

ESTUDIO DE LA EVOLUCIÓN EDÁFICA DE LOS SUELOS ROJOS EN BASE A SU SUSCEPTIBILIDAD MAGNÉTICA.

Pascual Cosp, J.¹; Clemente Salas, L.²; Ventura García Fernández, L.²; Zapatero Arenzana, J.¹; Moreno López, A.²; Moya García, M.V.¹; Ramiro Monge, A.¹.

¹Departamento de Ingeniería Civil, de Materiales y Fabricación. E.T.S.I.I.

Universidad de Málaga. Campus de El Ejido s/n, 20013 Málaga

²Instituto de Recursos Naturales de Sevilla. C.S.I.C. Apartado 1052. Sevilla 41080.

1. INTRODUCCIÓN.

Los contenidos y formas del hierro en el suelo, así como su distribución en el perfil, son datos de suma importancia para el conocimiento de los procesos edafogénicos [1]. La contribución del hierro a la edafogénesis viene determinada por su capacidad para formar quelatos con la materia húmica, su solubilidad variable dependiendo del grado de oxidación, la posibilidad de que forme coloides que pueden evolucionar en distintas direcciones dependiendo del medio en que se encuentren y, por último, por su capacidad de formar parte de las estructuras de algunos minerales de la arcilla.

Los métodos tradicionales para su estudio (extracción química, difracción de rayos X, análisis térmico, etc.) suministran información sobre que compuestos de hierro están presentes en el suelo y, la proporción de los mismos que es extraíble bajo unas condiciones determinadas. Sin embargo, en los suelos se presentan mezclas de materiales con grados variables de cristalinidad y diferentes proporciones, pero no siempre existe una relación directa entre la proporción y la importancia edafogénica.

La determinación de la susceptibilidad magnética que presentan los suelos, combinada con otras técnicas de estudio mineralógico y extractivas, suministra una importante información en los estudios de génesis y evolución de los suelos.

La heterogeneidad que presentan los suelos conduce a que el comportamiento magnético determinado por medida directa sea, en realidad, la consideración conjunta de las contribuciones de cada una de las especies presentes en ellos. A la susceptibilidad que presenta un suelo contribuyen, no solo las distintas especies presentes (diamagnéticas, paramagnéticas y ferromagnéticas), sino también el tamaño y forma de los granos.

La contribución a la susceptibilidad magnética de la forma de grano del material se puede determinar por la expresión de Mullins (1977):

$$\chi_d = f_i K_i / (1 + N_i K_i)$$

siendo: K_i la susceptibilidad intrínseca de grano de material, f_i la fracción en volumen de los granos de forma i , y N_i el factor de magnetización que a su vez es función de la forma del grano.

Admitiendo que para el tamaño de las partículas con las que se trabaja $h/D \approx 0,7$, el valor de N que corresponde a estas partículas es 0,33, por lo que para partículas paramagnéticas será válida la simplificación $\chi \cdot d = f_i \cdot K_i$ para todos aquellos casos en los $N > K_i$. No obstante, cuando se trabaja con compuestos la simplificación más adecuada es: $\chi \cdot d = f_i / N_i$.

Los suelos son mezclas de minerales muy diversos e incluso de integrados, por este motivo la susceptibilidad medida corresponde realmente a:

$$\bar{\chi} = \sum \chi_i \cdot f_i$$

El comportamiento magnético del suelo puede, no obstante, por sí solo ser indicativo de su *estado evolutivo*, como lo han apuntado numerosos autores [10]; [3], [8].

2. MATERIALES.

El estudio se ha llevado a cabo en suelos que constituyen dos catenas de evolución. La primera se sitúa en el Alto de la Quiruela (Alanís, Sevilla) y está conformada por tres perfiles de suelos desarrollados sobre pizarras precámbricas: I Lithic-Dystric Xerorthent, II Lithic-Ultic Haploxeralf y III Typic Rhodoxeralf. El material original formado por pizarras (constituidas por micas di y trioctaédricas), cuarzo, feldespatos, cloritas y silicatos de hierro tipo fayalita o granates, estuvo sometido a un proceso hidrotermal que produjo la alteración de los materiales y la formación de metahallosita y caolinita previamente al proceso edafogenético.

