

EL COLOR DEL ANDOSOL COMO UN INDICADOR DE SU CALIDAD FÍSICA BAJO EL MANEJO

The Color of Andosol as Indicator of its Physical Quality under Management

Jaime de J. Velázquez-García^{1‡}, Klaudia Oleschko², J. Arcadio Muñoz-Villalobos¹, Miguel A. Velásquez-Valle¹, Yolanda Girón-Ríos³, Mario Martínez-Menes⁴ y Benjamín Figueroa-Sandoval⁴

RESUMEN

El color de un Andosol del estado de Michoacán se utilizó como indicador de la dinámica de su calidad física en función del manejo. En el presente estudio se hizo una comparación estadística de las lecturas de los tres atributos del color del sistema color CIE L*a*b*, realizadas en muestras inalteradas y alteradas bajo el manejo del suelo. Las coordenadas L*, a* y b* de la cromaticidad se correlacionaron con el carbono total (CT) y se comprobó que el manejo modifica el color del suelo, a largo plazo, con cambios estadísticos significativos en los lotes experimentales con mayor cobertura vegetal. Las tres coordenadas de cromaticidad, determinadas a partir de las muestras alteradas, superaron en 4.3, 8.9 y 8.7%, respectivamente, a las mismas coordenadas de las muestras inalteradas. La relación establecida entre el color del suelo y el CT indica que conforme se incrementa el carbono total, disminuyen los valores de los tres atributos del color. Los modelos de regresión, ajustados a los datos experimentales, permiten predecir las variables de cromaticidad a partir del CT en muestras del suelo seco, con coeficientes de ajuste de 0.68, 0.79 y 0.70 para L*, a* y b*, respectivamente (muestras inalteradas), siendo R² siempre mayor para los mismos atributos determinados a partir de las muestras alteradas (0.90, 0.92 y 0.91, respectivamente). Los resultados confirman la efectividad del sistema de colores empleado (CIELAB)

¹ Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Producción Sostenible, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. 58920 Álvaro Obregón, Michoacán, México.

[‡] Autor responsable (velazquez.jaime@inifap.gob.mx)

² Centro de Geociencias. Universidad Nacional Autónoma de México. Juriquilla, Querétaro, México.

³ Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México.

⁴ Colegio de Postgraduados, campus Montecillo. Montecillo, estado de México.

Recibido: octubre de 2005. Aceptado: noviembre de 2006.
Publicado en *Terra Latinoamericana* 25: 1-8.

para detectar las diferencias entre los tratamientos de manejo del Andosol, aun cuando éstas sean pequeñas.

Palabras clave: *agricultura de ladera, atributos de color, carbono total, sistemas de manejo.*

SUMMARY

The color of an Andosol from the State of Michoacán, Mexico, was used as an indicator of the dynamics of its physical quality in function of management. In the present study a statistical comparison of the readings of three color attributes of the color system CIE L*a*b* was made in undisturbed and disturbed samples under soil management. The chromaticity coordinates L*, a*, and b* were correlated with the total carbon content (TC), and it was proved that management modifies soil color in the long term, with statistically significant changes in the experimental plots with greater plant cover. The three chromaticity coordinates determined from the disturbed samples surpassed the same coordinates of the undisturbed samples by 4.3, 8.9, and 8.7%, respectively. The relationship established between soil color and total carbon content indicates that when carbon content increases, the values of the three color attributes decrease. The regression models, fit to the experimental data, permit prediction of chromaticity parameters from total carbon content in dry soil samples, with some adjustment coefficients of 0.68, 0.79, and 0.70 for L*, a* and b*, respectively (undisturbed samples), being R² always higher for the same attributes extracted from the disturbed samples (0.90, 0.92 and 0.91, respectively). Results confirm the efficiency of the color system (CIELAB) in detecting differences between management treatments of the Andosol, even though these are small.

Index words: *hillside agriculture, color attributes, total carbon, management systems.*

INTRODUCCIÓN

El color del suelo es un producto integral de los rayos de luz dispersados, su geometría está en función de las propiedades físicas, químicas y biológicas. Entre los factores primarios que definen el color del suelo está su composición mineralógica, la morfología superficial y el contenido de humedad (Bedidi *et al.*, 1992), aunque el color también depende de la textura y el contenido de materia orgánica (Franzmeier *et al.*, 1983; Fernández y Schulze, 1987; Post *et al.*, 1993, 2000; Soares *et al.*, 1997; Matthias *et al.*, 2000). Estas relaciones entre el color y las propiedades básicas del suelo justifican los numerosos intentos de utilizar el color como un indicador de su funcionamiento como un sistema (Harden, 1982).

El manejo del suelo tiene repercusión directa sobre su calidad y puede deteriorar, estabilizar o mejorar las funciones de un ecosistema (Franzluebbers, 2002), mientras que las prácticas del laboreo excesivas tienen una influencia negativa sobre las propiedades del suelo, afectando la composición química de la materia orgánica (Ding *et al.*, 2002), directamente relacionada con el color del suelo (Michailova y Orlov, 1986).

