

The color of urban dust as an indicator of heavy metal pollution

El color del polvo urbano como indicador de contaminación por metales pesados

Rafael García¹; Carmen Delgado²; Rubén Cejudo²; Anahí Aguilera³; Avto Gogichaishvili²; Francisco Bautista^{1*}

¹Universidad Nacional Autónoma de México, Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, Laboratorio Universitario de Geofísica Ambiental. Antigua Carretera a Pátzcuaro núm. 8701, col. Exhacienda de San José de la Huerta. C. P. 58190. Morelia, Michoacán, México.

²Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geofísica, Laboratorio Universitario de Geofísica Ambiental. Antigua Carretera a Pátzcuaro núm. 8701, col. Exhacienda de San José de la Huerta. C. P. 58190. Morelia, Michoacán, México.

³Universidad Nacional Autónoma de México, Posgrado en Ciencias Biológicas. Antigua Carretera a Pátzcuaro núm. 8701, col. Exhacienda de San José de la Huerta. C. P. 58190. Morelia, Michoacán, México.
*Corresponding author: leptosol@ciga.unam.mx; tel.: +52 (443) 322 3869.

Abstract

Introduction: Urban dust contains heavy metals (HMs) that pose a risk to human health.

Objective: To evaluate the color of urban dust as an indicator of HM pollution in Mexico City.

Materials and methods: Color and HMs (Ba, Cr, Cu, Pb, Mn, Ni, V and Zn) were measured in 455 dust samples, and redness and saturation rates were calculated. Based on color, groups of samples were formed using cluster analysis. Multiple regression analysis between HMs and indices by color groups was performed, as well as a Kruskal-Wallis analysis of HMs by color groups.

Results and discussion: Urban dust samples were classified as dark grayish brown (I), dark gray (II), dark olive brown (III), very dark gray (IV), grayish brown (V) and black (VI). Multiple linear regressions between color indices and HMs showed high and significant correlation ($P < 0.05$) in groups I, II, III and IV. Urban dust HMs were generally found in the order $Zn > Mn > Ba > Pb > Cu > Cr > Ni > V$. Also, Cr, Cu, Ni, Pb and Zn showed significant differences ($P < 0.05$) among the color groups; the samples from very dark gray to black were the most polluted, and those of dark grayish brown had lower HM contents.

Conclusions: Urban dust color is an indicator of heavy metal pollution in Mexico City.

Resumen

Introducción: El polvo urbano contiene metales pesados (MP) que representan un riesgo para la salud humana.

Objetivo: Evaluar el color del polvo urbano como indicador de la contaminación por MP en la Ciudad de México.

Materiales y métodos: El color y los MP (Ba, Cr, Cu, Pb, Mn, Ni, V y Zn) se midieron en 455 muestras de polvo, y los índices de rojez y saturación se calcularon. Con base en el color, se formaron grupos de muestras utilizando un análisis de conglomerados. Se hicieron análisis de regresión múltiple entre los MP y los índices por grupos de color, y análisis de Kruskal-Wallis de los MP por grupos de color.

Resultados y discusión: Las muestras de polvo urbano se clasificaron en marrón grisáceo oscuro (I), gris oscuro (II), marrón oliva oscuro (III), gris muy oscuro (IV), marrón grisáceo (V) y negro (VI). Las regresiones lineales múltiples entre los índices de color y los MP mostraron correlación alta y significativa ($P < 0.05$) en los grupos I, II, III y IV. Los MP del polvo urbano se encontraron de manera general en el orden $Zn > Mn > Ba > Pb > Cu > Cr > Ni > V$. El Cr, Cu, Ni, Pb y Zn presentaron diferencias significativas ($P < 0.05$) entre los grupos de color; las muestras de color gris muy oscuro a negro fueron las más contaminadas, y las de color marrón grisáceo oscuro tuvieron contenidos menores de MP.

Conclusiones: El color del polvo urbano es un indicador de la contaminación por metales pesados en la Ciudad de México.

Keywords: Mexico City, redness index; saturation index; Zinc, Munsell.

Palabras clave: Ciudad de México, índice de rojez; índice de saturación; zinc, Munsell.

Introduction

Urban dust is a mixture of physical, chemical and biological materials caused by natural processes such as volcanic activity, soil erosion, forest fires (Chen, Lu, Li, Gao, & Chang, 2014; Luo, Yu, Zhu, & Li, 2012) and anthropic processes such as industrial ones (Liu, Liu, Yin, Zhang, & Zhang, 2014), vehicular traffic (Aguilar et al., 2013; Cortés et al., 2017; Peña-García, Maciel-Flores, Rosas-Elguera, & Rentería-Tapia, 2016; Sánchez-Duque et al., 2015; Zafra, Temprano, & Tejero, 2011), garbage and weathering of buildings (García-Rico et al., 2016).

The size of urban dust particles varies from very coarse fractions, the size of sand, to inhalable particles called $PM_{0.1}$, $PM_{2.5}$ and PM_{10} ranging in size between 0.1 and 10 μm . Urban dust often contains heavy metals (HMs), such as Pb, V, Cr, Cu and Zn; inhaling them poses a high health risk (Luo et al., 2012; Sabath & Robles-Osorio, 2012). The World Health Organization has stated that, annually, about 7 million people die from air pollution and diseases related to environmental pollution (World Health Organization [WHO], 2014).

HM in urban dust are measured using costly, time-consuming chemical analysis techniques that generate hazardous waste, which is why proxy analysis techniques have been developed that are economical, fast and non-polluting. One of these proxy techniques is the use of color as an indicator of urban dust contaminated by HMs, which has been successfully tested in the city of Ensenada, Mexico (Cortés, Bautista, Quintana, Aguilar, & Goguichaishvili, 2015) and Murcia, Spain (Marín et al., 2018).

In recent years, equipment has been designed to measure color (reflectance and light transmission) in solid samples, and optical color systems such as the CIE-L*a*b*, CIE-RGB, and Munsell ones (Vodyanitskii & Savichev, 2017), which provide useful quantitative parameters for calculating color indices (chroma, saturation and redness). With the color parameters and indices it has been possible to establish mathematical relationships with the concentrations of HM in urban dust (Cortés et al., 2015; Marín et al., 2018).

The objective of the present study was to assess the color of urban dust as an indicator of HM pollution in Mexico City.

Materials and methods

Mexico City (CDMX) covers an area of 1 485 km² and is located at 2 240 masl. The city is surrounded by volcanic mountains that impede the passage of the wind, causing atmospheric pollutants not to disperse easily. CDMX is home to 8.9 million people and has a population density of 5 966 inhabitants·km⁻², 4 million

Introducción

El polvo urbano es una mezcla de materiales físicos, químicos y biológicos originados por procesos naturales como la actividad volcánica, erosión de suelos, incendios forestales (Chen, Lu, Li, Gao, & Chang, 2014; Luo, Yu, Zhu, & Li, 2012) y procesos antrópicos como los industriales (Liu, Liu, Yin, Zhang, & Zhang, 2014), el tráfico vehicular (Aguilar et al., 2013; Cortés et al., 2017; Peña-García, Maciel-Flores, Rosas-Elguera, & Rentería-Tapia, 2016; Sánchez-Duque et al., 2015; Zafra, Temprano, & Tejero, 2011), la basura y el intemperismo de los edificios (García-Rico et al., 2016).

