

ESTUDIO DE LA AGREGACION DE LOS SUELOS Y SU RESPUESTA A LA LLUVIA SIMULADA EN UN GRADIENTE ALTITUDINAL EN CRETA (GRECIA)

C. BOIX FAYOS (1), M. D. SORIANO SOTO (1),
A. CALVO CASES (1), A. C. IMESON (2), J. M. SCHOORL (2)
&
I. R. TIEMESSEN (2)

(1) Departamento de Geografía. Universidad de Valencia. Avenida Blasco Ibañez 28.
46010 Valencia. España.

(2) Fysisch Geografisch Bodemkundig Laboratorium. Landscape and Environmental
Research Group. Universiteit van Amsterdam. Nieuwe Prinsengracht 130. 1018 VZ
Amsterdam. The Netherlands.

Resumen. Se seleccionó un gradiente altitudinal de Sur a Norte en Creta (Grecia) con el objetivo de evaluar la influencia del factor clima y el factor usos del suelo en los procesos de erosión, utilizando como metodología básica las simulaciones de lluvia. También, se tomó como indicador de la degradación de la estructura del suelo, su agregación, estudiándose la distribución del tamaño de los agregados y la estabilidad en agua de los microagregados.

Para todo ello se determinaron 4 zonas de estudio a lo largo del gradiente altitudinal elegido, cuyos rangos de precipitaciones varían desde los 1400 mm/anuales en la zona más alta, a 400 mm/anuales en la zona más baja. Aparecen diferentes usos del suelo como son: pastoreo intensivo, pequeños incendios controlados y terrazas agrícolas abandonadas. En cada zona se tomaron perfiles representativos y se realizaron experimentos con lluvia simulada en las distintas superficies, y bajo diferentes usos del suelo.

Tanto las condiciones climatológicas como el uso actual del suelo juegan un importante papel en el control de la erosión. La respuesta erosiva a lo largo del gradiente es máxima en la zona más húmeda y alta y mínima en la zona más seca y baja. Esta respuesta es, en gran medida, diferente a la esperada, valorando el factor climático. La explicación podría radicar en el diferente grado de pastoreo de cada zona, muy intenso en la zona más elevada e inducido por la mayor disponibilidad de humedad para la vegetación, produciendo la compactación del suelo y como consecuencia una mayor escorrentía.

Palabras clave : Erosión, concentración de sedimentos, coeficiente de escorrentía, microagregación, gradiente climático altitudinal.

Abstract. An altitudinal gradient from South to North was selected in Crete in order to evaluate the influence of the climatic and land use factors on soil erosion processes, using as basic methodology the rainfall simulation experiments. Further more, soil aggregation has been used as an indicator of soil structure conditions, by studying the aggregate size distribution and the waterstable microaggregation.

Four study zones were chosen along an altitudinal gradient, the annual precipitation ranges from 1400 mm at the highest zone to 400 mm at the lowest one. Different land uses appear along the selected gradient: intensive grazing, small controlled forest fires (to regenerate the vegetation for grazing) and abandoned agricultural terraces. At each zone reference soil profiles were studied and rainfall simulation experiments were performed on different soil surfaces and under the different land uses.

Both climatological conditions and present land use play an important role in the erosion control. The erosional response along the gradient is maximum at the highest and more moist location and minimum at the lowest and most arid zone. This response is, in some way, very different to the expected one, taking into account the climatic factor. The explanation to this could be found in the different degree of grazing at each zone. For instance, the most intensive grazing is found at the highest location, partially caused by the higher water availability for the plants. This intense grazing produces the compacting of the soil and as a consequence more runoff.

Key words: Erosion rate, sediment concentration, runoff coefficient, microaggregation, climatological gradient.

1. Introducción

Algunos autores han utilizado los gradientes climáticos y la simulación de lluvia como metodología base para valorar el efecto del factor clima en la respuesta erosiva de los suelos (Lavee et al., 1991, Imeson et al., 1994, Calvo et al., 1994). Los gradientes estudiados se caracterizan por presentar similares condiciones litológicas, evolución de los suelos, vegetación, geomorfología de laderas, etc., pero contrastadas condiciones climáticas, apareciendo una disminución de las precipitaciones a medida que se descende en el gradiente. Por otra parte, el efecto del uso actual del suelo a lo largo de estos gradientes no ha sido todavía evaluado, siendo éste un factor que influye sobre la respuesta erosiva del suelo, pudiendo incluso modificarla.

