

Parámetros magnéticos y concentración de metales pesados en polvo urbano de la Ciudad de México

Magnetic parameters and concentration of heavy metals in urban dust of Mexico City

Rubén Cejudo^{1,*}, Francisco Bautista², Avto Goguitchaichvili¹, Miguel A. Cervantes-Solano³

¹Laboratorio Universitario de Geofísica Ambiental, Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, Antigua Carretera a Pátzcuaro 8701, Ex Hacienda de San José de la Huerta, 58190 Morelia, Michoacán, México.

²Laboratorio Universitario de Geofísica Ambiental, Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México, Antigua Carretera a Pátzcuaro 8701, Ex Hacienda de San José de la Huerta, 58190 Morelia, Michoacán, México.

³Escuela Nacional de Estudios Superiores Unidad Morelia, Universidad Nacional Autónoma de México, Antigua Carretera a Pátzcuaro 8701, Ex Hacienda de San José de la Huerta, 58190 Morelia, Michoacán, México.

* Autor para correspondencia: (R. Cejudo) ruben@igeofisica.unam.mx

Cómo citar este artículo:

Cejudo, R., Bautista, F., Goguitchaichvili, A., Cervantes-Solano, M. A., 2022, Parámetros magnéticos y concentración de metales pesados en polvo urbano de la Ciudad de México: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 74 (1), A060821. <http://dx.doi.org/10.18268/BSGM2022v74n1a060821>

Manuscrito recibido: 30 de Mayo de 2020
Manuscrito corregido: 6 de Julio de 2021
Manuscrito aceptado: 8 de Agosto de 2021

La revisión por pares es responsabilidad de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Este es un artículo Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>)

RESUMEN

En el presente trabajo se exhiben los resultados de un análisis combinado: magnético y geoquímico, para identificar la relación entre los parámetros magnéticos, la concentración de elementos mayores y los metales pesados en el polvo urbano de Ciudad de México. Se proponen modelos matemáticos que pueden, bajo ciertas circunstancias, estimar la concentración de elementos en el polvo urbano por medio de parámetros magnéticos, así como establecer el grado de precisión de cada modelo. También se proponen valores de umbrales magnéticos para identificar muestras con baja, media y alta concentración de elementos. Los resultados indican que el polvo urbano de la Ciudad de México tiene una concentración variada de minerales esencialmente ferrimagnéticos y partículas superparamagnéticas. La concentración de los elementos en las muestras de polvo urbano fueron: Al entre 3,325 a 27,336 mg kg⁻¹; Cr entre 17 a 117 mg kg⁻¹; Cu entre 15 a 405 mg kg⁻¹; Fe entre 653 a 39,217 mg kg⁻¹; Ni entre 21 a 66 mg kg⁻¹; Pb entre 27 a 366 mg kg⁻¹; V entre 11 a 52 mg kg⁻¹ y Zn entre 102 a 537 mg kg⁻¹. La relación entre los parámetros magnéticos y la concentración de elementos resultaron de tipo lineal, con coeficientes de correlación de Pearson positivos entre 0.26 a 0.69. Los valores umbrales magnéticos propuestos para identificar sitios con problemas de acumulación de elementos (Cr, Cu, Ni, Pb y Zn) en polvo urbano para la Ciudad de México, para susceptibilidad específica son: Baja < 2.86 μm³ kg⁻¹; Moderada: 2.86 a 3.46 μm³ kg⁻¹ y Alta > 3.46 μm³ kg⁻¹. Para la magnetización remanente isoterma de saturación: Baja < 38 mAm² kg⁻¹; Moderada: entre 38 a 46 mAm² kg⁻¹ y Alta > 46 mAm² kg⁻¹. Los modelos matemáticos para estimar la concentración de elementos tuvieron una efectividad del 60%.

Palabras clave: Contaminación, Ciudad de México, propiedades magnéticas, elementos mayores, metales pesados.

ABSTRACT

A combined magnetic and geochemical analysis was carried out to identify the relationship between magnetic parameters, concentration of major elements and heavy metals in urban dust of Mexico City. Here, we propose simple mathematical models that can estimate the concentration of elements in urban dust by means of magnetic parameters, as well as establish the degree of precision of each model. Magnetic threshold values are also proposed to identify samples with low, medium and high concentrations of elements. Urban dust from Mexico City showed a different concentration of essentially ferrimagnetic minerals and superparamagnetic particles. The concentration of the elements in the urban dust samples were: Al between 3,325 to 27,336 mg kg⁻¹; Cr between 17 to 117 mg kg⁻¹; Cu between 15 to 405 mg kg⁻¹; Fe between 653 to 39,217 mg kg⁻¹; Ni between 21 to 66 mg kg⁻¹; Pb between 27 to 366 mg kg⁻¹; V between 11 to 52 mg kg⁻¹ and Zn between 102 to 537 mg kg⁻¹. The relationship between magnetic parameters and concentration of element is rather linear, showing positive Pearson correlation coefficients with values between 0.26 to 0.69. Magnetic threshold values were proposed to identify sites with relatively high accumulation of Cr, Cu, Ni, Pb and Zn. These values for specific magnetic susceptibility are: Low < 2.86 μm³ kg⁻¹; Moderate: 2.86 to 3.46 μm³ kg⁻¹ and High > 3.46 μm³ kg⁻¹; and for remanent isothermal magnetization of saturation: Low < 38 mAm² kg⁻¹; Moderate: between 38 to 46 mAm² kg⁻¹ and High > 46 mAm² kg⁻¹. Mathematical models to estimate the concentration of elements showed effectiveness of about 60%.

Keywords: Pollution, Mexico City, Magnetic properties, major elements, heavy metals.

1. Introducción

En los últimos años, se ha observado un incremento en el número de trabajos orientados a identificar y detectar sitios con problemas de contaminación por concentración de metales pesados mediante el uso de parámetros magnéticos, esto se debe mayormente a que las técnicas magnéticas suelen ser de bajo costo, rápidas y no generan residuos tóxicos (Beckwith *et al.*, 1986; Chaparro *et al.*, 2004; Aguilar *et al.*, 2011; Aguilar *et al.*, 2013; Bautista *et al.*, 2014; Limo *et al.*, 2018; Declercq *et al.*, 2019).

Los estudios de magnetismo ambiental emplean suelo superficial, material particulado (polvos urbanos o sedimentos) o material botánico (hojas, líquenes, etc.) para determinar el valor de su susceptibilidad específica (X_H), magnetización remanente isotermal de saturación (MRIS) (Evans y Heller, 2003) y concentración de metales pesado (Cr, Cu, Ni, Pb, V, Zn y otros), con el objetivo de establecer relaciones entre estas variables y su uso como un método de monitoreo ambiental *proxy* (Maher *et al.*, 2008; Qiao *et al.*, 2013; Szczepaniak *et al.*, 2016; Rachwal *et al.*, 2017; Limo *et al.*, 2018; Declercq *et al.*, 2019).

Las relaciones que se han encontrado entre los parámetros magnéticos y la concentración de metales pesados son de tipo lineal, con coeficientes de correlación (r) de Pearson entre: 0.2 a 0.90 (Zhang *et al.*, 2012; Zhu *et al.*, 2013; Dytlow *et al.*, 2019; Yang *et al.*, 2019; Wang *et al.*, 2020). Las relaciones entre los parámetros magnéticos y la concentración de metales pesados son distintas en cada área de estudio, por lo que no es posible establecer grados de comparación en lugares diferentes (Kim *et al.*, 2009; Morton *et al.*, 2009; Wei y Yang, 2010; Qiao *et al.*, 2013; Limo *et al.*, 2018; Declercq *et al.*, 2019).

Los modelos magnéticos que predicen la concentración de metales pesados pueden llegar a presentar variaciones menores al 30% (entre el valor medido y el valor estimado de la concentración), por lo que pueden ser métodos *proxy* confiables (Kim *et al.*, 2009; Qian *et al.*, 2011; Jordanova *et al.*, 2013; Jones *et al.*, 2015).

El material particulado urbano o polvo urbano contiene diferentes materiales (magnéticos y no magnéticos) que provienen de fuentes antrópicas (emisiones vehiculares, emisiones de fabricas, entre otros) y naturales (suelo, caída de ceniza volcánica, entre otros), el material magnético de origen antrópico incrementa la señal magnética de cualquier muestra ambiental debido a la adición de material ferrimagnético de baja coercitividad, por lo que es posible identificar los sitios con mayor o menor actividad antrópica a partir de la acumulación de material magnético o del incremento en la señal magnética (Thompson y Oldfield, 1986; Evans y Heller, 2003).

La hipótesis principal de los estudios de magnetismo ambiental en entornos urbanos propone que, los minerales ferrimagnéticos son portadores de iones de metales pesados, por lo que, si el polvo urbano tiene minerales ferrimagnéticos, es probable que también contenga metales pesados (Jordanova *et al.*, 2003; Gautam *et al.*, 2004; Jelenska *et al.*, 2008; Kim *et al.*, 2009; Qian *et al.*, 2011; Rai, 2013).

Los modelos que estiman las concentraciones de elementos mediante los parámetros magnéticos suelen omitir su grado de confiabilidad, además de que, no existe un valor de umbral magnético que permita examinar rápidamente si un área contienen concentración alta de metales pesados. Por otra parte, la distribución espacial de los parámetros magnéticos en las ciudades permite identificar los sitios con mayor concentración de materiales magnéticos y en consecuencia de metales pesados (Davila *et al.*, 2006; Maher *et al.*, 2008; Halsall *et al.*, 2008; Mitchell *et al.*, 2009; Morton *et al.*, 2009; Jordanova *et al.*, 2012; Qiao *et al.*, 2013; Cejudo *et al.*, 2015).

Este estudio tuvo como objetivo identificar los parámetros magnéticos que manifiestan una relación con las concentraciones de metales pesados para polvos urbanos, con la finalidad de establecer modelos matemáticos predictivos, así como proponer valores de umbrales magnéticos que permitan identificar áreas con una concentración baja, media y alta de metales pesados mediante los parámetros magnéticos.

2. Área de estudio

Las muestras de polvo urbano fueron recolectadas en la Ciudad de México (CDMX), la cual tiene cerca de 9 millones de habitantes, y una superficie de 1,485 km² (INEGI, 2020). Existen estudios previos sobre propiedades magnéticas, metales pesados y su distribución espacial que sugieren la existencia de relaciones estadísticamente significativas entre los parámetros magnéticos, metales pesado y su distribución geográfica (Morton *et al.*, 2009; Rodríguez *et al.*, 2011; Cejudo *et al.*, 2015).

