

RELACIÓN ENTRE FORMAS DE HIERRO Y COLOR ROJO EN SUELOS SOBRE CALIZAS DE GALICIA

M. T. TABOADA CASTRO (1), B. M. SILVA HERMO (2)
& M. T. BARRAL SILVA (2)

(1) Facultad de Ciencias, Universidad de A Coruña.

Campus de A Zapateira, 15071 A Coruña.

E-mail: teresat@udc.es; Fax: 981 16 70 65.

(2) Dpto. Edafología y Química Agrícola, Facultad de Farmacia.

Univ. Santiago de Compostela.

Resumen. Se estudian los compuestos de hierro de cuatro suelos de Galicia formados sobre calizas y se relacionan con sus intensas coloraciones. Las extracciones selectivas realizadas ponen de manifiesto un claro predominio de las formas cristalinas de hierro sobre las amorfas. La abundancia de las formas cristalinas se confirma por los análisis mineralógicos. En la arena se han identificado goethita y magnetita en todos los perfiles, y hematites en dos de ellos. En la fracción arcilla predomina la goethita y, solo en ocasiones, aparecen trazas de hematites. El color rojizo de los suelos se atribuye a la hematites heredada, que forma parte de la fracción arena, mientras que las coloraciones parduzcas pueden atribuirse a la goethita.

Palabras clave: Suelos sobre calizas, hematites, goethita, color, Galicia, NW España.

Abstract. We study the iron compounds of four soils formed over limestone in Galicia (NW. Spain) in relation to soil colour. Selective extraction suggested a clear predominance of crystalline iron over amorphous forms, a finding confirmed by mineralogical examination. Goethite and magnetite were found in the sand fraction of all four soils, and hematite in that of two. Goethite likewise predominated in the clay fraction, in which hematite was found only occasionally, and then only in trace quantities. The redness of the soils is attributed to inherited hematite in the sand fraction, and brown colouring to their goethite.

Key words: Soils over limestone, hematite, goethite, colour, Galicia, NW Spain.

1. Introducción

En el sistema FAO se consideran suelos rojos aquellos que presentan un color con un «hue» entre 5YR y 10R, mientras que, en la Soil Taxonomy se restringe esta denominación a los que poseen un «hue» más rojo que 5YR. La interpretación genética del color rojo ha planteado serias discusiones (Yaalon, 1970; Guerra, 1972).

Tradicionalmente la formación de estos suelos se relacionaba con la actuación de climas cálidos o con estaciones fuertemente contrastadas, pero actualmente, se sabe que se pueden formar tanto en climas templado húmedos (Brésson, 1976) como en climas de tipo mediterráneo (Lamouroux, 1972) cuando otras condiciones del medio son favorables. En Galicia, Guitián Ojea y Carballas Fernández (1969) relacionan el color rojo de los suelos con el material de partida. Macías Vázquez (1976) señala que puede haber génesis actual de suelos rojos siempre que la combinación de los diversos factores de formación, especialmente clima y roca sea la adecuada.

En las calizas, el desarrollo del color rojo sigue a la descarbonatación de la roca y a la alteración del residuo, encontrándose favorecida la rubefacción en climas con alternancia de humedad y sequía ya que el período húmedo interviene liberando el hierro por descarbonatación y el período seco provoca la deshidratación de los óxidos de hierro ligados a las arcillas (Guerra, 1972).

Aunque es evidente que los colores rojos van asociados al hierro, existen sin embargo, distintas opiniones con respecto a las formas de hierro causantes de esas coloraciones. Unos autores las relacionan con la presencia de óxidos de hierro amorfos (Schwertmann y Lentze, 1966; Lamouroux y Segalen, 1969) y otros con la deshidratación de óxidos de hierro amorfos hidratados y la subsiguiente cristalización a hematites vía ferrihidrita (Fischer y Schwertmann, 1975). Lamouroux (1972) habla de formación de prehematites criptocristalina y define la rubefacción como el resultado de una transformación de los productos ferruginosos rojos cuyos caracteres se aproximan a los de la hematites, pero que aún son amorfos a los rayos X. Brésson (1976) señala que la rubefacción parece deberse a la evolución superficial de los sesquióxidos de hierro, que se liberan por descarbonatación en forma de cristales de goethita y luego son alterados en superficie, donde se fragmentan en partículas de 30-50 Å de diámetro. La goethita microdividida como agente responsable de la rubefacción fue señalada también por Bronger *et al.*, (1980) y Guillet *et al.*, (1984). Este último habla de la división de goethita, heredada de las calizas, y su transferencia a la fracción arcillosa fina, unida a la formación de pequeñas cantidades de hematites finamente cristalizada.

Actualmente la opinión más generalizada está de acuerdo en que existe una fuerte correlación entre rojez y contenido en hematites (Torrent *et al.*, 1980, 1983; Bigham *et al.*, 1978), pues considera que este compuesto es un agente pigmentante muy eficaz, de modo que cantidades muy pequeñas son capaces de enmascarar a otros componentes y de impartir tonalidad rojiza a los suelos.

El objetivo de este trabajo es analizar la influencia de las formas de hierro en las intensas coloraciones de una serie de suelos desarrollados sobre calizas en Galicia, que representan el estado más evolucionado de todos los formados sobre estos materiales, tal como se ha señalado en anteriores trabajos, en los que detalladamente se estudiaron los procesos genéticos (Taboada y Silva, 1995, 1997), sus propiedades químicas (Taboada *et al.*, 1992 a, Taboada y Silva, 1999) y mineralógicas (Taboada *et al.*, 1992 b).