Con el sistema de labranza de conservación, el contenido de materia orgánica superficial se incrementa (Loveland *et al.*, 2001); también se ha determinado que las prácticas mecánicas modifican la rugosidad y el albedo superficial del suelo (Matthias *et al.*, 2000). En este estudio se trabajó con muestras inalteradas y alteradas, considerando, en el primer caso, que las muestras conservan el microrrelieve superficial formado por el manejo, mientras que en el caso de las muestras alteradas la rugosidad disminuye significativamente. Los objetivos del presente estudio fueron: a) determinar el color del suelo en muestras alteradas e inalteradas, utilizando el sistema color CIELAB, y b) utilizar el color como una medida cuantitativa de carácter integral de la dinámica del carbono total bajo el manejo y su efecto sobre la estructura del suelo a largo plazo.

El espacio de color CIE L*a*b* 1976 (también conocido como CIELAB) fue sugerido por Commission Internationale de l'Éclairage para solucionar uno de los mayores problemas del análisis del espacio de color original Yxy, donde los valores de distancias iguales sobre x y y en el diagrama de cromaticidad no correspondían a diferencias en color percibidas visualmente (CIE, 1978). Actualmente, el CIE L*a*b* se reconoce como uno de los espacios de color con mayor uniformidad y versatilidad, lo que hace que este método sea cada vez

más utilizado en diversos campos de investigación (Stokman *et al.*, 2000; Barret, 2002). En este espacio modulado de color, L* corresponde a la luminosidad, mientras que a* y b* son las coordenadas de cromaticidad (Figura 1).

El centro del diagrama es acromático. Conforme se incrementan los valores de a* y b*, el punto observado se mueve desde el centro hacia la orilla, coincidiendo la dirección con el aumento de la saturación de un color dado. Con este sistema, es posible especificar el color absoluto de cualquier muestra en términos de los atributos cuantificados sobre los ejes cartesianos a*, b* y L*. El espacio de colores CIE L*a*b* está diseñado de tal modo que se ajusta de manera exacta a la sensibilidad del ojo humano para distinguir los colores. Las ecuaciones que describen la dinámica de color a lo largo de las tres coordenadas para cada uno de los puntos de cromaticidad mencionados son (Sánchez-Marañón *et al.*, 1995):

$$L^* = 116(Y/Y_0)^{1/3} - 16, \quad (1)$$

$$a^* = 500[(X/X_0)^{1/3} - Y/Y_0]^{1/3}, \quad (2)$$

$$b^* = 200[(Y/Y_0)^{1/3} - Z/Z_0]^{1/3}, \quad (3)$$

donde: X, Y y Z son los valores de tres estímulos (rojo, verde y azul), medidos para cada muestra en particular, mientras que X₀, Y₀ y Z₀ se refieren a los valores estímulos conocidos para una placa blanca de referencia.

Estas ecuaciones se aplican cuando Y/Y₀, X/X₀ y Z/Z₀ son mayores de 0.008856. La diferencia en color se expresa de un modo cuantitativo, vía el valor numérico

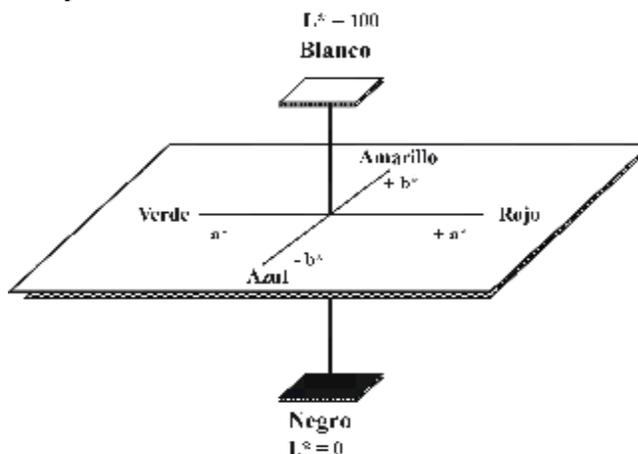


Figura 1. Diagrama de cromaticidad del espacio de color CIE L*a*b* (CIE, 1978)

ΔE^*_{ab} , el cual mide que tan diferentes son los colores comparados, sin especificar el sentido gráfico de las diferencias observadas (Figura 1). La diferencia en color (ΔE^*_{ab}) se expresa con la ecuación:

$$\Delta E^*_{ab} = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (4)$$

donde "L*", "a*" y "b*" son las diferencias en magnitud de cada uno de los tres atributos del CIELAB antes especificados, entre la muestra de interés y el patrón de referencia.