La CDMX en el sistema de coordenadas Universal Transversal de Mercator (UTM WGS84) Zona 14 N se encuentra entre 473,351 a 501,401 E y 2,128,050 a 2,164,290 N, en la región del Valle de México y rodeada por la cordillera de Guadalupe, a una altitud de 2,800 metros sobre el nivel del mar. En la parte SE y a 89.9 km de la CDMX se encuentra el volcán Popocatepetl, el

cual se encuentra activo y emite ceniza volcánica que puede llegar a la ciudad. El clima es templado con inviernos secos (clasificación del clima Köppen-Geiger: Cwb), con temperatura media de 17.3 °C, precipitación acumulada mensual de 10 mm (Conagua 2017), la dirección del viento de N-S y NW-SE durante Abril y Mayo (SEDEMA, 2018), tiempo durante el cual se llevó a cabo la campaña de muestreo.

La muestra de polvo urbano (PU) se obtuvo a partir del material recolectado dentro de un área de un metro cuadrado sobre el pavimento, el cual fue levantado por medio de un cepillo y recogedor plástico, los fragmentos de fracción gruesa (> 4 mm) fueron retirados en el sitio. Posteriormente, la muestra se colocó dentro de una bolsa de polipropileno para su almacenamiento y traslado al laboratorio, las coordenadas del sitio fueron tomadas en el sistema UTM WGS1984. Se recolectaron 374 muestras de polvo urbano distribuidas sobre

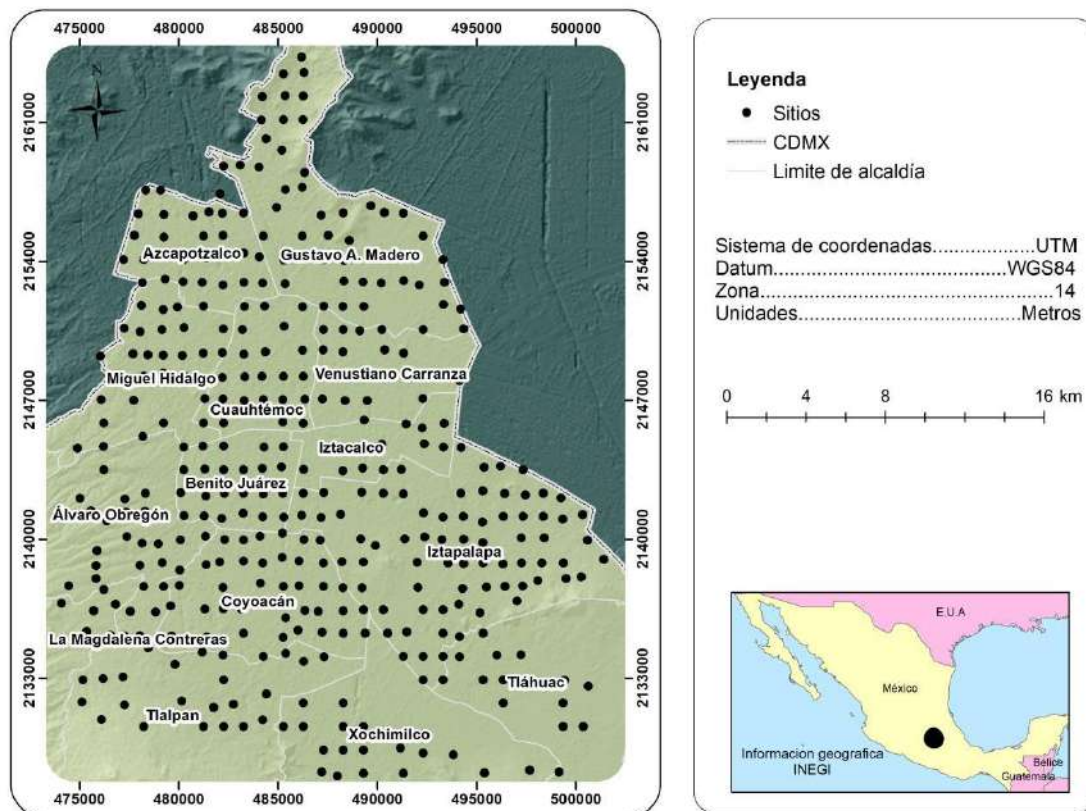


Figura 1 Mapa de localización de sitios de muestreo de material particulado de Ciudad de México.

la superficie de la Ciudad de México, la distancia entre cada sitio fue de 500 m aproximadamente (Figura 1).

En el laboratorio, las muestras se tamizaron en malla del número N°35 (0.5 mm), el material obtenido se empleó para los análisis magnéticos y la determinación de la concentración de Al, Cr, Cu, Fe, Ni, Pb, V y Zn.

2.1. MEDICIONES MAGNÉTICAS

Las mediciones de susceptibilidad magnética y magnetización remanente se hicieron con material tamizado que se colocó dentro de una capsula cúbica de acrílico de 8 cm³.

2.2. SUSCEPTIBILIDAD MAGNÉTICA

La susceptibilidad magnética (K) fue medida a 0.46 kHz (K_{lf}) y 4.6 kHz (K_{hf}) en un medidor de susceptibilidad Bartington MS3 con sensor dual MS2B a temperatura ambiente. Se determinó el parámetro de susceptibilidad específica ($X_{if} = K_{if} / \rho$, ρ es la densidad del material en kg m⁻³); el porcentaje de la susceptibilidad magnética dependiente de la frecuencia ($X_{if}\% = [(K_{hf} - K_{lf}) / K_{lf}] * 100$), el cual permite identificar muestras con minerales ferrimagnéticos superparamagnéticos (SP) ultra finos (< 0.3 μ m). La concentración de partículas SP se define como: Baja si, $X_{if}\% < 2.0$; mixta (hay mezcla de partículas SP con partículas más gruesas entre 0.2 a 110 μ m), si $X_{if}\% \in [2.0, 10.0]$; alta (>75% de partículas SP), si $X_{if}\% \in [10.0, 14.0]$ y para $X_{if}\% > 14$ se les considera valores extraños pocas veces reportados (Dearing, 1999).

2.3. MAGNETIZACIÓN REMANENTE ISOTERMAL

Se hizo la medición de la magnetización remanente adquirida a 1 T, la cual fue considerada como el valor de la magnetización remanente isotermal de saturación (MRIS). La aplicación del campo magnético se hizo con un magnetizador de pulso IM-10 ASC Scientific y la magnetización remanente se midió con un magnetómetro de

giro JR6A (AGICO). Para determinar el valor de cociente S_{-300} , a la muestra se le aplicó un campo magnético en dirección opuesta de la MRIS de 300 mT. Posteriormente se midió su magnetización remanente (IRM_{-300}), el valor de S_{-300} fue calculado como: $S_{-300} = MRI_{-300} / MRIS$. Si la muestra contienen una mayor concentración de minerales de baja coercitividad o ferrimagnéticos, entonces S_{-300} exhibirá valores entre 0.7 a 1.0; si la muestra contiene una mayor concentración de minerales de alta coercitividad magnética o antiferromagnéticos, entonces el valor de S_{-300} exhibirá valores entre 0.0 a 0.7 (Evans y Heller, 2003; Frank y Nowaczyk, 2008).

2.4. CURVAS TERMOMAGNÉTICAS (kT)

La identificación de los portadores magnéticos en el PU se determinaron por medio del cambio de la susceptibilidad magnética en función de la temperatura. Se utilizó un medidor de susceptibilidad magnética AGICO Kappabridge modelo KLY5. Las muestras fueron calentadas de 35 °C a 600 °C, con un ritmo de calentamiento de 20° min⁻¹ y enfriadas con la misma razón de cambio. Las fases magnéticas se determinaron por el método diferencial (d^2M/dT^2) descrito por Tauxe *et al.*, (2018).

2.5. COMBINACIÓN DE PARÁMETROS MAGNÉTICOS

La combinación de los parámetros magnéticos proporciona información adicional de las características de los minerales magnéticos presentes en la muestra de PU. La combinación de X_{if} vs MRIS permite estimar la concentración del material ferrimagnético (magnetita) y el tamaño de grano magnético, donde, las muestras con mayor concentración de materiales magnéticos de baja coercitividad se encuentran en la parte superior derecha del gráfico X_{if} vs MRIS, mientras que, las muestras con menor concentración de ferrimagnéticos tienden a ubicarse en la región inferior izquierda, el tamaño de la partícula magnética crece de derecha a izquierda (Thompson y Oldfield, 1986).

2.6. ANÁLISIS GEOQUÍMICO

La determinación de la concentración de Al, Cr, Cu, Fe, Ni, Pb V y Zn en las 374 muestras de PU, se realizó con un espectrómetro de fluorescencia de rayos X de energía dispersa (FRX-ED) portátil: Genius 9000 Skyray (Skyray, 2019), el cual tiene un detector de SDD y resolución mínima del detector < 139 eV, límite de detección 10 mg kg⁻¹. La curva de calibración fue hecha con los estándar de serie IGL: GLS-1, IGLa-1, IGLbb-3, obteniendo un coeficiente de correlación (r) de 0.98 (Lozano y Bernal, 2005).

Las mediciones se hicieron en material tamizado con malla N° 230, en seco y colocado en una copa plástica. El espectrómetro se orientó perpendicularmente a la muestra a una distancia de 2 mm, cada medición se hizo por triplicado a temperatura ambiente y con una exposición de 30 segundos. El protocolo de medición se basa en la recomendación sugerida en el método 6200 propuesto por EPA (US-EPA, 2007) y el manual de operación Skyray (Skyray, 2019).

2.7. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

La estadística descriptiva, el análisis exploratorio de datos (AED), los coeficientes de correlación y los modelos de estimación se realizaron con el software Statgraphics© V18.

Con la finalidad de identificar las concentraciones de los elementos (Al, Cr, Cu, Fe, Ni, Pb, V y Zn) que muestran relación con los parámetros magnéticos (X_{lf} y MRIS), se llevó a cabo un análisis de componente principales (ACP). Debido a que el ACP puede verse afectado por los valores atípicos, se hizo un AED y se hicieron prueba de normalidad. El ACP fue hecho con el software R.