Se han obtenido mayores valores de erosión a medida que se aridizan las condiciones medioambientales en los gradientes altitudinales y climáticos estudiados en Israel y España (Lavee et al., 1991, Imeson et al., 1994, Calvo et al., 1994). Pero la respuesta del sistema suelo-vegetación-procesos está altamente influenciada por procesos específicos que ocurren en cada una de las zonas de estudio, y que tienen una clara dependencia con el actual uso del suelo.

En este trabajo hemos seleccionado un gradiente altitudinal con un importante descenso de las precipitaciones de Sur a Norte en Creta. Nuestro objetivo ha sido establecer la influencia del factor climático (atendiendo principalmente a las precipitaciones) y algunos usos específicos del suelo (principalmente el pastoreo) en la respuesta hidrológica y erosiva de los suelos. Se ha utilizado como técnica base en el campo, la lluvia simulada y se ha valorado en el laboratorio, la microagregación estable en agua, como factor indicador de la degradación de los suelos.

2. Area de estudio

La zona de estudio se sitúa en el noroeste de Creta, próxima a la ciudad de Hania (Figura 1). El área seleccionada constituye un gradiente altitudinal con un descenso de las precipitaciones desde la parte alta del gradiente hasta las más baja (Tabla 1). Se escogieron 4 zonas representativas a lo largo del gradiente y en total 6 laderas de estudio. Una ladera en cada una de las cuatro zonas, más dos laderas con señales de recientes incendios en el caso de Rodoupos (zona intermedia) y Omalos (zona alta), ya que las originales no presentaban muestras de vegetación recientemente quemada.

En todas las zonas la litología se compone de calizas del Cretácico Superior. Las laderas de estudio se encuentran orientadas al sur, y su utilización principal es el pastoreo, siendo frecuentes los incendios controlados de algunas partes de la ladera con objeto de regenerar la vegetación para alimento del ganado. En ocasiones, en la parte más baja de estas laderas se encuentran terrazas de cultivo abandonadas en la actualidad.

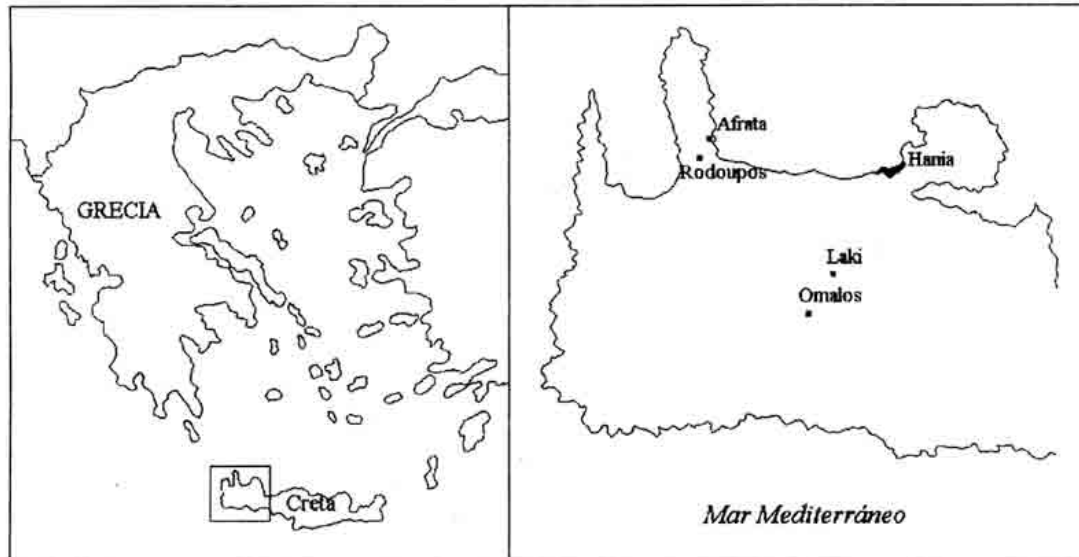


Fig. 1. Localización del área de estudio.
Location of the study area.

