	L*		a*		b*		IR CIEL*a*b*		IRR CIEL*a*b*	
	Quema	Antes	Después	Antes	Después	Antes	Después	Antes	Después	Antes	Después
0-2		40.07±3.09	37.72±2.46	0.99±0.05	0.98±0.04	4.07±0.67	3.89±0.64	<b>2.31±0.89*</b>	<b>4.02±0.92*</b>	0.25±0.02	0.26±0.00
2-4		39.04±2.47	37.50±2.22	1.05±0.12	0.96±0.08	4.22±0.54	4.06±0.57	3.21±1.10	3.91±1.02	0.25±0.01	0.25±0.01
4-6		40.60±3.29	38.12±2.55	1.00±0.01	1.01±0.13	4.28±0.53	3.97±0.59	2.64±1.25	3.57±1.16	0.24±0.02	0.25±0.02
6-8		41.24±2.88	40.20±3.71	0.99±0.12	0.99±0.06	4.13±0.55	3.70±0.07	2.26±1.01	2.63±1.46	0.24±0.02	0.25±0.02
8-10		44.12±6.06	41.87±4.85	1.02±0.07	0.95±0.04	3.96±0.46	3.90±0.44	1.80±1.21	2.19±1.17	0.25±0.02	0.24±0.03
10-12		45.40±7.59	41.16±3.18	0.96±0.05	0.96±0.05	3.99±0.45	3.74±0.51	1.67±1.41	2.12±0.90	0.25±0.03	0.25±0.02
12-14		45.50±8.63	43.11±5.42	0.97±0.08	0.89±0.09	4.01±0.45	3.69±0.66	1.67±1.17	1.84±1.24	0.25±0.02	0.25±0.04
14-16		49.00±12.72	42.94±5.10	0.89±0.01	0.96±0.09	3.89±0.67	3.91±0.65	1.34±1.03	1.94±1.09	0.24±0.03	0.25±0.04
16-18		51.33±12.00	44.53±6.27	0.85±0.07	0.90±0.08	3.92±0.68	3.85±0.80	0.98±0.98	1.58±1.03	0.23±0.04	0.24±0.04
18-20		51.01±12.30	45.60±6.33	0.92±0.06	0.94±0.10	4.03±0.77	3.92±0.73	1.12±1.10	1.45±0.96	0.24±0.05	0.25±0.05
		<b>44.85±8.67</b>	<b>41.27±4.88</b>	0.96±0.09	0.95±0.08	4.05±0.53	3.86±0.56	<b>1.87±1.22</b>	<b>2.49±1.35</b>	0.23±0.02	0.248±0.02
	Media	<b>a</b>	<b>b</b>	a	a	a	a	<b>a</b>	<b>b</b>	a	a
	Mediana	<b>42.14</b>	<b>40.05</b>	0.96	0.96	4.01	3.71	<b>1.91</b>	<b>2.47</b>	0.249	0.258
	Significancia de la quema	<b>p</b> Kruskal-Wallis < <b>0.05</b>		p ANOVA II >0.05		p ANOVA II >0.05		<b>p</b> ANOVA II < <b>0.05</b>		p ANOVA II >0.05	
	Significancia por profundidad	P Kruskal-Wallis >0.05		<b>P</b> ANOVA II < <b>0.05</b>		P ANOVA II >0.05		<b>P</b> ANOVA II < <b>0.05</b>		P ANOVA II >0.05	
	Significancia de la interacción Quema-Profundidad	P >0.05		P >0.05		P >0.05		P >0.05		P >0.05	

Anexo 7. Tabla de pruebas ANOVA II en Cambisol, para los parámetros de color e índices en el sistema CIEL\*a\*b\* (Medias ± Desviación estándar).