El polvo urbano es una mezcla de suelo y material antrópico, y actualmente, no hay valores de fondo que determinen su contaminación. En este trabajo, se exploró el uso de los valores de fondo que hay para suelo de CDMX propuestos por Morton *et al.*, (2009b), y el valor de la mediana obtenido de 25 muestras de usos de suelo de baja actividad antrópica y la metodología propuesta por Rueda *et al.*, (2011). Los valores de fondo son

propios para cada área de estudio, debido a la diversidad geológica y ambiental que existe. Por lo tanto, resulta difícil de aplicar o establecer un criterio general para decretarlos.

El factor de concentración (CF, siglas en inglés) se determinó por medio de los valores de fondo obtenidos de los usos de suelo con baja actividad antrópica y se calculó con (Ecuación 1):

$$CF = \frac{C_m}{C_{m \text{ fondo}}} \quad (1)$$

Donde C_m es la concentración medida del m elemento de la muestra y C_{m fondo} es el valor de fondo para el elemento m.

El índice de carga contaminante (PLI, siglas en inglés) se determinó mediante (Ecuación 2):

$$PLI = \sqrt[n]{CF_1 * CF_2 * CF_3 * ... * CF_n} \quad (2)$$

Donde, CF es el factor de contaminación, n representa el número de metales analizados. Las categorías de PLI fueron: PLI < 1, entonces la concentración de metales pesados se encuentra en estado natural; PLI ∈ [1,2], entonces la concentración de metales es moderada y si PLI > 2, entonces la concentración de metales pesados es significativa (Tomlinson *et al.*, 1980; Angulo, 1996).

2.8. ANÁLISIS ESPACIAL

El análisis estructural fue hecho con el software GS+, el cual permitió obtener el semivariograma teórico para poder aplicar un modelo de interpolación espacial para los parámetros magnético, concentración de elementos y PLI de tipo *Kriging* ordinario (KO) (Webster y Oliver, 2007; Robertson, 2015).

La representación geográfica se hizo con el software Arcgis© V.9.

3. Resultados y discusión

3.1. RESULTADOS MAGNÉTICOS

La estadística descriptiva de los parámetros magnéticos se presenta en la Tabla 1.

Los valores obtenidos de X_{if} y MRIS de las 374 muestras del PU de CDMX fueron: la X_{if} entre 1.51 a $6.52 \mu\text{m}^3 \text{kg}^{-1}$, con valor de mediana de $3.18 \mu\text{m}^3 \text{kg}^{-1}$; la MRIS con valores entre 16.40 a $81.43 \text{mAm}^2 \text{kg}^{-1}$, con un valor de mediana de $43.08 \text{mAm}^2 \text{kg}^{-1}$ que indicó una variación en el contenido de material magnético en el PU de CDMX (Tabla 1).

Los resultados de X_{if} y MRIS mostraron un comportamiento lineal, en donde el aumento de los valores de X_{if} y MRIS se debe al incremento del material ferrimagnético o magnetita en el PU. Se observó una dispersión de los valores de los parámetros magnéticos con respecto a la tendencia lineal debido a la presencia de partículas ferrimagnéticas de diversos tamaños ($1 \mu\text{m}$ a 256mm) (Thompson y Oldfield 1986; Evans y Heller 2003, Figura 2).

El $X_{if}\%$ mostró valores entre 0.39 a 7.09% y valor de mediana de 2.14% , indicando concentración baja y media de partículas SP con mezclas de partículas de fracciones más gruesas (Dearing, 1999). El cociente S_{-300} mostró valores entre 0.7 y 1.0 , indicando que el contenido de material ferrimagnético fue predominante sobre el material antiferromagnético en el PU. Los datos formaron

dos conglomerados que sugiere la presencia de sitios con material ferrimagnético antrópico mezclado con materiales antiferromagnéticos. (Evans y Heller, 2003)(Figura 2 y Tabla 1).

La comparación de los valores de X_{if} y MRIS de este estudio con los valores umbrales propuestos por Morton *et al.*, (2009) para X_{if} ($4.0 \mu\text{m}^3 \text{kg}^{-1}$) y por Cejudo *et al.*, (2015) para MRIS ($56 \text{mAm}^2 \text{kg}^{-1}$) indican que hay sitios con alta concentración de elementos en CDMX (Figura 2).

3.2. CURVAS DE SUSCEPTIBILIDAD MAGNÉTICA

El análisis de las curvas kT del PU mostró que el principal portador magnético es magnetita (material ferrimagnético), con una temperatura de Curie cercana a $580 \text{ }^\circ\text{C}$ (Tauxe *et al.*, 2018). Algunas curvas presentaron varias fases magnéticas durante el calentamiento (120 y $350 \text{ }^\circ\text{C}$), que indican la presencia de minerales magnéticos, tales como: goethita o greigita, y cuyo origen puede ser de fuentes naturales (Evans y Heller, 2003; Tauxe *et al.*, 2018) (Figura 3). En varias muestras, se observó un incremento de susceptibilidad en forma de cresta alrededor de $580 \text{ }^\circ\text{C}$, comportamiento asociado a la neoformación de magnetita, cuyo origen puede ser de emisiones vehiculares (Figura 3).

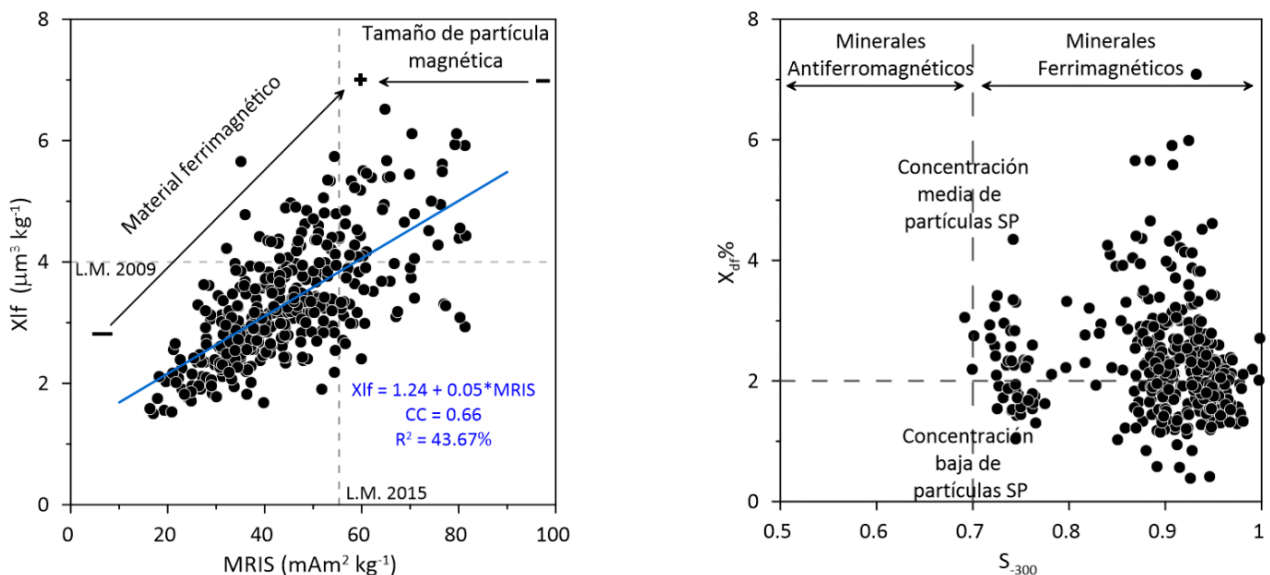


Figura 2 Gráfico de los parámetros magnéticos MRIS vs X_{if} y S_{-300} vs $X_{if}\%$ que indican la presencia de material antiferromagnético, ferrimagnético y tamaño de partículas superparamagnéticas en polvos urbanos de CDMX (L.M. es límite magnético).

Tabla 1. Estadística descriptiva de las mediciones de parámetros magnéticos, elementos mayores y metales pesados en 374 muestras de polvo urbano de Ciudad de México.

	X_{fr}	$X_{df} \%$	MRIS	S_{-300}
Máximo	6.52	7.09	81.43	1.0
Mínimo	1.51	0.39	16.40	0.7
Promedio	3.31	2.31	44.28	0.9
Mediana	3.18	2.14	43.08	0.9
Desviación	0.95	0.90	13.52	0.1
Coefficiente	0.29	0.39	0.31	0.1
Sesgo	5.52	11.77	4.51	-10.5
Curtosis	1.16	15.57	0.70	3.5
Fondo	1.50*			
Límite	4.00*		56.00**	

	Al	Cr	Cu	Fe	Ni	Pb	V	Zn
	(mg kg ⁻¹)							
Máximo	27336	117	405	39217	66	366	52	537
Mínimo	3325	17	15	653	21	27	11	102
Promedio	10577.4	47.4	94.7	4020.9	37.3	115.2	26.5	255.0
Mediana	9194.3	43.7	81.8	3256.4	36.3	102.5	26.2	238.6
Desviación	5522.0	16.9	57.2	3197.3	9.5	63.7	6.3	95.4
Coefficiente	0.5	0.4	0.6	0.8	0.3	0.6	0.2	0.4
Sesgo	8.3	9.9	13.2	34.9	2.7	10.2	4.1	5.2
Curtosis	2.0	8.4	17.5	156.4	-1.7	7.6	3.2	-0.2
Fondo		105	32		56	19	87	76
Límite		280i	3100ii		1600i	400i	78ii	23000ii

i) Valor recomendado por el gobierno de México (SEMARNAT, 2007). ii) Valor recomendado por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (US-EPA Region 9, 2012). Valores de fondo: reportados por Morton *et al.*, (2009). X_{fr} : ($\mu\text{m}^3 \text{kg}^{-1}$); $X_{df} \%$ en %; MRIS: ($\text{mAm}^2 \text{kg}^{-1}$) y S_{-300} adimensional.

3.3. RESULTADOS GEOQUÍMICOS

La estadística descriptiva de las concentraciones de Al, Cr, Cu, Fe, Ni, Pb, V y Zn se muestran en la Tabla 1.

La concentración de los elementos en las 374 muestras de PU fueron diferentes. La concentración de cada elemento fue: Al entre 3,325 a 27,336 mg kg⁻¹; Cr entre 17 a 117 mg kg⁻¹; Cu entre 15 a 405 mg kg⁻¹; Fe entre 653 a 39,217 mg kg⁻¹; Ni entre 21 a 66 mg kg⁻¹; Pb entre 27 a 366 mg kg⁻¹; V entre 11 a 52 mg kg⁻¹ y Zn entre 102 a 537 mg kg⁻¹.