Tabla 1. Zonas de estudio en Creta. Características generales

LOCALIDAD	ALT. metros	EXP°	PEND°	VEGETACION	Precipitac. mm
OMALOS	1100	200	25	<i>Sacropoterium spinosum</i> / <i>Quercus coccifera</i> / <i>Rhamnus prunifolius</i> / <i>Asphodelus aestivus</i> / <i>Colchium</i> / <i>Thymus capitatus</i>	1400
OMALOS (área incend.)	1100	190	15	<i>Asphodelus aestivus</i> / <i>Colchium</i>	1400
LAKI	800	180	35	<i>Sacropoterium spinosum</i> / <i>Quercus coccifera</i> / <i>Asphodelus aestivus</i> / <i>Colchium</i> / <i>Salvia triloba</i>	1000
RODOUPOS	400	175	18	<i>Sacropoterium spinosum</i> / <i>Pistacia lentiscus</i> / <i>Rhamnus prunifolius</i> / <i>Asphodelus aestivus</i> / <i>Thymus capitatus</i>	600
RODOUPOS (área incend.)	400	150	30	<i>Asphodelus aestivus</i> / <i>Colchium</i> / <i>Sacropoterium spinosum</i> / <i>Thymus capitatus</i> / <i>Calycotome villosa</i>	600
AFRATA	100	165	12	<i>Pistacia lentiscus</i> / <i>Sacropoterium spinosum</i> / <i>Colchium</i> / <i>Calycotome villosa</i> / <i>Lagoecia cuminoides</i> / <i>Knautia integrifolia</i> / <i>Albium rubrovitatum</i> / <i>Ononis reclinata</i>	400

Tabla 2. Descripción morfológica de los perfiles del suelo.
Morphological description of the soil profiles.

Perfiles	Hor	Prof	Color seco	Textura	Estructura	CaCO ₃	Poros	Pedregosidad	Raíces	Tipo Suelo
OM	A1	0-2	7,5YR4/4	Franco Arcillosa	Mediana Subangular	No Calcáreo	Frecuentes Finas	Abundantes Subangular	Frecuentes	RGe
	A2	2-15	10YR5/4	Franco Arcillosa	Subangular	No Calcáreo	Frecuentes Finas	Abundantes Subangular	Frecuente	
	C	15-45	7,5YR5/6	Franco Arcillosa	Subangular	No Calcáreo	Frecuentes Medianas	Abundantes Subangular	Pocas	
	2C	+45	7,5YR5/6	Franco Arcillosa	Subangular	No Calcáreo	Pocas Finas	Abundantes Subangular	Pocas	
LA	A1/A E	0-2	10YR5/4	Franco Arcillo limosa	Subangular	No Calcáreo	Pocas Finas	Abundantes Subangular	Muy Pocas Finas	RGe
	A2	2-20	10YR5/4	Franco Arcillo limosa	Subangular	No Calcáreo	Frecuentes Finas y Medianas	Abundantes Subangular	Frecuentes Finas y Medianas	
	B/C	+20	7,5YR4/4	Franco Arcillo limosa	Subangular	No Calcáreo	Pocas Finas	Frecuentes Subangular	Pocas Muy Finas	
AF	AE	1.5-2	5YR5/6	Arcillo limosa	Subangular	No Calcáreo	Pocas Finas	Abundantes Subangular	Comunes Muy Finas	LVx
	AB	2-5	2,5YR3/6	Franco Arcillo limosa	Subangular	No Calcáreo	Pocas Finas	Abundantes Subangular	Pocas Finas	
	Bt1	5-12	2,5YR4/6	Arcillosa	Subangular	No Calcáreo	Pocas Muy Finas	Abundantes Subangular	Muy Pocas Finas	
	Bt2	+12	2,5YR4/6	Arcillo limosa	Subangular	No Calcáreo	Pocas Muy Finas	Abundantes Subangular	Muy Pocas Finas	
RO1	A1	0-5	5YR5/6	Arcillo limosa	Subangular	No Calcáreo	Pocas Muy Finas	Abundantes Subangular	Comunes Finas Medianas	LVx
	AB	5-10	5YR4/6	Arcillo limosa	Subangular	No Calcáreo	Pocas Muy Finas	Abundantes Subangular	Pocas Finas	
	Bt1	10-30	2,5YR4/4	Arcillosa	Subangular	No Calcáreo	Pocas Muy Finas	Abundantes Subangular	Pocas Finas	
	B/C	+30	2,5YR4/6	Arcillo limosa	Subangular	No Calcáreo	Pocas Finas	Abundantes Subangular	Muy Pocas Finas	
RO2	AB	0-2	5YR4/4	Arcillo limosa	Subangular	No Calcáreo	Abundantes Finas	Abundantes Subangular	Muy Pocas Finas	LVx
	Bt2	5-10	5YR4/6	Franco Arcillosa	Subangular	No Calcáreo	Pocas Finas	Pocas Subangular	Muy Pocas Finas	
RO3	A1	0-2	7,5YR5/4	Arcillo limosa	Granular Mediana	No Calcáreo	Abundantes Finas	Abundantes Subangular	Comunes Finas Medianas	LVx
	A2	2-20	5YR5/4	Franco Arcillosa	Subangular	No Calcáreo	Pocas Finas	Abundantes Subangular	Pocas Muy Finas	
	Bt	+20	5YR5/6	Franco Arcillo limosa	Subangular	No Calcáreo	Muy Pocas Finas	Abundantes Subangular	Pocas Muy Finas	
RO4	A1	0.4-2	5YR5/6	Arcillo limosa	Subangular	No Calcáreo	Abundantes Finas	Abundantes Subangular	Comunes Finas	LVx
	Bt	2-15	5YR5/4	Arcillosa	Subangular	No Calcáreo	Pocas Finas	Abundantes Subangular	Pocas Muy Finas	

