

**Parámetros magnéticos indicadores de
contaminación por metales pesados en suelos de la
cuenca Almendares-Vento**

**Magnetic indicators parameters of contamination by
heavy metals in soils of Almendares-Vento basin**

Ida Inés Pedroso-Herrera^{1*}

¹Agencia del Medio Ambiente (CITMA), La Habana, Cuba.

*Autor para la correspondencia: ida@ama.cu

RESUMEN

Se investigó la relación entre parámetros magnéticos y la concentración de metales pesados en muestras de suelo de la cuenca Almendares-Vento, con el propósito de verificar si los parámetros magnéticos pueden ser indicadores de la contaminación del suelo. Se realizaron mediciones de susceptibilidad magnética y magnetización remanente, y determinaciones químicas de elementos pesados. Los valores de concentración en las muestras de los elementos pesados (Cr, Fe, Ni, Mn, Cu, Zn y Pb) se determinaron por espectrometría de masa con plasma inductivamente acoplado. La susceptibilidad magnética arrojó valores más altos hacia la parte superior del suelo, hasta los 20 cm de profundidad, lo que puede atribuirse a la presencia en la superficie del suelo de material magnético de origen

antrópico, generado en los procesos productivos de las instalaciones de la región. Se concluye que para los suelos de la cuenca, incrementos de los valores de la susceptibilidad magnética son indicadores del aumento en los niveles de concentración de elementos pesados como consecuencia de la contaminación antrópica.

Palabras clave: contaminación antrópica; suelos; metales pesados; susceptibilidad magnética; magnetización remanente isotérmica; magnetismo ambiental.

ABSTRACT

In order to verify if the magnetic parameters can be indicators of soil contamination, the relationship between magnetic parameters and the concentration of heavy metals in soil samples from the Almdares-Vento basin was studied. Measurements of magnetic susceptibility, chemical determinations of heavy elements and remanent magnetization, were made. The concentration values in the samples of the heavy elements (Cr, Fe, Ni, Mn, Cu, Zn and Pb) were determined by mass spectrometry with inductively coupled plasma. Magnetic susceptibility yielded higher values towards the upper part of the soil, up to 20 cm deep, which can be attributed to the presence of magnetic material of anthropogenic origin on the soil surface, generated by productive processes at the facilities of the region. It is concluded that increases in the values of magnetic susceptibility are indicators of the increase in the concentration levels of heavy elements for soils of the basin as a consequence of human contamination.

Keywords: anthropogenic contamination; soils; heavy metals; magnetic susceptibility; isothermal remanent magnetization; environmental magnetism.

Recibido: 07/06/2018

Aceptado: 20/09/2018

INTRODUCCIÓN

La aplicación de métodos magnéticos ha resultado útil para estudiar zonas afectadas por contaminantes por resultar más económica y relativamente más rápida que los métodos químicos. Diversos estudios han probado la relevancia de algunos parámetros magnéticos, como la susceptibilidad magnética, magnetizaciones remanentes, entre otros, para describir la presencia de contaminantes en distintos ambientes ([Chaparro 2006](#)).

De este modo ha sido posible identificar zonas contaminadas por metales pesados y cartografiar estas áreas para definir la extensión de la contaminación ([Gautam et al. 2004](#); [Chaparro et al. 2010](#); [Chaparro, Lavernia y Sinito 2013](#); [Bućko et al. 2010](#); [Bućko 2012](#); [Jordanova et al. 2010](#); [Fabian et al. 2011](#); [Pedroso 2013](#); [Marié et al. 2016](#)).

El método descansa en el conocimiento de las propiedades magnéticas y de los minerales portadores de la magnetización, determinándose la concentración de los minerales ferrimagnéticos de origen antrópico en muestras de suelo tomadas en zonas potencialmente contaminadas.

En Cuba es incipiente aún el uso de estas técnicas; es por ello que el propósito del estudio que aquí se reporta fue investigar la relación existente entre la concentración metales pesados y parámetros magnéticos en muestras de suelo de la cuenca Almendares-Vento, con el fin de utilizar estos parámetros como indicadores que faciliten el monitoreo de la contaminación. Más precisamente, este trabajo busca demostrar que en los suelos de la cuenca existe correlación entre la concentración de metales pesados y los valores de la susceptibilidad magnética

MATERIALES Y MÉTODOS

Caracterización del área de estudio

Se escogió la cuenca Almendares-Vento ([Fig. 1](#)) por ser un área de presencia potencial de metales pesados, al encontrarse en ella numerosas fuentes de contaminación industrial, como son fundiciones, siderurgia, fábrica de pintura, de baterías, puntos de deposición de residuales municipales sólidos y líquidos, avenidas de alta circulación y zonas agrícolas donde es posible el uso de herbicidas y fertilizantes, todo lo cual favorece la acumulación en los suelos de estos metales, cuyas concentraciones pueden afectar no solo la calidad del suelo, sino la de los productos de la agricultura y de la producción de alimentos para la población.