Parámetros CIE-L*a*b*	L*		a*		b*		IR CIEL*a*b*		IRR CIEL*a*b*		
	Quema	Antes	Después	Antes	Después	Antes	Después	Antes	Después	Antes	Después
Profundidad (cm)	0-2	40.99±1.59	39.41±0.44	1.12±0.11	1.14±0.06	4.50±0.34	4.49±0.13	<b>2.55±0.82*</b>	<b>3.15±0.27*</b>	0.249±0.011	0.254±0.012
	2-4	41.75±0.95	40.74±1.53	1.22±0.07	1.13±0.08	4.85±0.24*	4.41±0.18*	2.40±0.38	2.66±0.78	0.251±0.007	0.256±0.012
	4-6	42.58±1.31	42.18±1.31	1.21±0.13	1.16±0.08	4.84±0.46	4.52±0.16	2.15±0.55	2.18±0.57	0.250±0.010	0.256±0.014
	6-8	43.19±1.35	43.12±1.40	1.21±0.07	1.14±0.03	4.84±0.29	4.55±0.11	1.96±0.42	1.94±0.52	0.250±0.008	0.258±0.012
	8-10	43.50±1.24	43.06±1.14	1.24±0.09	1.23±0.10	4.91±0.27	4.82±0.30	1.92±0.40	2.05±0.51	0.252±0.009	0.256±0.011
	10-12	43.95±1.24	43.89±1.26	1.26±0.03	1.25±0.08	5.12±0.36	4.97±0.15	1.91±0.30	1.85±0.44	0.258±0.009	0.252±0.011
	12-14	45.37±1.97	44.73±1.96	1.36±0.07	1.30±0.05	5.56±0.55*	5.13±0.22*	1.75±0.41	1.74±0.50	0.259±0.014	0.253±0.011
	14-16	46.47±2.25	44.81±2.43	1.55±0.17*	1.38±0.06*	5.96±0.69*	5.40±0.40*	1.64±0.43	1.85±0.58	0.261±0.012	0.257±0.013
	16-18	47.45±2.34*	44.96±3.75*	1.59±0.18*	1.43±0.10*	6.30±0.77*	5.62±0.54*	1.48±0.37*	2.00±0.93*	0.254±0.016	0.255±0.015
	18-20	48.32±2.58	46.63±4.02	1.66±0.19*	1.47±0.11*	6.62±0.76*	5.86±0.85*	1.41±0.42	1.66±0.78	0.252±0.026	0.254±0.022
Media	<b>44.48±2.78</b> a	<b>43.34±2.93</b> b	<b>1.34±0.22</b> a	<b>1.26±0.14</b> b	<b>5.35±0.84</b> a	<b>4.97±0.60</b> b	<b>1.92±0.57</b> a	<b>2.11±0.73</b> b	0.254±0.013 a	0.255±0.013 a	
Mediana	<b>43.84</b>	<b>42.98</b>	<b>1.29</b>	<b>1.25</b>	<b>5.1</b>	<b>4.82</b>	<b>1.892</b>	<b>1.893</b>	0.254	0.254	
Significancia de la quema	<b>p ANOVA II &lt;0.05</b>		<b>p Kruskal-Wallis &lt;0.05</b>		<b>p Kruskal-Wallis &lt;0.05</b>		<b>p ANOVA II &lt;0.05</b>		<b>p ANOVA II &gt;0.05</b>		
Significancia por profundidad	<b>P ANOVA II &lt;0.05</b>		<b>P Kruskal-Wallis &lt;0.05</b>		<b>P Kruskal-Wallis &lt;0.05</b>		<b>P ANOVA II &lt;0.05</b>		<b>P &gt;0.05</b>		
Significancia de la interacción Quema-Profundidad	P >0.05		<b>P &lt;0.05</b>		P >0.05		P >0.05		P >0.05		

L\*= Luminosidad; IR= Índice de enrojecimiento; IRR= Índice de enrojecimiento relativo.

Anexo 8. Tabla de pruebas ANOVA II en Vertisol, para los parámetros de color e índices en el sistema rgb (Medias ± Desviación estándar).

