

PEDOGENESIS AND CHARACTERISTICS OF THE TERRA ROSSAS DEVELOPED ON DIFFERENT PHYSIOGRAPHIC POSITION AND THEIR CLASSIFICATION

PEDOGÉNESIS Y CARACTERÍSTICAS DE LAS TERRA ROSSAS DESARROLLADAS EN POSICIÓN FISIAGRÁFICA DISTINTA Y SU CLASIFICACIÓN

Cumhur Aydinalp^{1*} and Ewart Adsil FitzPatrick²

¹Uludag University, Faculty of Agriculture, Department of Soil Science, 16059 Bursa, Turkey. (cumhur@uludag.edu.tr) ²Department of Plant and Soil Science, University of Aberdeen, Aberdeen AB24 3UU, Scotland, UK.

ABSTRACT

Terra Rossas occur in the eastern part of the Bursa plain, Turkey. The region is covered by large forests growing on Terra Rossa soils. This area has ecological importance for these forests. The purpose of this study was to characterize five Terra Rossa profiles and to relate their properties to the pedogenic processes responsible for their formation under these important forests. Five soil profiles were selected on five different elevations ranging between 200 to 350 m under natural vegetation. Soils are dominated by the influence of climate and lithology. A special classification problem has occurred for two out of five profiles (World Reference Base for Soil Resources). These soils did not meet the clay increase requested by the WRB (2006) classification system for Luvisols. But they were classified due to the high contents of clay, clay coating and infilling in the B horizons and based on field characteristics. The soil samples were examined and classified according to the systems of USDA Soil Taxonomy (2003) and WRB (2006) as Calcic Haploxeralfs and Calcic Luvisols.

Key words: Bursa plain, Mediterranean climate, soil genesis, Terra Rossa.

INTRODUCTION

Terra rossa is reddish clayey to silty-clayey soil especially widespread in the Mediterranean region, which covers limestone and dolomite in the form of discontinuous layer ranging in thickness from a few centimeters to several meters. Red colour (5YR to 10R Munsell hues) is a classical diagnostic feature of Terra Rossa and is the result of rubification, *i.e.*, formation of hematite (Guerra, 1972). In Soil Taxonomy (USDA, 2003), Terra Rossa is classified as Alfisols and according to WRB (2006) Terra Rossa is recognized as Luvisols.

RESUMEN

Las Terra Rossas se dan en la parte oriental de la llanura de Bursa, Turquía. La región está cubierta por extensos bosques que crecen en suelos de Terra Rossa. Esta zona tiene importancia ecológica para estos bosques. El propósito de este estudio fue caracterizar cinco perfiles de Terra Rossa y relacionar sus propiedades con los procesos pedogénicos responsables de su formación bajo estos importantes bosques. Se seleccionaron cinco perfiles de suelo en cinco elevaciones distintas que variaron de 200 a 350 m con vegetación natural. Los suelos están dominados por la influencia del clima y la litología. En dos de los cinco perfiles hubo un problema de clasificación específico. Estos suelos no cumplieron con el aumento de arcilla establecido por el sistema de clasificación para Luvisoles de la WRB (World Reference Base for Soil Resources, (2006). Sin embargo, se clasificaron por su alto contenido de arcilla, revestimiento y relleno de arcilla iluvial en los horizontes B y con base en características de campo. Las muestras de suelo se examinaron y clasificaron conforme a los sistemas de la USDA Soil Taxonomy (2003) y la WRB (2006) como Haploxeralfs cálcicos y Luvisoles cálcicos.

Palabras clave: Llanura de Bursa, clima mediterráneo, génesis del suelo, Terra Rossa.

INTRODUCCIÓN

La terra rosa es un suelo de rojizo arcilloso a lodoso que se extiende principalmente en la región del mediterráneo, que cubre a las rocas calizas y dolomitas en estratos discontinuos que varían en espesor de unos cuantos centímetros a varios metros. El color rojo (5YR a 10R tonos Munsell) es una característica clásica de diagnóstico de la Terra Rossa y es resultado de la rubefacción, *i.e.*, formación de hematitas (Guerra, 1972). En Soil Taxonomy (USDA, 2003), la Terra Rossa se clasifica como Alfisoles y, de acuerdo con la WRB (2006), se reconoce como Luvisoles.

La naturaleza y la relación de Terra Rossa con carbonatos subyacentes es un problema desde hace tiempo y

* Author for correspondence ♦ Autor responsable.

Received: November, 2007. Approved: December, 2008.

Published as ARTICLE in *Agrociencia* 43: 97-105. 2009.

The nature and relationship of Terra Rossa to underlying carbonates is a long-standing problem and there are different opinions with respect to its parent material and origin. The most widely accepted theory is that Terra Rossa has developed from insoluble residue of carbonate rocks (Kubiena, 1953; Bronger *et al.*, 1983; Moresi y Mongelli, 1988). However, other authors have emphasized that Terra Rossa could not have been formed exclusively from insoluble residue of carbonate rocks. Soil geomorphic studies made by Olson *et al.* (1980) in southern Indiana, USA, indicate that the Terra Rossa is mainly debris, derived from erosion of clastic sedimentary rocks, transported on pediments cut into lower lying limestone. Aydinalp (1996, 2001a, 2001b) stated that Terra Rossas in northwestern Turkey developed on limestone and dolomitic limestone; besides, the Terra Rossa of southern Europe might be wind-borne material from Africa (Rapp, 1984). Eolian contributions have been recognized due to the similarities in clay mineralogy (Aydinalp, 1996; Balagh and Runge, 1970), similarities in heavy mineral fraction (Durn *et al.*, 1992; Durn and Aljinovic, 1995), particle size distribution (Aydinalp, 1996 and McLeod, 1980) and the divergence of oxygen isotopic ratios of associated fine quartz (Jackson *et al.*, 1982). The cryptogamic imprint of the rocks can be detected on the rock faces under present soil surface. Danin *et al.* (1983) concluded that eolian source is the principal contributor to the formation of the upper soil layer of Terra Rossa in Israel.