El tamaño de las partículas del polvo urbano es variable, desde fracciones muy gruesas del tamaño de las arenas hasta partículas respirables denominadas $PM_{0.1}$, $PM_{2.5}$ y PM_{10} de tamaño entre 0.1 a 10 μm . A menudo, el polvo urbano contiene metales pesados (MP) como el Pb, V, Cr, Cu y Zn; cuya inhalación es de alto riesgo para la salud (Luo et al., 2012; Sabath & Robles-Osorio, 2012). La Organización Mundial de la Salud ha declarado que, anualmente, alrededor de 7 millones de personas mueren por contaminación atmosférica y por otras enfermedades relacionadas con la contaminación del ambiente (World Health Organization [WHO], 2014).

Los MP en el polvo urbano se miden a través de métodos químicos costosos que consumen tiempo de análisis y que generan residuos peligrosos, por lo cual se han desarrollado técnicas de análisis denominadas *proxy* que son económicas, rápidas y no contaminantes. Una de estas técnicas *proxy* es el uso del color como indicador de contaminación del polvo urbano por MP, la cual ha sido probada con éxito en la ciudad de Ensenada, México (Cortés, Bautista, Quintana, Aguilar, & Goguichaishvili, 2015) y Murcia, España (Marín et al., 2018).

En los últimos años se han diseñado equipos para la medición del color (reflectancia y transmisión de la luz) en muestras sólidas, y sistemas ópticos de color como CIE-L*a*b*, CIE-RGB, además del Munsell (Vodyanitskii & Savichev, 2017), que proporcionan parámetros cuantitativos útiles para el cálculo de los índices de color (cromaticidad, saturación y rojez). Con los parámetros e índices de color ha sido posible establecer relaciones matemáticas con las concentraciones de los MP en el polvo urbano (Cortés et al., 2015; Marín et al., 2018).

El objetivo del presente estudio fue evaluar el color del polvo urbano como indicador de la contaminación por MP en la Ciudad de México.

Materiales y métodos

La Ciudad de México (CDMX) tiene superficie de 1 485 km² y está ubicada a una altitud de 2 240 m. La ciudad

vehicles and 40 000 small and medium-sized industries that influence environmental pollution.

Urban dust sampling and analysis

Urban dust samples were taken at 455 sites. The dust sample was collected in the street, on the sidewalks, in 1 m² areas. Stones, leaves and branches were separated and the dust was collected using a brush and plastic dustpan to avoid contamination by metal particles. Samples were deposited in polyethylene bags, labeled and georeferenced. Subsequently, the urban dust samples were dried in the shade and screened with a 250- μ mesh.

The urban dust was subjected to acid digestion according to U.S. EPA method 3051A (United States Environmental Protection Agency, 2007a). For this, a 0.4-g urban dust subsample was digested with 20 mL of concentrated HNO₃. In the heating program, the temperature of each sample increased to 175 \pm 5 °C during approximately 5 min and was maintained for 4.5 min. The extract was filtered using Whatman No. 42 paper, transferred to a 50-mL flask and then flushed to volume with type A distilled water. Quality control for the acid digestion method included reagent or control blanks and duplicate samples. The quality assurance and quality control (QA/QC) results showed no signs of contamination or losses in the analyses.

The digested urban dust samples were analyzed with an ICP-OES spectrometer (Agilent Technologies 5100) in accordance with U.S. EPA Method 6010C (2007b). The calibration curve was developed with multi-element QCS-26R solutions (high purity). The HM analyses were carried out at the National Autonomous University of Mexico's Environmental Biogeochemistry Laboratory.

The detection and quantification limits of the analyzed elements (mg·L⁻¹) were Ba (0.02 and 0.06), Cr (0.01 and 0.04), Cu (0.01 and 0.02), Mn (0.04 and 0.12), Ni (0.01 and 0.05), Pb (0.03 and 0.12), V (0.01 and 0.05) and Zn (0.02 and 0.10). The limits refer to the minimum concentration that the method detected and reliably quantified.

Urban dust color was measured with a Konica Minolta Cr-5 colorimeter (Japan); color parameters L, a, b were determined by the CIE-L*a*b* system and the parameters X, Y, Z from the CIE-XYZ system. With the color parameters of the CIE-L*a*b* system, the redness index (RI_{lab}) (Vodyanitskii & Savichev, 2017) was determined using the following equation:

$$RI_{lab} = \frac{L(a^2 + b^2)^{0.5} 10^{10}}{bL^6}$$

está rodeada de montañas volcánicas que impiden el paso del viento, ocasionando que los contaminantes atmosféricos no se dispersen fácilmente. En la CDMX habitan 8.9 millones de personas y su densidad de población es de 5 966 habitantes·km⁻², circulan 4 millones de vehículos y funcionan 40 000 industrias pequeñas y medianas que influyen en la contaminación ambiental.

Muestreo y análisis del polvo urbano

Se tomaron muestras de polvo urbano en 455 sitios. La muestra de polvo se recolectó en la calle, sobre las banquetas, en áreas de 1 m². Las piedras, hojas y ramas se separaron y el polvo se recogió utilizando una brocha y recogedor de plástico, para evitar la contaminación por partículas metálicas. Las muestras se depositaron en bolsas de polietileno, se etiquetaron y georreferenciaron. Posteriormente, las muestras de polvo urbano se secaron a la sombra y se tamizaron con una malla de 250 μ .

El polvo urbano se sometió a una digestión ácida de acuerdo con el método 3051A de la U. S. EPA (United State Environmental Protection Agency, 2007a). Para ello, una submuestra de polvo urbano de 0.4 g se dirigió con 20 mL de HNO₃ concentrado. En el programa de calentamiento, la temperatura de cada muestra incrementó a 175 \pm 5 °C durante aproximadamente 5 min y se mantuvo por 4.5 min. El extracto se filtró utilizando papel Whatman núm. 42, se transfirió a un matraz de 50 mL y se aforó con agua destilada tipo A. El control de calidad para el método de digestión ácida incluyó reactivos blanco o testigo y muestras duplicadas. Los resultados de garantía de calidad y control de calidad (QA/QC) no mostraron signos de contaminación o pérdidas en los análisis.

Las muestras de polvo urbano digeridas se analizaron con un espectrómetro ICP-OES (Agilent Technologies 5100) de acuerdo con el método 6010C de la U. S. EPA (2007b). La curva de calibración se elaboró con soluciones QCS-26R de varios elementos (alta pureza). Los análisis de los MP se realizaron en el Laboratorio de Biogeoquímica Ambiental de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Los límites de detección y cuantificación de los elementos analizados (mg·L⁻¹) fueron Ba (0.02 y 0.06), Cr (0.01 y 0.04), Cu (0.01 y 0.02), Mn (0.04 y 0.12), Ni (0.01 y 0.05), Pb (0.03 y 0.12), V (0.01 y 0.05) y Zn (0.02 y 0.10). Los límites se refieren a la concentración mínima que el método detectó y cuantificó con confiabilidad.

El color del polvo urbano se midió con un colorímetro Konica Minolta Cr-5 (Japón); los parámetros de color L,

where,

L = brightness parameter

a = red-green coordinate

b = yellow-blue coordinate.