La segunda catena está ubicada en los Lagos del Serrano (El Ronquillo, Sevilla) y comprende cuatro perfiles de suelos desarrollados a partir de pizarras mosqueadas devónicas con cuarcitas: IV Lithic Xerorthent, V Dystric Xerochrept, VI Ultic Haploxeralf y VII Ultic Palexeralf (Pascual, 1990). El material original sobre el que se desarrollan estos suelos son pizarras devónicas con cuarcitas. Estas pizarras están compuestas básicamente por micas (moscovita y biotita con pequeñas cantidades de paragonita), clorita y cuarzo, y contienen pequeñas secreciones en forma de nódulos verdosos (de ahí la denominación "pizarra mosqueada").

3. PROCEDIMIENTOS.

Las muestras naturales se han sometido a distintos procedimientos de extracción. La extracción de amorfos-pseudocristalinos se realiza con solución acuosa de oxálico-oxalato amónico a pH 3 agitando en la oscuridad [5]. Sobre las muestras libres de amorfos se extrae el hierro libre por dos procedimientos: a) solución oxálico-oxalato amónico a pH 4,25 bajo la acción de radiación ultravioleta manteniendo agitación [2] y, b) con solución ditionito-citrato-bicarbonato [6]. Una vez extraído el hierro libre, las muestras se tratan con HCl 4N a 80°C durante una hora. Este tratamiento extrae hierro, aluminio y magnesio de cloritas y minerales en vías de alteración.

La determinación de la susceptibilidad magnética se ha llevado a cabo mediante una adaptación del método de la balanza de Gouy. Para evitar las variaciones de susceptibilidad debidas a la temperatura [7] y tamaño de muestra [4] se ha trabajado a $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ con muestras tamizadas de tamaño $<100 \mu\text{m}$.

La heterogeneidad que presentan los suelos obliga a trabajar con la susceptibilidad másica calculada por la expresión:

$$\bar{\chi}_m = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} \gamma_i (\Delta\omega_i + \delta_i)}{n \cdot \omega}$$

La variación de peso que experimenta la muestra es, en realidad, la suma de las contribuciones de cada una de las especies presentes. Por consiguiente, siempre que sea posible eliminar de la muestra uno de sus componentes de forma selectiva será posible determinar su χ . En efecto, si se admite la aproximación de que la disolución del hierro amorfo-pseudocristalino con solución oxalato-oxálico en la oscuridad [5] solo afecta a los compuestos de hierro amorfos o pseudocristalinos cuyo límite viene determinado por la ferrihidrita, se puede determinar su susceptibilidad partiendo de las variaciones de peso en presencia de campos magnéticos, mediante la expresión:

$$\chi_a = M \left[\frac{\chi_s - \chi_{sa} (1 - f)}{f} - \frac{\sum_{i=1}^n \gamma_i \delta_i}{n \omega f} \right] \quad (1)$$

donde:

M es el peso molecular de la ferrihidrita.

n el número de campos utilizados en la medida.

f es la fracción de hierro amorfo-pseudocristalino presente en el suelo.

ω es el peso de la muestra en la primera determinación.

γ el parámetro del tubo para el campo i .

χ_s y χ_{sa} son las susceptibilidades del suelo antes y después de extraer los amorfos.

Esta misma expresión es válida para determinar la susceptibilidad de otras fracciones con la salvedad de tener en cuenta en cada caso, el peso molecular del compuesto cuya extracción es más probable.

4. RESULTADOS EXPERIMENTALES Y DISCUSIÓN.

En la tabla 1 se presentan los valores del hierro y aluminio extraídos por los tratamientos con oxalato-oxálico en la oscuridad (Fe_0), ditionito-citrato-bicarbonato (Fe_m), oxalato-oxálico en presencia de luz ultravioleta y, HCl (Fe_{Cl}) de cada uno de los horizontes que componen los perfiles de las catenas citadas y sus materiales originales.