3. Metodología

El diseño del trabajo experimental se centró en: por un lado, el estudio de la respuesta hidrológica de los suelos y su muestreo para el estudio detallado de la agregación. Para ello se escogieron unidades representativas en función de la cobertura vegetal, pedregosidad y uso del suelo (incendio, pastoreo). Se realizaron ocho simulaciones de lluvia en cada ladera a una intensidad de 55 mmh^{-1} durante 45 minutos (Calvo et al., 1988), tomando antes y después de la simulación muestras para la determinación de la humedad en los 3 cm superiores de la superficie del suelo. En las mismas superficies se estudio la distribución del tamaño de los macroagregados (10-5, 5-2, 2-1, 1-0 mm) y la microagregación estable ($<0.106 \text{ mm}$) en agua según se describe en Boix et al., 1994.

Tabla 3. Algunas características físicas y químicas de los perfiles del suelo (OM: Omalos; LA: Laki; RO: Rodoupos; AF: Afrata). Some chemical and physical characteristics of the soil profiles (OM: Omalos; LA: Laki; RO: Rodoupos; AF: Afrata)

Horizonte	Humedad del suelo %	pH H ₂ O 1-2.5	pH Cl ₂ Ca 1-2.5	CE mS 1-5	CO ₃ Ca %	Materia orgánica %	Profundi- dad (cm)	<0.002 %	Clase
OMA1	1,94	7,6	7,56	0,57	0,82	5,21	2	31,33	F-Ac-Li
OMA2	1,96	7,79	6,79	0,31	0,82	4,28	15	29,71	F-Ac-8Li
OMC	1,2	7,22	6,98	0,22	0,81	0,61	45	27,67	F-Ac-Li
OM2C	1,98	7,58	7,05	0,2	0,82	2,06	45	14,89	F-Li
LAA1E	1,71	7,23	7,04	0,25	1,63	5,4	2	27,85	F-Ac
LAA2	3,84	7,15	7,34	0,28	0,85	5,84	20	32,13	F-Ac
LAB/C	1,32	7,58	7,36	0,26	1,62	4,26	20	32,71	F-Ac
ROA1	1,32	7,71	6,96	0,26	0	3,06	5	41,79	Ac-Li
ROAB	1,45	7,9	7,11	0,17	0	1,7	10	29,33	F-Ac-Li
ROBt1	1,99	7,9	7,37	0,15	0	1,71	30	63,74	Ac
ROB/C	1,56	7,9	7,28	0,14	0	2,05	30	52,44	Ac-Li
RO2AB	1,22	7,51	7,1	0,3	0	2,99	5	43,75	Ac-Li
RO2Bt	1,35	7,75	7,25	0,19	3,24	2,25	10	45,1	Ac-Li
RO3A1	1,33	7,92	7,45	0,2	0,81	3,13	2	55,06	Ac-Li/Ac
RO3A2	1,41	8,13	7,48	0,19	0	2,32	20	38,7	Ac-Li
RO3Bt	1,93	7,96	7,51	0,25	0	2,84	20	44,99	Ac-Li
RO4A1	1,41	7,57	7,25	0,23	0	5,11	2	48,27	Ac-Li
RO4AB	1,52	7,69	7,35	0,23	0	3,07	15	41,83	Ac-Li/Ac
AFAE	1,25	7,82	7,34	0,25	0	2,89	2	32,2	F-Ac
AFAB	1,52	7,86	7,46	0,29	0	2,39	5	38,84	F-Ac-Li
AFBt1	1,89	7,76	7,57	0,26	0	1,54	12	41,86	Ac-Li
AFBt2	1,33	7,93	7,43	0,25	0	1,26	12	45,13	Ac-Li