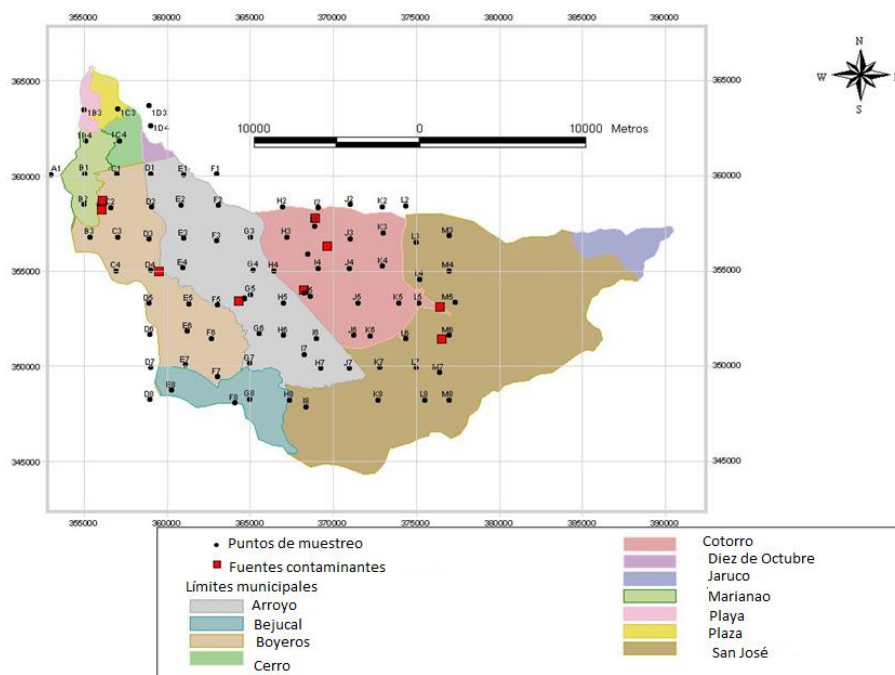


Fig. 1 - Ubicación geográfica de las fuentes contaminantes y los puntos de muestreo.

Se tomaron muestras de suelos cercanos a las fuentes contaminantes con dos objetivos: determinar por métodos químicos en el laboratorio la concentración de metales pesados y medir las propiedades magnéticas (susceptibilidad y magnetización remanente isotérmica). El propósito fue correlacionar los valores que se esperaban incrementados de la susceptibilidad magnética de los suelos contaminados, con los valores de concentración de metales pesados.

Determinaciones de concentración de metales pesados

Se realizaron determinaciones de la concentración de siete metales pesados (Cr, Fe, Ni, Mn, Cu, Zn y Pb) en el laboratorio de ensayos químicos del Centro de Investigaciones para la Industria Minero Metalúrgica (CIPIMM) mediante el método de espectrometría de masa con plasma inductivamente acoplado. Los siete metales fueron

seleccionados sobre la base de las características productivas de las fuentes contaminantes en la cuenca y las posibilidades financieras del presupuesto.

Determinación de las propiedades magnéticas

En el Laboratorio de Paleomagnetismo y Magnetismo de las Rocas del Instituto Nacional de Geofísica y Vulcanología de Roma, Italia, se realizaron mediciones, según procedimientos estandarizados, en las muestras de suelo para identificar los portadores del magnetismo. Estos trabajos incluyeron:

- Mediciones de la susceptibilidad magnética volumétrica $k \times 10^{-6}$ (SI), y su dependencia de la temperatura. Las curvas termomagnéticas fueron obtenidas con ayuda de la estufa CS-3, siguiendo la metodología descrita por [Hroudá \(1994\)](#), con incrementos de la temperatura cada 10 °C hasta 700 °C y el enfriamiento posterior hasta la temperatura ambiente.
- Determinaciones de la susceptibilidad magnética específica para campos magnéticos altos y bajos $\chi \times 10^{-5}$ (m^3kg^{-1}), medida con el puente de susceptibilidad magnética KLY3.
- Determinaciones de la magnetización remanente anhisterésica (MRA) y de la magnetización isoterma remanente (MIR) ($Am^2 kg^{-1}$), medidas con la ayuda del magnetómetro criogénico automático modelo 2G Enterprises (SQUID) y el magnetómetro vibrador de muestra (VSM por sus siglas en inglés) modelo Molspin.
- Determinación de los lazos histerésicos, para el cálculo de sus parámetros de magnetización de saturación (M_s), magnetización remanente de saturación (M_{rs}), fuerza coercitiva (H_c) y remanencia de la coercitividad (H_{rc}).

Se realizó un tratamiento estadístico multivariado ([Alfonso-Roche 1989](#)). Primeramente se determinaron las matrices de correlación, después se hizo el análisis de factores y finalmente un estudio de regresión múltiple que permitió obtener los coeficientes de correlación entre las variables magnéticas y las concentraciones (en %) de los metales pesados y entre el contenido de Fe y el resto de los metales pesados estudiados.

En los cálculos fue utilizado el software Statistica para Windows. Este método permite simplificar la interpretación de la data obtenida y reemplazar las variables originales con un pequeño número de estimación de factores. Los factores son determinados para explicar la máxima varianza de todas las variables observadas. El método empleado fue el de extracción de componentes principales.

La identificación de los portadores del magnetismo (mineralogía y tamaño de los granos) sirvió para establecer su carácter antrópico o natural y los probables efectos de las propiedades químicas de los suelos en su respuesta magnética ante la contaminación.

Los minerales magnéticos más importantes en estas investigaciones son los óxidos de hierro, tales como la magnetita, la hematita y los sulfuros de hierro; por ejemplo, en el proceso de combustión del combustible fósil se forma la pirita (FeS_2) que se disocia y forma la pirrotita (Fe_7S_8) y el gas sulfuro. Alrededor de $1\ 350^\circ\text{k}$ la pirrotita se descompone en sulfuro y hierro. Las partículas esféricas de hierro de $20\ \mu\text{m}$ de diámetro que se forman se oxidan, convirtiéndose en magnetita Fe_3O_4 , de origen antrópico.

Las propiedades magnéticas se evaluaron también en muestras tomadas a diferentes profundidades en los horizontes A y B del suelo. El horizonte A corresponde a la capa externa o superficial del suelo, la

capa arable y la más fértil y el horizonte B es la capa inferior en donde se almacenan los nutrientes del horizonte anterior que han sido movilizados por el arrastre del agua.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Propiedades magnéticas

Los resultados muestran (tablas 1 y 2) que los parámetros indicadores de la concentración del mineral magnético, como son: susceptibilidad magnética k , MRI, MRA, Ms y Mrs, varían mucho entre las muestras y, además, arrojan valores muy elevados comparados con estudios anteriores en que se han evaluado estas propiedades en suelos similares, pero en zonas no industrializadas.