Las concentraciones de los elementos se encontraron por debajo del valor límite permisible recomendado por las entidades gubernamentales y ambientales en CDMX (SEMARNAT 2007; USA-EPA 2012). Sin embargo, algunos sitios mos-

traron una concentración mayor al valor de fondo (VF) propuesta para suelo, como en: Cr (VF: 105 mg kg⁻¹), Cu (VF: 32 mg kg⁻¹), Ni (VF: 56 mg kg⁻¹), Pb (VR: 19 mg kg⁻¹), V (VF: 87 mg kg⁻¹) y Zn (VF: 76 mg kg⁻¹) (Morton *et al.*, 2009; Rodríguez *et al.*, 2011; Ihl *et al.*, 2015). Actualmente, no existen valores de fondo y de referencia para el PU, por lo que se usa el valor de fondo del suelo para su evaluación, aún cuando el PU tiene una matriz diferente (Morton *et al.*, 2009; Rodríguez *et al.*, 2011; Ihl *et al.*, 2015; Cejudo *et al.*, 2015).

La comparación de valores de referencias de los elementos geoquímicos con otros lugares alrededor del mundo puede provocar errores de interpretación, de tal forma que solo son útiles como un marco global y no para indicar si hay contaminación en una área específica, (Tabla 2).

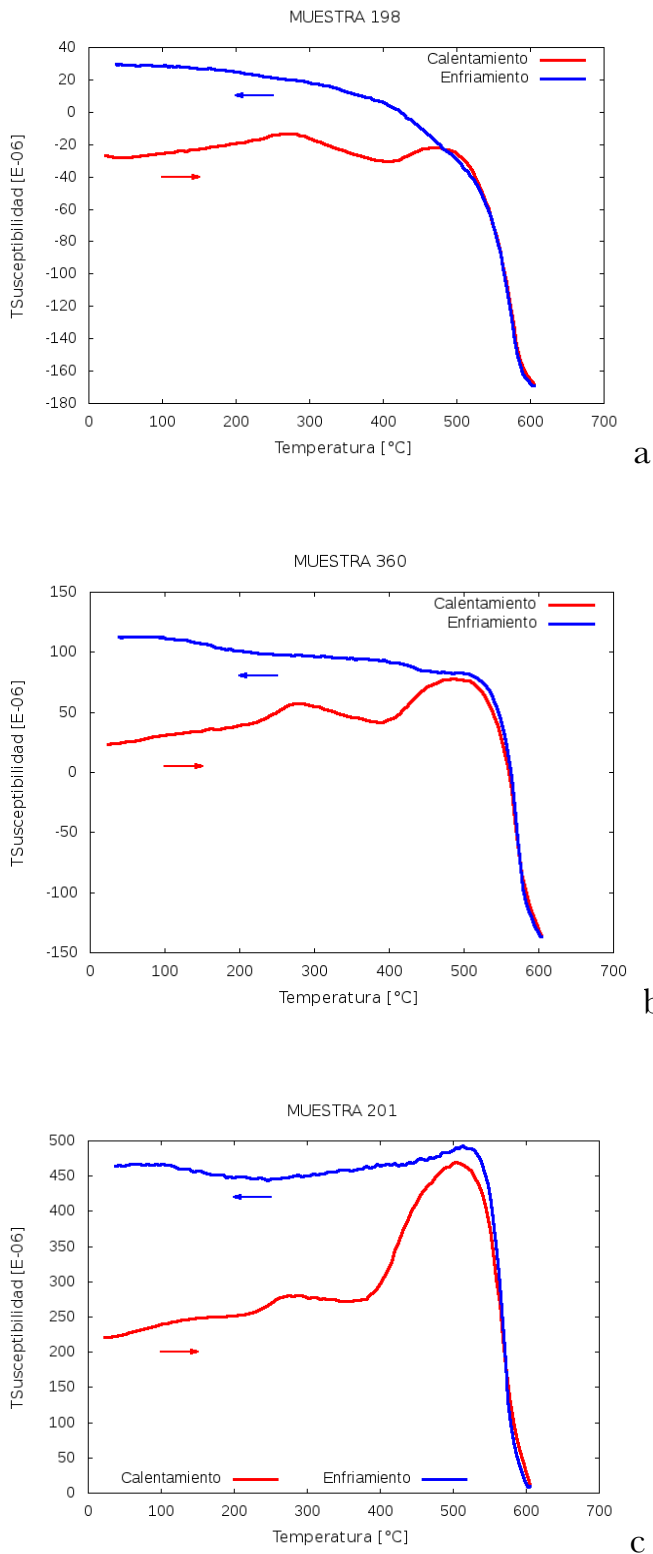


Figura 3 Curvas características de susceptibilidad magnética en función de la temperatura para muestras de polvo urbano de CDMX.

En este estudio, se usaron como valores de fondo las concentraciones de suelo reportados por Morton *et al.*, (2009) para CDMX y los valores de concentración de PU de las zonas de más baja actividad antrópica (Tabla 2).

3.4. ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES

Los resultados del ACP se presentan en la Tabla 3, los datos transformados por logaritmo natural presentaron una distribución normal. El ACP fue usado para expresar las concentraciones de elementos y parámetros magnéticos en un conjunto de componentes lineales (Figura 4). El ACP mostró que, la componente 1 y 2 representan el 60% de la varianza total, por lo que la información de las concentraciones y parámetros magnéticos queda representada con dos componentes. En el plano principal y el círculo de correlación (Figura 4) se observaron cuatro agrupaciones de datos del PU de CDMX. El Grupo I mostró una relación fuerte entre Al, Fe y V, y una relación inversamente proporcional con los parámetros magnéticos y Ni; el Grupo II presentó una correlación inversamente proporcional con el contenido de Cr, Cu, Pb y Zn; el Grupo III exhibió una relación entre X_{IP} , MRIS y Ni, pero inversamente proporcional con Al, Fe y V; el grupo IV presentó una fuerte relación entre Cr, Cu, Pb y Zn, elementos que se asocian con emisiones de tipo antrópico. Dado que, las concentraciones de Al, Fe y V mostraron una relación inversamente proporcional con los parámetros magnéticos, estos no se consideraron para la evaluación de PLI, debido a que se buscó estimar el índice de carga contaminante con el crecimiento de los valores de los parámetros magnéticos.

3.5. CORRELACIÓN ENTRE PARÁMETROS MAGNÉTICOS Y METALES PESADOS

Los trabajos previos de magnetismo ambiental en suelo urbano de la Ciudad de México, mostraron una relación entre parámetros magnéticos y metales pesados, los cuales exhibieron coeficiente de correlación lineal de Pearson (r) entre 0.3 a 0.5 (Morton *et al.*, 2009; Cejudo *et al.*, 2015). En este trabajo, las correlaciones entre los parámetros magnéticos y

Tabla 2. Valores de referencia para metales pesados en suelos de ciudades y países del mundo.

Ciudad	País	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Referencia	
		(mg kg ⁻¹)						
	Holanda	100	36	35	85	140	Brus <i>et al.</i> , 2009	
Málaga	España	132	65	58	69	132	Castillo <i>et al.</i> , 2002	
Granada	España	66	26	20	36	76	Díez <i>et al.</i> , 2009	
Almería	España		25			394	Gil <i>et al.</i> , 2002	
Tirana	Albania	114	36	42	86	151	Gjoka <i>et al.</i> , 2010	
	China	59	32	28	38	118	Wei y Yang, 2010	
Beijing	China	30	19	27	25	58	Chen <i>et al.</i> , 2005	
	Brasil	40	35	13	17	60	Fadigas <i>et al.</i> , 2006	
	México	105	32	56	19	76	Morton <i>et al.</i> , 2009	
	México	39	64	34	100	25	Este estudio	
Suelos del mundo	Promedio	7-221	6-80	4-55	10-84	17-125	McBride, 1994	

elementos en PU se muestra en la Tabla 4, donde, se observó r positivos (entre 0.25 a 52) para X_{if} y MRIS y las concentraciones de Cr, Cu, Ni, Zn y PLI, resultados similares a los reportados en los trabajos de Morton *et al.* (2009) y Cejudo *et al.*, (2015).

La concentración de Al, Fe y V mostraron una relación inversamente proporcional con X_{if} y MRIS (Tabla 4), este resultado concuerda con los datos obtenidos del ACP (Figura 4). La correlación inversa del Al y V se debe probablemente a las características paramagnéticas de estos elementos. Por otra parte, los minerales antiferromagnéticos con contenido Fe pueden provocar una baja señal magnética (Evans y Heller, 2003; Rengifo *et al.*, 2013, Tauxe *et al.*, 2018).

3.6. MODELO MATEMÁTICOS Y UMBRALES MAGNÉTICOS

Los modelos matemáticos para estimar la concentración de elementos (Cr, Cu, Ni, Pb y Zn) y el valor del PLI en el PU, por medio de los parámetros magnéticos, se muestran en la Tabla 5.

Los modelos propuestos para estimar la concentración de Cr, Ni, Zn y PLI, por medio de X_{if} y MRIS, mostraron una precisión de 57 a 74%. El PLI en PU puede ser estimado con X_{if} o MRIS con una precisión del 60% (Figura 5).

En 2009, Morton *et al.*, (2009) propusieron un valor umbral magnético de X_{if} : 4.0 μm³ kg⁻¹ y Cejudo *et al.*, (2015) un valor de MRIS de 46 mAm² kg⁻¹ para identificar sitios con altas concentraciones de metales

pesados. Para proponer, los nuevos valores umbrales, se definió los límites con el valor de PLI; si PLI ≤1, la concentración de elementos es baja; si PLI muestra valores entre 1 y 2, entonces la concentración de elementos es moderada y si PLI >2, entonces la concentración de elementos es alta. En cada modelo se determinó el valor medio del intervalo de PLI para determinar un valor umbral en termino del parámetro magnético. Los resultados se muestran en la Tabla 6.

Los valores umbrales que se proponen para estimar la concentración de Cr, Cu, Pb y Zn son: para X_{if}: Baja <2.86 μm³ kg⁻¹; Moderada: 2.86 a 3.46 μm³ kg⁻¹ y Alta >3.46 μm³ kg⁻¹; para MRIS: Baja <38 mAm² kg⁻¹; Moderada: entre 38 a 46 mAm² kg⁻¹ y Alta >46 mAm² kg⁻¹. Se encontró que entre el 36 a 40% de las muestras de PU de CDMX presentaron valores mayores al valor umbral de X_{if} y MRIS. Por lo tanto, hay un número considerables de sitios que tienen una concentración alta de elementos (Tabla 6). Por otro lado, los cálculos con los valores umbrales magnéticos de Morton *et al.*, (2009) y Cejudo *et al.*, (2015), mostraron que entre el 20% y 17% de los sitios tienen probablemente un problema de concentración metales pesados.

