

The color of urban dust as an indicator of contamination by potentially toxic elements: the case of Ensenada, Baja California, Mexico

El color del polvo urbano como indicador de contaminación por elementos potencialmente tóxicos: el caso de Ensenada, Baja California, México

José L. Cortés^{1,3}; Francisco Bautista^{1,4}; Patricia Quintana⁵; Daniel Aguilar⁵; Avto Goguichaishvili².

¹Laboratorio Universitario de Geofísica Ambiental, Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental.

²Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México. Antigua Carretera a Pátzcuaro núm. 8701, col. Exhacienda de San José de la Huerta. C. P. 58190. Morelia, Michoacán, MÉXICO. Correo-e: leptosol@ciga.unam.mx tel 52(443) 3223869 (*Autor para correspondencia).

³Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Gral. Francisco J. Múgica s/n, Felicitas del Río. C. P. 58030. Morelia, Michoacán, MÉXICO.

⁴Centro de Edafología y Biología Aplicada del Segura, Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Campus Universitario de Espinardo, Espinardo. Murcia, ESPAÑA.

⁵Departamento de Física Aplicada, Centro de Investigaciones y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, Unidad Mérida. Antigua carretera a Progreso km 6. C. P. 97310. Cordemex, Mérida, Yucatán, MÉXICO.

Abstract

Contamination by potentially toxic elements (PTE) is not periodically evaluated, given that the chemical analyses have a high cost. The ashes and combustion fumes give the ground a dark color, which could serve as a proxy indicator. In this study, a methodology was designed to prove the use of the color of urban dust as an indicator of contamination by PTE, and the most contaminated color was identified. 86 dust samples from Ensenada, Baja California were analyzed. The color of the samples was measured and the color indices (CI) were calculated using the RGB system. Nickel (Ni), Copper (Cu), Zinc (Zn), Lead (Pb), Rubidium (Rb), Vanadium (V), Strontium (Sr), and Yttrium (Y) were analyzed through x-ray fluorescence methods. The samples were grouped by color using the Munsell tables; the groups were validated with a discriminant analysis using the color indices. The multiple regressions indicated that there exists a relation between the CI and the PTE. The averages of the analyzed elements in the samples grouped by color were different (Kruskal-Wallis, $P < 0.05$). Gray dust contains higher concentrations of Pb, Cu, Zn and Ni. The color indices of urban dust can be considered a proxy methodology given their low cost, speed and reliability.

Keywords: Color indices, redness index; index; saturation index; hue index.

Resumen

La contaminación por elementos potencialmente tóxicos (EPT) no se evalúa periódicamente, ya que los análisis químicos son de costo elevado. Las cenizas y humos de combustión otorgan color oscuro al suelo y afectan la salud de la población. El color podría funcionar como indicador *proxy*. En este trabajo se diseñó una metodología para probar el uso del color del polvo urbano como indicador de contaminación por EPT y se identificó el color más contaminado. Se analizaron 86 muestras de polvo de Ensenada, Baja California. El color de las muestras se midió y los índices de color (IC) se calcularon con el sistema RGB. El Níquel (Ni), Cobre (Cu), Zinc (Zn), Plomo (Pb), Rubidio (Rb), Vanadio (V), Estroncio (Sr) e Itrio (Y) se analizaron por fluorescencia de rayos X. Las muestras se agruparon por color con las tablas Munsell; los agrupamientos se validaron con un análisis discriminante utilizando los IC. Las regresiones múltiples indicaron que existe relación entre los IC y los EPT. Las medianas de los elementos analizados en las muestras agrupadas por color fueron diferentes (Kruskal-Wallis, $P < 0.05$). El polvo gris contiene mayores concentraciones de Pb, Cu, Zn y Ni. Los índices de color del polvo urbano pueden considerarse una metodología *proxy* debido al bajo costo, rapidez y confiabilidad.

Palabras clave: Índices de color; índice de rojez; índice de saturación; índice hue.

Please cite this article as follows (APA 6): Cortés, J. L., 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, Mexico. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 21(3), 255-266. doi: 10.5154/r.rchscfa.2015.02.003

Received: February 4, 2015 / Accepted: July 7, 2015.



Introduction

Urban dust is a mixture of local soil and contaminating particles derived from the combustion of vehicles, chimneys and other wastes. It is formed by particles of various sizes; generally, a large portion corresponds to particles smaller than 10 μ that contain heavy metals. These particles are considered harmful to human health because they can be inhaled and cause cancer (Sabath & Osorio, 2012). The quantity and types of contamination by potentially toxic elements (PTE) varies according to the activity of the populace (Aguilar et al., 2013a; Aguilar, Mejía, Bautista, Goguitchaichvili, & Morton, 2011; Guagliardi, Cicchela, & De Rosa, 2012; Wang, Xia, Yu, Jia, & Xu, 2014).

Diagnostics of the contamination of the dust by PTE in urban areas are not carried out periodically, given that this monitoring task has the following disadvantages: a) it requires a large number of samples, b) the chemical analyses have a high cost and take time to be carried out, and c) the chemical analysis of the samples generates dangerous residues. Because of this, it is necessary to look for fast, reliable and low cost indicators that would allow for the analysis of a large number of samples in an efficient and economical manner, such as the proxy methodologies; for example, the magnetic parameters (Aguilar et al., 2011; Aguilar et al., 2013b) and the color of the dust.