The CIE-RGB system is based on the sum of the primary colors, namely R (red), G (green) and B (blue), according to the tristimulus theory. This system has a larger number of indices that enable describing the properties of the sample, such as the redness index (RI), hue index (HI) and saturation index (SI). For the use of this system, it was necessary to transform the CIE-XYZ color parameters to the CIE-RGB ones (Cortés et al., 2015).

For the CIE-XYZ transformation, parameters X, Y and Z were scaled between 0 and 1, and then the 3 x 3 square matrix was used for the standard illuminant D65 with 2° observation angle (Viscarra-Rossel, Fouad, & Walter, 2008):

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

The HI, SI and RI indices were calculated using the RGB parameters (Cortés et al, 2015; Levin, Ben-Dor, & Singer, 2005; Mathieu, Poujet, Cervelle, & Escafal, 1998), from the following equations:

$$HI = (2R - G - B) / (G - B)$$

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

$$RI = R^2 / BG^3$$

The HI records the primary colors red, green, and blue, and the SI records neutral colors such as gray (Mathieu et al., 1998). These indices are the result of simplifying the saturation and hue equations (Liu & Moore, 1990). The RI provides the hematite content and an approximation of soil redness.

Relationship between color and heavy metals

The urban dust samples were grouped using the SI and RI color indices and cluster analysis, due to the opaque and dark tones observed with the naked eye in the urban dust (between grays and blacks) samples. The HI was not used because it is an index susceptible to primary colors, which were not presented in the urban dust of Mexico City. The color name of each group was identified with the Munsell tables (Munsell Color Laboratory, 2000).

The relationship between urban dust color by RI and SI (dependent variables) and HMs such as Ba, Cr, Cu, Pb,

a, b se determinaron mediante el sistema CIE-L*a*b*, y los parámetros X, Y, Z a partir del sistema CIE-XYZ. Con los parámetros de color del sistema CIE-L*a*b* se determinó el índice de rojez (IR_{Lab}) (Vodyanitskii & Savichev, 2017) mediante la siguiente ecuación:

$$RI_{Lab} = \frac{L(a^2 + b^2)^{0.5} 10^{10}}{bL^6}$$

donde,

L = parámetro de luminosidad

a = coordenada rojo-verde

b = coordenada amarillo-azul.

El sistema CIE-RGB se basa en la suma de colores primarios, R (rojo), G (verde) y B (azul) de acuerdo con la teoría de triestímulos. Este sistema cuenta con un mayor número de índices que posibilitan la descripción de las propiedades de la muestra, tales como el índice de rojez (IR), índice de matiz (IH) e índice de saturación (IS). Para el uso de este sistema fue necesaria la transformación de los parámetros de color CIE-XYZ a CIE-RGB (Cortés et al., 2015).

Para la transformación de CIE-XYZ, se escalaron los parámetros X, Y y Z entre 0 y 1, y posteriormente se utilizó la matriz cuadrada 3 x 3 para el iluminante estándar D_{65} con ángulo de observación a 2° (Viscarra-Rossel, Fouad, & Walter, 2008):

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

Los índices IH, IS e IR se calcularon con los parámetros RGB (Cortés et al, 2015; Levin, Ben-Dor, & Singer, 2005; Mathieu, Poujet, Cervelle, & Escafal, 1998), a partir de las siguientes ecuaciones:

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

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

$$IR = R^2 / BG^3$$

El IH registra los colores primarios como el rojo, el verde y el azul, y el IS registra los colores neutros como el gris (Mathieu et al., 1998). Estos índices son el resultado de la simplificación de las ecuaciones de saturación y matiz (Liu & Moore, 1990). El IR proporciona el contenido de hematita y una aproximación de la rojez del suelo.

Relación entre el color y los metales pesados

Las muestras de polvo urbano se agruparon utilizando los índices de color IS e IR y análisis de conglomerados, debido a los tonos opacos y oscuros observados a

Mn, Ni, V and Zn (independent variables) was analyzed by means of a multiple linear regression adjustment from the following equation:

$$Ind_{Col} = X_0 + \alpha_1 X_1 + \dots + \alpha_n X_n + \varepsilon$$

where,

Ind_{Col} = dependent variable (color index)

X_n = independent variables (HM)

α = number of parameters to find

ε = random prediction error.

R^2 levels were considered low ($R^2 < 0.5$), moderate ($0.5 < R^2 < 0.7$), high ($0.7 < R^2 < 0.9$) and very high ($R^2 > 0.9$), with a significance of 95 % and $P < 0.05$.

In order to identify the most contaminated color groups, the Kruskal-Wallis test (1952) was performed for each MP, considering statistically significant differences with $P < 0.05$. Subsequently, Dunn's (1964) multiple comparison test was performed to identify the statistically different groups.

Results

Formation of groups by color

Six urban dust groups were formed per color with cluster analysis; each group had a characteristic color ranging from dark grayish brown to black. The number of samples varied in the six groups: group I with 73, group II with 110, group III with 70, group IV with 45, group V with 148 and group VI only with nine (Table 1).

simple vista en las muestras de polvo urbano (entre grises y negros). El índice IH no se utilizó debido a que es un índice susceptible a los colores primarios, los cuales no se presentaron en el polvo urbano de la Ciudad de México. El nombre del color de cada grupo se identificó con las tablas Munsell (Munsell Color Laboratory, 2000).

La relación entre el color del polvo urbano mediante IR e IS (variables dependientes) y los MP como el Ba, Cr, Cu, Pb, Mn, Ni, V y Zn (variables independientes) se analizó mediante un ajuste de regresión lineal múltiple a partir de la siguiente ecuación:

$$Ind_{Col} = X_0 + \alpha_1 X_1 + \dots + \alpha_n X_n + \varepsilon$$

donde,

Ind_{Col} = variable dependiente (índice de color)

X_n = variables independientes (MP)

α = número de parámetros a encontrar







ε = error de predicción aleatoria.

Los niveles de R^2 se consideraron bajos ($R^2 < 0.5$), moderados ($0.5 < R^2 < 0.7$), altos ($0.7 < R^2 < 0.9$) y muy altos ($R^2 > 0.9$), con una significancia del 95 % y $P < 0.05$.

Con el objetivo de identificar los grupos de color más contaminados, se realizó la prueba de Kruskal-Wallis (1952) para cada MP, considerando diferencias estadísticamente significativas con $P < 0.05$. Posteriormente se hizo la prueba de comparaciones múltiples de Dunn (1964), para identificar los grupos estadísticamente diferentes.

Table 1. Groups of urban dust samples by color named according to Munsell tables.

Cuadro 1. Grupos de muestras de polvo urbano por color nombrados de acuerdo con las tablas de Munsell.

	Groups/Grupos						Total
	I	II	III	IV	V	VI	
Samples/ Muestras	73	110	70	45	148	9	455
Proportion (%)/ Proporción (%)	16	24.18	15.4	9.9	32.5	2	100
Color							
	Dark grayish brown/ Marrón grisáceo oscuro	Dark gray/ Gris oscuro	Dark olive brown/ Marrón oliva oscuro	Very dark gray/ Gris muy oscuro	Very dark grayish brown/ Marrón grisáceo muy oscuro	Black/ Negro	
L*	47.2752	39.9656	33.9493	31.7658	36.3179	27.6044	
a*	1.5060	1.6528	1.8251	1.9202	1.6222	1.9278	
b*	10.2659	9.1964	8.7871	8.6833	8.8993	7.7733	

Relationship between urban dust sample groups by color and heavy metals

The relationship between RI_{Lab} and HM concentrations was high and significant ($R^2 = 0.7$) in groups I, III and IV, and low but significant ($P < 0.05$) in groups II ($R^2 = 0.5$) and V ($R^2 = 0.3$). In group VI, the relationship was high ($R^2 = 1$) but not significant, due to the low number of samples that forced the value of R^2 (Table 2).