3.7. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL

Con la finalidad de establecer la relación espacial que hay entre la acumulación de material magné-

Tabla 3. Varianza total y acumulada del análisis de componentes principales y matriz de componentes para parámetros magnéticos y metales pesados del polvo urbano de CDMX.

Componente	Varianza	% Var	% Var Acumulada
Dim.1	3.26	32.61	33
Dim.2	2.70	27.01	60
Dim.3	1.19	11.92	72
Dim.4	0.77	7.74	79
Dim.5	0.64	6.35	86
Dim.6	0.46	4.56	90
Dim.7	0.35	3.45	94
Dim.8	0.30	2.97	97
Dim.9	0.25	2.52	99
Dim.10	0.09	0.87	100

Parámetro	Componente		Cos ²		Suma
	Dim.1	Dim.2	Dim.1	Dim.2	
ln X _{lf}	0.718	0.062	0.52	0.00	0.72
ln MRIS	0.745	-0.157	0.55	0.02	0.76
ln Cr	0.583	0.564	0.34	0.32	0.81
ln Cu	0.638	0.420	0.41	0.18	0.76
ln Ni	0.549	0.081	0.30	0.01	0.55
ln Pb	0.403	0.566	0.16	0.32	0.69
ln V	-0.426	0.690	0.18	0.48	0.81
ln Zn	0.467	0.562	0.22	0.32	0.73
ln Al	-0.615	0.679	0.38	0.46	0.92
ln Fe	-0.449	0.773	0.20	0.60	0.89

Tabla 4. Coeficientes de correlación lineal de Pearson para elementos, parámetros magnéticos y PLI del polvo urbano de CDMX.

	ln X _{lf}	ln MRIS	ln Cr	ln Cu	ln Ni	ln Pb	ln V	ln Zn	ln Al	ln Fe	PLI
ln X _{lf}	1.00										
ln MRIS	0.69	1.00									
	0.00										
ln Cr	0.34	0.26	1.00								
	0.00	0.00									
ln Cu	0.43	0.27	0.49	1.00							
	0.00	0.00	0.00								
ln Ni	0.36	0.52	0.32	0.29	1.00						
	0.00	0.00	0.00	0.00							
ln Pb	0.16	0.03	0.69	0.42	0.15	1.00					
	0.00	0.55	0.00	0.00	0.01						
ln V	-0.18	-0.26	0.06	-0.04	0.00	0.06	1.00				
	0.00	0.00	0.28	0.50	0.97	0.28					
ln Zn	0.26	0.19	0.53	0.65	0.14	0.49	0.14	1.00			
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01				
ln Al	-0.31	-0.47	-0.04	-0.11	-0.27	0.09	0.68	0.07	1.00		
	0.00	0.00	0.42	0.04	0.00	0.09	0.00	0.23			
ln Fe	-0.09	-0.30	0.14	0.00	-0.09	0.10	0.75	0.10	0.92	1.00	
	0.07	0.00	0.01	0.94	0.09	0.05	0.00	0.07	0.00		
PLI	0.39	0.25	0.81	0.81	0.39	0.78	0.05	0.78	-0.05	0.10	1.00
	0.00*	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.30	0.00	0.31	0.06	

* valor de P.

Tabla 5. Modelos matemáticos para estimar la concentración de elementos por parámetros magnéticos.

Parámetros	R	R ²	Modelo matemático	n obs	n pred	Precisión
ln X_{if} vs ln MRIS	0.7	47.1	ln MRIS = 2.89426 + 0.737451*ln X_{if}	370	289	78%
ln X_{if} vs ln Ni	0.4	12.7	ln Ni = 3.1819 + 0.344504*ln X_{if}	349	259	74%
ln X_{if} vs ln Zn	0.3	6.6	ln Zn = 5.07524 + 0.339069*ln X_{if}	343	211	62%
ln X_{if} vs ln Cr	0.3	11.2	ln Cr = 3.34864 + 0.391169*ln X_{if}	372	228	61%
ln X_{if} vs PLI	0.4	14.9	PLI = 0.802279 + 0.747927*ln X_{if}	374	225	60%
ln X _{if} vs ln Cu	0.4	18.4	ln Cu = 3.35683 + 0.886519*ln X _{if}	372	151	41%
ln X _{if} vs ln Al	-0.3	9.6	ln Al = 9.77 - 0.542919*ln X _{if}	364	147	40%
ln X _{if} vs ln Pb	0.2	2.5	ln Pb = 4.256 + 0.298531*ln X _{if}	-	-	-
ln X _{if} vs ln V	-0.2	3.3	ln V = 3.42789 - 0.15255*ln X _{if}	-	-	-
ln MRIS vs ln Ni	0.5	27.2	ln Ni = 1.79952 + 0.474246*ln MRIS	347	265	76%
ln MRIS vs ln V	-0.3	6.7	ln V = 4.02728 - 0.206784*ln MRIS	370	281	76%
ln MRIS vs PLI	0.3	7.4	PLI = -0.337863 + 0.536596*ln MRIS	370	228	62%
ln MRIS vs ln Cr	0.3	6.8	ln Cr = 2.7151 + 0.290241*ln MRIS	368	209	57%
ln MRIS vs ln Zn	0.2	-3.5	ln Zn = 4.58362 + 0.236994*ln MRIS	339	170	50%
ln MRIS vs ln Cu	0.3	7.5	ln Cu = 2.36553 + 0.538765*ln MRIS	368	126	34%
ln MRIS vs ln Al	-0.5	22.4	ln Al = 12.1375 - 0.798593*ln MRIS	361	170	47%
ln MRIS vs ln Fe	-0.3	9.2	ln Fe = 10.5159 - 0.649695*ln MRIS	370	124	34%

X_{if}: (µm³ kg⁻¹); MRIS: (mAm² kg⁻¹).

Tabla 6. Valores de PLI para cada elemento relacionado con los parámetros magnéticos para estimar el valor umbral magnético.

Parámetro	PLI <1	PLI [1-2]	PLI >3	Modelo	Parámetro magnético		
ln Cr	3.44	3.69	4.15	X _{if} = exp (0.0629155 + 0.287546*ln Cr)	2.86	3.08	3.51
ln Cu	3.44	4.28	4.93	X _{if} = exp (0.247879 + 0.20769*ln Cu)	2.62	3.12	3.56
ln Ni	3.40	3.56	3.69	X _{if} = exp (-0.143548 + 0.36757*ln Ni)	3.02	3.21	3.36
ln Pb	3.82	4.46	5.10	X _{if} = exp (0.789394 + 0.0820755*ln Pb)	3.01	3.18	3.35
ln Zn	4.79	5.36	5.85	X _{if} = exp (0.110147 + 0.193529*ln Zn)	2.82	3.15	3.46
				Mediana	2.86	3.15	3.46
ln Cr	3.44	3.69	4.15	MRIS = exp(2.85859 + 0.234366*ln Cr)	39.1	41.40	46.1
ln Cu	3.44	4.28	4.93	MRIS = exp(3.13983+0.139792*ln Cu)	37.4	101.6	276.1
ln Ni	3.40	3.56	3.69	MRIS = exp(1.71692 + 0.572697*ln Ni)	39.0	42.8	46.1
ln Zn	4.79	5.36	5.85	MRIS = exp(2.84432 + 0.162912*ln Zn)	37.5	41.2	44.6
				Mediana	38	42	46

X_{if}: (µm³ kg⁻¹); MRIS: (mAm² kg⁻¹).

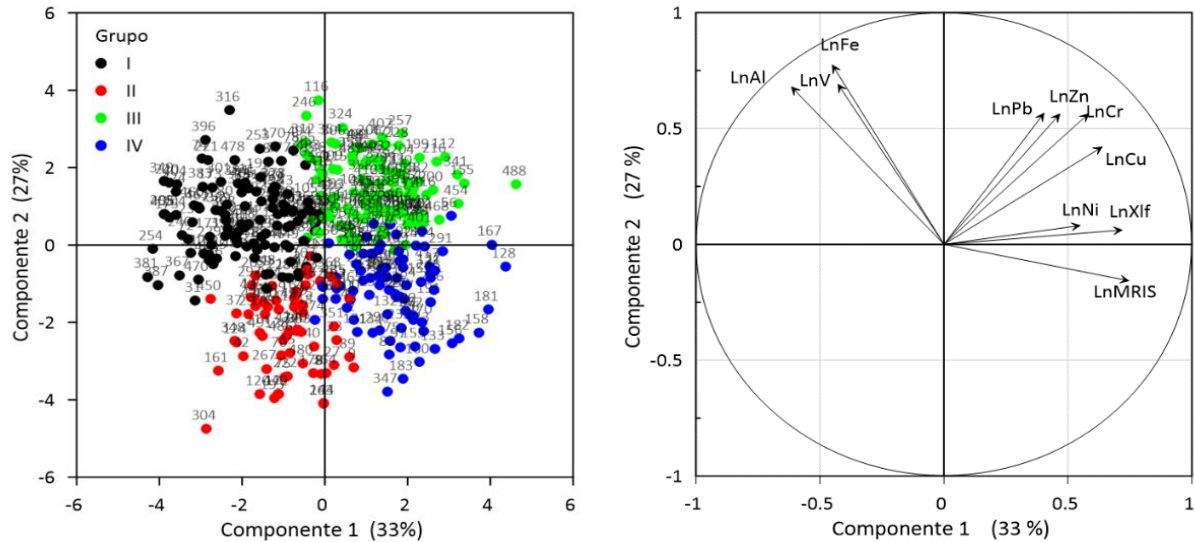


Figura 4 Plano principal y círculo de correlación obtenido del análisis de componentes principal para parámetros magnéticos y concentración de elementos normalizado.

tico y la concentración de elementos, se hizo un análisis geoestadístico para cada parámetro magnético, concentración de elemento y valor de PLI. Los resultados del análisis estructural indicaron : semivariogramas teóricos de tipo esférico y exponencial, con valores de *nugget* entre 0.003 y 0.013 y *sill* entre 0.8 a 0.14, con una varianza estructural > 91% y un rango entre 1.5 a 1.6 km, que indica una correlación espacial alta (Tabla 7, Figura 6). La representación espacial de los parámetros magnéticos muestra que, el mineral magnético se distribuye preferentemente en la dirección NO-SE, con una mayor acumulación en la parte SE de la ciudad (180 km² aprox.), la cual puede estar influenciada por la caída de ceniza volcánica, ya que en esa dirección se encuentra un volcán activo (Popocatepetl). La parte central de la ciudad mostró pequeñas áreas (12 km²), en donde se acumula material magnético (Figura 6). La acumulación del material magnético de este estudio fue similar a la distribución espacial reportado por Cejudo *et al.*, (2015).