2. Localización y descripción de los perfiles

Los cuatro perfiles seleccionados (nº 10, 11, 12 y 13) se sitúan en zonas montañosas de la provincia de Lugo, concretamente el perfil 10 se encuentra en Becerreá, en las cercanías del río Cruzul, el 11 en la Sierra de O Courel, el 12 en las proximidades de Sarria y el 13 en Meira, en los bordes de una cantera de caliza (Figura 1). Los tres primeros están dedicados a monte y básicamente soportan una vegetación de encinar (*Quercus rotundifolia*) mientras que el 13 es de uso agrícola y en el momento de estudio estaba dedicado a cultivo de forraje. En estas áreas se registran precipitaciones anuales del orden de los 2.000 mm y temperaturas inferiores al cero biológico durante 4 meses, excepto el perfil 13, que se localiza en una zona donde la precipitación anual es de 1.358 mm y la temperatura media anual nunca alcanza el cero biológico.

En cuanto al material de partida, el perfil 11 está formado sobre calizas de la formación de Cándana y los demás sobre calizas de la formación de Vegadeo. Ambas formaciones estratigráficas son del Cámbrico inferior y junto con la formación carbonatada de las Calizas de la Aquiana (Ordovícico superior) engloban la mayor parte de las calizas de Galicia. Las calizas no llegan a ocupar el 5% de la superficie total de Galicia y se disponen formando estrechas bandas de dirección aproximadamente N-SE en la parte oriental de la provincia de Lugo y en el noroeste de la de Orense. La composición y espesor de estas formaciones



Figura 1. Localización de los perfiles
Location of the four profiles

es muy variable. La Caliza de Vegadeo en la zona de Becerreá alcanza los 220 m de espesor, mientras que en Sarria y Meira su potencia es respectivamente del orden de 145 y 80 m. Esta formación está constituida por pizarras, calizas y dolomías, las dos últimas muy recrystalizadas, con calcita y dolomita respectivamente como componentes principales. Cuarzo, micas y minerales de hierro, así como dolomita en las calizas y calcita en las dolomías son los accesorios. En las áreas de estudio las calizas presentan una textura en mosaico de grano fino (IGME, 1979, 1980). La formación de la Caliza de Cándana en el lugar en el que se ubica el perfil 11 (Sierra de O Courel) se compone de calizas y dolomías marmóreas, compactas, de color gris plateado a gris oscuro, con cuarzo, moscovita, material arcilloso, plagioclasa y opacos como accesorios. Las calizas muestran textura granoblástica y afanítica. El espesor de la formación de Cándana en el área de O Courel es de 100 m (IGME, 1981).

Según el grado de desarrollo del perfil se han reconocido en Galicia cuatro tipos de suelos sobre calizas, que presentan, yendo del menos evolucionado al de mayor desarrollo, la siguiente secuencia de horizontes: AR, AC, ABwR ó ABCR, y ABtBwR ó ABtR (Taboada y Silva, 1997, 1999) Debido a que las calizas se presentan entremezcladas con esquistos, pizarras y cuarcitas, no pueden establecerse claramente catenas sobre estos materiales. Un esquema de la tipología de los suelos desarrollados sobre calizas en Galicia, tomando en consideración su posición topográfica, se encuentra en Taboada y Silva (1999).

Los suelos objeto de este estudio son representativos de los suelos bien desarrollados, que se presentan de forma esporádica y aislada, vinculados a las áreas más estables de la ladera (por ejemplo las cobijaduras de las rocas: perfiles 10, 11 y 12) o a las escasas zonas llanas que presentan las calizas (perfil 13).

Las características morfológicas de los perfiles se muestran en las tablas 1 y 2. Los suelos poseen un horizonte B muy profundo, con intensas coloraciones, estructura bien desarrollada y límites difusos entre los subhorizontes (Tablas 1 y 2). Sin embargo, lateralmente su desarrollo es discontinuo, pues en las áreas respectivas son muy abundantes los afloramientos rocosos. Todos ellos poseen un horizonte B con mayor contenido en arcilla que el A. En el horizonte B del perfil 13 se observaron rasgos indicativos de un proceso de argiluvación antiguo (Taboada y Silva, 1995, 1997). En base a las estimaciones realizadas por Díaz-Fierros (1995), que considera que el proceso edáfico de iluviación de arcilla que hoy se reconoce en los suelos cuaternarios de Galicia se extiende desde el Pleistoceno antiguo hasta las puertas del Würm, este suelo se podría considerar al menos del Pleistoceno. En los otros perfiles no se ha podido establecer con claridad una génesis iluvial a través del exámen micromorfológico, pero por su desarrollo y características morfológicas quizás se les pueda incluir igualmente en el Pleistoceno.

Tabla 1. Descripción morfológica de los perfiles 10 y 11
Morphological description of the 10 and 11 profiles