The analysis by multiple linear adjustment between the SI and the HMs showed a high, positive and significant multiple correlation in groups I, II, III and IV, and a low but significant correlation in group V. In group VI, the correlation was not significant due to the low number of samples ($n = 9$) (Table 3).

The RGB system's RI had a moderate to low and significant positive multiple correlation with the HMs in the order IV, I, III, II and V. Only group VI had a high correlation, but it was not significant (Table 4).

This analysis showed that the relationship of the CIE-L*a*b* system's RI with the HMs was higher than that of the CIE-RGB system's RI, due to greater variability of the CIE-L*a*b* system's coordinates.

Resultados

Formación de los grupos por color

Se conformaron seis grupos de polvo urbano por color con un análisis de conglomerados; cada grupo tuvo un color característico que va entre el marrón grisáceo oscuro al negro. El número de muestras varió en los seis grupos: el grupo I con 73, grupo II con 110, grupo III con 70, grupo IV con 45, grupo V con 148 y el grupo VI solo con nueve (Cuadro 1).

Relación entre los grupos de muestras del polvo urbano por color y los metales pesados

La relación entre el IR_{Lab} y las concentraciones de los MP fue alta y significativa ($R^2 = 0.7$) en los grupos I, III y IV, y baja pero significativa ($P < 0.05$) en los grupos II ($R^2 = 0.5$) y V ($R^2 = 0.3$). En el grupo VI, la relación fue alta ($R^2 = 1$) pero no significativa, debido al bajo número de muestras que forzó el valor de R^2 (Cuadro 2).

El análisis por ajuste lineal múltiple entre el IS y los MP presentó una correlación múltiple alta, positiva y significativa en los grupos I, II, III y IV, y correlación baja pero significativa en el grupo V. En el grupo VI, la

Table 2. Multiple linear regression of heavy metals (Cr, Cu, Ba, Pb, Mn, Ni, Zn and V) with the redness index (RI_{Lab}) in the urban dust of each color group.

Cuadro 2. Regresión lineal múltiple de los metales pesados (Cr, Cu, Ba, Pb, Mn, Ni, Zn y V) con el índice de rojez (IR_{Lab}) en el polvo urbano de cada grupo de color.

Groups/ Grupos	Color	IR_{Lab}	R^2
I	Dark grayish brown/ Marrón grisáceo oscuro	$0.65 + 0.09Cr - 0.20Cu + 0.10Ba + 0.06Pb - 0.41Mn + 0.23Ni + 0.58Zn + 0.01V - 0.16$	0.7*
II	Dark gray/ Gris oscuro	$0.67 + 0.088Cr - 0.21Cu + 0.054Ba + 0.05Pb - 0.35Mn + 0.40Ni + 0.11Zn - 0.32V - 0.06$	0.5*
III	Dark olive brown/ Marrón oliva oscuro	$0.68 + 0.09Cr - 0.21Cu + 0.05Ba + 0.05Pb - 0.35Mn + 0.4Ni + 0.12Zn - 0.33V - 0.06$	0.7*
IV	Very dark gray/ Gris muy oscuro	$0.28 + 1.29Cr - 0.17Cu + 0.14Ba + 0.83Pb - 0.48Mn + 0.13Ni + 0.01Zn - 0.42V - 0.09$	0.7*
V	Very dark grayish brown/ Marrón grisáceo muy oscuro	$0.53 - 2.22Cr - 2.14Cu - 1.35Ba + 5.09Pb - 0.167Mn - 0.17Ni - 1.89Zn - 0.71V + 1.52$	0.3*
VI	Black/Negro	$2.9 - 2.22Cr - 2.14Cu - 1.35Ba + 5.09Pb - 1.67Mn - 0.17Ni - 1.89Zn + 0.71V + 1.52$	1.0

* Significant regression ($P < 0.05$)

* Regresión significativa ($P < 0.05$)

Table 3. Multiple linear regression of heavy metals (Cr, Cu, Ba, Pb, Mn, Ni, Zn and V) with the saturation index (SI) in the urban dust of each color group.**Cuadro 3. Regresión lineal múltiple de los metales pesados (Cr, Cu, Ba, Pb, Mn, Ni, Zn y V) con el índice de saturación (IS) en el polvo urbano de cada grupo de color.**

Groups/ Grupos	Color	SI/IS	R ²
I	Dark grayish brown/ Marrón grisáceo oscuro	$0.07 - 0.29Cr - 0.24Cu + 0.06Ba + 0.13Pb + 0.18Mn + 0.18Ni + 0.17Zn + 0.19V + 0.0006$	0.7*
II	Dark gray/ Gris oscuro	$0.31 - 0.31Cr - 0.23Cu + 0.01Ba + 0.03Pb + 0.31Mn + 0.18Ni + 0.19Zn + 0.44V + 0.02$	0.6*
III	Dark olive brown/ Marrón oliva oscuro	$0.53 - 0.11Cr + 0.03Cu + 0.15Ba + 0.34Pb + 0.34Mn - 0.47Ni - 0.17Zn + 0.44V + 0.07$	0.7*
IV	Very dark gray/ Gris muy oscuro	$0.99 - 0.12Cr + 0.16Cu + 0.01Ba + 0.58Pb - 0.5Mn - 0.18Ni - 0.15Zn + 0.29V + 0.06$	0.6*
V	Very dark grayish brown/ Marrón grisáceo muy oscuro	$0.54 + 0.31Cr + 0.09Cu + 0.22Ba - 0.22Pb + 0.06Mn - 0.44Ni - 0.02Zn + 0.16V + 0.07$	0.25*
VI	Black/Negro	$0.5 - 0.88Cr - 1.45Cu - 1.50Ba + 1.5Pb - 1.9Mn - 0.52Ni + 0.94Zn + 1.7V + 1.6$	1

* Significant regression ($P < 0.05$)* Regresión significativa ($P < 0.05$)**Table 4. Multiple linear regression between heavy metals (Cr, Cu, Ba, Pb, Mn, Ni, Zn and V) and the redness index (RI) in urban dust samples grouped by colour using the CIE-RGB system.****Cuadro 4. Regresión lineal múltiple entre los metales pesados (Cr, Cu, Ba, Pb, Mn, Ni, Zn y V) y el índice de rojez (IR) en las muestras del polvo urbano agrupadas por color, mediante el sistema CIE-RGB.**