Parámetros RGB	R		G		B		IR RGB		IS RGB		IH RGB		
	Quema	Antes	Después	Antes	Después	Antes	Después	Antes	Después	Antes	Después	Antes	Después
Profundidad (cm)	0-2	99.20±8.01	93.4±6.35	93.8±7.46	88.4±5.94	88.0±7.11	82.8±5.17	1.38 E-4± 2.21 E-5	1.54E-4± 1.92E-5	0.056±0.007	0.060±0.006	2.87±0.19	2.80±0.19
	2-4	96.6±6.27	93±5.96	91.4±5.94	87.6±5.13	85.2±5.26	81.8±4.55	1.45 E-4± 1.90 E-5	1.58E-4± 1.56E-5	0.063±0.003	0.064±0.006	2.70±0.20	2.87±0.18
	4-6	100.8±7.85	94.4±6.43	95.2±8.04	89.2±6.06	88.8±7.76	83.4±5.59	1.35 E-4± 2.4 E-5	1.52E-4± 1.95E-5	0.060±0.005	0.062±0.008	2.78±0.37	2.83±0.38
	6-8	101.80±7.26	99.20±9.44	96.6±7.06	94.2±9.20	90.8±6.34	89.0±8.69	1.28 E-4± 1.96 E-5	1.36E-4± 2.71E-5	0.054±0.003	0.054±0.008	2.83±0.24	2.94±0.13
	8-10	109±15.05	103.4±12.28	103.8±15.09	98.4±11.99	98.2±14.75	92.8±11.10	1.14 E-4± 3.14 E-5	1.25E-4± 2.72E-5	0.053±0.009	0.054±0.003	2.93±0.40	2.81±0.27
	10-12	112.2±19.31	101.6±8.38	107.2±19.08	96.6±7.60	101.2±18.24	91.2±6.87	1.09 E-4± 3.7 E-5	1.27 E-4± 1.82E-5	0.052±0.006	0.054±0.005	2.68±0.21	2.86±0.34
	12-14	112.6±21.97	106.2±13.72	107.4±21.56	101.4±13.24	101.4±20.91	96.2±12.15	1.1 E-4± 3.63 E-5	1.17 E-4± 2.95 E-5	0.053±0.006	0.053±0.003	2.76±0.24	2.89±0.44
	14-16	121.8±33.45	106±12.75	116.4±32.54	101.0±12.75	109.8±30.40	95.2±11.90	9.9 E-5± 4.01 E-5	1.19 E-4± 2.75 E-5	0.049±0.001	0.054±0.006	2.73±0.45	2.81±0.45
	16-18	127.67±32	110±16.09	122.1±30.51	105.0±15.62	105.4±15.45	99.2±14.08	8.8 E-5± 3.65E-5	1.11 E-4± 3.03 E-5	0.050±0.003	0.051±0.006	2.67±0.18	2.79±0.29
	18-20	129±35.81	112.8±15.79	123.0±34.60	107.4±15.66	115.8±31.62	101.6±14.59	9.02 E-5± 3.95E-5	1.07 E-4± 2.95E-5	0.053±0.003	0.052±0.006	2.80±0.46	2.93±0.40
Media	111.39±23.02	102±12.23	106.02±22.43	96.92±11.99	98.46±19.15	91.32±11.33	11.5 E-5± 3.4 E-5 a	13 E-5 ± 2.8 E-5 b	0.054±0.006	0.055±0.006	2.77±0.29	2.85±0.29	
Mediana	105	99	99	94	91.5	89	12.4E <sup>-5</sup>	13.4E <sup>-5</sup>	0.054	0.055	2.71	3	
Significancia quema	<b>P</b> Kruskal-Wallis <0.05		<b>P</b> Kruskal-Wallis <0.05		<b>P</b> Kruskal-Wallis <0.05		<b>p</b> ANOVA II <0.05		<b>p</b> ANOVA >0.05		<b>P</b> Kruskal-Wallis >0.05		
Significancia profundidad	<b>P</b> Kruskal-wallis >0.05		<b>P</b> Kruskal-wallis >0.05		<b>P</b> Kruskal-wallis >0.05		<b>P</b> ANOVA II <0.05		<b>P</b> ANOVA II <0.05		<b>P</b> ANOVA II >0.05		
Significancia interacción Quema-Profundidad	P>0.05		P>0.05		P>0.05		P>0.05		P>0.05		P>0.05		

Anexo 9. Tabla de pruebas ANOVA II en Cambisol, para los parámetros de color e índices en el sistema rgb (Medias ± Desviación estándar).