MATERIALES Y MÉTODOS

El sitio experimental se ubica en la comunidad de Santa Isabel de Ajuno, al suroeste de la cuenca del lago de Pátzcuaro, estado de Michoacán; sus coordenadas geográficas son 19° 31' 00" N y 101° 36' 30" O, con una altitud de 2135 m. Los suelos son Andosoles, formados a partir de materiales piroclásticos compuestos de cenizas y vidrio volcánico, cuyo contenido de este último en la capa superficial puede fluctuar entre 10 y 64% (Alcalá *et al.*, 2001). La mayoría de los suelos son de baja fertilidad, pobres en materia orgánica y con una densidad aparente menor de 0.8 g cm⁻³ (Velásquez *et al.*, 2006). Las condiciones agroclimáticas prevalecientes favorecen el desarrollo de poblaciones de tuzas (*Pappogemys alconni* y *Zygoeomys trichopus*). El sitio experimental cuenta con lotes de escurrimiento de 4 x 22.9 m, donde se aplicaron, sin cambio, sistemas de manejo a lo largo de los últimos nueve años. La pendiente promedio de los lotes es de 9.9%.

Los sistemas de manejo que se comparan en el presente estudio se describen a continuación (Tiscareño-López *et al.*, 1999). a) Suelo desnudo (SD): el Andosol, en este tratamiento, no se utiliza con fines agrícolas, sino para estudios de erosión. Se mantiene libre de la cobertura vegetal y se requiere aflojar diariamente la capa superficial de los primeros 5 cm a lo largo del año. b) Labranza cero con porcentajes de residuos orgánicos sobre la superficie del suelo: 0, 33, 66 y 100 (L0, L33, L66, L100, respectivamente). c) Labranza mínima (LM): el laboreo de suelo se redujo a una remoción manual con azadón de los primeros 10 cm de la superficie. d) Labranza convencional (LCV): se aplicó un barbecho manual y con pala se simuló una remoción de suelo hasta

20 cm de profundidad; después, con un azadón, se hizo la simulación de la rastra y la escarda.

Durante el mes de mayo de 2004 se tomaron muestras inalteradas, aplicando manualmente núcleos de PVC con diámetro de 7.5 cm y altura de 5 cm. Las muestras estuvieron separadas por 1 m, una de otra, en cuatro equidistancias (5, 10, 15 y 20 m). Con este esquema se obtuvieron 12 muestras por lote, a una profundidad de 5 cm. Los núcleos con el suelo muestreado se mantuvieron a temperatura ambiente por 10 días y después se introdujeron a la estufa por 48 h a 40 °C, para evitar alteraciones en el carbono total. La lectura del color se realizó en muestras de suelo seco (condiciones homogéneas de humedad). Para preparar las muestras alteradas de cada núcleo, se tomó la parte superficial (aproximadamente 2 cm de espesor), la cual se mezcló y se pasó por el tamiz de malla de 2 mm, con el propósito de homogeneizar la muestra.

El color absoluto se midió en el sistema CIE L*a*b*, mediante un Chroma-metro Minolta CR-310, calibrando previamente con una placa estándar Minolta CR-A44 de referencia conocida, con la opción de iluminación estándar (D₆₅) (Post *et al.*, 1993). La diferencia en color absoluto (ΔE^*_{ab}) entre los sistemas de manejo se calculó tomando como referencia al suelo con labranza convencional, ya que este manejo representa el color de suelo más común del área estudiada. El porcentaje de carbono total (CT) se determinó por combustión seca (Nelson y Sommers, 1982). Para estimar la significancia de las diferencias se realizó un análisis de varianza con un diseño de una sola vía, utilizando la prueba de separación de medias de Duncan (Steel y Torrie, 1985). Al mismo tiempo, se llevaron a cabo regresiones lineales entre los tres atributos de color y el carbono total. Para los análisis estadísticos se utilizó el paquete de cómputo PC-SAS (SAS Institute, 1990).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Carbono Total

El contenido superficial del carbono total (CT) del Andosol fue diferente en los sistemas de manejo comparados (P < 0.01). El intervalo de variación del CT abarcó de 1.5 a 3.9%, con un promedio general de 2.9%. La Figura 2 muestra la distribución de los cuatro grupos de datos de CT que, en orden descendente, cumplen con la siguiente desigualdad: (L66, L100 y L33) > (L0) > (LM, LCV) > (SD).