Groups/ Grupos	Color	RI/IR	R ²
I	Dark grayish brown/ Marrón grisáceo oscuro	$0.52 - 0.13Cr - 0.4Cu + 0.34Ba + 0.23Pb - 0.4Mn + 0.44Ni + 0.47Zn + 0.14V + 0.016$	0.5*
II	Dark gray/ Gris oscuro	$0.78 - 0.25Cr + 0.081Cu + 0.08Ba - 0.13Pb - 0.10Mn + 0.21Ni - 0.05Zn + 0.13V + 0.04$	0.3*
III	Dark olive brown/ Marrón oliva oscuro	$0.82 + 0.30Cr - 0.02Cu - 0.09Ba - 0.22Pb - 0.06Mn + 0.09Ni + 0.05Zn + 0.06V + 0.03$	0.4*
IV	Very dark gray/ Gris muy oscuro	$0.87 + 0.43Cr - 0.07Cu - 0.02Ba - 0.36Pb + 0.12Mn - 0.06Ni - 0.03Zn - 0.26V + 0.042$	0.6*
V	Very dark grayish brown/ Marrón grisáceo muy oscuro	$0.76 + 0.13Cr + 0.07Cu + 0.03Ba - 0.23Pb + 0.02Mn + 0.06Ni - 0.04Zn + 0.03V + 0.02$	0.2*
VI	Black/Negro	$1.33 + 0.004Cr - 0.02Cu - 0.66Ba + 0.11Pb - 0.3Mn + 0.5Ni + 0.07Zn - 0.32V - 0.16$	1

* Significant regression ($P < 0.05$)* Regresión significativa ($P < 0.05$)

Heavy metals by color groups of urban dust samples

The median values of urban dust HM concentrations were generally found in the order Zn > Mn > Ba > Pb > Cu > Cr > Ni > V; the same pattern is repeated in four of the six groups (III, IV, V and VI) and only the Mn > Zn in groups I and II (Table 5).

correlación no fue significativa debido al bajo número de muestras (n = 9). (Cuadro 3).

El IR del sistema RGB tuvo una correlación múltiple positiva de moderada a baja y significativa con los MP en el orden IV, I, III, II y V. Solo el grupo VI tuvo una correlación alta, pero no fue significativa (Cuadro 4).

Table 5. Descriptive statistics of heavy metal concentrations of urban dust samples grouped by color.

Cuadro 5. Estadística descriptiva de las concentraciones de los metales pesados de las muestras de polvo urbano agrupadas por color.

Group/ Grupo	Measures of central tendency/ Medidas de tendencia central	Ba	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	V	Zn
		(mg.kg ⁻¹)							
General (n = 455)	Median/Mediana	122.5	43.7	82.5	223.6	35.0	101.2	26.2	229.9
	CV (%)	0.4	0.7	0.8	0.3	0.4	1.1	0.3	1.1
	Minimum/Mínimo	41.2	15.0	15.0	100.0	13.7	8.8	11.3	38.7
	Maximum/Máximo	446.0	441.0	847.1	990.5	148.7	1907.8	160.0	4827.6
I (n = 73)	Median/Mediana	124.9	36.2	67.5	214.9	26.2	75.0	26.2	185.0
	CV (%)	0.4	0.5	0.7	0.2	0.4	1.2	0.2	1.0
	Minimum/Mínimo	46.2	15.0	15.0	100.0	13.7	10.0	15.0	47.5
	Maximum/Máximo	288.7	167.5	342.3	359.7	73.7	897.1	52.5	1241.6
II (n = 110)	Median/Mediana	121.2	40.0	73.1	226.1	33.7	99.9	26.2	211.8
	CV (%)	0.5	0.7	0.6	0.3	0.5	0.7	0.5	0.7
	Minimum/Mínimo	41.2	17.5	17.5	108.7	15.0	8.8	15.0	41.3
	Maximum/Máximo	446.0	308.7	306.0	511.0	148.7	371.3	160.0	1246.3
III (n = 70)	Median/Mediana	123.1	51.2	98.7	236.2	36.2	115.5	27.5	249.8
	CV (%)	0.2	0.6	0.5	0.2	0.3	1.0	0.2	0.6
	Minimum/Mínimo	66.3	22.5	28.8	138.8	16.3	32.5	16.2	88.7
	Maximum/Máximo	239.8	302.3	297.4	413.5	68.7	1141.6	40.0	1234.4
IV (n = 45)	Median/Mediana	119.9	51.2	98.7	218.6	40.0	110.0	25.0	238.6
	CV (%)	0.3	0.4	0.6	0.2	0.2	0.6	0.2	0.4
	Minimum/Mínimo	62.5	21.2	36.2	156.2	21.2	26.2	16.2	91.2
	Maximum/Máximo	239.9	127.5	404.7	386.2	63.7	452.4	41.2	546.3
V (n = 148)	Median/Mediana	120.0	46.2	85.6	225.6	37.5	101.8	25.0	246.1
	CV (%)	0.4	0.8	0.9	0.5	0.4	1.3	0.3	1.4
	Minimum/Mínimo	47.5	21.2	18.8	107.5	18.8	10.0	11.3	38.7
	Maximum/Máximo	388.5	441.0	847.1	990.5	136.2	1907.8	50.0	4827.6
VI (n = 9)	Median/Mediana	133.7	66.2	112.4	196.3	36.3	151.1	23.7	346.0
	CV (%)	0.2	0.3	0.5	0.2	0.2	0.5	0.2	0.3
	Minimum/Mínimo	87.5	32.5	57.5	152.4	22.5	70.0	21.2	162.5
	Maximum/Máximo	148.8	81.3	286.2	302.4	45.0	327.4	35.0	501.3

n = number of samples, CV = coefficient of variation.

n = número de muestras, CV = coeficiente de variación.