Los modelos de distribución espacial del Cr y Zn indicaron distribuciones similares en la ciudad, y algunas áreas de mayor acumulación en la parte norte de la ciudad (Figura 7). Mientras que, el Ni se concentró en la región centro y sur de la ciudad.

La distribución espacial del PLI mostró que, la mayor parte de la ciudad presenta valores de PLI entre 1 y 2, y una zona pequeña de 5 km² al SE registro valores de PLI < 1. Las zonas con valores de PLI > 2, se ubican a lo largo de la ciudad, en dirección NO-SE y algunas zonas en dirección SO-NE (Figura 7).

4. Conclusiones

El análisis de propiedades magnéticas hecho en polvo urbano de la Ciudad de México mostró la presencia de material ferrimagnético mezclado con material antiferromagnético, siendo el principal portador magnético la magnetita, se detectó la presencia de partículas superparamagnéticas mezcladas con partículas de tamaño más grueso.

El estudio magnético del polvo urbano de CDMX contiene material magnético de fuentes antrópicas y de fuentes naturales, la presencia de partículas ferrimagnéticas metaestables indica la adición de material magnético de fuentes vehiculares. Por otra parte, la detección de material antiferromagnético muestra la adición probable de polvo proveniente del suelo de la Ciudad de México.

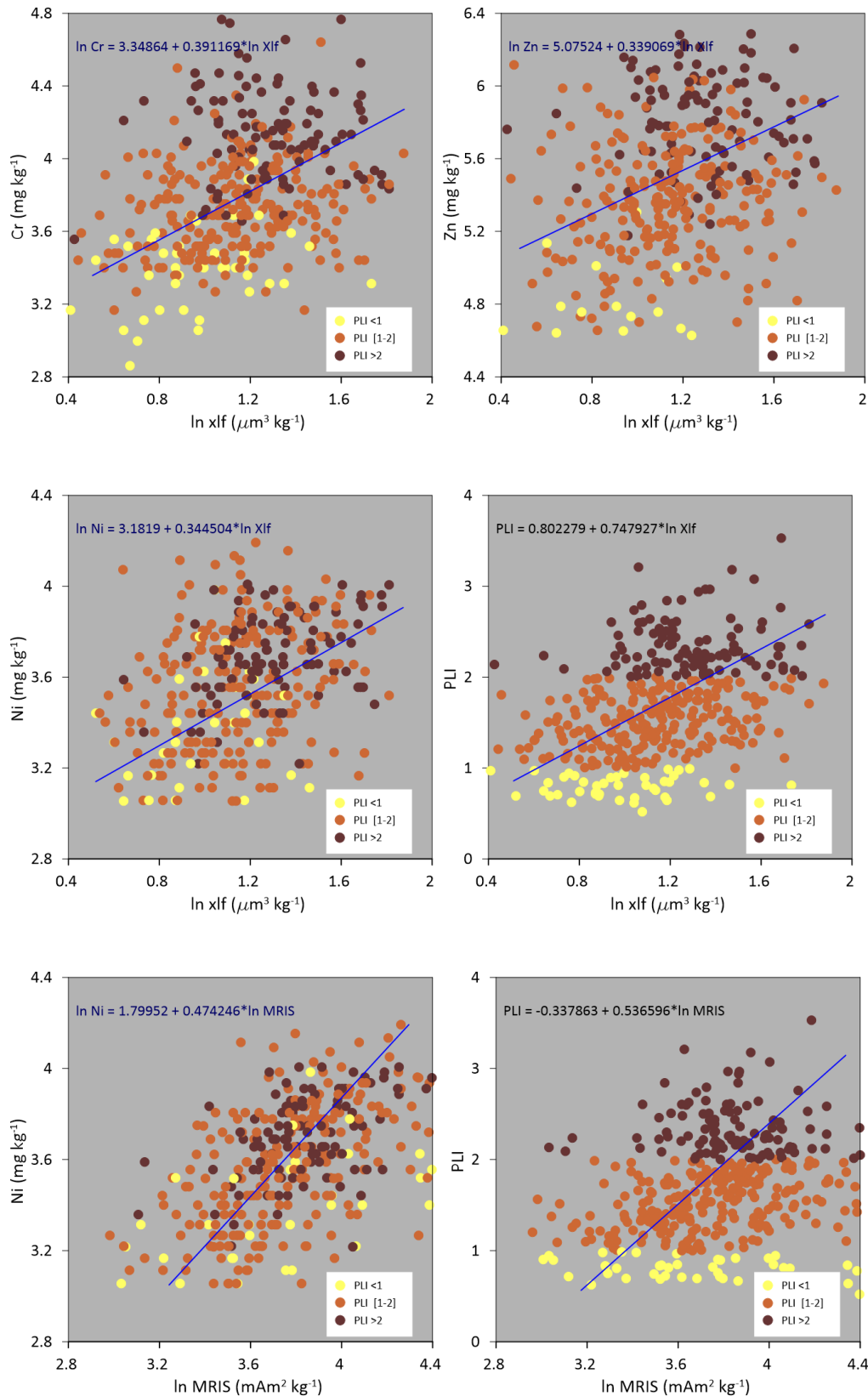


Figura 5 Gráfico de dispersión y modelos matemáticos que permiten estimar la concentración de elemento y PLI, por medio de parámetros magnéticos (las muestras de PU fueron clasificadas con los valores de PLI).

Tabla 7. Correlación espacial para elementos, parámetros magnéticos e índice de carga contaminante de polvo urbano de CDMX.

Parámetro	Modelo	Nugget	Sill	C	varianza estructural %	R ²	Rango (km)
Xlf	Exponencial	0.004	0.08	0.08	0.95	0.86	1.49
MRIS	Esférico	0.003	0.07	0.07	0.96	0.96	1.56
Cr	Esférico	0.003	0.10	0.10	0.97	0.91	1.42
Zn	Esférico	0.003	0.14	0.13	0.98	0.97	0.99
Ni	Esférico	0.000	0.06	0.06	1.00	0.97	1.40
PLI	Exponencial	0.013	0.14	0.13	0.91	0.86	1.68

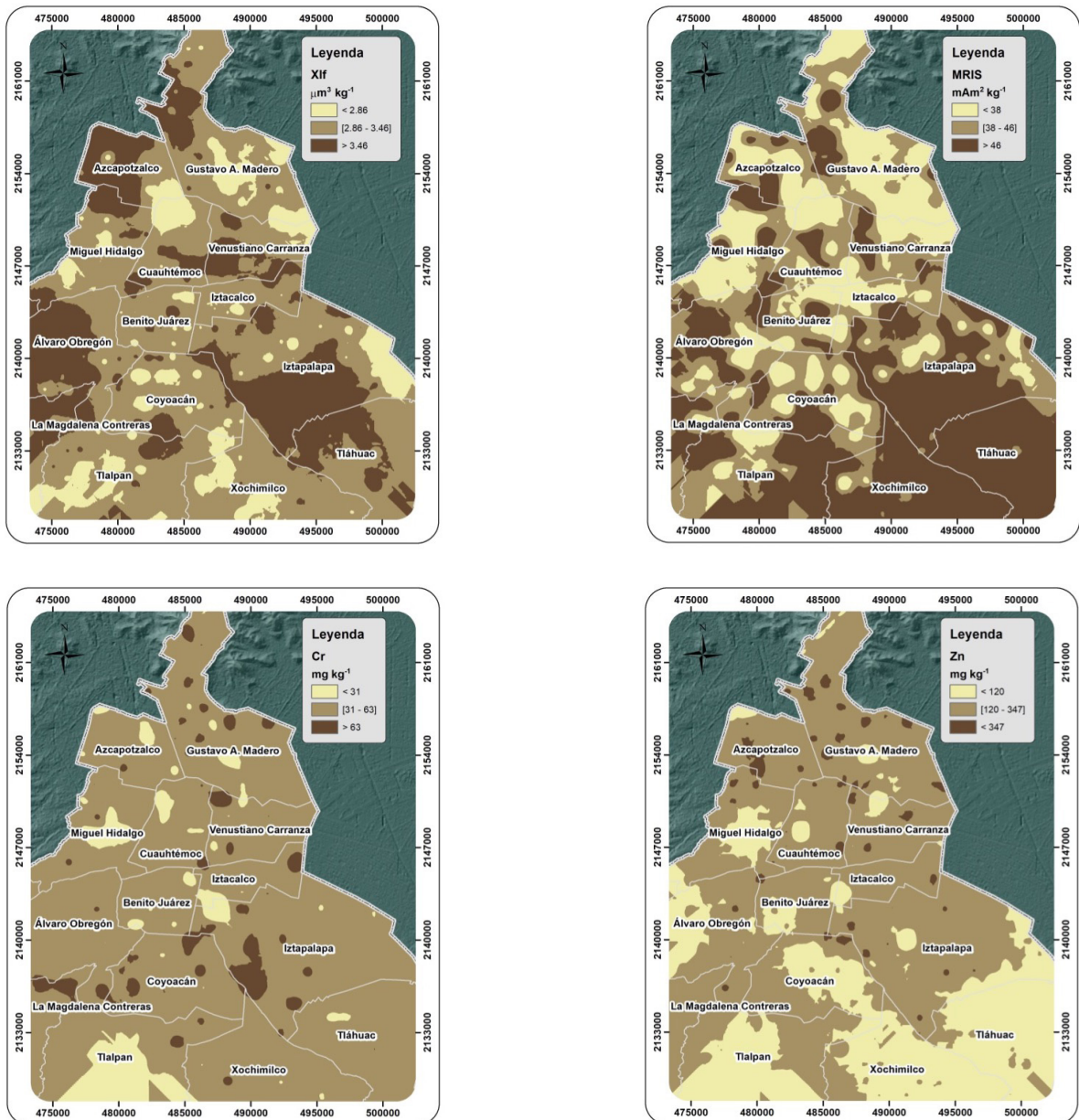


Figura 6 Distribución espacial de los valores de susceptibilidad magnética, magnetización remanente de saturación, concentración de Cr y Zn para polvo urbano de Ciudad de México por modelo de interpolación Kriging Ordinario.