Color has been used in classification and soil formation studies (Dobos, Ciolkosz, & Waltman, 1990; Kumaravel, Sangode, Siva, & Kumar, 2010; IUSS Working Group WRB, 2014) and for the identification of greater fertility areas (Leirena-Alcocer & Bautista, 2014; Schulze et al., 1993), due to the high content of organic matter (Viscarra, Fouad, & Walter, 2008). Color has also been used to study the oxides of iron and their changes through edaphic processes (Levin, Ben-Dor, & Singer, 2005; Madeira, Bedidi, Cervelle, Pouget, & Flay, 1997; Schwertmann, 1993; Viscarra et al., 2008). Nevertheless, the relation between the color of the dust and the PTE in urban areas has not been studied, with this being the first case study. Some field observations have made it possible to infer that urban dust contains ashes and fine particles, product of the contamination by automobiles and chimneys. The contaminating particles stay on the surface giving it a certain color, changing drastically if observed only a few centimeters below the soil.

Recently, equipment that is capable of measuring the color of the soil in a numeric manner has been fabricated, eliminating subjectivity in the measurements (Leirena & Bautista, 2014; Levin et al., 2005). In 1861, James Clerk Maxwell created the RGB color system and demonstrated that any color

Introducción

El polvo urbano es una mezcla de suelo local y de partículas contaminantes derivadas de la combustión de vehículos, chimeneas y demás desechos. El polvo urbano está formado por partículas de diversos tamaños; generalmente, una gran proporción corresponde a partículas menores de 10 μ que contienen metales pesados. Estas partículas se consideran peligrosas para la salud humana debido a que pueden ser inhaladas y causar cáncer (Sabath & Osorio, 2012). La cantidad y tipos de contaminación por elementos potencialmente tóxicos (EPT) varía según la actividad de la población (Aguilar et al., 2013a; Aguilar, Mejía, Bautista, Goguitchaichvili, & Morton, 2011; Guagliardi, Cicchela, & De Rosa, 2012; Wang, Xia, Yu, Jia, & Xu, 2014).

Los diagnósticos de la contaminación por EPT de los polvos en zonas urbanas no se hacen periódicamente, debido a que esta labor de monitoreo tiene las siguientes desventajas: a) se requiere de un gran número de muestras, b) los análisis químicos son de alto costo y no se hacen de manera rápida y c) se generan residuos peligrosos por el análisis químico de las muestras. Por lo anterior, es necesaria la búsqueda de indicadores rápidos, de bajo costo y confiables que permitan el análisis de un gran número de muestras de forma eficiente y económica como lo son las metodologías proxy; por ejemplo, los parámetros magnéticos (Aguilar et al., 2011; Aguilar et al., 2013b) y el color de los polvos.

El color se ha utilizado en estudios de clasificación y génesis de suelos (Dobos, Ciolkosz, & Waltman, 1990; Kumaravel, Sangode, Siva, & Kumar, 2010; IUSS Working Group WRB, 2014) y para la identificación de zonas de mayor fertilidad (Leirena-Alcocer & Bautista, 2014; Schulze et al., 1993), debido al alto contenido de materia orgánica (Viscarra, Fouad, & Walter, 2008). El color también se ha utilizado para estudiar los óxidos de hierro y sus cambios por procesos edáficos (Levin, Ben-Dor, & Singer, 2005; Madeira, Bedidi, Cervelle, Pouget, & Flay, 1997; Schwertmann, 1993; Viscarra et al., 2008). No obstante, la relación entre el color del polvo y los EPT en zonas urbanas no ha sido estudiada, siendo este el primer caso de investigación. Algunas observaciones de campo han permitido inferir que el polvo urbano contiene cenizas y partículas finas, producto de la contaminación de automóviles y chimeneas. Las partículas contaminantes se quedan en la superficie otorgando un color determinado, el cual cambia bruscamente si lo observamos solo unos centímetros abajo donde se encuentra el suelo.

Recientemente se han fabricado equipos capaces de medir el color del suelo de manera numérica, con lo cual se elimina la subjetividad de su medición (Leirena & Bautista, 2014; Levin et al., 2005). En 1861, James

can be generated from the trichrome structure that utilizes the primary colors red, green, and blue, basing the wavelength on a scale of 0 to 255. With these parameters, hue, redness, and saturation indices were obtained through which it is possible to carry out mathematical operations to find numerical relations between the color of an object and its chemical composition—in this case urban dust and the PTE. Based on this, the objectives of this study were to: a) design a methodology to prove the use of the color of urban dust as a proxy methodology of contamination with PTE, and b) identify the color of urban dust with greater concentrations of PTE.

Materials and methods

Area of study

The area of study is the city of Ensenada, Baja California, Mexico, mainly located on the coastal plains, although it also includes foothills and mountainous areas (Figure 1). It is a city with tourism and is the route towards the south of the Baja California Peninsula through the transpeninsular highway. The samples of urban dust were collected from 1 m² above the surface of the streets (cement, asphalt or soil) from the city at 86 geographically located sites. The sampling was systematic in mesh to evaluate the different types of substrate and to try and obtain representativeness of the entire city. The samples were taken in the shade, were ground with an

Clerk Maxwell creó el sistema de color RGB y demostró que cualquier color se puede generar a partir de ese tricroma que utiliza los colores primarios rojo, verde y azul a partir de su longitud de onda en una escala de 0 a 255. Con estos parámetros se obtuvieron índices de hue, rojez y saturación mediante los cuales es posible realizar operaciones matemáticas para encontrar relaciones numéricas entre el color de un objeto y su composición química; en este caso, el polvo urbano y los EPT. Con base en lo anterior, los objetivos de este trabajo fueron: a) diseñar una metodología para probar el uso del color del polvo urbano como metodología *proxy* de la contaminación con EPT, y b) identificar el color del polvo urbano con mayores concentraciones de EPT.

Materiales y métodos

Zona de estudio

La ciudad de Ensenada, Baja California, México, se localiza sobre la planicie costera principalmente, aunque también ocupa el piedemonte y parte de la montaña (Figura 1); es una ciudad con actividad turística y es el paso hacia el sur de la península por la carretera transpeninsular. Las muestras de polvo urbano se recolectaron sobre 1 m² de la superficie de las calles (cemento, asfalto o suelo) de la ciudad en 86 sitios localizados geográficamente. El muestreo fue sistemático en rejilla para evaluar los diferentes tipos



Figure 1. Localization of the urban dust sampling sites in the city of Ensenada, Baja California.