Estos valores altos se asocian a la existencia de concentraciones elevadas de material magnético, posiblemente de origen antrópico, que se genera en los procesos de fundición, combustión, en la siderurgia, entre otros y es transportado por el aire o por el agua y depositado en los suelos.

Tabla 1 - Resultados de las mediciones de los parámetros magnéticos

Muestra	K-10⁻⁸ SI	χ-10⁻⁸m³/ kg	MRA	MIR-10⁻⁴	Tipo de suelo
Alm.01	1 370	186	8,6E-05	0,3	Pardo
Alm.02	3 870	308	1,8E-04	5,2	Pardo
Alm.03	2 670	249	1,4E-04	4,0	Pardo
Alm.04	566	54,3	9,0E-05	2,6	Pardo Gleysoso
Alm.05	604	53,8	6,9E-05	3,9	Pardo Gleysoso
Alm.06	972	86,7	5,5E-05	---	Pardo Gleysoso
Alm.07	653	72,0	1,1E-04	3,6	Pardo Gleysoso
Alm.08	616	48,4	4,1E-01	---	Pardo Gleysoso
Alm.09	581	45,3	4,2E-01	3,1	Pardo Gleysoso
Alm.10	449	42,5	7,2E-01	2,2	Pardo Gleysoso
Alm.11	371	33,5	4,4E-01	---	Gley húmico
Alm.12	260	20,4	1,7E-01	---	Gley húmico
Alm.13	5 480	516	2,0E+00	49,0	Suelo húmico
Alm.14	1 110	153	6,0E-01	18,1	Antrosol úrbico
Alm.15	5 310	607	3,9E+00	79,0	Antrosol úrbico
Alm.16	22 000	1 830	8,5E+00	46,5	Antrosol úrbico
Alm.17	795	89,5	1,3E-01	10,3	Gley húmico
Alm.18	1 740	15,1	2,3E-01	---	Gley húmico
Alm.19	83,3	70,6	-1,7E-01	---	Gley húmico
Alm.20	2 610	40,2	2,8E+01	83,7	Fersialítico rojo
Alm.21	2 860	20,4	3,6E+00	19,3	Fersialítico rojo
Alm.22	8 340	66,6	1,6E+01	36,6	Fersialítico rojo
Alm.23	17 400	22,8	1,4+01	229,8	Antrosol úrbico
Alm.24	24 400	2 990	1,8E+00	72,1	Antrosol úrbico
Alm.25	477	45,3	4,7E-01	1,2	Pardo mullido
Alm.26	445	44,1	4,9E-02	---	Pardo mullido
Alm.27	462	45,5	9,4E-02	---	Pardo sialítico
Alm.28	4 060	273	4,2E+00	20,2	Ferralítico rojo
Alm.29	159 700	11 900	1,2E+02	2 246,8	Mullido
Alm.30	166 400	11 900	7,8E+01	---	Suelo pardo
Alm.31	18 400	2 400	9,9E+00	---	Suelo pardo
Alm.32	18 800	1 400	2,8E+00	130,9	Antrosol úrbico

La tabla 2 exhibe los valores de los parámetros obtenidos a partir de los lazos de histéresis como son: fuerza coercitiva (Hc), la

coercitividad de la remanencia (Hcr), la magnetización remanente de saturación (Mrs) y la magnetización de saturación (Ms), así como las relaciones Mrs/Ms y Hcr/Hc para las muestras de suelo.

Tabla 2 - Valores de los parámetros del ciclo de histéresis

Muestra	Hc (mT)	Hcr(mT)	Ms (Am²)	Mrs(Am²)	Mrs/Ms	Hcr/Hc
Alm. 01	6,0	21,0	47,4	0,3	0,01	3 500
Alm.02	4,5	18,5	44,0	5,2	0,12	4 111
Alm.03	4,5	22,0	31,2	3,3	0,13	4 889
Alm. 04	6	26,5	19,2	2,6	0,14	4 417
Alm. 05	7	24,0	24,7	3,9	0,16	3 429
Alm. 07	6	24,0	27,1	3,8	0,14	4 000
Alm. 08	7	26,0	21,1	3,6	0,14	3 714
Alm. 09	6,5	26,5	25,4	3,6	0,05	4 077
Alm. 10	6,5	23,5	21,9	3,1	0,14	3 615
Alm. 11	5	20,0	---	2,2	---	4 000
Alm. 13	7,5	27,5	502,0	49,0	0,10	3 667
Alm. 14	8	20,0	123,3	18,1	0,15	2 500
Alm. 15	9	21,8	482,0	79,0	0,16	2 417
Alm. 16	8	25,8	416,9	46,5	0,11	3 219
Alm. 17	6	18,5	89,9	10,3	0,11	3 083
Alm. 20	5,5	15,5	452,5	83,7	0,18	2 818
Alm. 21	4,5	13,0	116,9	19,3	0,17	2 889
Alm. 22	4	11,8	206,1	36,6	0,18	2 938
Alm. 23	8	19,0	1 547,1	229,8	0,15	2 375
Alm. 24	6,5	16,8	522,5	72,1	0,14	2 577
Alm. 25	5,5	21,0	11,2	1,2	0,11	3 818
Alm. 26	?	---	30,9?	---	---	---
Alm. 28	6	22,5	125,5	20,2	0,16	3,7
Alm. 29	7,5	21,8	19 417,2	2 246,8	0,12	2,9
Alm. 32	7,5	14,5	624,4	130,9	0,21	1,9

Para evaluar la mineralogía magnética en las muestras estudiadas se pueden considerar las propiedades de histéresis, o sea, la fuerza coercitiva H_c y su remanencia H_{cr} . De la tabla 2 se aprecia que la fuerza coercitiva es relativamente baja, el valor máximo de H_c se obtiene para la muestra Alm. 15 con $H_c = 9\text{mT}$, pero el resto de las muestras presenta valores de H_c bajos; por otra parte, los valores de H_{cr} también son bajos, el máximo alcanzado es $27,5\text{ mT}$ en la muestra Alm.13.