Previous statements imply a polygenetic nature of Terra Rossa. In some isolated karst terrain it may have formed exclusively from insoluble residue of limestone and dolomite but, much more often it comprises a diversity of parent materials which derived on carbonate terrain via different transport mechanisms. For example, Yaloon (1997) concluded that practically all soils in the Mediterranean region were influenced by the addition of eolian dust from North Africa. Erosion and deposition processes, which are superimposed on karst terrains and induced by both climatic changes and tectonic movements, might be responsible for thick colluvial Terra Rossa accumulations in uvala and dolina type of karst depressions. In this case, we can consider Terra Rossa as a pedo-sedimentary complex.

As long as the general pedoenvironment remains essentially suitable for the formation of Terra Rossa it is of a little relevance for the process of rubification whether the primary Fe sources are autochthonous or allochthonous (Boero and Schwertmann, 1989).

Merino *et al.* (2006a) concluded that Terra Rossa soils have long been thought to result from residual dissolution of limestone or to form by accumulation on

hay distintas opiniones con respecto a su material parental y origen. La teoría más aceptada es que la Terra Rossa se desarrolló a partir de residuos insolubles de rocas de carbonato (Kubiena, 1953; Bronger *et al.*, 1983; Moresi, *et al.*, 1998). Sin embargo, otros autores han enfatizado que la Terra Rossa podría no estar formada exclusivamente de residuos insolubles de rocas de carbonato. Estudios geomórficos de suelo realizados por Olson *et al.* (1980) en el sureste de Indiana, EE.UU., indican que la Terra Rossa está formada esencialmente de restos procedentes de la erosión de rocas sedimentarias clásticas, transportadas en pedimentos cortados en piedras calizas situadas en capas inferiores. Aydinalp (1996, 2001a, 2001b) indicó que las Terra Rossas en el noroeste de Turquía se desarrollaron en rocas calizas y rocas calizas dolomíticas; además, la Terra Rossa de Europa del Sur podría ser material de África transportado por el viento (Rapp, 1984). Las contribuciones eólicas se han identificado por las semejanzas de la mineralogía de la arcilla (Aydinalp, 1996; Balagh y Runge, 1970), similitudes en la fracción de minerales pesados (Durn *et al.*, 1992; Durn y Aljinovic, 1995), distribución del tamaño de partículas (Aydinalp, 1996 y McLeod, 1980) y la divergencia de las relaciones isotópicas de oxígeno del cuarzo puro asociado (Jackson *et al.*, 1982). La huella criptogámica de las rocas puede detectarse en las caras de la roca bajo la superficie actual del suelo. Danin *et al.* (1983) concluyeron que la fuente eólica es el contribuidor principal para la formación de la capa superior del suelo de la Terra Rossa en Israel.

Afirmaciones previas suponen una naturaleza poligénica de la Terra Rossa. En un terreno cárstico aislado puede haberse formado exclusivamente desde residuos insolubles de roca caliza y dolomita, pero con más frecuencia se compone de una diversidad de materiales originales provenientes de terrenos carbonatados mediante distintos mecanismos de transporte. Por ejemplo, Yaloon (1997) concluyó que prácticamente todos los suelos en la región del Mediterráneo fueron influenciados por la adición de polvo eólico proveniente del norte de África. Los procesos de erosión y depósito, que se superponen en terrenos cársticos y se inducen por cambios climáticos y por movimientos tectónicos, podrían ser la causa de las acumulaciones coluviales densas de Terra Rossa en depresiones cársticas de tipo uvala y dolina. En este caso, la Terra Rossa puede considerarse un conjunto pedosedimentario.

Mientras el pedoambiente general continúe siendo esencialmente idóneo para la formación de Terra Rossa, el que los orígenes primarios de Fe sean autóctonos o alóctonos resulta poco relevante para el proceso de rubefacción (Boero y Schwertmann, 1989).

preexisting limestone karst of detrital mud, ash, or especially dust. Conclusive new field and petrographic evidence for the Terra Rossa in southern Indiana, USA, shows that this soil is formed by replacement of limestone by authigenic red clay at a moving metasomatic front, with the clay's major elements, Fe, Al and Si, coming from dissolved dust, as suggested by strontium isotope ratios. Strikingly, the clay-for-limestone replacement triggers a reactive-infiltration instability, that causes the front to become 'fingered' and 'funneled' on a cascade of scales—precisely the characteristic morphology of karst. That is, the replacement of limestone by clay turns out also to carve the repeated karst funnels and sinks that contain the Terra Rossa itself. This is why Terra Rossa and karst are associated, and how the karst morphology arises. Terra Rossa is thus a metasomatic 'claystone' plus its lateritic or pedogenetic modifications, all hosted in a simultaneously karstified limestone. Karst limestone weathering is driven ultimately by eolian dust supply. The partial validity of both the residual and detrital origins has been a smoke screen that for decades has kept investigators from even suspecting that the true origin of Terra Rossa could be different, or that the way to find it should be petrographic, not chemical.