Figura 1. Localización de los sitios de muestreo de polvos urbanos en la ciudad de Ensenada, Baja California.

agate mortar, and were sifted with mesh 10 (2 mm of light). The sifted dust was divided into two parts: one to carry out the color measurements and a second for the chemical analysis.

Color analysis

The samples of urban dust were analyzed using the Munsell table (Munsell Color, 2000), and the color of the dust was measured using a Konica Minolta colorimeter (model CR400m, U.S.) which generates results in the X, Y, Z color system. The data was converted to the RGB decimal color system using the Color Slide Rule program; from this system the hue (HI), redness (RI), and saturation (SI) indices were obtained. The HI, RI, and SI of the urban dusts were obtained using the following equations (Levin et al., 2005):

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

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

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

In these equations, R, G, and B correspond to red, green, and blue, respectively. The color groups were formed using the Munsell table. Subsequently, the groups were validated using the measurements of the CI and a multivariate analysis.

Chemical analysis

The urban dust was analyzed by means of x-ray fluorescence using dispersed energy (FRX-ED), utilizing a Jordan Valley spectrometer (EX-6600, U.S.) equipped with a Si(Li) detector with an active area of 20 mm² and a resolution of 140 eV to 5.9 keV, operating at a maximum of 54 keV and 4,800 μA; international reference patterns were utilized for rocks and soils (Beckhoff, Kanngießner, Langhoff, Wedell, & Wolff, 2007; Ihl et al., 2015; Lozano & Bernal, 2005). The analyzed elements were Chrome (Cr), Nickel (Ni), Copper (Cu), Zinc (Zn), Lead (Pb), Vanadium (V), Rubidium (Rb), Strontium (Sr), and Yttrium (Y).

Data analysis

The urban dust samples were grouped based on the color identified using the Munsell tables. The formation of the groups by color was validated with a discriminant analysis using the Statgraphic Plus 5.1 software (Statpoint Technologies Inc., 1992). The groups by color were considered the dependent variables and the CI (HI, RI, and SI) were considered the independent variables; each group was assigned a name based on the Munsell tables. With these same groups formed using the Munsell tables, a discriminant analysis was carried out in order to validate the classification of the samples by groups formed based on the PTE, where the dependent variables were the groups by color and the independent variables were the concentrations of PTE.

de sustrato y tratar de obtener representatividad de toda la ciudad. Las muestras se secaron a la sombra, se molieron con un mortero de ágata y se tamizaron con malla 10 (2 mm de luz). Los polvos tamizados se dividieron en dos partes, una para realizar mediciones de color y otra para análisis químicos.

Análisis de color

Las muestras de polvo urbano se analizaron con la tabla Munsell (Munsell Color, 2000) y el color del polvo se midió con un colorímetro Konica Minolta (modelo CR400m, EUA), el cual genera los resultados en el sistema de color X, Y, Z. Los datos se convirtieron al sistema de color RGB decimal mediante el programa *Color Slide Rule*; a partir de este sistema se obtuvieron índices de color hue (IH), rojez (IR) y saturación (IS). Los IH, IR e IS de los polvos urbanos se obtuvieron con las siguientes ecuaciones (Levin et al., 2005):

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

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

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

En estas ecuaciones R, G y B corresponden a rojo, verde y azul, respectivamente. Los grupos de color se formaron utilizando la tabla Munsell. Posteriormente se validaron los grupos con las mediciones de los IC y un análisis multivariado.

Análisis químicos

El polvo urbano se analizó por medio de fluorescencia de rayos X por energía dispersa (FRX-ED), usando un espectrómetro Jordan Valley (EX-6600, EUA) equipado con un detector Si(Li) con área activa de 20 mm² y resolución de 140 eV a 5.9 keV, operado a un máximo de 54 keV y 4,800 μA; se utilizaron patrones de referencia internacional para rocas y suelos (Beckhoff, Kanngießner, Langhoff, Wedell, & Wolff, 2007; Ihl et al., 2015; Lozano & Bernal, 2005). Los elementos analizados fueron Cromo (Cr), Níquel (Ni), Cobre (Cu), Zinc, (Zn), Plomo (Pb), Vanadio (V), Rubidio (Rb), Estroncio (Sr) e Itrio (Y).

Análisis de datos

Las muestras de polvo urbano se agruparon con base en el color identificado con las tablas Munsell. La formación de los grupos por color se validó con un análisis discriminante con el software Statgraphic Plus 5.1 (Statpoint Technologies Inc., 1992). Los grupos por color se consideraron variables dependientes y los IC (IH, IR e IS) como variables independientes; a cada grupo se le asignó un nombre con base en las tablas Munsell. Con esos mismos grupos formados con las tablas Munsell se realizó un análisis discriminante para validar la clasificación de las muestras por grupos

A discriminant analysis is a classification and assignation technique for elements or a group, which allows to confirm the validation or not of the formation of sample groups based on a set of independent variables. The classification of the elements of a populace or group is carried out with lineal or quadratic functions (Lévy, Varela, Calvo, & Rodríguez, 2003).

Within each group of urban dust assigned by color, multiple correlations were made between the CI and the concentrations of Cr, Ni, Cu, Zn, Pb, V, and Rb utilizing Statgraphics plus 5.1 (Statpoint Technologies Inc., 1992). The multiple regression establishes the relation of a dependent variable Y with regard to a variable X (X_1, X_2, \dots, X_n) in a multidimensional space:

$$Y = a + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n + e$$

where:

Y = Dependent variable (indices of soil hue, redness, and saturation)

a = Regression parameter

β_i = Increase of Y in units when increasing X . The equation includes datum for each indicator $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$ (Aiken & West, 1991).