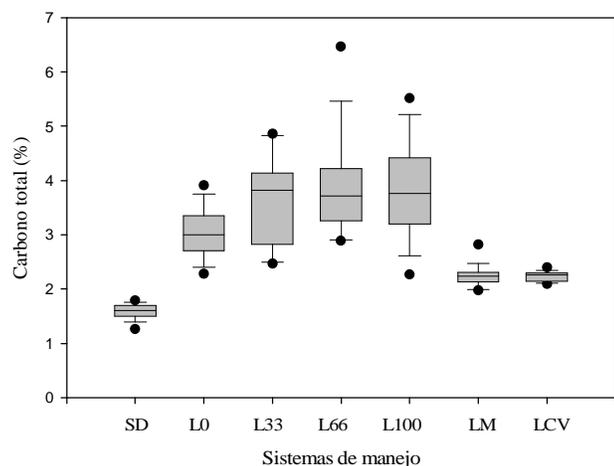


Figura 2. Gráfico de caja que presenta la variación del contenido de carbono total (%) sobre la superficie del Andosol bajo los sistemas de manejo comparados. Los límites inferiores y superiores de las cajas indican el percentil 25 y 75% respectivamente; la línea sólida representa la mediana y los ejes se extienden al décimo y noventa percentil, y los círculos simbolizan observaciones aberrantes. SD: suelo desnudo; L0, L33, L66 y L100: labranza cero con 0, 33, 66 y 100% de residuos orgánicos sobre la superficie del suelo; LM: labranza mínima; LCV: labranza convencional.

De este modo, los tres sistemas de manejo con labranza cero y adiciones constantes de residuos orgánicos han incrementado el CT del Andosol en la superficie. Este hecho coincide con lo reportado por Potter *et al.* (1999) y Ding *et al.* (2002).

La dispersión de los valores de CT fue mayor para aquellos tratamientos que tienen una mayor cobertura de residuos; esta tendencia corresponde al siguiente orden: L66 > L100 > L33, con las desviaciones estándar respectivas de 1.00, 0.96 y 0.85. En contraste con una mínima desviación estándar de 0.09, registrada para el Andosol con el LCV. Una posible explicación del hecho que se documentó sobre una mayor homogeneidad de los datos en LM y LCV se deriva de la menor perturbación del suelo en estos lotes por las tuzas. Lo anterior pudo constatare realizando una inspección visual de las perturbaciones de suelo (casas de tuzas) existentes en cada lote de escurrimiento; en las parcelas SD, LM y LCV se observaron, en promedio, alrededor de 1.4 perturbaciones/m², mientras que en lotes con labranza cero (L0, L33, L66 y L100) se calculó un promedio de 5.8 perturbaciones/m². Por su parte, el bajo CT encontrado en SD se asocia a las características del manejo de lote, derivadas del movimiento constante de suelo que propicia su máximo potencial erosivo.

Otra característica importante en común de la distribución de CT en los lotes con sistemas de manejo

comparados, es una tendencia a la concentración de CT en las partes bajas de la pendiente (Cuadro 1).

Este incremento del carbono en la parte baja de la pendiente fue especialmente importante para aquellos tratamientos donde el CT fue más elevado (L66, L33 y L100). Los resultados que se presentan en el Cuadro 1 coinciden con lo documentado por Ritchie (2001), quien detectó disminución en el contenido de la materia orgánica asociada a las partes altas de las cuencas y su acumulación en las partes bajas.

Color del Suelo

En la Figura 3 se presentan todos los valores del CIE L*a*b* obtenidos para los lotes experimentales comparados y para los dos tipos de muestras: alteradas e inalteradas, todos ellos referidos al espacio de color tridimensional (3D). Estos resultados representan de modo gráfico, el color del Andosol estudiado y se ubican en los cuadrantes +a* y +b* y corresponden al color rojo y amarillo, respectivamente. Los valores de L* fluctúan entre 43.52 y 50.14, mientras que para la coordenada de cromaticidad a* varían de 4.86 a 6.75 y, para b*, de 15.43 a 20.41. Por la ubicación de las coordenadas en el diagrama 3D, el color corresponde a un color amarillo-rojizo, con mayor saturación de amarillo y con una tendencia hacia las tonalidades claras.

En el sistema Munsell, el rango de color documentado para el Andosol estudiado se ubica en el Hue (color) de 8.5 a 9.2 YR, Value (luminosidad) de 4.2 a 4.9 y Chroma (saturación) de 2.2 a 3.4. Estos valores de Munsell concuerdan con el rango de color reportado por Egawa (1980) para Andosoles de Japón. Por su parte, Campos-Cascaredo *et al.* (2001) ubican los valores de color (Hue) de Andosoles del volcán Cofre de Perote, México, en el rango de Munsell alrededor de 10 YR. Estas diferencias pueden ser atribuibles a un mayor

Cuadro 1. Distribución del carbono total a lo largo de la pendiente de los lotes de escurrimiento comparados.

Distancia	Carbono total						
	SD	L0	L33	L66	L100	LM	LCV
m	----- % -----						
5	1.6	3.2	2.8	3.5	3.9	2.2	2.3
10	1.6	2.9	3.7	3.4	2.9	2.2	2.1
15	1.6	3.2	3.7	5.3	3.8	2.1	2.2
20	1.7	3.0	4.3	3.7	4.7	2.5	2.3

SD: suelo desnudo; L0, L33, L66 y L100: labranza cero con 0, 33, 66 y 100% de residuos orgánicos sobre la superficie del suelo; LM: labranza mínima; LCV: labranza convencional.