PERFIL	HORIZ.	Fe_0	Fe_E	Fe_M	Fe_{Cl}
I	Ah	0,15	3,15	2,80	2,52
	R		0,79	0,75	0,72
II	Ah	0,13	3,36	3,16	2,16
	AB	0,56	4,27	4,06	1,23
	Bt	0,45	4,70	4,67	1,12
	R1		1,95	1,70	0,95
III	Ah	0,34	3,85	3,06	1,18
	E	0,17	2,40	2,34	0,88
	Bt	0,95	5,05	4,67	1,45
	BC	0,50	3,80	1,98	1,79
	R1			1,70	1,71
	R2		2,10	1,68	1,55

Tabla 1

La susceptibilidad magnética de los diferentes horizontes y materiales originales que componen los suelos de la catena "Quiruela", la susceptibilidad magnética de los mismos una vez extraídos los amorfos (χ_{so}), el hierro libre (χ_{se}), así como la susceptibilidad calculada a partir de la expresión (1) para los amorfos (χ_{Feo}), se presentan en la tabla 2.

PERFIL	HORIZ.	PROFUND.	χ_s ($10^6 \text{m}^3 \text{kg}^{-1}$)	χ_{Sa} ($10^6 \text{m}^3 \text{kg}^{-1}$)	χ_{Sl} ($10^6 \text{m}^3 \text{kg}^{-1}$)	χ_a ($10^6 \text{m}^3 \text{kg}^{-1}$)
I	Ah	0-5	230,9	196,2	10,1	19876
	R	5 - +	4,6		2,8	
II	Ah	0-5	224,9	172,1	4,3	38762
	AB	0-25	319,6	163	6,6	25461
	Bt	25-45	90,6	32,8	4,1	9221
	R	45 - +	7,6		6,1	
III	Ah	0-15	169,5	58,7	10,8	28444
	E	15-30	51,2	17,5	3,7	15231
	Bt	30-70	42,6	25,2	2,4	914
	BC	70-80	36,9	23,4	2,3	1124
	R1	80 - +	16,6		2,7	

Tabla 2.

En la tabla 3 se exponen los contenidos de las distintas formas extraíbles de hierro que, presentan los suelos y materiales originales de la catena Serrano.

PERFIL	HORIZ.	Fe _O	Fe _E	Fe _M	Fe _{Cl}
IV	Ah	0,15	2,14	2,09	1,13
	R		1,45	1,27	0,65
V	Ah	0,13	3,00	2,32	1,22
	B	0,17	3,10	2,65	1,40
	BC	0,19	3,25	2,98	1,58
	C	0,12	2,80	2,47	1,35
VI	Ah	0,24	3,00	2,56	2,52
	2A	0,42	2,75	2,24	2,07
	2Bt	0,48	3,10	2,88	1,90
	2BC	0,11	2,40	2,09	2,15
	R		1,58	1,42	1,64
VII	Ah	0,11	2,16	1,64	0,32
	AB	0,14	2,88	1,93	0,43
	Bt1	0,33	4,88	3,17	0,60
	Bt2	0,63	7,95	4,46	0,24
	BC	0,35	5,91	4,35	0,89
	C	0,18	3,71	2,31	0,44
	R1		1,22	0,61	1,05

Tabla 3

Los datos relativos a la susceptibilidad magnética que presentan estos suelos y los productos que resultan de la extracción de las distintas formas de hierro se encuentran en la tabla 4.

PERFIL	HORIZ.	PROFUND.	χ_s ($10^6 \text{m}^3 \text{kg}^{-1}$)	χ_{Sa} ($10^6 \text{m}^3 \text{kg}^{-1}$)	χ_{St} ($10^6 \text{m}^3 \text{kg}^{-1}$)	χ_a ($10^6 \text{m}^3 \text{kg}^{-1}$)
IV	Ah	0-10	425,4	364,2	15,6	38250
	R	10-+	48,8		11,9	
V	Ah	0-10	87,5	56,7	22,3	21230
	B	10-30	467,6	413,2	14,2	25687
	BC	30-55	77,1	40,8	10,9	12543
	C	55-90	69,9	35	10,2	22614
VI	Ah	0-10	514,1	458,5	18,7	21964
	2A	10-25	93,6	63,6	15,4	7142
	2Bt	25-60	53,4	35,5	10	1278
	2BC	60-150	43,3	34	8,1	3435
VII	Ah	0-10	504,5	475,5	22,3	22456
	AB	10-20	99,2	68,9	25,7	14687
	Bt1	20-28	102	60,1	11,4	7698
	Bt2	28-55	86,3	62,4	11,8	1638
	BC	55-70	66,9	49,7	10,2	1999
	C	70-75	64,5	49,8	9,4	5687
	R1	75-+	14,6		6,6	

Tabla 4.