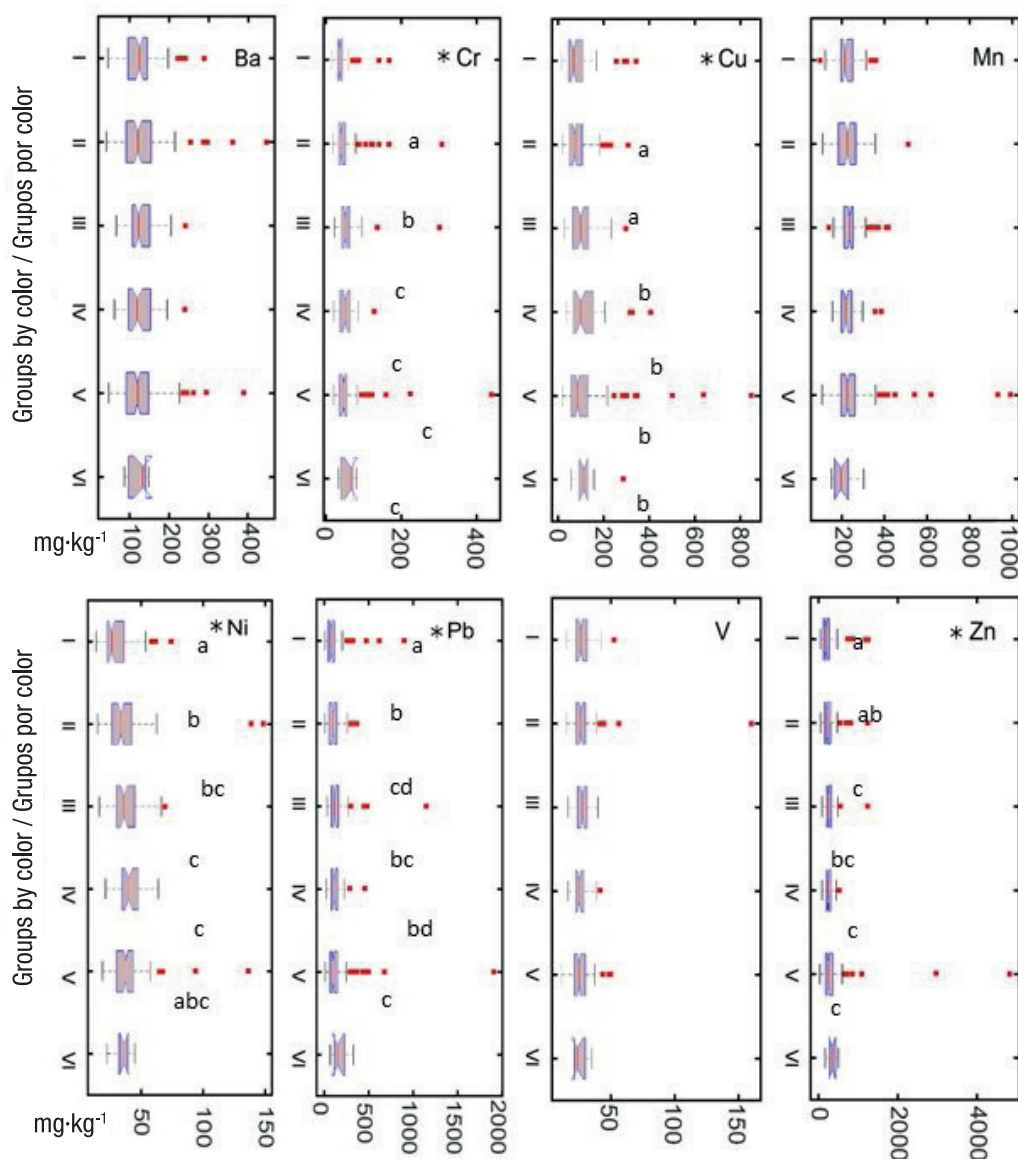


Figure 1. Comparison of medians of heavy metal concentrations by color groups of urban dusts in Mexico City. *Heavy metal concentrations with significant differences according to Dunn's multiple comparisons ($P < 0.05$).

Figura 1. Comparación de medianas de las concentraciones de los metales pesados por grupos de color de los polvos urbanos en la Ciudad de México. *Concentraciones de metales pesados con diferencias significativas de acuerdo con las comparaciones múltiples de Dunn ($P < 0.05$).

Figure 1 shows that there are differences ($P < 0.05$) in Cr, Cu, Ni, Pb, and Zn concentrations in urban dust samples grouped by color. Group I was the least contaminated as it had the lowest concentrations of Cu, Cr, Ni, Pb and Zn, while groups IV, V and VI had the highest concentrations, being the most contaminated.

Discussion

According to multiple linear regressions, Cu, Cr, Ni, Pb and Zn were the predominant HMs in terms of concentration, so they are considered coloring elements of urban CDMX dusts. The results of the present research indicate that the highest levels of

Este análisis mostró que la relación del IR del sistema CIE-L*a*b* con los MP fue más alta que con el IR del sistema CIE-RGB, debido a una mayor variabilidad de las coordenadas del sistema CIE-L*a*b*.

Metales pesados por grupos de color de las muestras del polvo urbano

Los valores de la mediana de las concentraciones de los MP del polvo urbano se encontraron de manera general en el orden $Zn > Mn > Ba > Pb > Cu > Cr > Ni > V$; el mismo patrón se repitió en cuatro de los seis grupos (III, IV, V y VI) y solo el $Mn > Zn$ en los grupos I y II (Cuadro 5).

correlation between color and HMs occur with RI (CIE- $L^*a^*b^*$) and SI (CIE-RGB), due to the dark tones of the urban dusts studied.

The SI measures the general slope of a spectra, from red to blue wavelength, which, in other words, is the relative deviation from a flat spectra characteristic of a neutral color such as grey (Liu & Moore, 1990; Mathieu et al., 1998). In this study it was observed that the SI had acceptable correlation values with HMs in all urban dust groups formed by color.

The RI is used for the identification of iron oxides; in principle, this index was calculated with the Munsell system considering the chroma, hue and value parameters (Buntley & Westin, 1965; Hurst, 1977). The RI has been one of the most used in soil sciences, so it has undergone modifications, migrating to the CIE-RGB and CIE- $L^*a^*b^*$ systems (Barrón & Torrent, 1986; Torrent, Schwertmann, Fechter, & Alferez, 1983; Torrent, Schwertmann, & Schulze, 1980). Barrón and Torrent (1986) conclude that the calculation of RI with the CIE- $L^*a^*b^*$ system reproduces absolute values with greater reliability than the Munsell system and with a better relationship with iron oxides (Kirillova, Vodyanitskii, & Sileva, 2015). This index made it possible to determine that dark colors are associated with the concentration of HMs in urban dusts.

According to studies by Vodyanitskii and Savichev (2017), color is an important characteristic for the study, description and determination of various soil properties. The use of color in urban dusts that have anthropic material and soils, and their relationship with HMs, is suitable for the estimation of pollution (Cortés et al., 2015), mainly because anthropic minerals such as magnetite and maghemite are black (Bautista-Zúñiga, Cejudo, Aguilar, & Goguitchaichvili, 2014). In other words, the use of urban dust color for the identification of HM-contaminated samples corresponds to the same strategy for the use of magnetic parameters (Aguilar et al., 2013; Sánchez-Duque et al., 2015). This is because fuel burning in industries, house chimneys and vehicle exhausts causes a magnetic increase (ferrimagnetic minerals) and a dark color, due to products generated by combustion such as maghemite and magnetite (Bautista et al., 2014).

There are still few studies that use color as a tool for identifying urban dust samples with a high content of potentially toxic elements (Cortés et al., 2015; Marín et al., 2018); however, it is clear that the use of color, as a low-cost technique, facilitates the implementation of pollution monitoring studies in urban centers. Nonetheless, a study should be conducted in each city to serve as a basis for identifying the colors of the most contaminated samples; in the case of CDMX, they were

La Figura 1 muestra que existen diferencias ($P < 0.05$) en las concentraciones de Cr, Cu, Ni, Pb y Zn en las muestras de polvo urbano agrupadas por color. El grupo I fue el menos contaminado ya que tuvo las menores concentraciones de Cu, Cr, Ni, Pb y Zn, mientras que los grupos IV, V y VI tuvieron las mayores concentraciones, siendo los más contaminados.

Discusión

Acorde con las regresiones lineales múltiples, el Cu, Cr, Ni, Pb y Zn fueron los MP predominantes en concentración, por lo que se consideran elementos colorantes de los polvos urbanos de la CDMX. Los resultados de la presente investigación indican que los niveles más altos de correlación entre el color y los MP se dan con el IR (CIE- $L^*a^*b^*$) e IS (CIE-RGB), debido a las tonalidades oscuras de los polvos urbanos estudiados.

El IS mide la pendiente general del espectro de longitud de onda de los rojos a los azules que, en otras palabras, es la desviación relativa con respecto a un espectro plano, característico de un color neutro como el gris (Liu & Moore, 1990; Mathieu et al., 1998). En este estudio se observó que el IS tuvo valores de correlación aceptables con los MP en todos los grupos de polvo urbano formados por color.