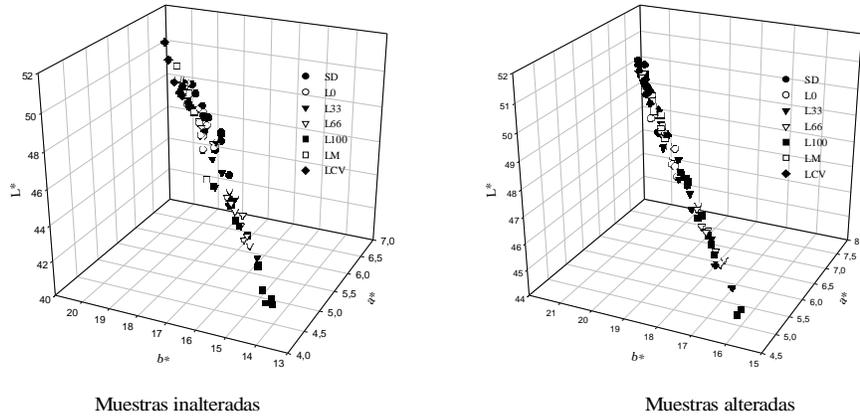


Figura 3. Distribución de los tres atributos del color ($L^*a^*b^*$) del Andosol bajo los sistemas de manejo comparados para muestras inalteradas y alteradas.

contenido de carbono total. Los valores de los tres atributos del color, determinados a partir de las muestras alteradas, superaron, en promedio, en 4.3, 8.9 y 8.7%, los valores de L^* , a^* y b^* , respectivamente, a los obtenidos en las muestras inalteradas. Estas diferencias se atribuyen al efecto de la homogeneización de las muestras durante su paso por el tamiz de malla de 2 mm. Según Sánchez-Marañón *et al.* (1995), la molienda y la homogeneización de suelo cambian significativamente el color de la muestra, donde el atributo más afectado es la luminosidad, responsable principal de las diferencias detectadas en el presente estudio. Matthias *et al.* (2000) notaron que al moler la muestra, suavizando su heterogeneidad a través del paso por un tamiz de malla < 2 mm, se registran incrementos significativos del albedo de suelo.

Efecto del Manejo del Suelo sobre el Color del Andosol

A pesar de la similitud aparente de las gráficas presentadas en la Figura 3, el color del Andosol estudiado se modificó significativamente ($P < 0.01$) por el manejo. Las diferencias significativas se obtuvieron para los dos tipos de muestras analizadas (Cuadro 2), donde los coeficientes de variación fluctuaron entre 1.83 y 6.20. De acuerdo con los resultados estadísticos, la respuesta del color del Andosol al tipo de manejo cambia en función de la rugosidad superficial del suelo, producto de su preparación mecánica.

Los valores máximos de los atributos de color, determinados a partir de las muestras inalteradas y

Cuadro 2. Atributos $L^*a^*b^*$ y diferencias en color entre los sistemas de manejo del Andosol comparados.

Manejo	Parámetros CIELAB							
	Muestras inalteradas				Muestras alteradas			
	L^*	a^*	b^*	ΔE^*_{ab}	L^*	a^*	b^*	ΔE^*_{ab}
SD	47.02 b	6.14 a	18.23 b	2.06 c	49.75 a	6.75 a	20.41 a	0.74 c
L0	47.06 b	6.00 a	18.30 b	2.01 c	48.54 b	6.37 b	19.56 b	1.81 b
L33	45.31 c	5.28 b	16.62 c	4.48 b	47.11 c	5.82 c	18.24 c	3.76 a
L66	44.65 c	5.20 b	16.25 c	5.22 b	46.48 c	5.73 c	17.79 c	4.54 a
L100	43.52 d	4.86 c	15.43 d	6.66 a	46.73 c	5.66 c	17.80 c	4.34 a
LM	48.14 a	6.20 a	19.16 a	0.89 cd	49.56 a	6.54 ab	20.07 ab	0.79 c
LCV	48.68 a	6.22 a	19.42 a	0.67 d	50.14 a	6.58 ab	20.32 a	0.50 c
\bar{X}	46.34	5.69	17.63		48.33	6.2	19.17	

Medias con la misma letra dentro de cada columna no son significativamente diferentes ($P < 0.01$), según la prueba de rango múltiple de Duncan. L^* : luminosidad; a^* y b^* : coordenadas de cromaticidad; ΔE^*_{ab} : diferencia en color. SD: suelo desnudo; L0, L33, L66 y L100: labranza cero con 0, 33, 66 y 100% de residuos orgánicos sobre la superficie del suelo; LM: labranza mínima; LCV: labranza convencional.