According to Merino *et al.* (2006b), Terra Rossas in the Bahamas, the Antilles, Yucatán, Florida, Texas, Kentucky, southern Europe, Israel, southern Australia, and elsewhere, probably have the same origin as the Bloomington Terra Rossa, but a replacement origin, which can be detected only with an optical polarizing microscope, has never been suspected or sought. The iron, aluminum, and silicon needed for clay growth are provided probably by dust; this can be established by matching of strontium and neodymium isotope ratios. Saharan dust is certainly abundant in southern Europe and the Caribbean, both of which are abundant in karst and Terra Rossa too. After settling, the dust dissolves at the surface, the solutes leak in, reach the reaction front at several meters of depth, and drive the precipitation of the red clay crystals that replace the limestone. Terra Rossa is thus a unique laterite - one none of whose major chemical elements comes from its parent limestone

Terra Rossas were derived from hard and unconsolidated limestones that occur widely in the east side of the Bursa region, Turkey. Therefore, the objective of this research was to study genesis of the Terra Rossas formed on five different elevations and to classify them according to the Soil Taxonomy (USDA, 2003) and WRB (2006) systems with their morphological, physical, and chemical properties.

Merino *et al.* (2006a) concluyeron que por mucho tiempo se ha considerado que los suelos de Terra Rossa resultaron de la disolución residual de rocas calizas o que se forman en carsts de roca caliza preexistente por la acumulación de lodo de detritos, cenizas, o particularmente polvo. Una evidencia petrográfica reciente y de campo concluyente sobre la Terra Rossa en el suroeste de Indiana, EE.UU., muestra que este suelo se formó mediante el reemplazo de piedra caliza por arcilla autigénica roja en un frente de reemplazo metasomático, con los elementos principales de la arcilla, Fe, Al y Si, provenientes de polvo disuelto, como lo indican las proporciones de isótopos de estroncio. Sorprendentemente, el reemplazo de arcilla por piedra caliza causa una inestabilidad en la reactivación-infiltración que provoca que el frente sea señalado y encausado a una cascada de escalas con precisamente la característica morfológica del karst. Es decir, el reemplazo de roca caliza por arcilla causa también la formación de embudos y sumideros repetidos de origen cárstico que contienen también a la Terra Rossa. Por ello Terra Rossa y karst están asociados, y es la razón que origina la morfología del karst. La Terra Rossa es, por tanto, una roca arcillosa metasomática más sus modificaciones lateríticas o pedogenéticas, todas hospedadas en una roca caliza carsificada simultáneamente. La erosión de roca caliza se produce finalmente por reservas de polvo eólico. La validez parcial del origen de los residuos y de los detritos ha sido una cortina de humo que por décadas ha impedido que los investigadores imaginen siquiera que el origen verdadero de la Terra Rossa podría ser otro, o que la manera de encontrarlo debería ser petrográfica y no química.

Según Merino *et al.* (2006b), las Terra Rossas en las Bahamas, las Antillas, Yucatán, Florida, Texas, Kentucky, Europa del Sur, Israel, Australia del Sur y en otros sitios, tienen probablemente el mismo origen que la Terra Rossa Bloomington, pero nunca se ha sospechado ni buscado un origen de reemplazo, el cual puede detectarse sólo con un microscopio óptico polarizante. Probablemente el polvo aporta el hierro, aluminio y silicón necesarios para el desarrollo de la arcilla; esto puede establecerse al combinar proporciones de isótopos de estroncio y neodimio. El polvo del Sahara es, sin duda, abundante en Europa del Sur y el Caribe, donde el carso y la Terra Rossa también son cuantiosos. Tras establecerse, el polvo se disuelve en la superficie, los solutos se infiltran, alcanzan el frente de reacción a varios metros de profundidad, y producen la precipitación de cristales de arcilla roja que reemplazan a la piedra caliza. Así, la Terra Rossa es una laterita única; cuyos elementos químicos principales no provienen de su piedra caliza original.

MATERIAL AND METHODS

The soil profiles are located on: 1) 40° 10' 26" N-28° 19' 42" E; 2) 40° 10' 32" N-29° 19' 42" E; 3) 40° 10' 38" N-29° 19' 18" E; 4) 40° 10' 44" N-29° 19' 08" E; 5) 40° 10' 55" N-29° 19' 01" E; in the eastern side of the Bursa plain, Turkey (Figure 1). Profiles represented five Terra Rossas ranging in elevation between 200 m to 350 m and they were derived from unconsolidated limestone; present vegetation is shrubland biome.

The research area was formed during the upper Pleistocene and modified in the Holocene period (Penck, 1953). The soils were formed under Mediterranean climate characterized by hot summers and mild winters. The mean annual precipitation and temperature are 713.1 mm and 14.4 °C. The soil temperature and moisture regimes are thermic and xeric.

The soil profiles in each site were dug down to C horizon (120 cm) and described according to Soil Survey Manual (1993). In each profile, bulk samples of the horizons were taken for laboratory analysis. Particle-size distribution was determined by the hydrometer method (Gee and Bauder, 1982), and pH in a 1:2 soil:water ratio (McLean, 1982). Other variables were organic carbon (Nelson and Sommers, 1982), total nitrogen (Bremner and Mulvaney, 1982) and calcium carbonate (Nelson, 1982), CEC (Rhoades, 1982). Exchangeable cations were extracted from the soil by 1 M NH₄OAc (Thomas, 1982). EC (Rhoades, 1996) was determined by placing 25 g of air dry soil in a 125 mL Erlenmeyer flask, adding 100 mL of sterile deionized water, shaking for 30 min at 250 rpm, allowing the solution to settle for 30 minutes; then gravity filtering the solution through a Whatman 2 filter paper. The clear extract solution received two drops of a 0.1 % sodium hexametaphosphate solution prior to EC measurement. A Hach CO150 conductivity meter was used to determine EC, which was reported as dS m⁻¹. Iron and manganese oxides were extracted by citrate-bicarbonate-dithionite (Mehra and Jackson, 1960) and analyzed by atomic absorption spectrophotometer. These soils were classified according to the systems of Soil Taxonomy (USDA, 2003) and WRB (2006).