Valores bajos de H_c y H_{cr} son característicos de los óxidos de hierro ferrimagnéticos, tales como magnetita (Fe_3O_4) o maghemita (Fe_2O_3), mientras los altos valores de susceptibilidad magnética combinados con la suave coercitividad que caracteriza a estas muestras es propio de la magnetita. Esto lo corrobora la forma del lazo de histéresis que se observa en la figura 1. Como ejemplo se tomó la muestra alm.14, pero todas presentan una morfología del lazo parecida a la que aquí se exhibe.

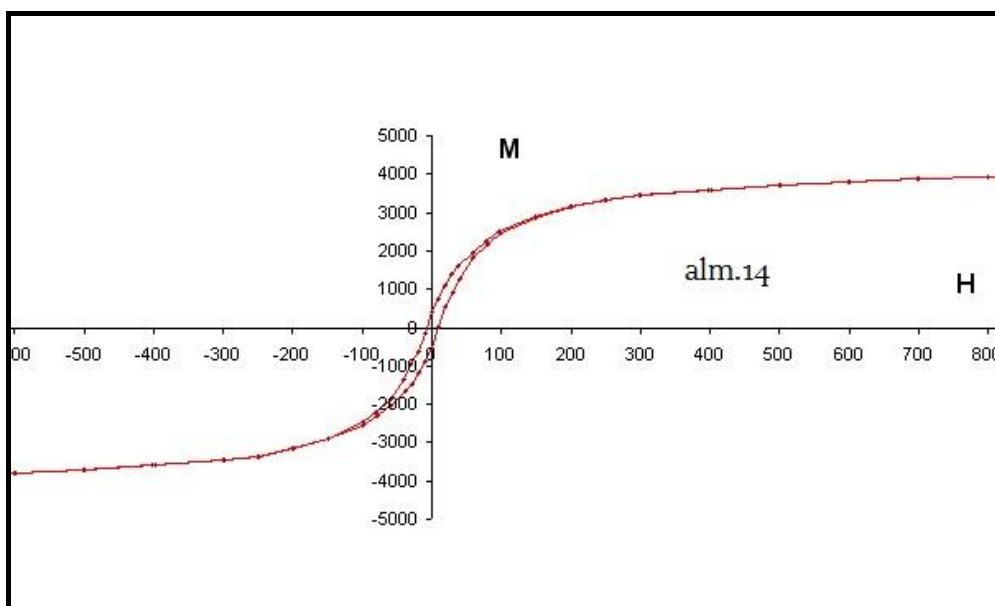


Fig. 1 - Lazo de histéresis de una muestra de suelo de la cuenca Almdares-Vento.

La variación de la susceptibilidad magnética con la temperatura es un indicador importante de la mineralogía magnética; estas curvas permiten identificar los minerales portadores de la magnetización a partir del punto de Curie. En la figura 2 (a y b) se presentan como ejemplo dichas curvas para las muestras alm.02 y alm.13.

La figura 2 evidencia un comportamiento parecido de las curvas de enfriamiento de ambas muestras, un pico aproximadamente a los 250 °C y otro alrededor de los 500 °C, seguido de un decrecimiento de la susceptibilidad aproximadamente alrededor de los 580 °C, que es el punto de Curie de la magnetita. La presencia de los dos picos puede indicar una mezcla de minerales, ya que cuando la diferencia entre las curvas de enfriamiento y calentamiento es muy grande esto puede estar indicando la presencia de impurezas paramagnéticas

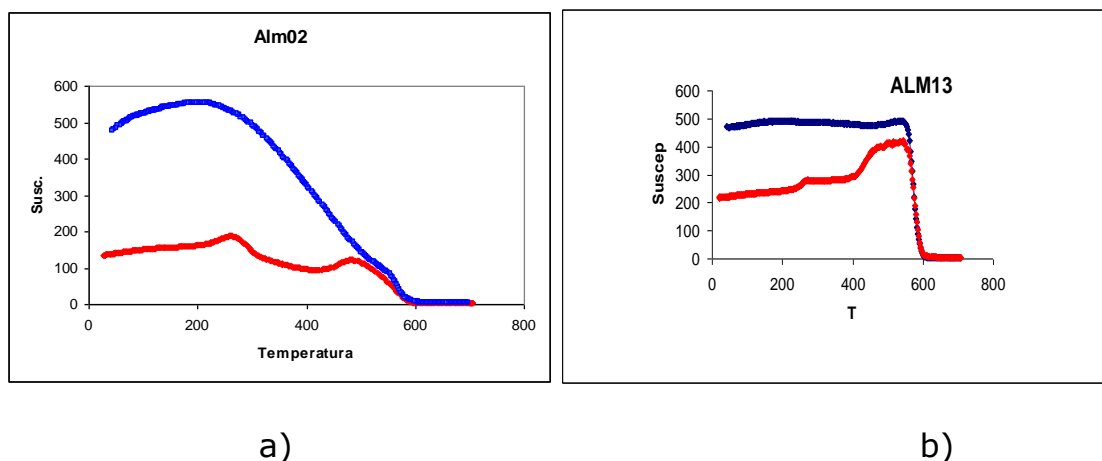


Fig. 2 - Curvas termomagnéticas de las muestras: a) alm.02 y b) alm.13. En rojo la de calentamiento y en azul la de enfriamiento.

Los efectos del tamaño de los granos dependen del balance entre las energías térmicas y magnéticas competentes del cristal, a través de

la formación y reordenamiento de dominios magnéticos. Los cristales ultrafinos (típicamente $< 0,03 \mu\text{m}$ de diámetro) no portan remanencia a temperatura ambiente, pero tienen una significativa susceptibilidad magnética y son conocidos como superparamagnéticos (SP) porque se comportan en campos bajos como paramagnéticos, pero tienen magnetización mucho más fuerte.