X_i = Explicative variable (concentrations of PTE)

e = Indication error

The contents of each PTE by color group of urban dust were compared using the Kruskal-Wallis test, as it is the best method to compare populace in which there is no normal distribution of the data. This test evaluates the hypothesis that the averages of each group are equal; it combines the data of every group and orders them from least to greatest, and subsequently calculates the average range for the data of each group (Kruskal & Wallis, 1952).

Results and discussion

Formation of color groups

Figure 2 shows the four color groups formed by the urban dust, based on the Munsell color card: I) Dark reds (2.5 YR), II) Grays (10 YR), III) Clear reddish browns (5 YR), and IV) Clear grayish-browns (10 YR). According to Table 1, the urban dust groups based on the Munsell tables coincided with the groups made in accordance to the HI, RI, and SI, since 100 % of the assignments were correct. On the other hand, the urban dust groups in accordance to color coincided 84.88 % with the groups made considering the concentration of the PTE (Table 2).

Correlation between color indices and potentially toxic elements

The multiple lineal regressions indicated an appropriate adjustment between the HI with regard

formados con base en los EPT, donde las variables dependientes fueron los grupos por color y las variables independientes fueron las concentraciones de EPT.

El análisis discriminante es una técnica de clasificación y asignación de elementos a un grupo que permite validar o no la formación de grupos de muestras con base en un conjunto de variables independientes. La clasificación de los elementos de una población o grupo se lleva a cabo con las funciones lineales o cuadráticas (Lévy, Varela, Calvo, & Rodríguez, 2003).

Al interior de cada grupo de polvo urbano por color se realizaron correlaciones múltiples entre los IC y las concentraciones de Cr, Ni, Cu, Zn, Pb, V y Rb utilizando Statgraphics plus 5.1 (Statpoint Technologies Inc., 1992). La regresión múltiple establece la relación de una variable dependiente Y con respecto de una variable X (X_1, X_2, \dots, X_n) en un espacio multidimensional:

$$Y = a + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n + e$$

donde:

Y = Variable dependiente (índices de color de suelo hue, rojez y saturación)

a = Parámetro de regresión

β_i = Incremento de Y en unidades al aumentar X . La ecuación incluye un dato por cada predictor $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$ (Aiken & West, 1991).

X_i = Variables explicativas (concentraciones de EPT)

e = error de la predicción.

Los contenidos de cada EPT por grupo de color de polvo urbano se compararon mediante la prueba de Kruskal-Wallis, ya que es el mejor método para comparar poblaciones donde no hay una distribución normal de los datos. Esta prueba evalúa la hipótesis de que las medianas de cada grupo son iguales, combina los datos de todos los grupos y los ordena de menor a mayor, posteriormente calcula el rango promedio para los datos de cada grupo (Kruskal & Wallis, 1952).

Resultados y discusión

Formación de grupos de color

La Figura 2 presenta los cuatro grupos de color formados por los polvos urbanos, con base en las cartas de color Munsell: I) Rojos oscuros (2.5 YR), II) Grises (10 YR), III) Cafés rojizos claros (5 YR) y IV) Grises-café claros (10 YR). De acuerdo con el Cuadro 1, los grupos de polvos urbanos con base en tablas Munsell coincidieron con los grupos formados de acuerdo con los IH, IR e IS, ya que 100 % de las asignaciones fueron correctas. Por otra parte, los grupos de polvos urbanos por color coincidieron en 84.88 % con los grupos formados considerando la concentración de EPT (Cuadro 2).



Figure 2. Grouping of urban dust samples (Ensenada, Baja California) with regard to color, based on the Munsell color cards.

Figura 2. Agrupación de muestras de polvo urbano (Ensenada, Baja California) con respecto a su coloración, con base en las cartas de color Munsell.

Table 1. Congruency matrix between the color groups of urban dust based on the Munsell color cards and those groups formed based on the color indices (hue, redness, and saturation).

Cuadro 1. Matriz de congruencia entre los grupos de polvos urbanos formados por color con base en las cartas de color Munsell y los formados de acuerdo con los índices de color (hue, rojez y saturación).

Groups / Grupos	Samples / Muestras	Classification / Clasificación			
		Dark reds / Rojos oscuros	Grays / Grises	Clear reddish-browns / Cafés rojizos claros	Clear grayish-browns / Grises-cafés claros
Dark reds / Rojos oscuros	6	6	0	0	0
Congruency (%) / Congruencia (%)		100			
Grays / Grises	63	0	63	0	0
Congruency (%) / Congruencia (%)			100		
Clear reddish-browns / Cafés rojizos claros	11	0	0	11	0
Congruency (%) / Congruencia (%)				100	
Clear grayish-browns / Grises-cafés claros	6	0	0	0	6
Congruency (%) / Congruencia (%)					100

Table 2. Congruency matrix between the color groups of urban dust based on the Munsell color cards and those groups formed based on the potentially toxic elements.

Cuadro 2. Matriz de congruencia entre los grupos de polvo urbano formados por color con base en las cartas de color Munsell y los formados de acuerdo con los elementos potencialmente tóxicos.