Las Terra Rossas provinieron de rocas calizas duras y no consolidadas presentes extensivamente en el lado este de la región de Bursa, Turquía. Por tanto, el objetivo de esta investigación fue estudiar la génesis de las Terra Rossas formadas en cinco altitudes diferentes, y clasificarlas conforme a la Soil Taxonomy (USDA, 2003) y los sistemas de WRB (2006) con sus propiedades morfológicas, físicas y químicas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Los perfiles del suelo se localizan a: 1) 40° 10' 26" N-28° 19' 42" E; 2) 40° 10' 32" N-29° 19' 42" E; 3) 40° 10' 38" N-29° 19' 18" E; 4) 40° 10' 44" N-29° 19' 08" E; 5) 40° 10' 55" N-29° 19' 01" E; en el lado este de Bursa, Turquía (Figura 1). Los perfiles representaron cinco Terra Rossas, cuya elevación varió de 200 m a 350 m y provinieron de roca caliza no consolidada; la vegetación actual es un bioma de matorral o maleza.

La zona de estudio se formó durante el pleistoceno superior y se modificó en el periodo holoceno (Penck, 1953). Los suelos se formaron bajo clima mediterráneo caracterizado por veranos calientes e inviernos leves. La precipitación y la temperatura promedio anual son 713.1 mm y 14.4 °C. La temperatura del suelo y los regímenes de humedad son térmicos y xéricos.

Los perfiles del suelo en cada sitio se excavaron al horizonte C (120 cm) y se describieron conforme al Soil Survey Manual (1993). De cada perfil, las muestras de volumen de los horizontes se analizaron en el laboratorio. La distribución partícula-tamaño se determinó con el método del hidrómetro (Gee y Bauder, 1982), y pH en una proporción suelo:agua de 1:2 (Mc Lean, 1982). Otras variables fueron carbón orgánico (Nelson and Summers, 1982), nitrógeno total (Bremner and Mulvaney, 1982) y carbonato de calcio (Nelson, 1982), CEC (Rhoades, 1982). Se extrajeron cationes intercambiables del suelo por 1 M NH₄OAc (Thomas, 1982). EC (Rhoades, 1996) se determinó colocando 25 g de suelo seco al aire en un matraz de Erlenmeyer de 125 mL, al que se

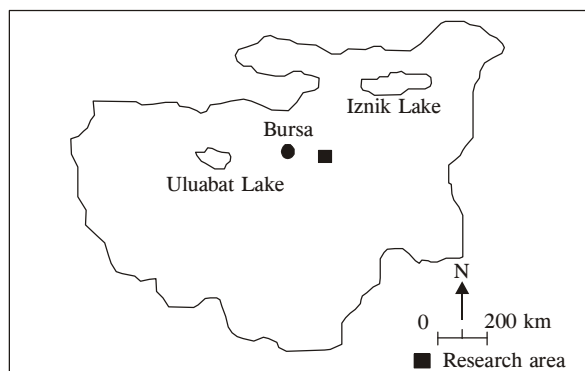


Figure 1. The location of research area in the Bursa province, Turkey.
Figura 1. La localización del área de investigación en la provincia de Bursa, Turquía.

RESULTS AND DISCUSSION

The morphological properties of Terra Rossas are described in Table 1. The color of all studied profiles has Munsell color of 2.5 YR hue with value 4 to 5 and chroma 3 to 8 when moist. The morphological properties of soils are quite similar and A horizons are usually quite well preserved, being 10-25 cm thick and with moderate medium subangular blocky structure. The profile thickness varied from 90 to 115 cm and topography changed from convex to concave in the study area. All profiles are well drained.

The physical and chemical properties of the soils are presented in Table 2. Texture ranged between clay and clay loam and clay content (32.9 to 57.1 %) increased appreciably with depth.

These soil profiles developed on unconsolidated limestone and the clay fraction showed higher values than the sand and silt fractions throughout the profiles. The geomorphic position of profiles and their locations affected distribution of the clay content which was significant for profiles 3, 4 and 5 had. Clay content increased sharply with depth for profiles 3, 4, and 5. The 1.2 ratio of total clay in the argillic horizon to that of an overlying eluvial horizon satisfies the requirements

agregaron 100 mL de agua estéril desionizada, se agitó a 250 rpm por 30 min, dejando que la solución se asentara por 30 min; la solución se filtró por gravedad en un filtro de papel Whatman 2. En la solución clara del extracto se agregaron dos gotas de una solución de hexametaphosfato sódico al 0.1 % antes de medir EC. Para medir EC se usó un metro de conductividad Hach CO150, que se reportó como dS m⁻¹. Los óxidos de hierro y manganeso se extrajeron con citrato-bicarbonato-ditionita (Mehra and Jackson, 1960) y se analizaron con un espectrofotómetro de absorción atómica. Estos suelos se clasificaron conforme a los sistemas de la Soil Taxonomy (USDA, 2003) y la WRB (2006) están bien drenados.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las propiedades morfológicas de la Terra Rossa se describen en el Cuadro 1. El color de todos los perfiles estudiados es el tono 2.5 YR de Munsell con valor 4 a 5 y cromo 3 a 8 cuando están húmedos. Las propiedades morfológicas de los suelos son muy similares y los horizontes A se conservan bastante bien, con 10-25 cm de espesor y estructura de bloques subangulares media, moderada. El espesor del perfil varió de 90 a 115 cm y la topografía cambió de convexa a cóncava en la zona de estudio. Todos los perfiles.

Table 1. Morphological properties of the studied profiles.
Cuadro 1. Propiedades morfológicas de los perfiles estudiados.