De la observación de la fig. 1 se desprende que los valores que presenta χ_s en los distintos horizontes del suelo es superior al valor que corresponde a la roca madre. El epipedón del perfil I presenta un valor de χ mayor que el de los demás horizontes de los otros perfiles de esta catena. En el perfil II se observa un aumento importante de χ al pasar del horizonte Ah al Bt para disminuir al seguir profundizando en el perfil. El perfil III representa suelos con una susceptibilidad magnética en el horizonte superficial menor que en los perfiles anteriores, con una disminución acusada y un tramo de valores constantes hasta las proximidades de la roca madre.

Los valores altos de la susceptibilidad en los epipedones se relacionan con el contenido en humus de estos horizontes. La fuerte correlación de la χ con el Ca^{++} de cambio es indicativa de una estrecha correlación del humus que tiene afinidad por el calcio y la susceptibilidad magnética. El fuerte aumento de la susceptibilidad, que se experimenta en el perfil II, al pasar del horizonte superficial al siguiente más profundo se puede relacionar con el aumento del grado de desaturación y con las características de horizonte iluvial.

Los datos relativos a la susceptibilidad magnética que presentan estos suelos y los productos que resultan de la extracción de las distintas formas de hierro se encuentran en la tabla 4.

PERFIL	HORIZ.	PROFUND.	χ_s ($10^6 \text{m}^3 \text{kg}^{-1}$)	χ_{s_a} ($10^6 \text{m}^3 \text{kg}^{-1}$)	χ_{s_l} ($10^6 \text{m}^3 \text{kg}^{-1}$)	χ_a ($10^6 \text{m}^3 \text{kg}^{-1}$)
IV	Ah	0-10	425,4	364,2	15,6	38250
	R	10+	48,8		11,9	
V	Ah	0-10	87,5	56,7	22,3	21230
	B	10-30	467,6	413,2	14,2	25687
	BC	30-55	77,1	40,8	10,9	12543
	C	55-90	69,9	35	10,2	22614
VI	Ah	0-10	514,1	458,5	18,7	21964
	2A	10-25	93,6	63,6	15,4	7142
	2Bt	25-60	53,4	35,5	10	1278
	2BC	60-150	43,3	34	8,1	3435
VII	Ah	0-10	504,5	475,5	22,3	22456
	AB	10-20	99,2	68,9	25,7	14687
	Bt1	20-28	102	60,1	11,4	7698
	Bt2	28-55	86,3	62,4	11,8	1638
	BC	55-70	66,9	49,7	10,2	1999
	C	70-75	64,5	49,8	9,4	5687
	R1	75+	14,6		6,6	

Tabla 4.

De la observación de la fig. 1 se desprende que los valores que presenta χ_s en los distintos horizontes del suelo es superior al valor que corresponde a la roca madre. El epipedón del perfil I presenta un valor de χ mayor que el de los demás horizontes de los otros perfiles de esta catena. En el perfil II se observa un aumento importante de χ al pasar del horizonte Ah al Bt para disminuir al seguir profundizando en el perfil. El perfil III representa suelos con una susceptibilidad magnética en el horizonte superficial menor que en los perfiles anteriores, con una disminución acusada y un tramo de valores constantes hasta las proximidades de la roca madre.

Los valores altos de la susceptibilidad en los epipedones se relacionan con el contenido en humus de estos horizontes. La fuerte correlación de la χ con el Ca^{++} de cambio es indicativa de una estrecha correlación del humus que tiene afinidad por el calcio y la susceptibilidad magnética. El fuerte aumento de la susceptibilidad, que se experimenta en el perfil II, al pasar del horizonte superficial al siguiente más profundo se puede relacionar con el aumento del grado de desaturación y con las características de horizonte iluvial.