El IR se utiliza para la identificación de los óxidos de hierro; en principio, este índice se calculaba con el sistema Munsell considerando los parámetros cromaticidad, matiz y valor (Buntley & Westin, 1965; Hurst, 1977). El IR ha sido uno de los más usados en las ciencias del suelo, por lo mismo ha sufrido modificaciones, migrando a los sistemas CIE-RGB y CIE- $L^*a^*b^*$ (Barrón & Torrent, 1986; Torrent, Schwertmann, Fechter, & Alferez, 1983; Torrent, Schwertmann, & Schulze, 1980). Barrón y Torrent (1986) concluyen que el cálculo del IR con el sistema CIE- $L^*a^*b^*$ reproduce valores absolutos con mayor confiabilidad que el sistema Munsell y con una mejor relación con los óxidos de hierro (Kirillova, Vodyanitskii, & Sileva, 2015). Este índice permitió identificar que los colores oscuros se asocian con la concentración de los MP en los polvos urbanos.

De acuerdo con los estudios de Vodyanitskii y Savichev (2017), el color es una característica importante para el estudio, descripción y determinación de diversas propiedades de los suelos. El uso del color en los polvos urbanos que tienen material antrópico y suelos, y su relación con los MP, es adecuado para la estimación de la contaminación (Cortés et al., 2015), principalmente porque los minerales antrópicos como la magnetita y maghemita son de color negro (Bautista-Zúñiga, Cejudo, Aguilar, & Goguitchaichvili, 2014). Dicho de

dark olive brown, very dark gray, very dark grayish brown and black.

In the study of urban dusts, a methodological complication is the identification of background levels; however, in this work we could consider as background values the concentrations of HMs contained in urban dust samples of dark greyish brown (less contaminated), but eliminating the extreme values.

As for costs, the chemical analyses of each HM per sample is quoted between 100 and 200 MXN and the price of the color analysis is 30 MXN, so chemical analysis of eight elements would be approximately between 800 and 1600 MXN, that is, 26.7 to 53.3 times higher than the cost of color analysis.

This technological advance will allow the obtaining of rapid diagnoses considering thousands of samples; in this way, based on the color, it will be possible to select those that should be chemically analyzed. This will allow us to do what has never been implemented before in any part of the world: a system for monitoring HM contamination in urban dust.

Conclusions

The color of urban dust is an indicator of heavy metal pollution in Mexico City. Dark gray and black urban dust contains higher concentrations of heavy metals such as Cr, Cu, Ni and Pb compared to other colors. This first study of urban dust color as a proxy technique (time and cost savings) can be very useful in the implementation of a heavy metal pollution monitoring system, for better decision-making for the benefit of the population's health.

Acknowledgments

The authors are grateful to Mexico City's Secretariat of Science, Technology and Innovation for the financial support provided to the SECITI/051/2016 project, and to the General Directorate of Academic Personnel Affairs of the National Autonomous University of Mexico for funding the PAPIIT IN 209218 project. We also thank Julio César Villalobos Gama and Carlos Jaimes Beltrán for their participation in the sampling, as well as Margarita E. Gutiérrez-Ruiz, Agueda E. Ceniceros-Gómez and Ruth López-Santiago for the chemical analyses.

End of English version

otra manera, el uso del color del polvo urbano para la identificación de muestras contaminadas con MP corresponde con la misma estrategia de uso de los parámetros magnéticos (Aguilar et al., 2013; Sánchez-Duque et al., 2015). Lo anterior debido a que la quema de combustible en industrias, chimeneas de casas y escapes de los automóviles ocasiona un aumento magnético (minerales ferrimagnéticos) y un color oscuro, a causa de los productos generados por la combustión como la maghemita y magnetita (Bautista et al., 2014).

Aun son pocos los estudios que utilizan el color como herramienta para la identificación de muestras de polvo urbano con alto contenido de elementos potencialmente tóxicos (Cortés et al., 2015; Marín et al., 2018); sin embargo, queda claro que el uso del color, como técnica de bajo costo, facilita la instrumentación de estudios de monitoreo de la contaminación en centros urbanos. No obstante, en cada ciudad se deberá hacer un estudio que sirva de base para la identificación de los colores de las muestras más contaminadas; en el caso de la CDMX fueron marrón oliva oscuro, gris muy oscuro, marrón grisáceo muy oscuro y negro.

En el estudio de los polvos urbanos, una complicación metodológica es la identificación de los niveles de fondo; sin embargo, en este trabajo podríamos considerar como valores de fondo a las concentraciones de los MP contenidos en las muestras de polvo urbano de color marrón grisáceo oscuro (menos contaminadas), pero eliminando los valores extremos.

En cuanto a los costos, los análisis químicos de cada MP por muestra se cotizan entre 100 y 200 MXN y el precio del análisis de color es de 30 MXN, por lo que el análisis químico de ocho elementos sería aproximadamente de entre 800 y 1600 MXN; es decir, 26.7 a 53.3 veces mayor que el costo del análisis de color.

Este avance tecnológico permitirá la elaboración de diagnósticos rápidos considerando miles de muestras; de esta forma, con base en el color, se podrán seleccionar las que deben ser analizadas químicamente. Esto permitirá hacer lo que en ninguna parte del mundo se ha podido instrumentar: un sistema de monitoreo de la contaminación por MP en el polvo urbano.

Conclusiones

El color del polvo urbano es un indicador de la contaminación por metales pesados en la Ciudad de México. El polvo urbano de color gris oscuro y negro contiene mayores concentraciones de metales pesados como Cr, Cu, Ni y Pb en comparación con otros colores. Este primer estudio del color del polvo urbano como técnica *proxy* (ahorro de tiempo y de costos) puede ser muy útil en la instrumentación de un sistema de