Horizon	Depth (cm)	Munsell color, (moist)	Texture	Structure (moist)	Consistence	Boundary	Elevation (m)	Angle of slope	Form of slope	Land use and vegetation type
Profile 1						350	7	Convex	<i>Pinus brutia</i>	
A	0-20	2.5 YR 4/6	C	2m, sbk	fi	s				
Bw	20-45	2.5 YR 5/8	C	3m, sbk	fi	c				
Ck	45-100	2.5 YR 5/3	CL	2m, sbk	fi	c				
Profile 2							300	6	Convex	<i>Pinus brutia</i>
A	0-25	2.5 YR 4/6	C	2m, sbk	fi	w				
Bw	25-35	2.5 YR 5/8	C	3m, sbk	fi	g				
Ck	35-95	2.5 YR 5/4	CL	2m, sbk	fi	g				
Profile 3							250	3	Concave	<i>Pinus brutia</i>
A	0-15	2.5 YR 4/3	C	2m, sbk	fi	s				
Bt	15-42	2.5 YR 5/6	C	3m, sbk	fi	g				
Ck	42-90	2.5 YR 5/6	CL	2m, sbk	fi	g				
Profile 4							200	3	Concave	<i>Machines</i>
A	0-10	2.5 YR 4/4	C	2m, sbk	fi	s				
Bt	10-58	2.5 YR 5/6	C	3m, sbk	fi	s				
Ck	58-110	2.5 YR 5/3	C	2m, sbk	fi	g				
Profile 5							220	2	Concave	<i>Macchie</i>
A	0-20	2.5 YR 4/3	C	2m, sbk	fi	s				
Bt	20-65	2.5 YR 5/6	C	3m, sbk	fi	c				
Ck	65-115	2.5 YR 5/4	C	3m, sbk	fi	c				

Structure: 2 = moderate; 3 = strong. Type: m = medium. Class: sbk = subangular blocky. Consistency: fi = firm. Boundary: c = clear; g = gradual; s = smooth; w = wavy.

Table 2. Some physical and chemical properties of studied profiles.
Cuadro 2. Algunas propiedades físicas y químicas de los perfiles estudiados.

Horizon	Depth (cm)	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	Texture	pH 1:2 soil: water	EC (dS m ⁻¹)	Org. C (%)	Total N (%)	C/N	CaCO ₃ (%)	CBD extractable		CEC	Exchangeable cations			
												Fe mg g ⁻¹	Mn mg g ⁻¹		Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	Na ⁺
															cmol kg ⁻¹			
Profile 1																		
A	0-20	26.2	30.3	41.0	C	7.7	0.67	0.9	0.09	10.0	1.8	10.7	0.77	36.9	31.0	3.2	1.8	2.9
Bw	20-45	23.5	28.1	47.2	C	7.9	0.60	0.6	0.07	8.6	2.0	17.5	0.58	39.2	33.5	3.9	1.3	2.3
Ck	45-100	32.1	27.3	38.0	CL	8.0	0.45	—	—	—	13.7	12.4	0.65	32.6	27.1	4.3	0.9	1.7
Profile 2																		
A	0-25	28.4	27.3	42.5	C	7.9	0.60	0.9	0.08	11.2	1.2	15.1	1.02	38.1	32.3	3.1	1.4	2.7
Bw	25-35	18.7	29.7	49.4	C	8.0	0.54	0.5	0.06	8.3	2.7	19.0	0.87	42.0	35.7	3.6	1.5	2.4
Ck	35-95	29.1	35.2	32.9	CL	8.2	0.37	—	—	—	16.8	17.2	0.98	30.4	24.0	4.6	1.1	1.9
Profile 3																		
A	0-15	25.1	28.9	44.1	C	7.8	0.72	1.1	0.09	12.2	2.0	24.1	0.92	42.2	35.1	3.9	1.6	3.0
Bt	15-42	19.0	26.4	52.6	C	7.9	0.63	0.8	0.07	11.4	3.6	29.9	0.80	45.8	39.5	4.4	1.0	2.2
Ck	42-90	26.6	32.0	39.3	CL	8.2	0.48	—	—	—	20.7	26.2	0.87	37.6	29.5	6.5	0.8	2.2
Profile 4																		
A	0-10	27.5	22.8	47.9	C	8.0	0.79	1.0	0.08	12.5	3.1	23.5	0.86	46.5	39.8	2.5	2.0	3.5
Bt	10-58	16.0	24.9	57.1	C	8.1	0.61	0.6	0.06	10.0	5.9	27.2	0.71	49.0	41.1	3.9	2.1	2.9
Ck	58-110	25.0	28.3	43.7	C	8.2	0.50	—	—	—	18.1	24.8	0.78	39.1	31.3	6.3	1.3	1.2
Profile 5																		
A	0-20	33.3	25.8	40.3	C	7.9	0.58	1.2	0.09	13.3	1.6	20.3	0.95	40.1	32.6	2.9	2.3	3.2
Bt	20-65	17.6	27.5	54.5	C	8.0	0.42	0.7	0.07	10.0	2.9	29.1	0.88	50.8	43.1	3.7	1.8	2.7
Ck	65-115	27.0	30.2	42.7	C	8.0	0.36	—	—	—	22.8	24.4	0.90	37.8	29.0	6.9	1.5	1.6

CBD: Citrate-bicarbonate-dithionite.

of Soil Taxonomy (USDA, 2003). These profiles had higher clay values than the other profiles, because they were developed on the lowest part of the research area. The high clay accumulation in the Bt horizons was due to the high degree of clay illuviation at the lower elevation, their topography and a better water movement throughout these profiles. Therefore, the profiles 1 and 2 did not meet the clay increase requested by the WRB (2006); however, they showed high contents of clay, clay coating and infilling in the B horizons, which are characteristics of argillic horizon. Hopkins and Frazer. (2003) have stated the similar soil forming processes for similar soil profiles; they studied, on the eastern North Dakota till plains since the inception of the Holocene, soils with argillic horizon which were recognized on a very limited basis. The examined profiles showed evidence of genetic argillic horizons based on soil structure, hand texturing, and cutan presence.