Profundidad (cm)	Parámetros RGB		R		G		B		IR RGB		IS RGB		IH RGB	
	Quema		Antes	Después	Antes	Después	Antes	Después	Antes	Después	Antes	Después	Antes	Después
0-2			101.8±3.79	98.1±0.99	96.1±3.78	92.2±1.22	89.7±4.19	85.9±1.10	1.26E-4± 7.71E-6 *	1.43E-4± 4.40E-6 *	0.063±0.008	0.066±0.003	2.80±0.18	2.89±0.20
2-4			104.1±2.46	101.2±3.85	97.8±2.34	95.2±3.85	90.8±2.29	89.1±4.01	1.28E-4 ± 6.65E- 6	1.34E-4 ± 1.21E-5	0.069±0.004	0.064±0.004	2.80±0.14	2.97±0.09
4-6			106.1±3.41	104.8±3.08	99.8±3.32	98.8±3.32	92.8±3.15	92.4±3.20	1.23E-4± 9.13E-6	1.24E-4± 9.89E-6	0.067±0.006	0.063±0.004	2.81±0.18	2.89±0.25
6-8			107.6±3.33	107.4±3.37	101.2±3.08	101.3±3.52	94.5±3.13	94.6±3.59	1.19E-4± 7.76E-6	1.18E-4± 9.73E-6	0.065±0.004	0.063±0.005	2.91±0.14	2.83±0.15
8-10			108.4±3.09	107.4±2.41	102.0±3.12	100.9±2.80	94.8±3.25	93.9±2.92	1.17E-4± 8.39E-6	1.20E-4± 8.59E-6	0.067±0.005	0.067±0.005	2.79±0.20	2.86±0.15
10-12			110.0±3.46	109.6±3.02	103.1±3.07	103.0±3.01	95.6±2.67	95.9±2.96	1.16E-4± 6.56E-6	1.15E-4± 7.92E-6	0.070±0.006	0.067±0.003	2.84±0.14	2.86±0.19
12-14			114.0±5.20*	111.9±4.79*	106.4±4.97	104.9±4.79	98.4±4.16	97.5±4.74	1.11E-4± 1.04E-5	1.12E- 04±1.11E- 05	0.073±0.006	0.069±0.004	2.91±0.26	2.90±0.13
14-16			117.1±6.11*	112.3±6.46*	109.1±5.62	105.2±5.94	100.4±4.64	97.1±5.21	1.06E-4± 1.06E-5	1.13E-4± 1.24E-5	0.077±0.006	0.073±0.004	2.85±0.17	2.77±0.22
16-18			120.0±6.44*	113.1±9.68*	111.6±5.91	105.4±9.15	102.1±4.58	97.4±8.24	1.02E-4± 1.02E-5	1.14E-4± 2.05E-5	0.080±0.007	0.074±0.004	2.79±0.23	2.94±0.21
18-20			122.4±7.10*	117.3±10.8*	113.6±6.55	109.7±9.80	103.9±5.04	101.0±8.60	9.92E-5± 1.08E-5	1.05E-4± 1.79E-5	0.082±0.007	0.074±0.005	2.85±0.28	2.76±0.16
Media			111.15±7.98 b	108.26±7.73 a	104.07±7.01 b	101.62±7.14 a	96.3±5.82 a	94.45±6.33 b	11.4E-5 ± 1.2E-5 a	11.9E-5 ± 1.5E-5 b	0.071±0.008 a	0.067±0.005 b	2.83±0.19 a	2.86±0.18 a
Mediana			109.5	107	103	101	95.5	94	11.6E-5	12E-5	0.07	0.067	2.77	3
Significancia quema	<b>p</b> Kruskal-Wallis <0.05		<b>P</b> Kruskal-Wallis <0.05		<b>P</b> Kruskal-Wallis <0.05		<b>p</b> ANOVA II <0.05		<b>p</b> ANOVA II <0.05		<b>p</b> ANOVA II <0.05		<b>p</b> Kruskal-Wallis >0.05	
Significancia profundidad	<b>P</b> Kruskal-Wallis <0.05		<b>P</b> Kruskal-Wallis <0.05		<b>P</b> ANOVA II <0.05		<b>P</b> ANOVA II <0.05		<b>P</b> ANOVA II <0.05		<b>P</b> ANOVA II <0.05		<b>P</b> Kruskal-Wallis >0.05	
Significancia interacción Quema-Profundidad	P >0.05		P >0.05		P >0.05		P >0.05		P >0.05		<b>P &lt;0.05</b>		P >0.05	

IR= Índice de enrojecimiento; IS= Índice de saturación; IH= Índice de Hue