| <i>Perfil 10</i> | | |
|---------------------------------|--|--|
| <i>Situación</i> | <i>Becerreá (Lugo)</i> | |
| Altitud y posición fisiográfica | 500 m. Fondo de ladera | |
| Forma del terreno circundante | Montañoso | |
| Pendiente | Clase 5. Escarpado | |
| Vegetación o uso de la tierra | Encinar con <i>Ulex</i> , <i>Sarothamnus</i> , <i>Helleborus</i> | |
| Drenaje | Clase 4. Bien drenado | |
| Afloramientos rocosos | Clase 0. Muy pocos | |
| <i>Horz.</i> | <i>Prof. (cm)</i> | <i>Descripción</i> |
| Ah1 | 0-15 | Pardo oscuro 7,5YR3/3 (h) y 7,5YR4/4 (s). Textura franco limosa. Estructura migajosa fina, débil; ligeramente adherente, ligeramente plástico, friable en húmedo, blando en seco. Pocas piedras y gravas coluviales de caliza, esquisto y cuarcita. No calcáreo. Raíces finas y gruesas muy abundantes. Límite difuso. |
| Ah2 | 15-32 | Continuación del anterior. Pardo oscuro 7,5YR3/3 (h) y 7,5YR4/4 (s). Textura franco arcillosa. Estructura migajosa fina, débil; ligeramente adherente, ligeramente plástico, muy friable y blando. Pocas gravas de esquisto y cuarcita. No calcáreo. Raíces finas y gruesas abundantes. Límite difuso. |
| Bt1 | 32-55 | Pardo oscuro 7,5YR4/6 (h) y amarillo rojizo 7,5YR6/8 (s). Aciloso. Estructura granular gruesa; adherente, plástico, friable en húmedo. Frecuentes gravas de esquisto y pocas de cuarcita. No calcáreo. Pocas raíces. Límite difuso. |
| Bt2 | 55-80 | Continuación del anterior. Pardo oscuro 7,5YR4/6 (h) y amarillo parduzco 10YR6/6 (s). Arcilloso. Estructura granular gruesa; ligeramente adherente, plástico, friable en húmedo. Ligeramente pedregoso con gravas de esquisto. No calcáreo. Límite neto. |
| R | +80 | Caliza. |
| <i>Perfil 11</i> | | |
| <i>Situación</i> | <i>Lousada-Sierra de O Courel (Lugo)</i> | |
| Altitud y posición fisiográfica | 800 m. Ladera convexa | |
| Forma del terreno circundante | Montañoso | |
| Pendiente | Clase 6. Muy escarpado | |
| Vegetación o uso de la tierra | Encinar | |
| Drenaje | Clase 3. Moderadamente bien drenado | |
| Afloramientos rocosos | Clase 1. Moderadamente rocoso | |
| <i>Horz.</i> | <i>Prof. (cm)</i> | <i>Descripción</i> |
| A | 0-12 | Pardo rojizo 5YR4/4 (h) y 5YR5/4 (s). Textura franco limosa. Estructura migajosa, moderada, con agregados isodiamétricos; ligeramente adherente, ligeramente plástico, muy friable y blando. Pocas gravas y piedras coluviales de caliza. Ligeramente calcáreo. Abundantes raíces. Límite gradual. |
| Bt1 | 12-40 | Rojo amarillento, 5YR5/8 (h) y 5YR6/8 (s). Textura franco arcillo limoso. Estructura moderada, en bloques subangulares gruesos; ligeramente adherente, plástico, friable y duro. No calcáreo. Pocas raíces gruesas. Límite difuso. |
| Bt2 | 40-65 | Rojo amarillento, 5YR5/8 (h) y 5YR6/8 (s). Franco arcillo limoso. Estructura fuerte, en bloques subangulares muy gruesos; adherente, plástico, friable y duro; ligeramente calcáreo. Muy pocas raíces gruesas. Límite difuso. |
| Bt3 | 65-115 | Rojo amarillento, 5YR5/8 (h) y 5YR6/8 (s). Franco arcillo limoso. Estructura en bloques subangulares gruesa, grado de agregación menor que los anteriores; adherente, ligeramente plástico, muy friable y duro. No calcáreo. Límite neto. |
| R | +115 | Caliza metamórfica (formación de Cándana). |

Tabla 2. Descripción morfológica de los perfiles 12 y 13
Morphological description of the 12 and 13 profiles