The soil pH varied from 7.7 to 8.2 and values increased with depth. The cation exchange capacity (CEC) of these soils ranges between 30.4 to 50.8 cmol (+) kg⁻¹ and organic matter conditions were low. This means that CEC was largely due to clay presence. Exchangeable calcium and magnesium are dominant cations followed by sodium and potassium. The use of ammonium acetate pH 7 could lead to overestimation of exchangeable calcium. The values of CaCO₃ (1.2 to 22.8 %) were high and increased with depth due to presence of the alkaline parent material, which is unconsolidated limestone. This trend shows that there is a calcification in these soils. The organic C, total N, and C/N values are generally very low; the low carbon values are due to the high rate of decomposition of organic matter, occurring in most soils of the region (Aydinalp, 1996). The electrical conductivity values decreased with depth and the results indicated that the soils are not saline under these conditions.

The profiles 3, 4, and 5 had higher citrate-bicarbonate-dithionite extractable Fe values than the other two profiles. The citrate-bicarbonate-dithionite extractable Mn values decreased in the all soils with depth. The results of the present research indicated that the soils of the study area exhibit a similar degree of development. But, local microtopography have caused some differences in the chemical and physical properties of the soils, especially the clay illuviation and the citrate-bicarbonate-dithionite extractable Fe values. The differences in soil properties were due to different location of the profiles in relation with the geomorphological position of the study area at the profiles 3, 4, and 5. Sgouras *et al.* (2007) studied some soils from Greece and classified them as Haploxeralfs and Rhodoxeralfs. They found similar

Las propiedades físicas y químicas de los suelos se muestran en el Cuadro 2. La textura varió de arcillosa a franco arcillosa y el contenido de arcilla (32.9 a 57.1 %) aumentó considerablemente con la profundidad.

Estos perfiles de suelo se desarrollaron en roca caliza no consolidada y la porción de arcilla mostró valores más altos que las de arena y cieno en todos sus perfiles. La posición geomórfica de los perfiles y sus ubicaciones afectaron la distribución del contenido de arcilla, el cual fue significativo en los perfiles 3, 4 y 5. El contenido de arcilla se incrementó mucho con la profundidad en los perfiles 3, 4 y 5. La proporción 1:2 de arcilla total en el horizonte argílico con respecto al de un horizonte eluvial subyacente cumple con los requerimientos de la Soil Taxonomy (USDA, 2003). Estos perfiles mostraron valores más altos de arcilla que otros, debido a que se desarrollaron en la zona inferior del área de estudio. La gran acumulación de arcilla en los horizontes Bt se debió al alto grado de iluviación de arcilla en la elevación más baja, a su topografía, así como a un mejor flujo del agua en todos estos perfiles. Por tanto, los perfiles 1 y 2 no cumplieron con el aumento de arcilla establecido por la WRB (2006); sin embargo, mostraron altos contenidos de arcilla, revestimiento y relleno de arcilla iluvial en los horizontes B, características del horizonte argílico. Hopkins y Frazer (2003) señalaron la similitud de los procesos de formación del suelo en perfiles de suelo semejantes; estudiaron, en llanuras de till (tillita) del este de Dakota del Norte del comienzo del Holoceno, suelos con horizonte argílico que se reconocieron de forma muy limitada. Los perfiles analizados mostraron evidencia de horizontes argílicos genéticos con base en la estructura del suelo, texturización manual, y presencia de cútan.

El pH del suelo varió de 7.7 a 8.2 y los valores aumentaron con la profundidad. La capacidad de intercambio catiónico (CIC) de estos suelos varió entre 30.4 y 50.8 cmol (+) kg⁻¹ y las condiciones de la materia orgánica fueron bajas. Esto significa que CIC se debió en gran medida a la presencia de arcilla. Calcio y manganeso intercambiables son cationes dominantes, seguidos por sodio y potasio. El uso de acetato de amonio pH 7 podría ocasionar una sobre estimación de calcio intercambiable. Los valores de CaCO₃ (1.2 a 22.8 %) fueron elevados y aumentaron con la profundidad por la presencia de material alcalino original, que es roca caliza no consolidada. Esta tendencia muestra que en estos suelos hay calcificación. El C orgánico, N total, y los valores C/N son generalmente muy bajos; los bajos valores de carbono se deben al alto índice de descomposición de la materia orgánica, la cual tiene lugar en prácticamente todos los suelos de la región (Aydinalp, 1996). Los valores de conductividad eléctrica

distribution of the citrate-bicarbonate-dithionite extractable Fe and Mn and stated that the Mediterranean climate affects many soil properties in this region.

The studied soils were classified according to their type and sequence of horizons. The cambic, argillic and calcic horizons were defined in for these soils. The middle horizons were identified as cambic B (Bw) and argillic B (Bt) horizons. The lowest horizons were identified as calcic (Ck) horizon due to accumulation of carbonates. These soils were classified according to the Soil Taxonomy (USDA, 2003) and WRB (2006) systems as Calcic Haploxeralfs, and Calcic Luvisols.