Por otro lado, se estudiaron perfiles de suelo que fueran representativos para cada ladera. Se muestreó un perfil por cada ladera, tomado, aproximadamente, a media ladera, a excepción de Rodoupos donde se estudiaron dos perfiles. Se estudiaron las características físicas y químicas de los suelos según se describe en Calvo et al., 1994.

4. Resultados

4.1. Estudio de los suelos: propiedades físicas, químicas y morfológicas

En todas las laderas existen terrazas abandonadas situadas en la zona más baja de la ladera, siendo frecuente encontrar en la zona alta desprendimiento de rocas que producen al disgregarse pequeños fragmentos que originan una elevada pedregosidad superficial. La descripción de los perfiles se muestra en la Tabla 2.

Los suelos presentan en superficie una estructura granular de moderada a fina, evolucionando a una estructura más desarrollada en bloques subangulares en los horizontes más profundos. Las estructuras más desarrolladas se encuentran en los suelos de Rodoupos debido principalmente al alto contenido en arcilla (Tabla 3). En general, las fracciones arcilla y limo son las dominantes en los suelos. Los máximos valores de arena (26%) se encuentran en Omalos y Laki.

La textura de los suelos en Laki y Omalos es comparable. En Afrata y Rodoupos la textura es más arcillosa por la presencia de arcillas de iluviación. Los valores medios de arcilla en los perfiles varían entre 25.64% y 25.26% en Laki y Omalos, y de 34.33% a 33.00% en Afrata y Rodoupos. Obteniéndose los valores más elevados para el horizonte Bt del perfil de Afrata (63.74%) (Tabla 3).

Los contenidos en materia orgánica en los horizontes superficiales son elevados como corresponden a suelos forestales, especialmente en Laki y Omalos con valores medios de 5.16% en Laki y 3.04% en Omalos (Tabla 3).

En toda el área estudiada, el contenido en carbonatos totales es muy bajo, observándose una recarbonatación de los horizontes superficiales posiblemente debida a las aguas de escorrentía superficial.

Los mayores valores de conductividad eléctrica se obtienen para Omalos, con valores medios de 0.32 mS y máximos de 0.57 mS en los horizontes superficiales. En Rodoupos se obtienen los valores medios más bajos (0.21 mS).

Los pH medios varían entre 7.32 y 7.84, siendo los más altos en Afrata y Rodoupos. El valor máximo corresponde al horizonte A2 del perfil 3 (RO3) en Rodoupos.

Los suelos fueron clasificados según FAO (1988) como Luvisoles crómicos en Afrata y Rodoupos, y Regosoles eútricos en Laki y Omalos.