Groups / Grupos	Samples / Muestras	Classification / Clasificación			
		Dark reds / Rojos oscuros	Grays / Grisés	Clear reddish-browns / Cafés rojizos claros	Clear grayish-browns / Grisés-café claros
Dark reds / Rojos oscuros	6	5	0	1	0
Congruency (%) / Congruencia (%)		83.33		16.67	
Grays / Grisés	63	0	56	3	4
Congruency (%) / Congruencia (%)			88.89	4.76	6.35
Clear reddish-browns / Cafés rojizos claros	11	0	2	7	2
Congruency (%) / Congruencia (%)			18.18	63.64	18.18
Clear grayish-browns / Grisés-café claros	6	0	1	0	5
Congruency (%) / Congruencia (%)			16.67		83.33

to the PTE (Table 3). The best represented PTE in the equations were Pb and Zn in the four color groups of the urban dust samples. Regarding RI, the multiple regressions (Table 4) indicate that the best represented PTE in the equations were Cr, Ni, Cu, Pb, and V in the four groups. Finally, the regressions of the four groups based on the SI were significant (Table 5), which indicates that SI showed a high level of relation or association with the PTE. The best represented PTE in the equations were Cr, Ni, Cu, Zn, Pb, and V in the four color groups of the urban dust samples. The CI functioned as indicators for the concentration of PTE in all the cases or color groups; in general, they are related mainly with the concentrations of Pb, followed by Zn, Cr, Cu, Ni, and V.

Content of potentially toxic elements in urban dusts by color group

In line with the Kruskal-Wallis test, Ni, Cu, Zn, Pb, and Rb showed statistically significant differences ($P < 0.05$) between the averages of each color group. Figure 3 shows that the dark red color group of urban dust contains greater concentrations of V and Rb. On the other hand, the gray color urban dust samples have higher concentrations of Ni, Cu, Zn, and Pb, which indicate that this is the group with greater PTE contamination.

Correlación entre índices de color y elementos potencialmente tóxicos

Las regresiones lineales múltiples indicaron un buen ajuste entre el IH con respecto a los EPT (Cuadro 3). Los EPT mejor representados en las ecuaciones fueron Pb y Zn en los cuatro grupos de muestras de polvo urbano por color. Con respecto al IR, las regresiones múltiples (Cuadro 4) indicaron que los EPT mejor representados en las ecuaciones fueron Cr, Ni, Cu, Pb y V en los cuatro grupos. Finalmente, las regresiones de los cuatro grupos con base en el IS fueron significativas (Cuadro 5), lo cual indica que el IS mostró un alto grado de relación o asociación con los EPT. Los EPT mejor representados en las ecuaciones fueron Cr, Ni, Cu, Zn, Pb y V en los cuatro grupos de muestras de polvo urbano por color. Los IC funcionaron como indicadores de la concentración de EPT en todos los casos o grupos de color; en general, se encuentran relacionados principalmente con las concentraciones de Pb, seguido del Zn, Cr, Cu, Ni y V.

Contenido de elementos potencialmente tóxicos en polvos urbanos por grupo de color

Acorde con la prueba de Kruskal-Wallis, el Ni, Cu, Zn, Pb y Rb presentaron diferencias estadísticamente significativas ($P < 0.05$) entre las medianas de cada grupo

Table 3. Multiple regressions between the hue index and the potentially toxic elements (PTE) of the urban dust samples.**Cuadro 3. Regresiones múltiples entre el índice hue y los elementos potencialmente tóxicos (EPT) de las muestras de polvo urbano.**

Groups / Grupos	PTE / EPT	r ²	P value / Valor P
Dark reds / Rojos oscuros	HI = 86.341 - 0.06*Cr - 2.207*Ni - 1.387*Cu + 0.719537*Zn - 0.0214*Pb - 0.822*V	1.00	0.00
Grays / Grises	HI = 5.839 + 0.003*Zn + 0.007*Pb - 0.004*V - 0.006*Rb - 0.002*Sr - 0.003*Y	0.58	0.00
Clear reddish-browns / Cafés rojizos claros	HI = 10.278 - 0.035*Cr + 0.550*Ni + 0.210*Cu - 0.1293*Zn - 0.063*Pb + 0.084*V - 0.053*Rb - 0.019*Sr - 0.070*Y	0.91	0.06
Clear grayish-browns / Grises-cafés claros	HI = 58.746 + 0.116*Cr - 0.272*Ni - 1.063*Cu + 0.196*Zn - 1.713*Pb	1.00	0.00

Table 4. Multiple regressions between the redness index and the potentially toxic elements (PTE) of the urban dust samples.**Cuadro 4. Regresiones múltiples entre el índice de rojez y los elementos potencialmente tóxicos (EPT) de las muestras de polvo urbano.**

Groups / Grupos	PTE / EPT	r ²	P value / Valor P
Dark reds / Rojos oscuros	RI = 0.431 - 0.001*Cr - 0.011*Ni - 0.008*Cu + 0.004*Zn - 0.001*Pb - 0.004*V	1.00	0.00
Grays / Grises	RI = 0.001 + 0.001*Cr + 0.001*Ni - 0.001*Cu + 2.948E-7*Zn + 0.001*Pb + 0.001*V - 0.001*Rb - 0.001*Sr - 0.001*Y	0.67	0.00
Clear reddish-browns / Cafés rojizos claros	RI = 0.011 - 0.017*Cr - 0.001*Ni - 0.016*Cu + 0.001*Zn + 0.013*Pb + 0.001*V - 0.001*Rb - 0.001*Sr - 0.001*Y	0.73	0.09
Clear grayish-browns / Grises-cafés claros	RI = -0.028 + 0.001*Cr - 0.001*Ni + 0.001*Cu + 0.001*Pb - 0.001*V	1.00	0.00

Table 5. Multiple regressions: index saturation and the potentially toxic elements (PTE) of the urban dust samples.**Cuadro 5. Regresiones múltiples: índice saturación y los elementos potencialmente tóxicos (EPT) de las muestras de polvo urbano.**