Los cristales ligeramente más grandes (típicamente de $0,1 \mu\text{m}$ de diámetro) son fuertes imanes y comúnmente son referidos como granos de dominio simple estable (SSD). Para granos de mayor tamaño la estabilidad magnética comienza a declinar, los cristales exhiben lo que es conocido como comportamiento de pseudos simple dominio (PSD) porque portan una remanencia estable, como los granos SSD, pero de menor intensidad.

En los granos más grandes (típicamente $>1 \mu\text{m}$ de diámetro) los cristales son multidominios (MD) y se comportan como imanes débiles. El diagrama de [Day, Fuller y Schmidt \(1977\)](#) relaciona M_r/M_s y H_{cr}/H_c , sensitiva al tamaño de los granos.

En la figura 3 se presenta el diagrama de [Day, Fuller y Schmidt \(1977\)](#) para las muestras estudiadas en la cuenca, donde puede observarse que, de acuerdo al comportamiento de las muestras, estas exhiben valores en los rangos de $0,5 > M_r/M_s > 0,10$ y $H_{cr}/H_c > 4,0$, correspondientes a las partículas de granulometría mayor, dominados por multidominios MD. Este tamaño de grano es característico de las partículas magnéticas antropogénicas, como las generadas por la combustión de combustible fósil.

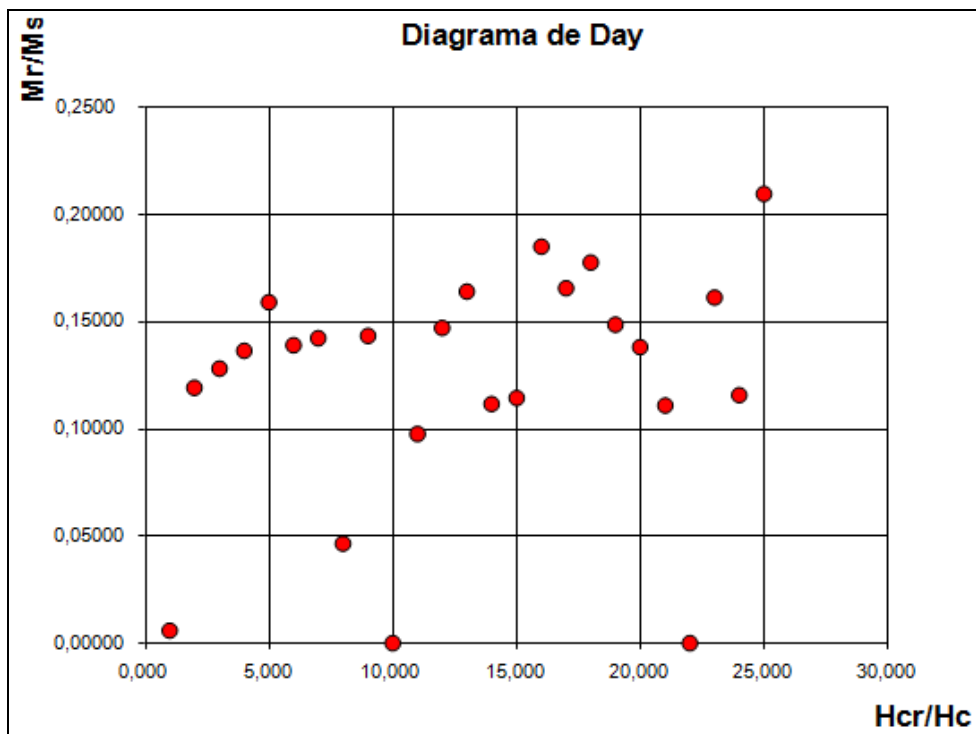


Fig. 3 - Relación Hcr/Hc y Mrs/Ms para las muestras contaminadas estudiadas.

Las figuras de la 4 a la 6 ilustran los resultados para muestras tomadas a diferentes profundidades en los alrededores de la fábrica de pintura Pedro María Rodríguez, de Asbesto-Cemento PERDURIT y en los alrededores de la tenería La Vaquita. Puede observarse que los valores más altos de la susceptibilidad magnética se registran en la parte superior del suelo, por encima de los primeros 20 cm, y a medida que se va profundizando este parámetro va disminuyendo.

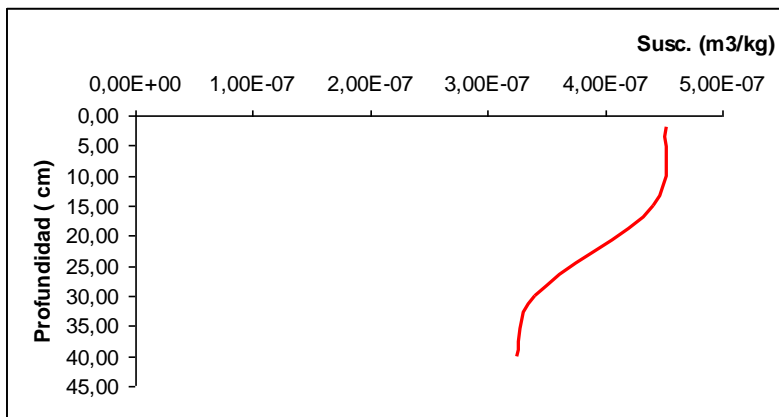


Fig. 4 - Comportamiento de la susceptibilidad magnética de muestras de suelo tomadas entre 0 cm y 40 cm de profundidad en un punto de muestreo próximo a la Fábrica de Pinturas Pedro María Rodríguez en Boyeros.