CONCLUSIONS

The formation and evolution of Terra Rossa soils under a xeric climate in Turkey, similar to other that prevails in most areas around the Mediterranean basin, are affected by the role and the relative importance of soil genesis factors, such as parent material, time, topography, and climate. The profile developments when all these factors have an optimal effect correspond with the Alfisols order. These soils have slightly to moderate alkaline reactions, low organic matter, and high CaCO_3 content in the Ck horizons. The red color is related to amounts of iron oxides in the profiles. A special problem was encountered in classifying two out of five profiles. These soil profiles did not meet the clay increase requested by the WRB (2006) classification system to be classified as Luvisols, but were classified as Calcic Luvisols due to the high contents of clay, clay coating and infilling in the B horizons and based on field characteristics. The soils were examined and classified according to the Soil Taxonomy (USDA, 2003) system as Calcic Haploxeralfs. These soils are similar in their physical, chemical and morphological properties. Soils are dominated by the influence of climate and lithology.

LITERATURE CITED

- Aydinalp, C. 1996. Characterization of the Main Soil Types in the Bursa Province, Turkey. Ph. D. Thesis, The University of Aberdeen, Aberdeen, UK. pp: 144-145.
- Aydinalp, C. 2001a. A pedological study of Terra Rossas formed on different parent materials in northwestern Turkey. 7th International Meeting of Soils with Mediterranean Type of Climate, Sept 23-28, Technomack, Bari, Italy. pp: 132-135.
- Aydinalp, C. 2001b. The effect of different geomorphological positions on Terra Rossas in northwestern Turkey: Soil characteristics and pedogenesis. 7th International Meeting of Soils with Mediterranean Type of Climate, Sept 23-28, Technomack, Bari, Italy. pp: 136-139.
- Balagh, T. M., and E. C. A. Runge. 1970. Clay rich horizons over limestone, illuvial or residual. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 34: 534-535.

disminuyeron con la profundidad y los resultados indicaron que los suelos no son salinos en estas condiciones.

Los perfiles 3, 4 y 5 tuvieron valores de Fe extraíble con ditionito-citrato-bicarbonato más altos que los otros dos. Los valores de Mn extraíble con ditionito-citrato-bicarbonato disminuyeron en todos los suelos con la profundidad. Los resultados de esta investigación indican que los suelos del área de estudio muestran un grado similar de desarrollo. Pero la microtopografía local ha causado algunas diferencias en las propiedades químicas y físicas de los suelos, particularmente en la iluviación de arcilla y los valores de Fe extraíble con ditionito-citrato-bicarbonato. Las diferencias en las propiedades del suelo se debieron a la distinta ubicación de los perfiles en relación con la posición geomórfica del área de estudio en los perfiles 3, 4 y 5. Sgouras *et al.* (2007) analizaron algunos suelos de Grecia y los clasificaron como Haploxeralfs y Rhodoxeralfs. Ellos encontraron una distribución semejante de Fe y Mn extraíbles con ditionito-citrato-bicarbonato y señalaron que el clima mediterráneo afecta muchas de las propiedades del suelo en esta región.

Los suelos estudiados se clasificaron conforme a su tipo y secuencia de horizontes. Los horizontes cámbicos, argólicos y cálcicos se definieron dentro de estos suelos. Los horizontes intermedios se definieron como horizontes B cámbicos (Bw) y B argólicos. Los horizontes inferiores se definieron como horizontes cálcicos (Ck) debido a la acumulación de carbonatos. Estos suelos se clasificaron como Haploxeralfs cálcicos y Luvisoles cálcicos según los sistemas de la Soil Taxonomy (USDA, 2003) y la WRB (2006).

CONCLUSIONES

La formación y la evolución de suelos Terra Rossa en clima xérico en Turquía, similar al que predomina en la mayoría de las zonas aledañas de la cuenca mediterránea, son afectadas por la función y la importancia relativa de los factores de génesis del suelo, como material parental, tiempo, topografía, y clima. Los desarrollos del perfil cuando todos estos factores tienen un efecto óptimo corresponden al orden de los Alfisoles. Estos suelos tienen reacciones alcalinas ligeras a moderadas, poca materia orgánica, y alto contenido de CaCO_3 en los horizontes Ck. El color rojo está relacionado con cantidades de óxidos de hierro en los perfiles. Hubo un problema específico en la clasificación de dos de los cinco perfiles. Estos perfiles de suelo no tuvieron el aumento de arcilla establecido por el sistema de clasificación de la WRB (2006) para ser clasificados como Luvisoles, pero se clasificaron como Luvisoles cálcicos por su alto contenido de arcilla,