Groups / Grupos	PTE / EPT	r ²	P Value / Valor P
Dark reds / Rojos oscuros	SI = -1.747 + 0.005*Cr + 0.063*Ni + 0.038*Cu - 0.021*Zn - 0.003*Pb + 0.023*V	1.00	0.00
Grays / Grises	SI = 0.188 + 0.001*Cr + 0.001*Ni + 0.001*Cu - 0.001*Zn - 0.001*Pb + 0.001*V + 0.001*Rb + 0.001*Sr	0.31	0.010
Clear reddish-browns / Cafés rojizos claros	SI = 0.631 + 0.002*Cr - 0.045*Ni - 0.020*Cu + 0.009*Zn + 0.007*Pb - 0.005*V + 0.001*Rb + 0.001*Sr - 0.008*Y	0.99	0.009
Clear grayish-browns / Grises-cafés claros	SI = 0.196 + 0.001*Cr + 0.005*Ni + 0.004*Cu - 0.001*Zn + 0.004*Pb	1.0	0.00

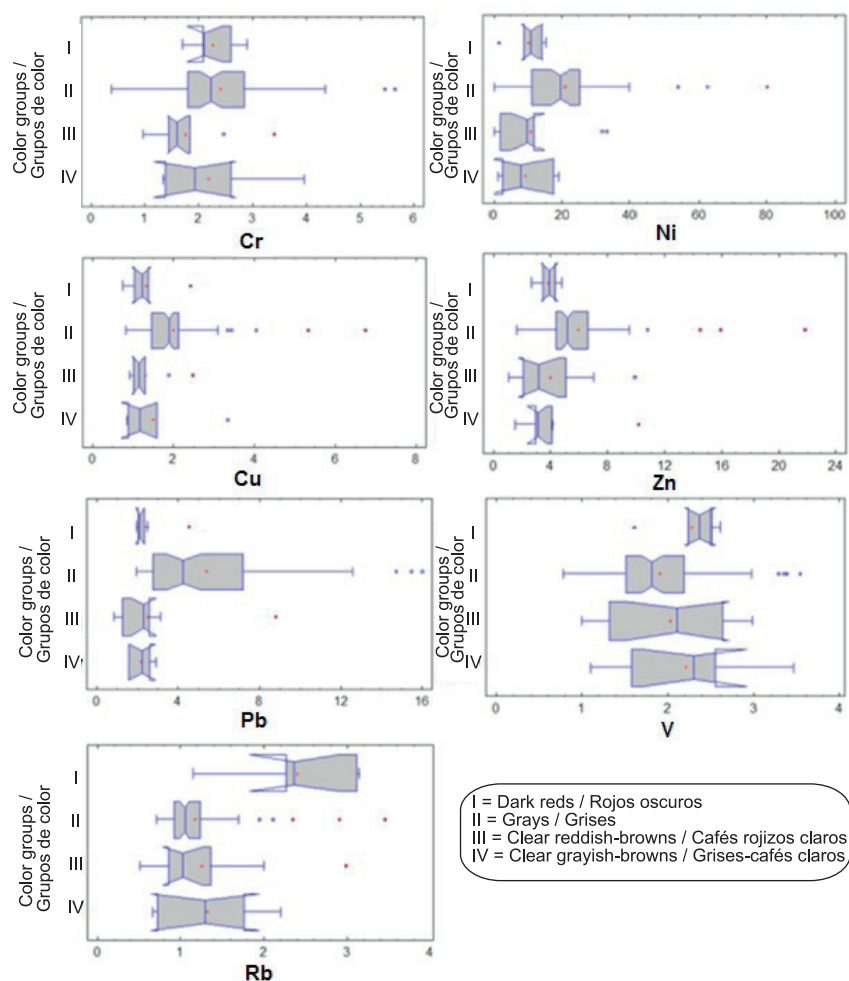


Figure 3. Whisker-plot graphs with notches. Averages of Ni, Cu, Zn, Pb, and Rb in the urban dust samples (Ensenada, Baja California) grouped by color.

Figura 3. Gráficas de cajas de bigotes con muescas. Medianas de Ni, Cu, Zn, Pb y Rb en las muestras de polvo urbano (Ensenada, Baja California) agrupadas por color.

The ash and combustion fumes contributed by motor vehicles and chimneys generate grayish colorings when combined with the urban dust from the soil, especially when ash is a major component. The samples of urban dust of predominantly red or brown colors maintain the colors of the urban soils in the area; therefore, it can be said that they are less contaminated.

The color of urban dust has been shown to be a proxy parameter in the evaluation of heavy metal content, even at the level of the visual measure of the color, since gray colored urban dust was shown to have a greater content of Pb, Cu, Ni, and Zn. With this study, it has been proven that the color of urban dust and the color indices (HI, RI, and SI) are useful proxy methodologies in the quick diagnosis of sites contaminated with heavy metals, as has also been proven by magnetic parameters such as magnetic susceptibility and isothermal remanent magnetization (Aguilar et al., 2011; Aguilar et al., 2013a; Aguilar et al., 2013b; Bautista, Cejudo-

de color. La Figura 3 muestra que el grupo de polvos urbanos de color rojo oscuro contiene concentraciones mayores de V y Rb. Por otra parte, el grupo de muestras de polvo urbano de color gris contiene concentraciones más altas de Ni, Cu, Zn y Pb, lo cual indica que este es el grupo con mayor contaminación por EPT.

Los aportes de ceniza y humos de combustión de los vehículos automotores y de las chimeneas generan coloraciones grises al combinarse con los polvos urbanos provenientes del suelo, sobre todo cuando la ceniza es un componente mayoritario. Las muestras de polvo urbano de colores predominantemente rojos o pardos conservan los colores de los suelos urbanos de la zona, por tanto puede decirse que están menos contaminados.

El color del polvo urbano ha mostrado ser un parámetro *proxy* en la evaluación del contenido de metales pesados, incluso en el nivel de medición visual del color, ya que los

Ruiz, Aguilar-Reyes, & Gogichaishvili, 2014). However, each city will have different colors in the urban dust, as such it is necessary to carry out reference studies such as this one.