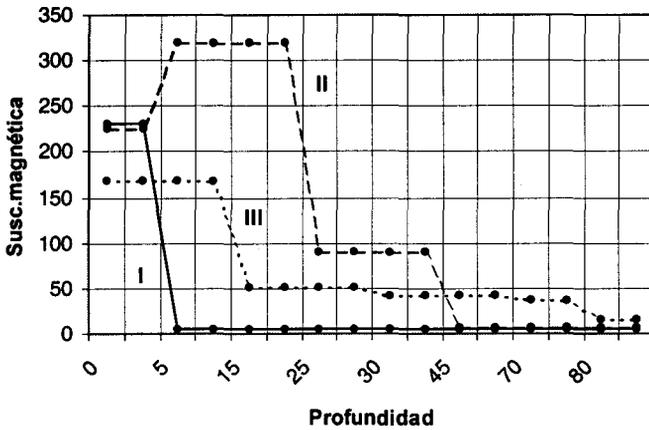


Figura 1.

La fig. 2, muestra la variación que experimenta la susceptibilidad magnética con la profundidad de cada horizonte en los distintos perfiles que componen la catena Serrano. La evolución que experimenta χ en estos perfiles presenta amplias analogías con las gráficas de la catena de la Quiruela pudiéndose hacer las mismas observaciones y manteniendo iguales correlaciones. De cualquier modo, es significativo en ambas catenas que conforme aumenta el grado de evolución de un suelo disminuye su susceptibilidad magnética.

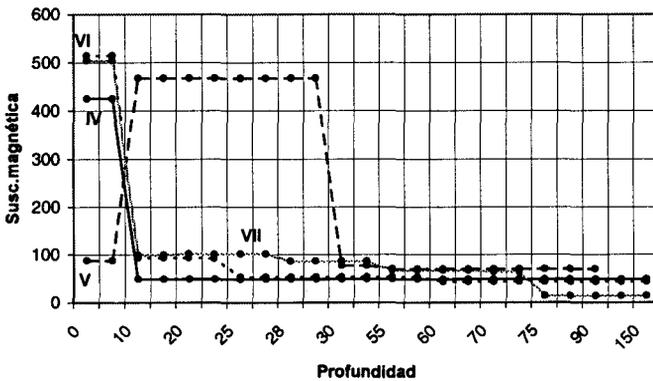


Figura 2.

Si se compara el valor de la χ_s con el valor que presenta una vez extraídos los amorfos, se aprecia una disminución muy importante, especialmente si se tiene en cuenta el valor

bajo que, en todos los casos, presenta Fe_0 . Las especies que pueden constituir esta fracción son hidróxidos, oxidróxidos y óxidos con mayor o menor grado de hidratación, de tal forma que si se excluyen los ferromagnéticos (maghemita y magnetita), los demás presentan una susceptibilidad magnética algo menor del 20% de la que corresponde a la ferrihidrita que, por otra parte constituirá probablemente el componente mayoritario de esta fracción.

Si se hace la suposición de que todo el hierro que se extrae con oxalato-oxálico en la oscuridad está en forma de ferrihidrita y, por aplicación de la expresión (1), se calcula χ_a , se encuentran valores anormalmente altos que demuestran la presencia, en esta fracción de ferromagnéticos.

Teniendo en cuenta que la maghemita se disuelve en oxalato-oxálico en la oscuridad, mientras que la magnetita es prácticamente insoluble [3], el fuerte descenso de χ al tratar con oxalato-oxálico se puede atribuir a la disolución de maghemita. La simplificación de Fine (1989) permite determinar con buena aproximación la proporción de maghemita presente en la mezcla, obteniéndose los resultados de la tabla 5. La disminución de la proporción de maghemita al aumentar la profundidad del horizonte es indicativa de su tendencia a cristalizar perdiendo movilidad en el perfil. Por el contrario, la ferrihidrita aumenta su proporción en profundidad, alcanzando los valores máximos en los horizontes argílicos.