| <i>Perfil 12</i> | | |
|---------------------------------|---|---|
| <i>Situación</i> | <i>Lózara-Sarria (Lugo)</i> | |
| Altitud y posición fisiográfica | 800 m. Ladera convexa | |
| Forma del terreno circundante | Montañoso | |
| Pendiente | Clase 5. Escarpado | |
| Vegetación o uso de la tierra | Monte con Ulex, Sarothamnus y gramíneas | |
| Drenaje | Clase 4. Bien drenado | |
| Afloramientos rocosos | Clase 2. Rocoso | |
| <i>Horz.</i> | <i>Prof. (cm)</i> | <i>Descripción</i> |
| A | 0-20 | Pardo oscuro 7,5YR4/6 (h) y pardo fuerte 7,5YR5/6 (s). Textura franco limosa. Estructura migajosa, moderadamente desarrollada, ligeramente adherente, ligeramente plástico y muy friable. No calcáreo. Abundantes raíces, un poco afieltrado. Límite gradual. |
| Bt1 | 20-40 | Pardo fuerte 7,5YR5/6 (h) y amarillo rojizo 7,5YR6/6 (s). Franco arcillosos. Estructura poliédrica gruesa, moderadamente desarrollada; adherente, plástico muy friable en húmedo y ligeramente duro en seco. No calcáreo. Límite difuso. |
| Bt2 | 40-80 | Pardo fuerte 7,5YR5/6 (h) y amarillo parduzco 10YR6/6 (s). Franco. Estructura en grandes bloques poliédricos, con tendencia a prismática, fuerte; adherente, plástico, friable en húmedo y duro en seco. No calcáreo. Límite difuso. |
| Bw | 80-100 | Pardo oscuro 7,5YR4/4 (h) y pardo amarillento 10YR5/4 (s). Franco limoso. Estructura en bloques subangulares con tendencia a prismática, más fuerte, que en el anterior; adherente, plástico, friable en húmedo y duro en seco. Pocas gravas de caliza, muchas de pizarra y algunas de cuarcita. No calcáreo. |
| R | +100 | Caliza marmórea (formación de Vegadeo) |
| <i>Perfil 13</i> | | |
| <i>Situación</i> | <i>Meira (Lugo)</i> | |
| Altitud y posición fisiográfica | 490 m. Fondo de ladera convexa | |
| Forma del terreno circundante | Ondulado | |
| Pendiente | Clase 3. Inclinado | |
| Vegetación o uso de la tierra | Prado cultivado | |
| Drenaje | Clase 4. Bien drenado | |
| Afloramientos rocosos | Clase 2. Rocoso | |
| <i>Horz.</i> | <i>Prof. (cm)</i> | <i>Descripción</i> |
| Ap | 0-20 | Pardo oscuro 7,5YR4/4 (h) y pardo fuerte 7,5YR5/6 (s). Franco limoso, estructura granular moderadamente desarrollada; adherente y plástico. Gravas de esquisto, caliza y escasas de arenisca ferruginosa de color ladrillo. No calcáreo. Pocas raíces. Restos de vidrios. Límite neto. |
| Bt1 | 20-50 | Rojo amarillento, 5YR5/8 (h) y 5YR6/6 (s). Arcillo limoso, con estructura poliédrica en bloques angulares medianos, moderada; muy adherente, muy plástico, friable en húmedo y duro en seco. Poco poroso, con poros muy finos. Frecuentes piedras coluviales de esquisto y caliza. Pocas gravas de caliza y esquisto alterado. Muchas manchas de color rojo y nódulos rojos y negros. Trozos de arenisca ferruginosa alterada. No calcáreo. Pocas raíces finas. |
| Bt2 | 50-80 | Rojo amarillento, 5YR5/8 (h) y 5YR6/6 (s). Arcilloso. Estructura poliédrica en bloques angulares medianos, moderada; muy adherente, muy plástico, muy friable. Pocas piedras y gravas de esquisto y caliza. Frecuentes fragmentos de arenisca ferruginosa. Abundantes nódulos, más oscuros que en el anterior, abigarrados. No calcáreo. Muy pocas raíces. |
| Bt3 | 80-120 | Continuación del anterior, pero más estructurado. Rojo amarillento, 5YR4/6 (h) y 5YR5/6 (s) con textura arcillo limosa. |
| Bt4 | 120-200 | Continuación del anterior. Pardo rojizo 5YR4/4 (h) y 5YR5/4 (s). Franco arcillo limoso. |
| R | +200 | Caliza de Vegadeo. |

3. Material y métodos

En la fracción tierra fina (< 2 mm) de los cuatro perfiles seleccionados (nº 10, 11, 12 y 13) se analizaron los parámetros que se indican a continuación.

Determinación del color. Tanto en los suelos como en la arcilla se determinó mediante la clave de Munsell (1975).

Extracciones selectivas de hierro. Se utilizaron los reactivos Ditionito-Citrato (Holmgren, 1967), Pirofosfato sódico (Bascomb, 1968) y Oxálico-Oxalato (McKeague y Day, 1966).

Hierro total. Se realizó digestión de las muestras finamente molidas con HNO₃ y HF y el hierro se determinó por espectrofotometría de absorción atómica.

Determinaciones mineralógicas. Se obtuvieron difractogramas de rayos X de los agregados orientados de la fracción arcilla, en estado natural, saturados con magnesio, con etilenglicol, con potasio y sometidos a diversos tratamientos térmicos. La identificación de los óxidos de hierro se efectuó en los diagramas de polvo cristalino, utilizando la radiación Ka del Cu, filtro de Ni y monocromador de grafito. La composición mineralógica de la roca se determinó por difracción de rayos-X en diagrama de polvo cristalino. La identificación de los minerales de hierro en la fracción arena se llevó a cabo con el microscopio petrográfico, utilizando luz reflejada.

4. Resultados y discusión

Desde el punto de vista de sus propiedades químicas hay que señalar que son suelos descarbonatados, con una capacidad total de cambio baja, principalmente en los horizontes B. Los perfiles 10, 11 y 12 presentan desbasificación incipiente, pH en agua ligeramente superior a la neutralidad y próximo de 6,5 en KCl, mientras que, en el perfil 13 la desbasificación es intensa, la acidez de cambio acusada y el pH ácido (Taboada y Silva, 1997, 1999).

En ellos destacan las vivas coloraciones, especialmente en los horizontes B (Tablas 1 y 2). Los perfiles 12 y 10 poseen tonalidades parduzcas, de matiz en húmedo 7,5YR y en seco 7,5YR ó más amarillento, y los perfiles 11 y 13, tonalidades rojizas con un matiz tanto en seco como en húmedo de 5YR. Estos últimos cumplen, por lo tanto, los requisitos para ser considerados «suelos rojos» según la FAO.

Los resultados de las extracciones selectivas se muestran en la tabla 3. Se observa que estos suelos poseen un contenido bastante elevado en hierro, siendo el hierro total del orden del 4% en el perfil 10, oscilando entre 4,25 y 6,13% en el perfil 11, entre 2,80 y 4% en el 12 y entre un 2,10 y 8,35% en el 13. Por otra parte se encontró una elevada relación Fe_{DC}/Fe_{TOTAL}, lo que indica que la mayoría del hierro se encuentra en forma libre, es decir, no ligado a la estructura de los silicatos. La abundancia de hierro libre en los suelos sobre calizas frente a los formados sobre otros materiales tales como areniscas, esquistos y granitos ya ha sido señalada por Guitián Ojea y Carballas Fernández (1969). En los cuatro perfiles, el cociente Fe_{OX}/Fe_{DC} oscila entre 0,04 y 0,24; estos bajos valores son indicativos de que el hierro libre está constituido fundamentalmente por compuestos cristalinos. Por otra parte, el Fe_{OX} es ligeramente más elevado que el Fe_{PIRO} lo que evidencia, dentro de la escasez de hierro amorfo, una ligera preponderancia de las formas amorfas inorgánicas sobre las complejadas con la materia orgánica. A estos mismos resultados se ha llegado en trabajos anteriores, estudiando un mayor número de suelos sobre calizas (Barral *et al.*, 1988; Taboada *et al.*, 1992 a).