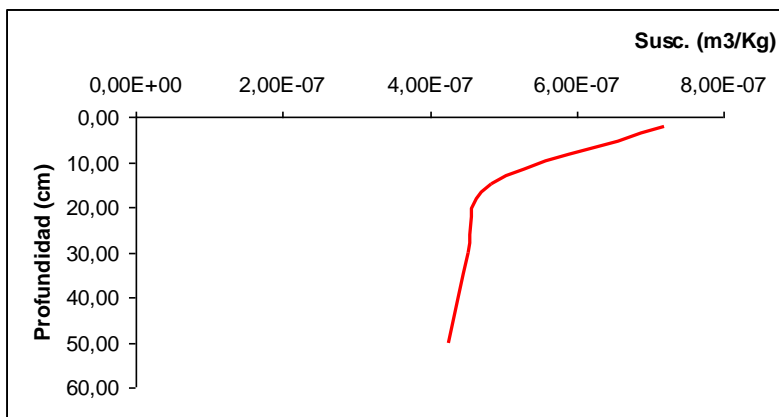


Fig. 5 - Comportamiento de la susceptibilidad magnética de muestras de suelo tomadas entre 0 cm y 50 cm de profundidad en un punto de muestreo próximo a la industria PERDURIT en Boyeros.

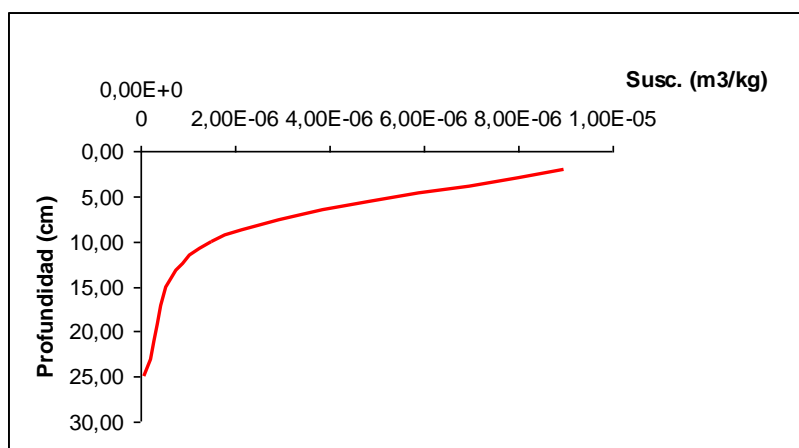


Fig. 6 - Comportamiento de la susceptibilidad magnética de muestras de suelo tomadas entre 0 cm y 25 cm de profundidad en un punto de muestreo próximo a la Tenería La Vaquita en el Cotorro.

Estos resultados indican que el valor de susceptibilidad magnética registrado en la parte superior del suelo no está asociado con la influencia de las rocas formadoras del suelo, como debería ocurrir de forma natural, ni a procesos de pedogénesis; es decir, en un suelo no contaminado los mayores valores de susceptibilidad magnética deben registrarse en la parte inferior influenciado por la roca madre e ir disminuyendo a medida que se pierde profundidad. El hecho de estar ocurriendo lo contrario en estos casos se puede interpretar como un incremento de los valores de la susceptibilidad magnética provocado por la presencia de material magnético de origen antrópico en la superficie del suelo, que puede ser debido a la contaminación por metal pesado generado en los procesos productivos de las instalaciones de la región.

Concentración de metales pesados

En la tabla 3 se presentan los resultados de las determinaciones por el método de espectrometría de masa con plasma inductivamente acoplado de las concentraciones de metales pesados en muestras

pilotos, tomadas en los mismos puntos de la cuenca Almendares, donde se tomaron las muestras para realizar los estudios magnéticos.

Tabla 3 - Valores de concentración (en mg/kg) de metales pesados en muestras de suelo de la cuenca Almendares-Vento. En negritas los valores que exceden las normas

Muestra	Punto de Muestreo	Fe	Mn	Pb	Zn	Cu	Cr	Ni
A1	Fábrica Pintura	4 030	970	2 060	340	170	250	80
A2	Fábrica Pintura	4 770	750	2 060	860	230	330	90
A3	Fábrica Pintura	4 840	9 400	1 850	930	350	350	100
A4	Fábrica Pintura	6 260	1 030	3 080	860	240	390	100
A5	PERDURIT	4 860	1 080	1 640	370	90	360	120
A6	Tenería	4 580	1 050	1 880	360	450	55 800	900
A7	Tenería	15 420	2 270	4 450	560	1 100	139 700	110
A8	Carretera Central	3 700	980	2 420	250	160	1 320	90
A9	Fundición Vulcano	33 130	2 630	3 010	730	620	2 550	380
A10	Fundición Vulcano	13 550	1 290	2 620	2 210	200	1 250	230
A11	Fundición Vulcano	2 900	690	1 530	400	170	280	130
A12	Fundición Vulcano	5 610	770	1 520	200	90	290	130
A13	Fundición Casio	28 470	6 600	3 020	300	80	650	120
A14	EPROELEC	78 600	10 100	5 000	1 240	130	490	140
A15	Finca Felicidad	11 120	2 400	2 150	170	130	270	70
A16	Finca Felicidad	9 860	1 970	2 900	170	80	240	50
A17	Antillana	70 840	8 900	2 710	70	910	2 260	2 900

Los resultados de la tabla 3 para plomo, zinc, cobre y níquel fueron comparados con normas internacionales. Según la norma de la Comisión Europea del Medio Ambiente (CEE) los límites de metales pesados en suelos agrícolas, de acuerdo a la Directiva 86/278/CEE, son los siguientes: Pb (350 mg/kg); Zn (350 mg/kg); Cu (140 mg/kg) y Ni (75 mg/kg). Se puede observar que los valores de estos elementos en la mayoría de los puntos están por encima de esas normas.

También se sobrepasan en muchas de las muestras los valores de referencia de calidad de metales pesados para suelos cubanos publicados por [Rodríguez y otros investigadores \(2014\)](#), quienes establecen los siguientes valores de alerta y de intervención -aquí referidos en ese mismo orden entre paréntesis y en mg/kg-: Pb (72; 180), Zn (300; 450), Cu (150; 200), Ni (300; 400) y Cr (300; 400).