Tabla 4. Resultados medios de los experimentos de lluvia simulada y condiciones previas de humedad (OM: Omalos; LA: Laki; RO: Rodoupos; AF: Afrata). Average results of the rainfall simulation experiments and previous soil moisture condition (OM: Omalos; LA: Laki; RO: Rodoupos; AF: Afrata).

	Coefficiente de escorrentía	Concentración de sedimentos (gr l⁻¹)	Producción de sedimentos (gr)	Erosión (grm⁻²h⁻¹)	Densidad aparente (gr cm⁻³)	Porosidad (%)	Humedad del suelo (%)
OM	0.66	9.26	61.41	356.19	0.94	64.45	15.43
LA	0.68	1.95	15.74	97.59	0.90	65.70	17.69
RO	0.69	1.72	12.53	70.99	0.95	64.35	22.41
AF	0.37	1.40	6.00	33.40	0.91	65.80	10.04

4.2. Respuesta hidrológica

a) Influencia del factor climático: comparación entre laderas

Se han obtenido diferencias notables entre los valores de erosión, escorrentía y concentración de sedimentos en las cuatro zonas estudiadas. A escala de ladera, los valores más altos de erosión corresponden a Omalos, la zona de estudio más elevada y con mayor precipitación media anual. Los valores más bajos de erosión corresponden a Afrata, la zona de estudio más árida. Los valores medios para cada ladera se muestran en la Tabla 4. En Omalos se obtienen los valores más elevados de erosión y de concentración de sedimentos, así como una elevada densidad aparente del suelo. Al mismo tiempo, Omalos presenta los valores más bajos de microagregados estables en agua y de arcilla (Figura 2). Aunque en Omalos se obtienen los valores más altos de erosión, los más altos coeficientes de escorrentía corresponden a Rodoupos, área de estudio en la zona intermedia. Durante el trabajo de campo el suelo en Rodoupos presentaba los valores más altos de humedad y de densidad aparente. En Afrata, la zona de estudio más árida, se obtienen los valores más bajos de erosión y de coeficiente de escorrentía, correspondiendo a esta zona los mayores contenidos en arcilla y la mayor estabilidad de microagregados en agua junto con el diámetro más grande de microagregados. Durante los experimentos de campo en Afrata se obtuvieron los menores contenidos de humedad del suelo, siendo el tiempo de encharcamiento y la producción de escorrentía mucho mayor que en el resto de las zonas. Los valores de erosión y concentración de sedimentos aumentan con la altitud en el gradiente. Omalos presenta los valores más altos de erosión, seguido respectivamente de Laki, Rodoupos y Afrata.