En el análisis mineralógico mediante DRX de muestras puntuales de la roca subyacente a cada perfil, aparece calcita como constituyente mayoritario y pequeñas cantidades de micas, en todos los casos, junto con trazas de dolomita y cuarzo en la roca del perfil 10, sin embargo no se ha identificado ningún mineral de hierro. A pesar de ello, los minerales de hierro encontrados en la arena se consideran heredados de la roca subyacente, pues su existencia en los materiales de partida se señala en los mapas geológicos de la zona (IGME, 1979, 1980 y 1981). Su ausencia en los fragmentos analizados, puede ser debida a que dichos minerales no se encuentren uniformemente repartidos en la roca, y por ello no hayan aparecido en las muestras examinadas. Sin embargo, son muy frecuentes en los litorrelictos de caliza que aparecen en los suelos, y en lámina delgada se han observado abundantes nódulos que contienen hematites y goethita.

Tabla 3: Extracciones selectivas de hierro (%) en los suelos.
Selective extraction of iron in soils (%)

| Perfil | Hor. | Fe_{TOTAL} | Fe_{DC} | Fe_{OX} | Fe_{PIRO} | $\frac{Fe_{DC}}{Fe_{TOTAL}}$ | $\frac{Fe_{OX}}{Fe_{DC}}$ |
|--------|------|--------------|-----------|-----------|-------------|------------------------------|---------------------------|
| 10 | Ah1 | 4,50 | 3,87 | 0,48 | 0,07 | 0,86 | 0,12 |
| | Ah2 | 4,21 | 3,37 | 0,53 | 0,09 | 0,80 | 0,16 |
| | Bt1 | 4,00 | 3,25 | 0,34 | 0,11 | 0,81 | 0,10 |
| | Bt2 | 4,18 | 3,37 | 0,33 | 0,07 | 0,81 | 0,10 |
| 11 | A | 4,25 | 3,75 | 0,51 | 0,09 | 0,88 | 0,14 |
| | Bt1 | 5,58 | 4,50 | 0,41 | 0,04 | 0,81 | 0,10 |
| | Bt2 | 5,32 | 4,75 | 0,40 | 0,02 | 0,89 | 0,08 |
| | Bt3 | 6,13 | 4,62 | 0,31 | 0,02 | 0,75 | 0,07 |
| 12 | A | 3,80 | 2,87 | 0,36 | 0,09 | 0,76 | 0,13 |
| | Bt1 | 4,00 | 3,12 | 0,29 | 0,18 | 0,78 | 0,10 |
| | Bt2 | 3,21 | 2,37 | 0,21 | 0,01 | 0,74 | 0,09 |
| | Bw | 2,80 | 2,25 | 0,28 | 0,01 | 0,80 | 0,12 |
| 13 | Ap | 2,10 | 1,75 | 0,42 | 0,45 | 0,83 | 0,24 |
| | Bt1 | 5,12 | 4,00 | 0,17 | 0,74 | 0,78 | 0,04 |
| | Bt2 | 5,06 | 4,00 | 0,25 | 0,34 | 0,79 | 0,06 |
| | Bt3 | 7,02 | 6,37 | 0,44 | 0,15 | 0,91 | 0,07 |
| | Bt4 | 8,35 | 7,37 | 0,45 | 0,07 | 0,88 | 0,06 |

En la fracción arena, los minerales de hierro son abundantes, apareciendo goethita y magnetita en todos los perfiles, además de hematites en los perfiles 11 y 13 (Tabla 4).

En la fracción arcilla predominan los minerales heredados, las micas son los constituyentes mayoritarios de los perfiles 10, 11 y 12, acompañadas de vermiculita y caolinita, además de clorita en el perfil 11. En el perfil 13, micas, vermiculita e interestratificados son los componentes fundamentales. Entre los minerales no laminares se encuentran trazas de feldespatos y goethita. Únicamente se identificaron trazas de hematites en el perfil 11 y gibbsita en el 13.

La abundancia de compuestos cristalinos de hierro, reflejada en las extracciones selectivas, queda confirmada como hemos visto por su presencia en las fracciones arena y arcilla. No obstante, los compuestos cristalinos de hierro se encuentran principalmente en las fracciones más gruesas como partículas individuales. Este dato señalado también por Barral *et al.*, (1988) y Taboada *et al.*, (1992 b) es una característica que diferencia a los suelos formados sobre calizas de los demás suelos de Galicia formados sobre otros materiales, en los cuales los óxidos de hierro se suelen encontrar en estado no cristalino o como compuestos cristalinos de tamaño de partícula tan pequeño que prácticamente no resultan detectables por DRX (Villar *et al.*, 1983).