referidas a las coordenadas CIE $L^*a^*b^*$, se obtuvieron para los sistemas de manejo LCV y LM. Por el contrario, los valores mínimos de los atributos especificados y para las tres coordenadas cuantificadas coincidieron con el sistema L100, mientras que L33 y L66 formaron otro grupo estadísticamente diferente con los valores ligeramente superiores a L100. La respuesta del color del Andosol al manejo, documentada para muestras alteradas, fue ligeramente diferente en comparación con lo discutido para las muestras inalteradas. En este caso, el grupo con los valores máximos de luminosidad (L^*) correspondió a LCV, LM y SD. Para la coordenada a^* , el valor máximo se obtuvo en el suelo desnudo; para la coordenada b^* , el valor máximo se documentó para el suelo desnudo y la labranza convencional. Es importante resaltar que en ambos tipos de muestras, los valores mínimos de los atributos del color coincidieron con los sistemas de manejo L33, L66 y L100, refiriéndose a las tres coordenadas. El color del Andosol bajo el sistema de manejo L0, determinado a partir de muestras alteradas, ocupó la posición intermedia entre las tendencias arriba discutidas.

Para los dos tipos de muestras, la desviación estándar de los datos en todos los sistemas de manejo comparados fue mayor para el atributo L^* , seguido por el b^* y el a^* , en ese orden. En este caso, la luminosidad contribuyó más a la variabilidad de los resultados, destacando los tratamientos L33, L100 y L66, los cuales presentaron una máxima desviación estándar; la menor desviación se encontró en LCV y LM. Sánchez-Marañón *et al.* (1995) también encontraron que 89% de las diferencias en color en muestras homogeneizadas y molidas fueron atribuibles al factor luminosidad. Del análisis de las lecturas de color se desprende que, para los dos tipos de muestras (alteradas e inalteradas), los valores mínimos de los atributos CIE $L^*a^*b^*$ se presentan en el Andosol bajo los sistemas de manejo de conservación (L100, L66 y L33). Lo anterior se relaciona con el hecho de que, al no remover el suelo y adicionarle de manera constante los residuos orgánicos, a largo plazo se origina un mayor oscurecimiento de la capa superficial, originado por el incremento en el carbono total, lo que resulta en una reducción de su luminosidad y de los valores de las coordenadas a^* y b^* de la cromaticidad. Al lado opuesto están los sistemas de manejo LCV y LM, los cuales mostraron una estabilidad de los atributos del color que siempre se han mantenido a niveles máximos, en comparación con otros tratamientos. El efecto del manejo de Andosol sobre los atributos de color,

documentado en el presente estudio, es similar al encontrado por Post *et al.* (2000).

Las máximas diferencias de color absoluto (ΔE^*_{ab}) del Andosol se encontraron en las muestras inalteradas y en los sistemas de manejo con labranza cero y residuos orgánicos. Durante la comparación, destacó el lote L100, con 6.6 unidades de $L^*a^*b^*$; la misma variable, en los lotes de L66 y L33, tuvo valores significativamente inferiores. La diferencia en color más cercana a LCV aunque estadísticamente diferente a éste, fue el lote con laboreo mínimo (LM), donde ΔE^*_{ab} llegó sólo a 0.89 unidades. En el Cuadro 2 se observa que la tendencia en la diferencia del color, determinada a partir del análisis de las muestras alteradas, se ha mantenido en las muestras inalteradas, donde es notorio que el valor máximo de ΔE^*_{ab} fue significativamente menor en muestras alteradas (4.54 unidades). Por otra parte, el sistema de manejo L0 conservó la diferencia en su color tan pequeña con respecto a LM y SD, de manera que se puede afirmar que todos estos últimos tratamientos presentan el mismo color que el Andosol del lote con el laboreo convencional (LCV). Estas diferencias en color se atribuyen a la dinámica de la rugosidad superficial del suelo, el carbono total y el efecto de la pendiente del terreno, lo cual coincide con los factores reportados por Post *et al.* (2000), Ritchie (2001) y Matthias *et al.* (2000). Según Schulze *et al.* (1993), la pigmentación oscura de la materia orgánica proviene principalmente del ácido húmico y es el causante del oscurecimiento del color del suelo a largo plazo (Miclailova y Orlov, 1986).

Relación entre el CIE $L^*a^*b^*$ y CT

El manejo del suelo, analizado a partir de los valores promedio obtenidos para toda la parcela (12 en total por cada lote), mejoró la relación entre el CT y los atributos del CIE $L^*a^*b^*$, conservando la tendencia hacia la linealidad negativa. De acuerdo con los modelos de regresión (Cuadro 3), la tendencia de la relación negativa indica que conforme se incrementa el carbono total,

Cuadro 3. Modelos de regresión lineal entre el carbono total (CT) y los atributos del sistema de color $L^*a^*b^*$.