Se derivó de este estudio que las mayores concentraciones de metales pesados corresponden al Fe, Cr y Mn, y le siguen el Pb y el Zn. Este último es uno de los metales que más se moviliza en el suelo, superando al Pb y al Cu, y además, con un alto potencial de biodisponibilidad; los tres metales por su carácter fitotóxico pueden contaminar el acuífero y reducir la fertilidad del suelo.

La correlación de los resultados de los ensayos químicos y de los parámetros magnéticos en el laboratorio así como las mediciones de la susceptibilidad magnética en el terreno apuntan a que, ante incrementos de valores de susceptibilidad magnética de los suelos, es posible esperar un incremento en los niveles de concentración de los metales pesados. Por ello la kapametría de los suelos pudiera ser utilizada como un método rápido y barato preliminar para la detección de altos contenidos de metales pesados en suelos. Asimismo, la cartografía de la susceptibilidad magnética encuentra un espacio también en clima tropical para monitorear contaminación por metales pesados, convirtiéndose en un valioso auxiliar de los métodos geoquímicos para la evaluación y delimitación de las áreas contaminadas.

Resultados de la correlación

En la matriz de correlación entre los elementos analizados (tabla 4) se resaltan los valores por encima de 0,7. En el caso de la correlación de los metales pesados, de la susceptibilidad magnética (χ), la MRI y

kappa (susceptibilidad magnética medida en el campo con equipo portátil) se percibe que los factores de correlación, frecuentemente, son más altos entre los parámetros magnéticos y los contaminantes metálicos que entre el hierro y los propios elementos metálicos.

Tabla 4 - Matriz de correlación

	χ_r	IRM	LOG SUSC	KAPP A	K	Fe %	Mn %	Pb %	Zn %	Cu %	Cr %	Ni %
χ_r	1,00	0,99	0,994	0,994	1,00	0,92	0,31	0,10	-0,14	0,53	0,00	0,94
MRI	0,99	1,00	0,65	0,87	0,99	0,89	0,36	0,09	-0,25	0,50	-0,04	0,96
LOG SUSC	0,994	0,65	1,00	0,55	0,70	0,71	0,07	0,28	0,03	0,48	0,22	0,58
KAPPA	0,994	0,87	0,55	1,00	0,86	0,75	0,54	0,39	-0,28	0,35	-0,06	0,81
K	1,00	0,99	0,70	0,86	1,00	0,90	0,33	0,11	-0,16	0,52	0,01	0,95
Fe_%	0,92	0,89	0,71	0,75	0,90	1,00	0,40	0,23	-0,16	0,53	-0,01	0,84
Mn_%	0,31	0,36	0,07	0,54	0,33	0,40	1,00	0,44	-0,02	0,33	-0,15	0,30
Pb_%	0,10	0,09	0,28	0,39	0,11	0,23	0,44	1,00	0,02	0,39	0,41	-0,01
Zn_%	-0,14	-0,25	0,03	-0,28	-0,16	-0,16	-0,02	0,02	1,00	0,09	-0,05	-0,23
Cu%	0,53	0,50	0,48	0,35	0,52	0,53	0,33	0,39	0,09	1,00	0,62	0,49
Cr_%	-0,00	-0,04	0,22	-0,06	0,01	-0,01	-0,15	0,41	-0,05	0,62	1,00	0,01
Ni_%	0,94	0,96	0,58	0,81	0,95	0,84	0,30	-0,01	-0,23	0,49	0,01	1,00

La susceptibilidad para bajos campos χ_r , el Fe, el Cu y el Ni agrupados en el factor 1 presentan altos valores con una varianza total de este factor de 43,58 % en la dirección de la primera componente principal; el incremento en la concentración de estos elementos en el suelo es la causa de los valores incrementados de la susceptibilidad magnética.

En la extracción de los componentes principales, para el caso de χ_r , los mayores factores de carga corresponden al factor 1 donde se destacan además de χ_r , el Fe, el Ni y el Cu, con quien posee una alta correlación.

A partir de estos resultados se realizó un estudio de regresión múltiple en varios pasos, tomando en el primer paso, para la correlación, a la susceptibilidad magnética específica como variable dependiente y aquellos elementos que habían resultado agrupados con una mayor carga en conjunto con la susceptibilidad, los elementos pesados que aparecían agrupados en el factor 1. Posteriormente, en cada paso, se fueron agregando los otros elementos hasta completar el conjunto de siete elementos químicos. En todos los casos se arrojó que el modelo de regresión explica la relación entre las variables, al dar positiva la prueba de hipótesis por el estadígrafo de Fisher, ya que en ningún caso la F calculada cayó en la región crítica. Sin embargo, del análisis de factores se pudo apreciar que para el Cr y el Mn existe una disociación con la susceptibilidad magnética.

Análisis de regresión múltiple para χ

Para todos los casos se obtuvo un coeficiente de correlación mayor de 0,90. La prueba de Fisher se pasó exitosamente en todos los pasos. Los coeficientes de determinación múltiples R^2 obtenidos de la comunalidad de los factores son buenos para todos los elementos pesados y, por tanto, lo son los coeficientes de correlaciones múltiples y parciales de cada variable correlacionada con χ .