Tabla 4. Óxidos de Fe en la fracción arena (%)
Iron oxide in the sand fraction

| Perfil | Horz. | Goethita | Magnetita | Hematites | Perfil | Horz. | Goethita | Magnetita | Hematites |
|--------|-------|----------|-----------|-----------|--------|-------|----------|-----------|-----------|
| 10 | Ah1 | 1,5 | 1 | 0 | 12 | A | 1 | 0,9 | 0 |
| | Ah2 | 2,4 | 0,5 | 0 | | Bt1 | 1,1 | 0,5 | 0 |
| | Bt1 | 2 | 0,4 | 0 | | Bt2 | 1,5 | 0,9 | 0 |
| | Bt2 | 3,1 | 2 | 0 | | Bw | 1 | 1,6 | 0 |
| 11 | A | 1,4 | 1,4 | 3,6 | 13 | Ap | 0,4 | 0,5 | 0,5 |
| | Bt1 | 1,2 | 0,6 | 4,1 | | Bt1 | 1 | 4 | 2,4 |
| | Bt2 | 2,4 | 1,2 | 5,2 | | Bt2 | 1,5 | 4,7 | 2,3 |
| | Bt3 | 1,8 | 0,6 | 7,1 | | Bt3 | 3,9 | 18,7 | 2,6 |
| Bt4 | | | | | | 3,5 | 26,2 | 4,6 | |

Vista la naturaleza de las formas de hierro y las cantidades presentes en estos suelos, se discute a continuación sobre la influencia que tienen en sus vivas coloraciones. Diversos autores atribuyen el color rojo de los suelos al gran poder pigmentante de los componentes amorfos de hierro, debido a su pequeño tamaño de partícula y a su capacidad para formar revestimientos (Schwertmann y Lentze, 1966; Segalen, 1969; Lamouroux y Segalen, 1969; Fischer y Schwertmann, 1975; Lamouroux, 1972; Segalen, 1964). Sin embargo, tanto en los perfiles de color rojo (11 y 13) como en los de tonalidad parduzca (12 y 10) la fracción de hierro amorfa es muy escasa en comparación con las formas cristalinas, por lo que el hierro amorfo no debe de tener gran influencia sobre su color.

Teniendo esto en cuenta, el agente responsable de esas coloraciones habrá que buscarlo dentro de las formas de hierro cristalinas. En este sentido, las opiniones se dividen entre los que atribuyen el color pardo a la goethita y el rojo a la hematites (Waegemans y Herry, 1954; Decraene *et al.*, 1955; Kubiena, 1956; Scheffert *et al.*, 1957; Soileau y McCracken, 1967; Davey *et al.*, 1975; Bigham *et al.*, 1978; Torrent *et al.*, 1980, 1983; Schwertmann *et al.*, 1982; Kemp, 1985) y los que consideran a la goethita microdividida como la responsable del color rojo (Brésson, 1976; Guillet *et al.*, 1984).

En los perfiles 11 y 13 la goethita aparece como el óxido de hierro que predomina en la fracción arcilla (Tabla 5), cuya coloración, de acuerdo con la «redness rating» resulta ser más parda que el suelo en conjunto (Tabla 6), mientras que la hematites predomina sobre la goethita en la fracción arena (Tabla 4),

Tabla 5. Estimación semicuantitativa de los óxidos de Fe (DRX) en la fracción cristalina de la arcilla (sobre 10)
Semicuantitative estimation of the iron oxides (XRD) in the crystalline fraction to the clay (over 10)

| <i>Perfil</i> | <i>Horz.</i> | <i>Goethita</i> | <i>Hematites</i> | <i>Perfil</i> | <i>Horz.</i> | <i>Goethita</i> | <i>Hematites</i> |
|---------------|--------------|-----------------|------------------|---------------|--------------|-----------------|------------------|
| 11 | A | 3 | tr | 13 | Ap | 3 | 0 |
| | Bt1 | 4 | tr | | Bt1 | 4 | 0 |
| | Bt2 | 4 | tr | | Bt2 | 4 | 0 |
| | Bt3 | 4 | tr | | Bt3 | 4 | 0 |
| | | | | | Bt4 | 4 | 0 |

Tabla 6. Color del suelo y arcilla.
Soil colour and clay colour

| <i>Perfil</i> | <i>Hor.</i> | <i>Suelo (< 2 mm)</i> | | | | <i>Arcilla (< 2 μ)</i> | |
|---------------|-------------|--------------------------|-----------|------------------|-----------|---------------------------|-----------|
| | | <i>color (h)</i> | <i>RR</i> | <i>color (s)</i> | <i>RR</i> | <i>color (s)</i> | <i>RR</i> |
| 10 | Ah1 | 7,5YR3/3 | 2,5 | 7,5YR4/4 | 2,5 | 7,5YR4/4 | 2,5 |
| | Ah2 | 7,5YR3/3 | 2,5 | 7,5YR4/4 | 2,5 | 7,5YR4/4 | 2,5 |
| | Bt1 | 7,5YR4/6 | 3,7 | 7,5YR6/8 | 3,3 | 7,5YR7/8 | 2,9 |
| | Bt2 | 7,5YR4/6 | 3,7 | 10YR6/6 | 0 | 10YR6/6 | 0 |
| 11 | A | 5YR4/4 | 5 | 5YR5/4 | 4 | 7,5YR5/6 | 3 |
| | Bt1 | 5YR5/8 | 8 | 5YR6/8 | 6,6 | 7,5YR6/8 | 3,3 |
| | Bt2 | 5YR5/8 | 8 | 5YR6/8 | 6,6 | 7,5YR6/8 | 3,3 |
| | Bt3 | 5YR5/8 | 8 | 5YR6/8 | 6,6 | 7,5YR6/8 | 3,3 |
| 12 | A | 7,5YR4/6 | 3,7 | 7,5YR5/6 | 3 | 7,5YR5/6 | 3 |
| | Bt1 | 7,5YR5/6 | 3 | 7,5YR6/6 | 2,5 | 7,5YR6/6 | 2,5 |
| | Bt2 | 7,5YR5/6 | 3 | 10YR6/6 | 0 | 10YR7/6 | 0 |
| | Bw | 7,5YR4/4 | 2,5 | 10YR5/4 | 0 | 10YR6/4 | 0 |
| 13 | Ap | 7,5YR4/4 | 2,5 | 7,5YR5/6 | 3 | 7,5YR5/4 | 2 |
| | Bt1 | 5YR5/8 | 8 | 5YR6/6 | 5 | 7,5YR6/6 | 2,5 |
| | Bt2 | 5YR5/8 | 8 | 5YR6/6 | 5 | 7,5YR6/6 | 2,5 |

$$RR = \text{«Redness Rating»} = \frac{(10 - H)C}{V} \quad (\text{Torrent et al., 1980})$$

C = Chroma

H = Hue YR* o Hue R-10

V = Value

*10R = 0, H = 10 para todos los Y.

por lo que el color rojo de estos suelos parece deberse a granos de hematites cuyo origen es el heredado de la roca.