In subsequent studies, two conditions must be analyzed during the pre-treatment of the samples: a) the sieving and homogenization of the sample, since they can change the color of the urban dust, providing them with increased luminosity (Domínguez, Román, Prieto, & Acevedo, 2012; Matthias et al., 2000; Sánchez-Marañón, Delgado, Delgado, Pérez, & Melgosa, 1995), and b) the humidity content, given that humid dust can be darker than dried dust (Brooks, 1952; Kojima, 1958; Domínguez et al., 2012).

Conclusions

Gray colored urban dust contains greater concentrations of Pb, Cu, Zn, and Ni, potentially toxic elements (PTE) associated with environmental contamination of an anthropogenic origin. The color indices of urban dust for the case of Ensenada were shown to be a proxy indicator due to the low measurement cost, speed, and simplicity, as well as the fact that they do not generate harmful residues. In this study, a methodology has been established in order to identify the urban dust samples contaminated with PTE utilizing the color indices. The steps to follow are: a) analyze the color of the urban dust using the Munsell color card; b) measure the color of the urban dust and calculate the indices (HI, SI, and RI); c) group the urban dust samples by Munsell colors and validate the groups by means of a discriminant analysis with the color indices as independent variables; d) analyze the PTE in the urban dust samples; e) validate the formation of the color groups with a discriminant analysis considering the PTE as independent variables; and f) carry out the multiple regressions between the color indices and the PTE.

Acknowledgements

Thank you to the National Council of Science and Technology for the financial support of the project CB-2011-01-169915, and to A. García, C. Figueroa and D. Maldonado for their help in the field work. FBZ appreciates the economic support of DGAPA-UNAM for the realization of the sabbatical leave in CEBAS-CSIC.

polvos urbanos de color gris resultaron ser los de mayores contenidos de Pb, Cu, Ni y Zn. Con este estudio se prueba que el color del polvo urbano y los índices de color (IH, IR y IS) son metodologías *proxy* de utilidad en el diagnóstico rápido de sitios contaminados con metales pesados, así como también lo han probado los parámetros magnéticos como la susceptibilidad magnética y la magnetización remanente isoterma (Aguilar et al., 2011; Aguilar et al., 2013a; Aguilar et al., 2013b; Bautista, Cejudo-Ruiz, Aguilar-Reyes, & Gogichaishvili, 2014). Sin embargo, cada ciudad tendrá colores diferentes del polvo urbano por lo cual es necesario realizar estudios de referencia como el presente.

En estudios posteriores, dos condiciones deben ser analizadas durante el pretratamiento de las muestras: a) el tamizado y homogeneización de la muestra, ya que pueden cambiar el color de los polvos urbanos, imprimiéndoles mayor luminosidad (Domínguez, Román, Prieto, & Acevedo, 2012; Matthias et al., 2000; Sánchez-Marañón, Delgado, Delgado, Pérez, & Melgosa, 1995) y b) el contenido de humedad, debido a que los polvos húmedos pueden ser más oscuros que los secos (Brooks, 1952; Kojima, 1958; Domínguez et al., 2012).

Conclusiones

El polvo urbano de color gris contiene mayores concentraciones de Pb, Cu, Zn y Ni, elementos potencialmente tóxicos (EPT) asociados con la contaminación ambiental de origen antrópico. Los índices de color del polvo urbano para el caso de Ensenada mostraron ser un indicador *proxy* por su bajo costo de medición, por ser rápidos, sencillos y no generar residuos peligrosos. En este trabajo se ha establecido una metodología para identificar las muestras de polvo urbano contaminadas con EPT mediante los índices de color. La secuencia de pasos a seguir es: a) analizar el color del polvo urbano con la carta de color Munsell; b) medir el color del polvo urbano y calcular los índices (IH, IS e IR); c) agrupar las muestras de polvo urbano por colores Munsell y validar la agrupación mediante análisis discriminante con los índices de color como variables independientes; d) analizar los EPT en las muestras de polvo urbano; e) validar la formación de los grupos por color con un análisis discriminante considerando los EPT como variables independientes; y f) realizar las regresiones múltiples entre los índices de color y los EPT.

Agradecimientos

Agradecemos al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el soporte financiero del proyecto CB-2011-01-169915, y A. García, C. Figueroa y D. Maldonado por la ayuda en el trabajo de campo. FBZ agradece el apoyo económico de la DGAPA-UNAM para la realización de la estancia sabática en el CEBAS-CSIC.