El modelo funcional que predice a la susceptibilidad magnética específica a partir de las concentraciones de los metales pesados quedaría como:

$$\chi = -0,000119 + 0,341 \text{ Fe \%} + 0,668\text{Ni\%} + 0,074 \text{ Cu\%} + 0,83 \text{ Pb\%} + 0,048 \text{ Zn\%} - 0,11 \text{ Mn\%} - 0,2 \text{ Cr (1)}$$

CONCLUSIONES

- En los suelos de la cuenca Almendares-Vento existe evidente correlación entre la concentración de contaminantes metálicos pesados (fundamentalmente Ni, Cu, Fe) y parámetros magnéticos como la susceptibilidad magnética y la MRI.
- Los valores altos de susceptibilidad magnética en la superficie del suelo es consecuencia de la contaminación con metales pesados provenientes de la atmósfera que se acumulan hasta una profundidad aproximada de 10 cm-15 cm del suelo.
- El hecho de que los factores de correlación sean frecuentemente más altos entre los parámetros magnéticos y los contaminantes metálicos que entre el hierro y esos mismos elementos metálicos, indica que el hierro está dividido entre una fracción débilmente magnética de origen natural (arcillas, hidróxido de hierro, hematita, goetita) y una fracción fuertemente magnética derivada de fuentes antrópicas.
- Los minerales magnéticos que poseen alta susceptibilidad y baja coercitividad, como la magnetita y la maghemita, predominan entre los minerales portadores de la magnetización debida al aporte antrópico por la contaminación industrial.
- La correlación obtenida entre los resultados de los ensayos químicos y los parámetros magnéticos permite presumir que incrementos de los valores de la susceptibilidad magnética son indicadores de aumento en los niveles de concentración de elementos pesados.
- Los suelos de la cuenca Almendares-Vento tienen altos niveles de contaminación por metales pesados. En particular, se destacan por su elevada toxicidad los contenidos de Pb detectados en EPROLEC, la tenería La Vaquita, la Fábrica de

Pinturas Pedro María Rodríguez, las Fundiciones Vulcano y Casio Martínez y Antillana de Acero, así como los altos valores de Cr en la tenería La Vaquita. La finca de cultivos menores Felicidad, que utiliza como fuente de regadío las aguas del Almendares, tiene una alta contaminación particularmente por los elevados valores de Mn y Pb.

REFERENCIAS

- Alfonso-Roche, J. R. 1989: *Estadísticas en las Ciencias Geológicas*. Tomos I y II. Ciudad de La Habana: Editorial ISPJAE.
- Bučko, M. S. 2012: *Application of Magnetic, Geochemical and Micro-Morphological Methods in Environmental Studies of Urban Pollution Generated by Road Traffic*. Doctoral dissertation. University of Helsinki.
- Bučko, M. S.; Magiera, T.; Pesonen, L. J. y Janus, B. 2010: Magnetic, geochemical, and microstructural characteristics of road dust on roadsides with different traffic volumes - case study from Finland. *Water, Air, and Soil Pollution*, 209(1-4): 295-306.
- Chaparro, M. A. E. 2006: *Estudio de parámetros magnéticos de distintos ambientes relativamente contaminados en Argentina y Antártida*. Ciudad de México: Ed. Geofísica UNAM. ISBN: 970323567-0.
- Chaparro, M. A. E.; Lavernia, J. M. y Sinito, A. M. 2013: Biomonitoring of urban air pollution: Magnetic studies and SEM observations of corticolous foliose and microfoliose lichens and their suitability for magnetic monitoring. *Environmental Pollution*, 172: 61-69. doi:10.1016/j.envpol.2012.08.006

- Chaparro, M. A. E.; Marié, D. C.; Gogorza, C. S.; Navas, A. y Sinito, A. M. 2010: Magnetic studies and scanning electron microscopy - x-ray energy dispersive spectroscopy analyses of road sediments, soils, and vehicle-derived emissions. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 54(4): 633-650.
- Day, R.; Fuller, M. y Schmidt, V. A. 1977: Hysteresis properties of titanomagnetites: grain-size and compositional dependence. *Physics of the Earth and planetary interiors*, 13(4): 260-267.
- Comunidad Económica Europea. 1986: Directiva 86/278/CEE del Consejo de 12 de junio de 1986 relativa a la protección del medio ambiente y, en particular, de los suelos, en la utilización de los lodos de depuradora en agricultura. *Diario Oficial* L(181): 0006-0012. Consultado: 3 abril 2018. Disponible en: <http://data.europa.eu/eli/dir/1986/278/oj>
- Fabian, K.; Reimann, C.; McEnroe, S. A. y Willemoes-Wissing, B. 2011: Magnetic properties of terrestrial moss (*Hylocomium splendens*) along a north-south profile crossing the city of Oslo, Norway. *Science of the Total Environment*, 409(11): 2252-2260.
- Gautam, P.; Blaha, U.; Appel, E. y Neupane, G. 2004: Environmental magnetic approach towards the quantification of pollution in Kathmandu urban area, Nepal. *Physics and Chemistry of the Earth, parts A/B/C*, 29(13-14): 973-984.
- Hrouda, F. 1994: A technique for the measurement of thermal changes of magnetic susceptibility of weakly magnetic rocks by the CS-2 apparatus and KLY-2 Kappabridge. *Geophysical Journal International*, 118(3): 604-612.
- Jordanova, D.; Petrov, P.; Hoffmann, V.; Gocht, T.; Panaiotu, C.; Tsacheva, T. y Jordanova, N. 2010: Magnetic signature of

different vegetation species in polluted environment. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 54(3): 417-442.

Marié, D. C.; Chaparro, M. A. E.; Irurzun, M. A.; Lavernia, J. M.; Marinelli, C.; Cepeda, R.; Böhnelt, H. N.; Castañeda, A. G. y Sinito, A. M. 2016: Magnetic mapping of air pollution in Tandil city (Argentina) using the lichen *Parmotrema pilosum* as biomonitor. *Atmospheric Pollution Research*, 7(3): 513-520.

Pedroso, I. 2013: Zonación de la contaminación por metales pesados en la cuenca del Almandares según mapeo de la susceptibilidad magnética. *Minería y Geología*, 29(3): 1-17.

Rodríguez, M.; Muñiz, O.; Montero, A.; Araújo do Nascimento, C. W.; Calero, B.; de Aguiar, A. M.; Chávez, N.; Leal, A. y Hernández, M. 2014: Valores de calidad para metales pesados en suelos de Cuba. En: XX Congreso Internacional de Ciencias Agrícolas 2014. Disponible en:
<http://ediciones.inca.edu.cu/files/congresos/2014/CD/memorias/p-onencias/talleres/ENP/ra/ENP-O.05.pdf>