La ausencia de hematites en los perfiles 12 y 10 podría ser la razón de su color más pardo, dominado por la coloración de la goethita (7,5YR a 10R) que está presente en todas las fracciones. Resultados similares a los expuestos han sido señalados por Barral *et al.*, (1988) para otros suelos sobre calizas en Galicia.

El hecho de que los perfiles 11 y 13 presenten colores rojos nos lleva a plantearnos si se ha producido un proceso de rubefacción, que sería perfectamente factible en estos suelos descarbonatados. La respuesta depende de la definición que se tome. Si se considera rubefacción el desarrollo de un suelo rojo sobre una roca que no presenta este color, efectivamente se podría decir que la rubefacción ha tenido lugar, pero si se aplica el criterio más restringido, aunque generalmente más aceptado, según el cual para que exista rubefacción ha de existir formación edáfica de hematites (Schwermann *et al.*, 1982; Kemp, 1985), no habría existido rubefacción, puesto que según se ha dicho, la hematites presente en las fracciones gruesas se considera heredada del material de partida.

En cualquier caso, la composición del material de partida parece ser determinante del color de estos suelos, a través de su influencia directa en la composición mineralógica de la fracción arena y, en menor medida, de la fracción arcilla. El grado de desarrollo del perfil u otros factores del sitio, tales como las condiciones climáticas actuales o antiguas, no parecen influir en el color, puesto que todos los suelos estudiados, ya sean pardos o rojos, se caracterizan por su elevado grado de desarrollo, que nos permite suponer una antigüedad e historia paleoclimática semejantes, siendo las condiciones climáticas actuales (elevada pluviosidad y temperaturas moderadas a bajas) más acordes con las que conducen al empardecimiento.

5. Conclusiones

El contenido de hierro total de los suelos sobre calizas estudiados oscila entre un 2,10 y un 8,35%. De acuerdo con su solubilidad diferencial en extractantes selectivos, el hierro se encuentra mayoritariamente en forma «libre», no formando parte de estructuras silicatadas, con un claro predominio de los óxidos cristalinos sobre los compuestos de hierro amorfos o ligados a la materia orgánica.

Los suelos de coloración rojiza (5YR) (perfiles 11 y 13) presentan hematites, goethita y magnetita, en la fracción arena; la goethita es el mineral de hierro presente en la fracción arcilla, acompañada de trazas de hematites en el perfil 11. Los suelos de color pardo (7,5YR) (perfiles 10 y 12) presentan goethita y magnetita, pero carecen de hematites en ambas fracciones.

La coloración rojiza se atribuye, por lo tanto, a la presencia de hematites, que se considera heredada del material de partida, por lo que podemos considerar que se ha producido el proceso de rubefacción únicamente si éste se interpreta en un sentido amplio como desarrollo de un suelo rojo sobre materiales que no presentan este color.

Referencias bibliográficas

- Barral, M.T., Taboada, M.T. & Guitián, F.** (1988): Caracterización química y mineralógica de las formas de hierro en suelos sobre sustrato calizo de Galicia (NW de España). *Anal Edafol. Agrobiol.*, 47 (9-10), 1303-1323.
- Bascomb, C. L.** (1968): Distribution of pyrophosphate extractable iron and organic carbon in soils of various groups. *J. Soil Sci.*, 19 (2), 251-268.
- Bigham, J. M., Golden, D. C., Buol, S. W., Weed, S. B. & Bowen, L. H.** (1978): Iron oxide mineralogy of well-drained Ultisols and Oxisols: II. Influence on color, surface area and phosphate retention. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 42, 825-830.
- Bresson, L. M.** (1976): Rubéfaction récente des sols sous climat tempéré humide. *Sci. du Sol*, 1, 3-22.
- Bronger, A., Enslin, J., Gutlich, P. & Spiering, H.** (1980): Mossbauer studies on the rubefication of «terrae rossae» in Slovakia. *4 th. Meet. Eur. Clay Group. Abst.*, 28-29.