Muestras inalteradas	Muestras alteradas
$L^* = 51.34 - 1.71 (CT) \quad R^2 = 0.68$	$L^* = 53.03 - 1.61 (CT) \quad R^2 = 0.90$
$a^* = 7.315 - 0.55 (CT) \quad R^2 = 0.79$	$a^* = 7.61 - 0.48 (CT) \quad R^2 = 0.92$
$b^* = 21.72 - 1.40 (CT) \quad R^2 = 0.70$	$b^* = 22.79 - 1.24 (CT) \quad R^2 = 0.91$

los valores del CIE $L^*a^*b^*$ que se asocian a la dinámica de la coloración superficial del Andosol estudiado, disminuyen. En estas relaciones, los valores de la pendiente y el intercepto establecidos para ambos tipos de muestras fueron significativamente diferentes de uno y cero, respectivamente ($P < 0.01$).

Fernández *et al.* (1988) documentaron una tendencia similar para el cambio de color estimado con Munsell, en función de la materia orgánica en muestras de suelos de textura franco-limosa pasadas por tamiz.

Con base en los modelos de regresión obtenidos en el presente estudio es factible, con un adecuado grado de confianza, predecir los atributos del color del Andosol a partir del carbono total (y *viceversa*), en condiciones secas en cualquiera de los sistemas de manejo comparados. Estos resultados coinciden con aquéllos reportados por Schulze *et al.* (1993). Sin embargo, a pesar de una mayor variación de los atributos del color en muestras inalteradas, la importancia de su medición en el suelo no tamizado es difícil de subestimar en cuanto se refiere a los estudios relacionados con la percepción remota.

CONCLUSIONES

- Con el sistema color propuesto (CIELAB) se identificaron diferencias numéricamente significativas del color del suelo entre los sistemas de manejo. Los valores de los atributos L^* (luminosidad), a^* y b^* (variables de cromaticidad) del sistema labranza cero con 100% de residuos fueron marcadamente inferiores en el orden de 11, 22 y 20%, respectivamente, con relación a los atributos del sistema convencional. Los cambios en el color del suelo se atribuyen a la rugosidad superficial, el efecto de pendiente del terreno y el carbono total.
- El carbono total mostró una tendencia negativa en los atributos $L^*a^*b^*$ en el Andosol estudiado. La luminosidad y las variables a^* y b^* en labranza cero con mayor carbono total disminuyeron (color más oscuro) con respecto a los sistemas de manejo LCV y LM (color más claro).
- El color del suelo fue un buen indicador integral para definir la calidad física del Andosol bajo diferentes sistemas de manejo de largo plazo.
- El sistema de color propuesto (CIELAB) permite valorar numéricamente los atributos de color, los cuales superan la precisión de la evaluación visual.

- Los atributos de color (L^* , a^* y b^*) determinados a partir de las muestras alteradas fueron mayores en 4.3, 8.9 y 8.7%, respectivamente, con relación a las muestras inalteradas.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo otorgado a través, del proyecto G-33156-B "Definición y Mapeo de Indicadores para el Manejo Sostenible del Suelo" y del proyecto V42571Z "Física Ambiental: Percepción Remota Multiescalar de la Calidad Física de Suelos".

Al laboratorio de Fertilidad de suelos del Colegio de Postgraduados por su valiosa colaboración en el análisis del carbono total, así como al Dr. José Manuel Hernández Alcántara y Dr. Enrique Camarillo García del Instituto de Física de la UNAM por la continua asesoría en el manejo y la calibración del Chroma-Metro.

LITERATURA CITADA

- Alcalá de Jesús, M., C. A. Ortiz-Solorio y Ma. del C. Gutiérrez-Castorena. 2001. Clasificación de los suelos de la Meseta Tarasca, Michoacán. *Terra* 19: 227-239.
- Barret, L. R. 2002. Spectrophotometric color measurement *in situ* in well drained sandy soils. *Geoderma* 108: 49-77.
- Bedidi, A., B. Cervelle, J. Madeira, and M. Pouget. 1992. Moisture effects on visible spectral characteristics of lateritic soils. *Soil Sci.* 153: 129-141.
- Campos-Cascaredo, A., K. Oleschko, L. Cruz-Huerta, J. D. Etchevers-Barra, C. Hidalgo-Moreno. 2001. Estimación de alófono y su relación con otros parámetros químicos en Andisoles de montaña del volcán Cofre de Perote. *Terra* 19: 105-116.
- CIE. (Commission Internationale de l'Éclairage). 1978. Recommendations on uniform color spaces, color difference and psychometric color terms. Suppl. No. 2 to Publ. CIE No. 15 (E-1.3.1), 1971, (TC-1.3) 1978. CIE Central Bureau. Paris, France.
- Ding, G., J. M. Novakb, D. Amarasirwardenac, P. G. Huntb, and B. Xing. 2002. Soil organic matter characteristics as affected by tillage management. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66: 421-429.
- Egawa, T. 1980. Propiedades de los suelos derivados de cenizas volcánicas. pp. 14-67. *In*: Y. Ishizuka y C.A. Black (eds.). Suelos derivados de cenizas volcánicas en Japón. CIMMYT. México, D.F.
- Fernández, R. N. and D. G. Schulze. 1987. Calculation of soil color from reflectance spectra. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 51: 1277-1282.
- Franzluebbers, A. J. 2002. Soil organic matter stratification ratio as an indicator of soil quality. *Soil Till. Res.* 66: 95-106.
- Franzmeier, D. P., J. E. Yahner, G. C. Steinhardt, and H. R. Sinclair, Jr. 1983. Color patterns and water table levels in some Indiana soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 47: 1196-1202.