En estos tipos de suelos hay, por tanto, una presencia de óxidos ferromagnéticos (maghemita) en horizontes superficiales que se relaciona positivamente con el contenido en humus [9] y, un aumento de la ferrihidrita, óxidos y oxihidróxidos paramagnéticos con la profundidad, alcanzando valores máximos en los horizontes argílicos.

La extracción del hierro libre con citrito-ditionito-bicarbonato produce una disminución muy fuerte en la susceptibilidad magnética del suelo, arrojando valores del mismo orden de los que presentan los minerales de la arcilla presentes en el suelo. El bajo valor de χ_{sl} indica que la eliminación de óxidos y oxihidróxidos del suelo ha sido completa.

5. CONCLUSIONES.

La representación gráfica de la susceptibilidad magnética que presentan los distintos horizontes que componen un perfil de suelo en función de su profundidad, suministra información característica de cada tipo de suelo comportándose como si se tratara de una huella dactilar.

Las medidas de susceptibilidad magnética combinadas con métodos de extracción selectiva de óxidos y oxihidróxidos de hierro suministra información determinante sobre el proceso físico-químico que rige la edafogénesis.

En los suelos rojos existe una correlación positiva entre el contenido en hematites y ferrihidrita con el índice de rubefacción, es decir, la determinación de χ puede suponer una medida indirecta del grado de rubefacción.

PERFIL	HORIZ	%MAGHEMITA EN AMORFOS	%FERRIHID.
I	Ah	0,06	0,09
II	Ah	0,1	0,03
	AB	0,28	0,28
	Bt	0,08	0,37
III	Ah	0,19	0,15
	E	0,05	0,12
	Bt	0,02	0,93
	BC	0,01	0,49
IV	Ah	0,07	0,03
V	Ah	0,06	0,07
	B	0,09	0,08
	BC	0,05	0,14
	C	0,05	0,07
VI	Ah	0,11	0,13
	2A	0,04	0,38
	2Bt	0,01	0,47
	2BC	0,01	0,1
VII	Ah	0,05	0,06
	AB	0,04	0,1
	Bt1	0,05	0,28
	Bt2	0,02	0,61
	BC	0,01	0,34
	C	0,02	0,16

Tabla 5

BIBLIOGRAFÍA.

- [1]. Clemente L., Pascual J., Silgeström P., García L. V. "Rubefacción sobre materiales ácidos. Formas y distribución de hierro" Estudio del suelo y su degradación en relación con la desertificación. Ed. Sociedad Española de Ciencia del Suelo y Ministerio de Agricultura y Pesca. 1993. pág. 942-1050.
- [2]. Endredy, F. "Estimation of free iron oxides in soils and clays by a photolytic method". Cay Min. Bull, 1963, 29, 5, pp209.

- [3]. Fine, P.; Singer, N.J. "Contribution of Ferromagnetic Minerals to Oxalate and Dithionite extractable Iron" . Soil, Sc. Soc. Am. J. 1989, 53, 191-196.
- [4]. Fine, P.; Singer, N.J.; Laven, R.; "Role of Pedogenesis in Distribution of Magnetic Susceptibility in two California Chronosequences. Geoderma., 1989, 44, 287-306.
- [5]. McKeage, J.A.; Day, J.H. "Dithionite and oxalate extractable Fe and Al as aids in differentiating various classes of soils" Conf. J. Soil Sci., 1966, 46, 13-22.
- [6]. Mehra, O.P.; Jackson, M.L. "Iron oxide removal from soil and clay by dithionite-citrate- System buffered with sodium bicarbonate. Clays and Clay Mineralogy, 1960, 7, 317-327.
- [7]. Mullins, C. "Magnetic susceptibility of the soil and its significance in soil science a review". J. soil science, 1977, 28, pp.2
- [8]. Pascual J. Tesis Doctoral. 1990.
- [9]. Pascual J. "Estudio del Proceso de rubefacción sobre materiales ácidos". Ed. Univ. Sevilla. 1992, pp-650.
- [10] Prasad, B.; Ghildyal, B.P. "Magnetic susceptibility of lateritic soils and clays". J. Soil Science. 1968, 19, 125-139.