- Bremner, J. M., and C.S. Mulvaney. 1982. Nitrogen: Total. *In*: Page, A. L., R. H. Miller, and D. R. Keeney (eds). *Methods of Soil Analysis*, Part 2, 2nd Ed. American Society of Agronomy: Madison, WI. pp: 595-624.
- Boero, V., and U. Schwertmann. 1989. Iron oxide mineralogy of Terra Rossa and its genetic implications. *Geoderma*. 44: 319-327.
- Bronger, A., J. Ensling, P. Gütlich, and H. Spiering. 1983. Rubification of Terra Rossa in Slovakia: A mösbauer effect study. *Clays Clay Miner.* 31: 269-276.
- Danin, A., R. Gerson, and J. Carty. 1983. Weathering patterns on hard limestone and dolomite by endolithic lichens and cyanobacteria: Supporting evidence for eolian contribution to Terra Rossa. *Soil Sci.* 136: 213-217.
- Durn, G., and D. Aljinovic. 1995. Heavy mineral assemblage in Terra Rossa from the peninsula of Istria, Croatia. 1st Croatian Geological Congress, Abstracts, Opatija, Croatia. pp: 31.
- Durn, G., D. Slovenec, and B. Sinkovec. 1992. Eolian influence in Terra Rossa in Istria. 7th International Congress of ICSOBA, Abstract Balatonalmadi, Hungary. pp: 89.
- Gee, G.W., and J.W. Bauder. 1982. Particle size analysis. *In*: Klute, A. (ed). *Methods of Soil Analysis*, Part 1, 2nd Ed. American Society of Agronomy. Madison, WI. pp: 383-412.
- Guerra, A. 1972. Los suelos rojos en España. Publicaciones del Departamento de Suelos del Instituto de Edafología y Biología Vegetal. C.S.I.C., Madrid. pp: 234.
- Hopkins, D.G, and D.W. Franzen. 2003. Argillic horizons in stratified drift Luverne End moraine, eastern North Dakota. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67: 1790-1796.
- Jackson, M.L., R.N. Clayton, A. Violante, and P. Violante. 1982. Eolian influence on Terra Rossa soils of Italy traced by oxygen isotopic ratio. *In*: van Olphen, H., and F. Veniale (eds). 7th Int. Clay Conf., Pavia, Italy. pp: 293-301.
- Kubiena, W.L. 1953. *The Soils of Europe*. Thomas Murby, London. 317 p.
- McLeod, D.A. 1980. The origin of the red Mediterranean soils in Epirus, Greece. *J. Soil Sci.* 31: 125-136.
- Moresi, M., and G. Mongelli. 1988. The relation between the Terra Rossa and the carbonate-free residue of the underlying limestones and dolostones in Apulia, Italy. *Clay Minerals* 23: 439-436.
- McLean, E.O. 1982. Soil pH and lime requirement. *In*: Page, A. L., R. H. Miller, and D. R. Keeney (eds). *Methods of Soil Analysis*, Part 2, 2nd Ed. American Society of Agronomy. Madison, WI. pp: 199-224.
- Merino, E., A. Banerjee, and S.I. Dworkin. 2006a. Dust, Terra Rossa, replacement, and karst: Serendipitous geodynamics in the critical zone. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 70: 18-1: 416.
- Merino, E., A. Banerjee, and S.I. Dworkin. 2006b. Origin of associated Terra Rossa and karst by mineral replacement driven by dissolved dust: a striking case of chemical geodynamics. 18th World Congress of Soil Science, July 9-15, Philadelphia, Pennsylvania, USA. pp:12.
- Mehra, O. P., and M. L. Jackson. 1960. Iron oxide removal from soils and clays by a dithionate-citrate system buffered with sodium bicarbonate. *In*: *Proceedings of the 7th National Conference on Clays and Clay Minerals*. Pergamon Press, New York, NY. pp: 317-327.
- revestimiento y relleno de arcilla iluvial en los horizontes B, y con base en características de campo. Los suelos se examinaron y clasificaron como Haploxferals cálcicos conforme al sistema de la Soil Taxonomy (USDA, 2003). Estos suelos son semejantes en sus propiedades físicas, químicas y morfológicas. Los suelos están regidos por la influencia del clima y la litología.
- Fin de la versión en Español—
- *~*~*
- Nelson, R.E. 1982. Carbonate and gypsum. *In*: Page, A. L., Miller, R. H., and D. R. Keeney (eds). *Methods of Soil Analysis*, Part 2, 2nd Ed. American Society of Agronomy. Madison, WI. pp: 181-198.
- Nelson, D.W., and L.E. Sommers. 1982. Total carbon, organic carbon, and organic matter. *In*: Page, A.L., R.H. Miller, and D. R. Keeney (eds). *Methods of Soil Analysis*, Part 2, 2nd Ed. American Society of Agronomy. Madison, WI. pp: 538-580.
- Penck, W. 1953. *Morphological Analysis of Land Forms*. Macmillan and Co., Limited, London. pp: 250-253.
- Olson, C.G., R.V. Ruhe, and M.J. Mausbach. 1980. The Terra Rossa limestone contact phenomena in karst, southern Indiana. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44: 1075-1079.
- Rapp, A. 1984. Are Terra Rossa soils in Europe eolian deposits from Africa? *Geologiska Foreningens et Stockholm Forhandlingar* 105: 161-168.
- Rhoades, J. D. 1982. Cation exchange capacity. *In*: Page, A. L., R. H. Miller, and D. R. Keeney (eds). *Methods of Soil Analysis*, Part 2, 2nd Ed. American Society of Agronomy: Madison, WI. pp: 149-158.
- Rhoades, J.D. 1996. Salinity: Electrical conductivity and total dissolved salts. *In*: Sparks, D. L. (ed). *Methods of Soil Analysis*, Part 3. SSSA Book Ser. 5. SSSA and ASA, Madison, WI. pp: 417-435.
- Sgouras, I. D., C. D. Tsadilas, N. Barbayiannis, and N. Danalatos. 2007. Physicochemical and mineralogical properties of red Mediterranean soils from Greece. *Comm. in Soil Sci. and Plant Analysis*. 38: 695-711.
- Soil Survey Division Staff. 1993. *Soil Survey Manual*, Chapter 3. USDA. Washington, D.C. pp: 1-112.
- Thomas, G.W. 1982. Exchangeable cations. *In*: Page, A.L., R. H. Miller, and D.R. Keeney (eds). *American Methods of Soil Analysis*, Part 2, 2nd Ed. Society of Agronomy, Madison, WI, pp: 159-166.
- USDA. 2003. *Soil Taxonomy: Keys to Soil Taxonomy*. Ninth Edition, United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service. Washington, DC. 82 p.
- WRB (World reference base for soil resources). 2006. *A Framework for International Classification, Correlation and Communication: World Soil Resources Reports*. Rome, Italy. 86 p.
- Yaloon, D.H. 1997. Soils in the Mediterranean Region: What makes them different? *Catena* 28: 157-169.