- Davey, B. G., Russell, J. D. & Wilson, M. J.** (1975): Iron oxide and clay minerals and their relation to colours of red and yellow podzolic soils near Sydney, Australia. *Geoderma*, 14, 125-138.
- Decraene, A. & Laruelle, P.** (1955): Genèse et altération des latosols équatoriaux et tropicaux humides. *Bull. Agric. Congo Belge*. 46, 1113-1243.
- Díaz-Fierros, F.** (1995): Evolución del suelo en el Cuaternario de Galicia. *Cad. Lab. Xeol. Laxe*, 20, 231-252.
- Fischer, W R. & Schwertmann, U.** (1975): The formation of hematite from amorphous iron (III) hydroxide. *Clays and Clay Min.*, 23, 33-37.
- Guerra, A.** (1972): Los suelos rojos en España. Contribución a su estudio y clasificación. *Dpto. de Suelos del Instituto de Edafología y Biología Vegetal*. CSIC. Madrid.
- Guillet, B., Borting, G., Delcroix, P. & Gury, M.** (1984): Le fer des calcaires et des terra fusca des plateaux lorraines (France). *Pédologie*, 34 (3), 301-318.
- Gutián Ojea, F. & Carballas Fernández, T.** (1969): Suelos de la zona húmeda española. V. Factores de formación: material geológico. *Anal. Edafol. Agrobiol.* 28 (3-4), 191-204.
- Holmgren, G. G. S.** (1967): A rapid citrate-dithionite extractable iron procedure. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 31, 210-211.
- I.G.M.E.** (1979): Mapa 1:50.000 y memoria de la hoja 48 (Meira). *Inst. Geol. Min. Esp.* Madrid.
- I.G.M.E.** (1980): Mapas 1:50.000 y memorias de las hojas 99 (Becerreá), 124 (Sarría). *Inst. Geol. Min. Esp.* Madrid.
- I.G.M.E.** (1981): Mapa 1:50.000 y memoria de la hoja 157 (Oencia). *Inst. Geol. Min. Esp.* Madrid.
- Kemp, R. A.** (1985): The cause of redness in some buried and non-buried soils in eastern England. *J. of Soil Sci.*, 36, 329-334.
- Kubiena, W. L.** (1956): Red-earth formation and lateritization (Their differentiation by micromorphological characteristics). *Cong. Int. Sci. Sol*, 6, Paris, 247-249.
- Lamouroux, M.** (1972): État et comportement du fer dans les sols formés sur roches carbonatées du Liban. *Sci. du Sol*. n° 1, 33-43.
- Lamouroux, M. & Segalen, P.** (1969): Etude comparée des produits ferrugineux dans les sols rouges et bruns méditerranéens. *Sci. du Sol*. 1, 43-52.
- Macías Vázquez, F** (1976): Los suelos rojos como indicadores climáticos en Galicia. *V Cong. de Climatología Agrícola*. Santiago de Compostela.
- McKeague, J. A. & Day, J. H.** (1966): Dithionite and extractable Fe and Al as aids in differentiation of various classes of soils. *Can. J. Soil Sci.*, 46, 13-22.
- Munsell** (1975): *Soil Color Charts*. Munsell Colour Co. USA.
- Scheffert, F., Welte, E. & Ludwig, F.** (1957): A propos du problème des hydroxides de fer dans les sols. *Chimie der Erde*. 19, 51-64.
- Schwertmann, U. & Lentze, W.** (1966): Couleur des sols et formes des oxydes de fer. *Zeitschr. F. Pflanzenernahrung. Düngung Bodenkde.* 115 (3), 209-214.
- Schwertmann, U., Murad, E. & Schulze, D. G.** (1982): Is there Holocene reddening hematite formation in soils of axeric temperate areas? *Geoderma* 27, 209-223.
- Segalen, P.** (1964): Le fer dans les sols. ORSTOM. Paris.
- Segalen, P.** (1969): Contribution à la connaissance de la couleur des sols à sesquioxides de la zone inter-tropicale: sols jaunes et sols rouges. *Cah. O.R.S.T.O.M. sér. Pédol.*, 7 (2), 225-236.
- Soileau, J. M. & Mccracken, R. J.** (1967): Free iron and coloration in certain well drained coastal plain soils in relation to their properties and classification. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 31 (2), 248-255.
- Taboada, M. T., Silva, B. M. & Barral, M. T.** (1992 a): Distribución y origen de los óxidos de hierro en suelos sobre calizas. *Cuad. Lab. Xeol. de Laxe*, 17: 23-34.
- Taboada, M. T., Silva, B. M. & Villar, M. C.** (1992 b): Mineralogía de suelos formados sobre calizas en Galicia. *Suelo y Planta*, 2: 81-100.
- Taboada, M. T. & Silva, B. M.** (1995): Interpretación genética de los rasgos micromorfológicos de suelos con horizonte textural formados sobre calizas en Galicia. *Nova Acta Científica Compostelana (Biología)*, 5: 161-172.
- Taboada, M. T. & Silva, B. M.** (1997): Evolution of soils developed over limestone in a humid temperate region (Galicia, NW Spain). *Agrochimica*, 41 (1-2): 85-96.

- Taboada, M. T. & Silva, B. M.** (1999): Factores de formación y propiedades de los suelos formados sobre calizas en Galicia. *Cad. Lab. Xeol. de Laxe*, 24. (En prensa).
- Torrent, J., Schwertmann, U., Fechter, H. & Alferez, F.** (1983): Quantitative relationships between soil color and hematite content. *Soil Sci.*, 136 (6), 354-358.
- Torrent, J., Schwertmann, U. & Schulze, D. G.** (1980): Iron oxide mineralogy of some soils of two river terrace sequences in Spain. *Geoderma*. 23, 191-208.
- Villar Celorio, M. C, Silva Hermo, B. M. & Macías Vázquez, F.** (1983): Composición mineralógica de los suelos del área de Mera (Las Mariñas). Relación con los factores edafogénicos. *Cuad. Lab. Xeol. de Laxe*. 5, 281-308.
- Waagemans, G. & Herry, S. S.** (1954): La couleur des latosols. *CR. 5^e Conf. Sci. Sol.* 2, 384-389.
- Yaalon, D. H.** (1970): Soil forming processes in time and space. In: *Paleopedology Origin, Nature and Dating of Paleosols*. Intern. Soc. of Soil Sci. and Israel Univ. Press, Jerusalem.

Recibido el 14 de septiembre de 1999

Aceptado el 14 de octubre de 1999

Trabajo inicialmente aceptado en diciembre de 1994