- Harden, J. W. 1982. A quantitative index of soil development from field descriptions: examples from a chronosequence in central California. *Geoderma* 28: 1-28.
- Loveland, P. J., J. Webb, and P. Bellamy. 2001. Critical levels of soil organic matter: the evidence for England and Wales. pp. 23-33. *In*: R. M. Rees, B. C. Ball, C. D. Campbell, and C. A. Watson (eds.). Sustainable management of soil organic matter. CABI Publishing. Wallingford, UK.
- Matthias, A. D., A. Fimbres, E. E. Sano, D. F. Post, L. Accioly, A. K. Batchily, and L. G. Ferreira. 2000. Surface roughness effects on soil albedo. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64: 1035-1041.
- Miclailova, N. A. y D. S. Orlov. 1986. Las propiedades ópticas del suelo y de sus principales componentes (en Ruso). Editorial Nauta. Moscú, Rusia.
- Nelson, D. W. and L. E. Sommers. 1982. Total carbon, organic carbon, and inorganic carbon. pp. 539-577. *In*: A. L. Page (ed.). Methods of soil analysis. Part 2. 2nd ed. Agron. Monogr. 9. American Society of Agronomy- Soil Science Society of America. Madison, WI, USA.
- Post, D. F., R. B. Bryant, A. K. Batchily, A. R. Huete, S. J. Levine, M. D. Mays, and R. Escadafal. 1993. Correlations between field and laboratory measurements of soil color. pp. 159. *In*: J. M. Bigham and E. J. Ciolkosz (eds.). Soil color. Special publication. 31. Soil Science Society of America. Madison, WI, USA.
- Post, D. F., A. Fimbres, A. D. Matthias, E. E. Sano, L. Accioly, A. K. Batchily, and L. G. Ferreira. 2000. Predicting soil albedo from soil color and spectral reflectance data. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64: 1027-1034.
- Potter K. N., H. A. Torbert, H. B. Johnson, and C. R. Tischler. 1999. Carbon storage after long-term grass establishment on degraded soils. *Soil Sci.* 164: 718-725.
- Ritchie, J. C. 2001. ¹³⁷Cesium for measuring soil erosion and redeposition: application for understanding soil carbon. pp. 403-416. *In*: R. Lal, J. M. Kimble, R. F. Follet, and B. A. Stewart (eds.). Assessment methods for soil carbon. Lewis Publishers. Boca Raton, FL, USA.
- Sanchez-Marañón, M., G. Delgado, R. Delgado, M. Perez, and M. Melgosa. 1995. Spectroradiometric and visual color measurements of disturbed and undisturbed soil samples. *Soil Sci.* 160: 291-303.
- SAS Institute. 1990. SAS user' guide: Statistics. Release 6. SAS Institute. Cary, NC, USA.
- Schulze, D. G., J. L. Nagel, G. E. van Scoyoc, T. L. Henderson, and M. F. Baumgardner. 1993. Significance of organic matter in determining soil colors. pp. 71-90. *In*: J. M. Bigham and E. J. Ciolkosz (eds.). Soil color. Special publication 31. Soil Science Society of America. Madison, WI, USA.
- Soares, L. G., I. Vitorello, and A. R. Formaggio. 1997. Relationships of spectral reflectance and color among surface and subsurface horizons of tropical soil profiles. *Remote Sens. Environ.* 61: 24-33.
- Steel, R. G. D. and J. H. Torrie. 1985. Bioestadística: principios y procedimientos. McGraw-Hill. México, D. F.
- Stokman, H. M. G., T. Gevers, and J. J. Koenderink. 2000. Color measurement by imaging spectrometry. *Computer Vision and Image Understanding* 79: 236-249.
- Tiscareño-López, M., A. D. Báez-González, M. Velázquez-Valle, K. N. Potter, J. J. Stone, M. Tapia-Vargas, and R. Claverán-Alonso. 1999. Agricultural research for watershed restoration in central Mexico. *J. Soil Water Conserv.* 54: 686-692.
- Velásquez-Valle M. A., M. R. Martínez-Menes, M. Bravo-Espinosa, J. J. Velázquez-García, K. N. Potter, M. Tiscareño-López. 2006. Erosionabilidad acanalada de un Andosol en dos sistemas de labranza en la Meseta Tarasca, Michoacán. *Terra Latinoamericana* 24: 119-123.