End of English version

Fin de la versión en español

References / Referencias

- Aguilar, B., Mejía, V., Goguichaishvili, A., Escobar J., Bayona G., Bautista, F., Morales, C. J., & Ihl, T. (2013a). Reconnaissance environmental magnetic study of urban soils, dust and leaves from Bogotá, Colombia. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 57, 741–754. doi: 10.1007/s11200-012-0682
- Aguilar, B., Bautista, F., Goguichaishvili, A., Quintana, P., Carvallo, C., & Battu, J. (2013b). Rock-magnetic properties of topsoils and urban dust from Morelia (>800,000 inhabitants), México: Implications for anthropogenic pollution monitoring in medium-size cities. *Geofísica Internacional*, 52(2), 121–133. Obtenido de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=56826168003>
- Aguilar, B., Bautista, F., Goguitchaichvili, A., & Morton, O. (2011). Magnetic monitoring of top soils of Merida (Southern Mexico). *Studia Geophysica et Geodaetica*, 55(2), 377–388. doi: 10.1007/s11200-011-0021-6
- Aiken, L. S., & West, S. G. (1991). *Multiple regression: Testing and interpreting interactions*. California, USA: Sage.
- Bautista, F., Cejudo-Ruiz, R., Aguilar-Reyes, B., & Gogichaishvili, A. (2014). El potencial del magnetismo en la clasificación de suelos: Una revisión. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 66(2), 365–376. Obtenido de <http://boletinsgm.igeolcu.unam.mx/bsgm/vols/epoca04/6602/%2811%29Bautista.pdf>
- Beckhoff, B., Kanngießer, B., Langhoff, N., Wedell, R., & Wolff, H. (2007). *Handbook of practical X-ray fluorescence analysis*. Berlin, Germany: Springer.
- Brooks, F. A. (1952). Atmospheric radiation and its reflection from the ground. *Journal of Meteorology*, 9(1), 41–52. doi: 10.1175/1520-0469(1952)009<0041:ARAIRF>2.0.CO;2
- Dobos, R. R., Ciolkosz, E. J., & Waltman, W. J. (1990). The effect of organic carbon, temperature, time, and redox conditions on soil color. *Soil Science*, 150(2), 506–512.
- Domínguez, S. J. M., Román, G. A. D., Prieto, G. F., & Acevedo, S. O. (2012). Sistema de notación Munsell y CIELab como herramienta para evaluación de color en suelos. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 3(1), 141–155. Obtenido de <http://www.scielo.org.mx/pdf/remexca/v3n1/v3n1a10.pdf>
- Guagliardi, I., Cicchella, D., & De Rosa, R. (2012). A geostatistical approach to assess concentration and spatial distribution of heavy metals in urban soils. *Water, Air, & Soil Pollution*, 223(9), 5983–5998. doi: 10.1007/s11270-012-1333-z
- Ihl, T., Bautista, F., Cejudo, R., Delgado, C., Quintana, P., Aguilar, D., & Goguitchaichvili, A. (2015). Concentration of toxic elements in topsoils of the metropolitan area of México City: A spatial analysis using ordinary Kriging and indicator Kriging. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 31(1), 47–62. Obtenido de <http://www.revistas.unam.mx/index.php/rica/article/view/38711>
- IUSS Working Group WRB (2014). *World reference base for soil resources*. Rome: FAO.
- Kojima, M. (1958). Relationship between size of soil particles and soil colors. *Soil and Plant Food*, 3(4), 204.
- Kruskal, W. H., & Wallis, W. A. (1952). Use of ranks in one-criterion variance analysis. *Journal of the American Statistical Association*, 47(260), 583–621. doi: 10.2307/2280779
- Kumaravel, V., Sangode, S. J., Siva, N., & Kumar, R. (2010). Interrelation of magnetic susceptibility, soil color and elemental mobility in the Pliocene–Pleistocene Siwalik paleosol sequences of the NW Himalaya, India. *Geoderma*, 154(3), 267–280. doi: 10.1016/j.geoderma.2009.10.013
- Leirena-Alcocer, J. L., & Bautista, F. (2014). Patrones de asociación entre la cobertura vegetal y la calidad del suelo en el matorral costero de la reserva Ría Lagartos, Yucatán. *CienciaUAT*, 8(2), 44–53. Obtenido de <http://www.revistaciencia.uat.edu.mx/index.php/CienciaUAT/article/view/297/160>
- Levin, N., Ben-Dor, E., & Singer, A. (2005). A digital camera as a tool to measure color indices and related properties of sandy soils in semi-arid environments. *International Journal of Remote Sensing*, 26(24), 5475–5492. doi: 10.1080/01431160500099444
- Lévy, J., Varela, J., Calvo, A., & Rodríguez, M. (2003). *Análisis multivariado para las ciencias sociales*. Madrid, España: Pearson educación.
- Lozano, R., & Bernal, J. P. (2005). Characterization of a new set of eight geochemical reference materials for XRF major and trace element analysis. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 22(3), 329–344. Obtenido de <http://satori.geociencias.unam.mx/22-3/%284%29Lozano.pdf>
- Madeira, J., Bedidi, A., Cervelle, 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
- Matthias, A. D., Fimbres, A., Sano, E. E., Post, D. F., Accioly, L., Batchily, A. K., & Ferreira, L. G. (2000). Surface roughness effects on soil albedo. *Soil Science Society of America Journal*, 64(3), 1035–1041. doi: 10.2136/sssaj2000.6431035x
- Munsell Color. (2000). *Munsell soil color charts. Revised washable edition*. MI, USA: GretagMacbeth
- Sabath, D. E., & Osorio, L. R. (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-Marañón, M., Delgado, G., Delgado, R., Pérez, M. M., & Melgosa, M. (1995). Spectroradiometric and visual color measurements of disturbed and undisturbed soil samples. *Soil science*, 160(4), 291–303.
- Schulze, D. G., Nagel, L. L., van Scoyoc, G. E., Henderson, T. L., Baumgardner, M. F., & Stott, D. E. (1993). Significance of organic matter in determining soil color. In J. M.

- Bigham, & E. J. Ciolkosz (Eds.), *Soil color* (pp. 71–90, vol. 31). Madison, WI, USA: Soil Science Society of America. doi: 10.2136/sssaspecpub31.c4
- Schwertmann, U. (1993). Relations between iron oxides, soil color, and soil formation. In J. M. Bigham, & E. J. Ciolkosz (Eds.), *Soil color* (pp. 51–69). Madison, WI, USA: Soil Science Society of America. doi: 10.2136/sssaspecpub31.c4
- Statgraphics (1992). Statgraphics plus, version 5.1. Reference Manual, Manugistics. Rockville, MD: Statpoint Technologies, Inc.
- Viscarra, R. 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
- Wang, B., Xia, D., Yu, Y., Jia, J., & Xu, S. (2014). Detection and differentiation of pollution in urban surface soils using magnetic properties in arid and semi-arid regions of northwestern China. *Environmental Pollution*, 184, 335–346. doi: 10.1016/j.envpol.2013.08.024