References / Referencias

- Aguilar, B., Bautista, F., Goguichaishvili, A., Quintana, P., Carvallo, C., & Battu, J. (2013). Rock-magnetic properties of topsoils and urban dust from Morelia (>800,000 inhabitants), Mexico: Implications for anthropogenic pollution monitoring in Mexico's medium size cities. *Geofísica Internacional*, 52(2), 121–133. doi: 10.19155/geofint.2013.052.2.1528
- Barrón, V., & Torrent, J. (1986). Use of the Kubelka-Munk theory to study the influence of iron oxides on soil colour. *Journal of Soil Science*, 37(4), 499–510. doi: 10.1111/j.1365-2389.1986.tb00382.x
- Bautista-Zúñiga, F., Cejudo-Reyes, B., Aguilar-Reyes, R., & Goguitchaichvili, A. (2014). El potencial del magnetismo en la clasificación de suelos: una revisión. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 66(2), 123–134. doi: 10.18268/BSGM2014v66n2a11
- Buntley, G. J., & Westin, F. C. (1965). A comparative study of developmental color in Chestnut-Chernozem-Brunizem soil climosequence. *Soil Science Society of America Journal Abstract*, 29(5), 579–582. doi: 10.2136/sssaj1965.03615995002900050029x
- Chen, H., Lu, X., Li, L.Y., Gao, T., & Chang, Y. (2014). Metal contamination in campus dust of Xi'an, China: A study based on multivariate statistics and spatial distribution. *Science of the Total Environment*, 484, 27–35. doi: 10.1016/j.scitotenv.2014.03.026
- Cortés, J. L., Bautista, F., Quintana, P., Aguilar, D., & Goguichaishvili, A. (2015). The color of urban dust as indicator of contamination by the potentially toxic elements: the case of Ensenada, Baja California México. *Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 21(3), 255–266. doi: 10.5154/r.rchscfa.2015.02.003
- Cortés, J. L., Bautista, F., Delgado, C., Quintana, P., Aguilar, D., García A., & Gogichaishvili, A. (2017). Spatial distribution of heavy metals in urban dust from Ensenada, Baja California, Mexico. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 23(1), 47–60. doi: 10.5154/r.rchscfa.2016.02.005
- Dunn, O. J. (1964). Multiple comparisons using rank sums. *Technometrics*, 6(3), 241–252. doi: 10.2307/1266041
- García-Rico, L., Meza-Figueroa, D., Gandolfi, A. J., Del Río-Salas, R., Romero, F. M., & Meza-Montenegro, M. (2016). Dust-metal sources in an urbanized arid zone: Implications for health-risk assessments. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 70(3), 522–533. doi: 10.1007/s00244-015-0229-5.
- Hurst, V. J. (1977). Visual estimation of iron in saprolite. *Geological Society of America Bulletin*, 88(2), 174–176. doi: 10.1130/0016-7606(1977)88<174:VEOIS>2.0.CO;2
- Kirillova, N. P., Vodyanitskii, Y. N., & Sileva, T. M. (2015). Conversion of soil color parameters from the Munsell system to the CIE-L*a*b* System. *Genesis and Geography of Soils*, 48(5), 468–475. doi: 10.1134/S1064229315050026
- Kruskal, W. H., & Wallis, W. A. (1952). Use of ranks in one-criterion variance analysis. *Journal of the*
- monitoreo de la contaminación por metales pesados, para una mejor toma de decisiones en beneficio de la salud de la población.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Secretaría de Ciencia, Tecnología e Innovación de la Ciudad de México por el apoyo financiero del proyecto SECITI/051/2016, y a la Dirección General de Asuntos del Personal Académico de la Universidad Nacional Autónoma de México por el financiamiento al proyecto PAPIIT IN 209218. Agradecemos también a Julio César Villalobos Gama y Carlos Jaimes Beltrán por su participación en el muestreo, así como a Margarita E. Gutiérrez-Ruiz, Agueda E. Cenicerós-Gómez y Ruth López-Santiago por los análisis químicos.

Fin de la versión en español

American Statistical Association, 47(260), 583–621. doi: 10.2307/2280779

Levin, N., Ben-Dor, E., & Singer, A. (2005). A digital camera as a tool to measure colour indices and related properties of a sandy soils in semi-arid environments. *International Journal of Remote Sensing*, 26(24), 5475–5492. doi: 10.1080/01431160500099444

Liu, J. G., & Moore, McM. J. (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

Liu, Q., Liu, Y., Yin, J., Zhang, M., & Zhang, T. (2014). Chemical characteristics and source apportionment of PM₁₀ during Asian dust storm and non-dust storm days in Beijing. *Atmospheric Environment*, 91, 85–94. doi: 10.1016/j.atmosenv.2014.03.057

Luo, X. S., Yu, S., Zhu, Y. G., & Li, X. D. (2012). Trace metal contamination in urban soils of China. *Science of the Total Environment*, 421–422, 17–30. doi: 10.1016/j.scitotenv.2011.04.020

Marín, P., Sánchez-Navarro, A., Díaz-Pereira, E., Bautista, F., Romero, M. M., & Delgado, I. M. J. (2018). Assessment of heavy metals and color as indicators of contamination of traffic intensity and sampling location. *Sustainability*, 10(11), 4105. doi: 10.3390/su10114105

Mathieu, R., Poujet, J., Cervelle, B., & Escafal, R. (1998). Relationships between satellite-based radiometric indices simulated using laboratory reflectance data and typic soil color of an arid environment. *Remote Sensing of Environment*, 66(1), 17–28. doi: 10.1016/S0034-4257(98)00030-3

Munsell Color Laboratory. (2000). *Munsell soil color charts*. New Windsor, Nueva York, USA: GretagMacbeth. Retrieved

- from <https://www.worldcat.org/title/munsell-soil-color-charts/oclc/869844188?referer=di&ht=edition>
- Peña-García, L., Maciel-Flores, R., Rosas-Elguera, J., & Rentería-Tapia, V. (2016). Distribución de polvo urbano en la zona metropolitana de Guadalajara, México. *Revista de Investigación y Desarrollo*, 3(4), 16–23. Retrieved from http://www.ecorfan.org/spain/researchjournals/Investigacion_y_Desarrollo/vol2num4/Revista_de_Investigacion_y_Desarrollo_V2_N4_4.pdf
- Sabath, D. E., & Robles-Osorio, L. (2012). Medio ambiente y riñón: Nefrotoxicidad por metales pesados. *Nefrología: Publicación oficial de la Sociedad Española de Nefrología*, 32(3), 279–286. doi: 10.3265/Nefrologia.pre2012.Jan.10928
- Sánchez-Duque, A., Bautista, F., Goguichashvili, A., Cejudo-Ruiz, R., Reyes-López, J. A., Solís-Domínguez, F. A., & Morales-Contreras, J. J. (2015). Evaluación de la contaminación ambiental a partir del aumento magnético en polvos urbanos. Caso de estudio en la ciudad de Mexicali, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 32(3), 501–513. Retrieved from http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1026-87742015000300501&lng=es&nr m=iso
- Torrent, J., Schwertmann, U., Fechter, H., & Alferez, F. (1983). Quantitative relationships between soil color and hematite content. *Soil Science*, 136(6), 354–358. Retrieved from https://journals.lww.com/soilsci/Abstract/1983/12000/QUANTITATIVE_RELATIONSHIPS_BETWEEN_SOIL_COLOR_AND.4.aspx
- Torrent, J., Schwertmann, U., & Schulze, D. G. (1980). Iron oxide mineralogy of some soils of two river terrace sequences in Spain. *Geoderma*, 23(3), 191–298. doi: 10.1016/0016-7061(80)90002-6
- United States Environmental Protection Agency (U. S. EPA). (2007a). Method 3051A (SW-846): Microwave assisted acid digestion of sediments, sludges, and oils. Retrieved August 13, 2019 from <https://www.epa.gov/homeland-security-research/us-epa-method-3051a-microwave-assisted-acid-digestion-sediments-sludges>
- United States Environmental Protection Agency (U. S. EPA). (2007b). Method 6010 C (SW-846). Inductively coupled plasma-atomic emission spectrometry. Retrieved from <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-07/documents/epa-6010c.pdf>
- Viscarra-Rossel, R. A., Fouad, Y., & Walter, C. (2008). Using a digital camera to measure soil organic carbon and iron contents. *Biosystems Engineering*, 100(2), 149–159. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2008.02.007
- 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*, 15(3), 380–385. doi: 10.1016/j.aasci.2017.05.023
- World Health Organization. (2014). 7 million premature deaths annually linked to air pollution. Retrieved April 12, 2018, from <http://www.who.int/mediacentre/news/releases/2014/air-pollution/en/>
- Zafra, C. A., Temprano, J., & Tejero, M. J. M. (2011). Distribution of the concentration of heavy metals associated with the sediment particles accumulated on road surfaces. *Environmental Technology*, 32(9), 997–1008. doi: 10.1080/09593330.2010.523436