El polvo urbano de CDMX tiene concentraciones variables de elementos mayores y metales pesados. El contenido de los elementos del polvo urbano de mayor a menor, fue: Al > Fe > Zn > Pb > Cu > Cr > Ni > V.

El análisis multivariante mostró que, hay una relación entre parámetros magnéticos y la concentración de elementos. Sin embargo, no todas las relaciones fueron del tipo directamente proporcional y positiva: La concentración de Al y V mostraron un comportamiento inverso con los parámetros magnéticos debido a su comportamiento paramagnéticos, mientras que, la concentración de Cr, Cu, Ni y Zn se logró estimar con los parámetros magnéticos con una precisión entre 60 a 70%.

Se puede estimar el índice de carga contaminante con parámetros magnéticos. El modelo de regresión lineal es capaz de estimar el valor del índice de carga contaminante con una probabilidad del 60%.

Se proponen nuevos valores umbrales magnéticos para identificar sitios con problemas de acumulación de elementos como Cr, Cu, Ni, Pb y Zn en polvo urbano para la Ciudad de México, los cuales proporcionan un grado de eficacia del 60%, como: X_{Ni} : Baja < 2.86 $\mu\text{m}^3 \text{kg}^{-1}$; Moderada: 2.86 a 3.46

$\mu\text{m}^3 \text{kg}^{-1}$ y Alta > 3.46 $\mu\text{m}^3 \text{kg}^{-1}$; para MRIS: Baja < 38 $\text{mAm}^2 \text{kg}^{-1}$; Moderada: entre 38 a 46 $\text{mAm}^2 \text{kg}^{-1}$ y Alta > 46 $\text{mAm}^2 \text{kg}^{-1}$.

El modelo de distribución espacial de susceptibilidad magnética, magnetización remanente isothermal y el índice de carga contaminante mostraron que la dirección noreste-sureste de la Ciudad de México es más propensa a exhibir concentraciones altas de metales pesados. La influencia de la ceniza del volcán Popocatepetl se ve reflejada en la acumulación de material magnético en la zona sureste y fue detectada con los parámetros magnéticos.

Este estudio, proponen nuevos modelos matemáticos que estiman la concentración de elemento e índice de carga contaminante a través de los parámetros magnéticos con un grado de precisión del 60%. Los umbrales magnéticos que se proponen para polvo urbano podrían usarse como *proxy* ambientales.

Contribuciones de los autores

Conceptualización: R. Cejudo (RC), F. Bautista (FB) y A. Goguitchaichvili (AG); Análisis o adquisición de datos: RC, FB, AG y M.Cervantes (MC);

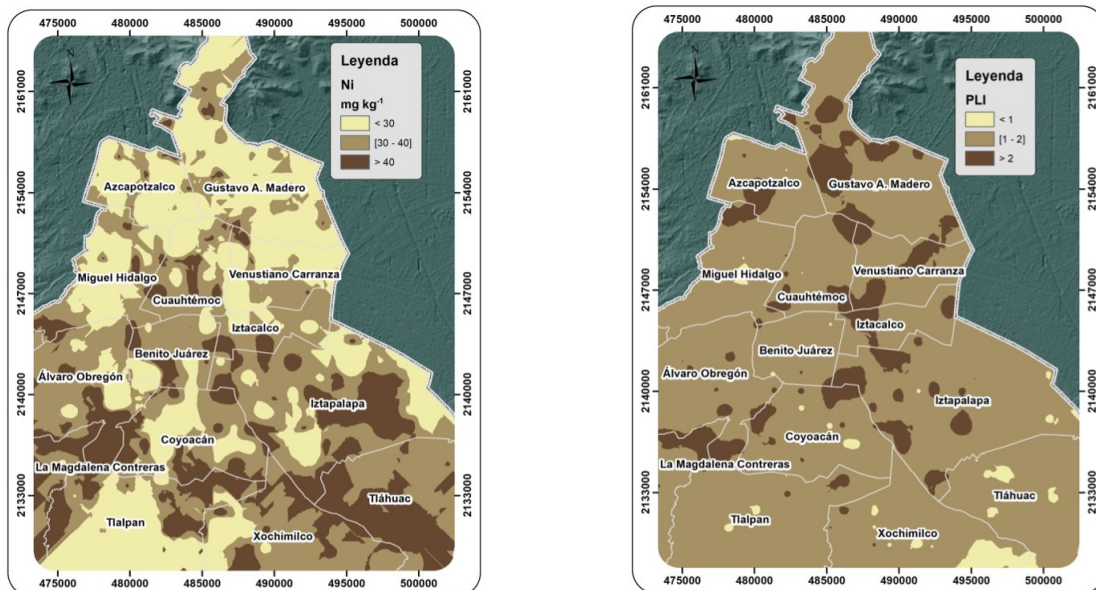


Figura 7 Distribución espacial de la concentración de Ni e índice de carga contaminante de muestras de polvo urbano de Ciudad de México.

Desarrollo metodológico/técnico: RC, FB, AG y MC; Redacción del manuscrito original: RC, AG, FB; Redacción del manuscrito corregido y editado: RC, FB y AG Diseño gráfico: RC, FB y AG; Trabajo de campo: RC; Interpretación: RC, FB, AG y MC.

Financiamiento

Al CONACYT por el apoyo financiero al proyecto: Las propiedades magnéticas de los suelos y sus aplicaciones: contaminación, clasificación y uso del fuego en agricultura. Continuación, Clave: 283135. A la Secretaria de Ciencias, Tecnología e Innovación de la Ciudad de México. Proyecto de investigación: Sistema de monitoreo de la contaminación por metales pesados en polvos urbanos de la CDMX (SECITI/051/2016).

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo del Laboratorio Universitario de Geofísica Ambiental, UNAM además al equipo editorial del BSGM.

Conflictos de interés

No existen conflictos de interés con otros autores, instituciones u otros terceros sobre el contenido del presente artículo.

Referencias

Angulo, E., 1996, The Tomlinson Pollution Load Index applied to heavy metal, 'Mussel-Watch' data: a useful index to assess coastal pollution: *The Science of Total Environment*, 187, 19-56. [https://doi.org/10.1016/0048-9697\(96\)05128-5](https://doi.org/10.1016/0048-9697(96)05128-5)

Aguilar, B., Bautista, F., Goguitchaichvili, A., Morton, O., 2011, Magnetic Monitoring of top soils of Merida (Southern Mexico): *Studia Geophysica et Geodaetica*, 54, 377-388. <https://doi.org/10.1007/s11200-011-0021-6>

Aguilar, B., Bautista, F., Goguitchaichvili, A., Morales, J., 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. [https://doi.org/10.1016/S0016-7169\(13\)71467-3](https://doi.org/10.1016/S0016-7169(13)71467-3)

Bautista, F., Cejudo, R., Aguilar, B., Gogichashvili, A., 2014., El potencial del magnetismo en la clasificación de suelos: una revisión: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 66, 2, 365-376. <https://doi.org/10.18268/BSGM2014v66n2a11>

Beckwith, P., Ellis, J., Revitt, D., Oldfield, F., 1986, Heavy metal and magnetic relationships for urban source sediments: *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 42, 67-75. [https://doi.org/10.1016/S0031-9201\(86\)80009-7](https://doi.org/10.1016/S0031-9201(86)80009-7)

Brus, D., Lamé, F., Nieuwenhuis, R., 2009, National baseline survey of soil quality in the Netherlands: *Environmental Pollution*, 157, 2043-2052. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2009.02.028>

Castillo, M., Ortega, E., Martín, J., 2002, Valores de referencia de elementos traza en vertisoles de la Provincia de Málaga: *Edafología*, 9, 295-304.

Cejudo, R., Bautista, F., Quintana, P., Delgado, M., Aguilar, D., Goguitchaichvili, A., Morales, J., 2015, Correlación entre elementos potencialmente tóxicos y propiedades magnéticas en suelos de la Ciudad de México para la identificación de sitios contaminados: definición de umbrales magnéticos: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 32, 1, 50-61.

Chaparro, M., Bidegain, J., Sinito, A., Jurado, S., Gogorza, C., 2004, Magnetic studies applied to different environments (soils and stream sediments) from a relatively polluted area in Buenos Aires Province, Argentina: *Environmental Geology*, 45, 654-664. <https://doi.org/10.1007/s00254-003-0915-x>

Chen, T., Zheng, Y., Lei, M., Huang, Z., Wu, H., Chen, H., Fan, K., Yu, K., Wu, X., Tian, Q., 2005, Assessment of heavy metal pollution in

- surface soils of urban parks in Beijing, China: *Chemosphere* 60, 542–551. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2004.12.072>
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), 2017, Modelo de temperatura promedio mensual, precipitación acumulada mensual, marzo 2017. Disponible en: <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/temperaturas-y-lluvias/resumenes-mensuales-de-temperaturas-y-lluvias> Consultado: 02 julio 2020.
- Davila, A.F., Rey, D., Mohamed, K., Rubio, B., Guerra, A.P., 2006, Mapping the sources of urban dust in a coastal environment by measuring magnetic parameters of *Platanus hispanic* leaves: *Environmental Science & Technology*, 40, 3922-3928. <https://doi.org/10.1021/es0525049>
- Dearing, J., 1999, *Environmental magnetic susceptibility: Using the bartington MS2 system*: Kenilworth, Chi Publishing, 54p.
- Declercq, Y., Samson, R., Castanheiro, A., Spassov, S., Tack, F., Van De E., De Smedt P., 2019, Evaluating the potential of topsoil magnetic pollution mapping across different land use classes: *Science of the Total Environment*, 685, 345-356. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.379>
- Díez, M., Simón, M., Martín, F., Dorronsoro, C., García, I., Van Gestel, C., 2009, Ambient trace element background concentrations in soils and their use in risk assessment: *Science of The Total Environment*, 407, 4622-4632. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.05.012>
- Dytlow, S., Winkler, A., Gorka, B., Sagnotti L., 2019, Magnetic, geochemical and granulometric properties of street dust from Warsaw (Poland): *Journal of Applied Geophysics*, 169, 58-73. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2019.06.016>
- Evans, M., Heller, F., 2003, *Environmental magnetism, Principles and applications of enviromagnetics*: San Diego, Academic Press, 317 p. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2004.05.004>
- Fadigas, F., Sobrinho, N., Mazur, N., dos Anjos, L., 2006, Estimation of reference values for cadmium, cobalt, chromium, copper, nickel, lead, and zinc in Brazilian soils: *Communications: Soil Science and Plant Analysis*, 37, 945-959 <https://doi.org/10.1080/00103620600583885>
- Frank, U., Nowaczyk, N., 2008, Mineral magnetic properties of artificial samples systematically mixed from haematite and magnetite: *Geophysical Journal International*, 175(2), 449-461. <http://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2008.03821.x>
- Gautam, P., Blaha, U., Appel, E., Neupane, G., 2004, Environmental magnetic approach towards the quantification of pollution in Kathmandu urban area, Nepal: *Physics and Chemistry of the Earth*, 29, 973–984. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2004.02.001>
- Gil, C., Ramos, J., Boluda, R. 2002, Niveles Estándar de Cu, Zn y Co y evaluación de la contaminación en los suelos de los invernaderos de la Comarca del Poniente (Almería, España): *Edafología*, 9, 283-294.
- Gjoka, F., Felix, P., Wegener, R., Salillari, I., Beqiraj, A., 2010, Heavy metals in soils from Tirana (Albania): *Environmental Monitoring and Assessment*, 172, 517-527. <https://doi.org/10.1007/s10661-010-1351-5>
- Halsall, C.J., Maher, B.A., Karloukovski, V.V., Shah, P., Watkins, S.J., 2008, A novel approach to investigating indoor/outdoor pollution links: combined magnetic and PAH measurements: *Atmospheric Environment*, 42, 8902-8909. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.09.001>
- 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 Mexico City: A spatial analysis using ordinary kriging and indicator kriging: *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 31(1), 47-62.

- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2020, Datos-Inegi: México. Consultado el 02 julio 2020. <https://www.inegi.org.mx/datos/>
- Kim, W., Doh, S., Yu, Y., 2009, Anthropogenic contribution of magnetic particulates in urban roadside dust: *Atmospheric Environment*, 43, 3137–3144. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.02.056>.
- Jelenska, M., Hasso-Agopsowicz, A., Kądziak-Hofmokr, M., 2008, Magnetic structure of polluted soil profiles from Eastern Ukraine: *Acta Geophysica*, 56, 1043. 1-22, <https://doi.org/10.2478/s11600-008-0036-8>
- Jones, S., Richardson, N., Bennett, M., Hoon, S., 2015, The application of magnetic measurements for the characterization of atmospheric particulate pollution within the airport environment: *Science of the Total Environment*, 502, 385-390. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.09.010>
- Jordanova, N., Jordanova, D., Veneva, L., Yorova, K., Petrovsky, E., 2003, Magnetic Response of Soils and Vegetation to Heavy Metal Pollutions A Case Study: *Environmental Science & Technology*, 37, 4417-4424. <https://doi.org/10.1021/es0200645>
- Jordanova, D., Jordanova, N., Lanos, P., Petrov, P., Tsacheva, T., 2012, Magnetism of outdoor and indoor settled dust and its utilization as a tool for revealing the effect of elevated particulate air pollution on cardiovascular mortality: *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 13(8), Q08Z49, <https://doi.org/10.1029/2012GC004160>
- Jordanova, D., Rao, S., Kotsev, T., Jordanova, N., 2013, Industrial contamination of alluvial soils near Fe–Pb mining site revealed by magnetic and geochemical studies: *Geoderma*, 192, 237-248. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.07.004>
- Limo, J., Paturi, P., Mäkinen, J., 2018, Magnetic biomonitoring with moss bags to assess stop-and-go traffic induced particulate matter and heavy metal concentrations: *Atmospheric Environment*, 195, 187-195. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.09.062>
- Lozano, R., Bernal J., 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.
- Maher, B., Moore, C., Matzka, J., 2008, Spatial variation in vehicle-derived metal pollution identified by magnetic and elemental analysis of roadside tree leaves: *Atmospheric Environment*, 42, 364–373. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.09.013>
- McBride, M.B., 1994, *Environmental chemistry of soils*: New York, Oxford University Press, 406p.
- Mitchell, R., Maher, B., 2009, Evaluation and application of biomagnetic monitoring of traffic-derived particulate pollution: *Atmospheric Environment*, 43, 2095-2103. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.01.042>
- Morton, O., Hernandez, E., Martinez, E., Soler, A., Lozano, R., Gonzales, G., Beramendi, L., Urrutia, J., 2009, Mexico City topsoils: Heavy metals vs. magnetic susceptibility: *Geoderma*, 151, 121–125. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.03.019>
- Morton, O., Hernandez, E., Gonzales, G., Romero, F., Lozano, R., Beramendi, L., 2009b, Assessment of heavy metal pollution in urban topsoils from the metropolitan area of Mexico City: *Journal of Geochemical Exploration*, 101, 218–224. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2008.07.002>
- Qian, P., Zheng, X., Zhou, L., Jiang, Q., Zhang, G., Yang, J., 2011, Magnetic properties as indicator of heavy metal contaminations in roadside soil and dust along G312 Highways: *Procedia Environmental Sciences.*, 1370-1375. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2011.09.219>
- Qiao, Q., Huang, B., Zhang, C., Piper, J.D.A., Pan, Y., Sun, Y., 2013, Assessment of heavy metal contamination of dustfall in northern China

- from integrated chemical and magnetic investigation: *Atmospheric Environment*, 74, 182-193. <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.03.039>
- Rachwal, M., Kardel, K., Magiera, T., Bens, O., 2017, Application of magnetic susceptibility in assessment of heavy metal contamination of Saxonian soil (Germany) caused by industrial dust deposition: *Geoderma*, 295, 10-21. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.02.007>
- Rai, P., 2013, Environmental magnetic studies of particulates with special reference to biomagnetic monitoring using roadside plant leaves: *Atmospheric Environment*, 72, 113-129. <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.02.041>
- Rengifo, M., Lozano, D., Rojas, Y., 2013, Efecto de la concentración del vanadio en las propiedades magnéticas y estructurales del sistema Fe CIENCIAS - FÍSICA 100-x v x obtenidas por molienda mecánica: *Tumbag*, 1(8), 7-13.
- Robertson, G.P., 2015, *GS⁺: GeoStatistics for the environmental sciences, GS⁺ user's guide*: Michigan, Gamma Design Software, 179 p.
- Rodríguez, M., Morton, O., Hernández, E., Lozano, R., Tapia, V., 2011, The study of metal contamination in urban topsoils of Mexico City using GIS: *Environmental Earth Sciences*, 62, 899-905. <https://doi.org/10.1007/s12665-010-0584-5>
- Rueda, G., Rodríguez, J., Madriñan R., 2011, Metodologías para establecer valores de referencia de metales pesados en suelos agrícolas: *Perspectivas para Colombia: Acta Agronómica*, 60, 203-218.
- Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México (SEDEMA), 2018, *Calidad del aire en la Ciudad de México*. Ciudad de México, Dirección General de Gestión de la Calidad del Aire, Dirección de Monitoreo Atmosférico. Ciudad de México, 160p. <http://www.aire.cdmx.gob.mx/default.php?opc=Z6BhnmI=>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), 2007, *Norma Oficial Mexicana que establece los criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio (NOM-147-SEMARNAT/SSA1)*: México, D.F., Diario Oficial de la Federación, 2 de marzo de 2007, 86p. https://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/1392/1/nom-147-semarnat_ssa1-2004.pdf
- Skyray Instrument, 2019, *Genius 9000 XRF Heavy metals in soil handheld analyzer*. 9 p. https://www.skyrayinstruments.com/PDF/Skyray_Genius_XRF_web.pdf
- Szczepaniak, I., Górka, B., 2016, Magnetic particles in indoor dust as marker of pollution emitted by different outside sources: *Studia Geophysica et Geodaetica*, 60, 297-315, <https://doi.org/10.1007/s11200-015-1238-6>
- Tauxe, L., Banerjee, S.K., Butler, R.F., van der Voo R., 2018, *Essentials of paleomagnetism: fifth web edition*: Los Angeles California. Consultado 02 julio 2020. <https://earthref.org/MagIC/books/Tauxe/Essentials/>
- Thompson, R., Oldfield, F., 1986, *Environmental Magnetism*: Londres, Allen & Unwin: Springer, 237p. <http://dx.doi.org/10.1007/978-94-011-8036-8>
- Tomlinson, D.L., Wilson, J., Harris, C., Jeffrey, D., 1980, Problems in the assessment of heavy-metal levels in estuaries and the formation of a pollution index: *Helgoländer Meeresuntersuchungen*, 33, 566-575. <https://doi.org/10.1007/BF02414780>
- United State Environmental Protection Agency (US-EPA), 2012, *IRIS*. United States, Environmental Protection Agency, Integrated Risk Information System. Disponible en: <http://www.epa.gov/iris/>
- United State Environmental Protection Agency (US-EPA), 2007, *Method 6200: Field*

portable X-Ray Fluorescence spectrometry for the determination of element concentration: USA, 32p. <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-12/documents/6200.pdf>

- Wang, S., Liu, J., Li, J., Xu, G., Qiu, J., Chen, B., 2020, Environmental magnetic parameter characteristics as indicators of heavy metal pollution in the surface sediments off the Zhoushan Islands in the East China Sea: *Marine Pollution Bulletin*, 150, 110642, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.110642>
- Webster, R., Oliver, M., 2007, *Geostatistics for Environmental Scientists* 2nd Edition: Glasgow, Reino Unido, John Wiley & Sons, 315 p. <https://doi.org/10.1002/9780470517277>
- Wei, B., Yang, L., 2010, A review of heavy metal contaminations in urban soils, urban road dusts and agricultural soils from China: *Microchemical Journal*, 94, 99-107. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2009.09.014>

- Yang, D., Wang, W., Lu, H., Ding, Z., Liu, J., Yan, C., 2019, Magnetic properties and correlation with heavy metals in mangrove sediments, the case study on the coast of Fujian, China: *Marine Pollution Bulletin*, 146, 865-873. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.07.035>
- Zhang, C., Qingqing, Q., Appel, E., Huang, B., 2012, Discriminating sources of anthropogenic heavy metals in urban street dusts using magnetic and chemical methods: *Journal of Geochemical Exploration*, 119-120, 60-75. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2012.06.014>
- Zhu, Z., Li, Z., Bi, X., Han, Z., Yu, G., 2013, Response of magnetic properties to heavy metal pollution in dust from three industrial cities in China: *Journal of Hazardous Materials*, 246-247, 189-198. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.12.024>