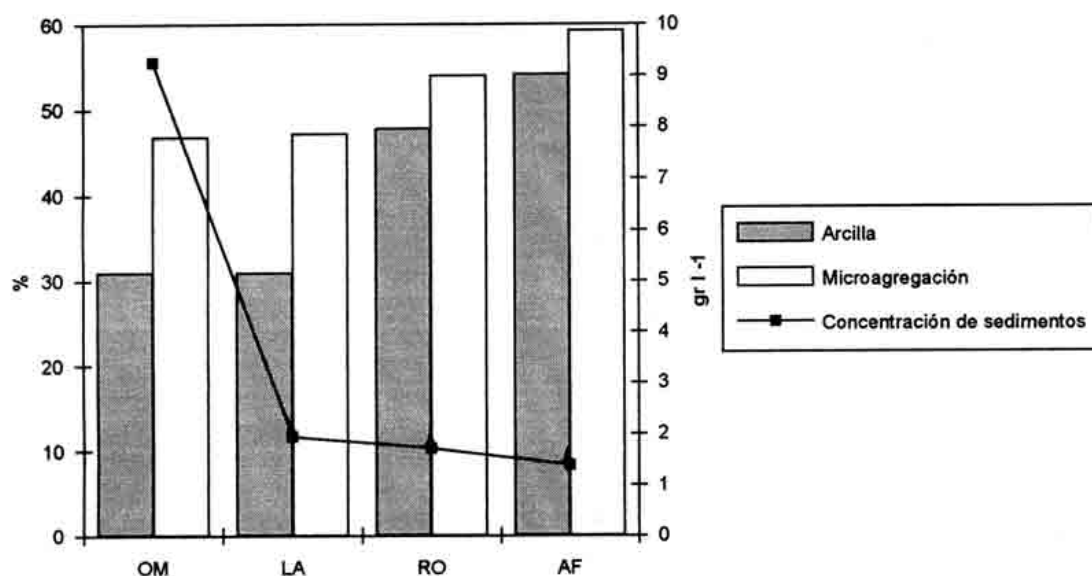


Fig. 2. Valores medios para las cuatro zonas de estudio (desde la más elevada a la más baja) de arcilla, microagregación estable en agua y concentración de sedimentos (OM: Omalos; LA: Laki; RO: Rodoupos; AF: Afrata). Mean values for the four study zones (from the highest one to the lowest one) of clay content, waterstable microaggregation and sediment concentration (OM: Omalos; LA: Laki; RO: Rodoupos; AF: Afrata).

b) Influencia del factor usos del suelo: comparación entre parcelas

Se han analizado, también, los datos a escala de parcela, estudiando los resultados para cada condición específica en la ladera, para ello todos los experimentos han sido clasificados en cinco grupos de acuerdo con las características específicas de la superficie del suelo y su utilización. Estos grupos son los siguientes: espacios desnudos, espacios vegetados, espacios incendiados desnudos y vegetados, y terrazas

abandonadas. Sólo en las zonas intermedias (Laki y Rodoupos) fueron realizados experimentos y tomado muestras en estas cinco condiciones. En Afrata, la zona más baja, fue imposible encontrar superficies representativas de terrazas abandonadas y zonas recientemente incendiadas. En Omalos, la zona de estudio más elevada, a causa de su reciente incendio no fue posible encontrar parcelas quemadas con vegetación. La Tabla 5 resume los resultados de los experimentos realizados con lluvia simulada.

Tabla 5. Resultados de los experimentos de lluvia simulada y condiciones previas de humedad en los distintos tipos de superficies estudiadas (OM: Omalos; LA: Laki; RO: Rodoupos; AF: Afrata; d: espacios desnudos; v: espacios vegetados; di: espacios desnudos e incendiados; vi: espacios vegetados e incendiados; t: terrazas abandonadas). Results of the rainfall simulation experiments and soil moisture condition at the different studied soil surfaces (OM: Omalos; LA: Laki; RO: Rodoupos; AF: Afrata; d: bare patches; v: vegetated patches; di: burnt and bare patches; iv: burnt and vegetated patches; t: abandoned terraces).

Parcelas	Humedad del suelo (%)	Frente de humedad (cm)	Tiempo de encharcamiento (minutos)	Tiempo de escorrentía superficial (minutos)	Coefficiente escorrentía	Concentración de sedimentos (gr l^{-1})	Producción de sedimentos (gr)	Erosión ($\text{gr m}^{-2} \text{h}^{-1}$)
OM b	4.49	10	2	2.35	0.76	22.98	155.75	945.55
OM v	17.59	14.75	2.73	3.2	0.4	6.07	36.92	203.66
OM bb	20.66	19.5	0.37	0.45	0.79	6.05	39.94	203.96
OM t	18.96	10	1.22	2.33	0.69	1.94	13.04	71.57
LA b	19.67	16.5	2.23	3.86	0.64	5.09	28.91	174.61
LA v	24.86	13	3.22	1.91	0.52	0.43	1.22	7.5
LA bb	21.47	19	1.56	2.1	0.8	2.04	15.09	87.37
LA vb	11.35	12	0.57	0.57	0.78	1.13	8.04	46.85
LA t	11.08	19.5	1.56	2.1	0.66	1.08	25.46	171.6
RO b	32.75	20	1.69	1.3	0.85	3.21	26.11	146.24
RO v	27.43	19	0.52	1.04	0.58	1.54	9.21	51.86
RO bb	11.73	4	2.05	4.5	0.77	0.67	5.1	27.11
RO vb	21.2	4	2.33	3.22	0.6	2.37	14.11	76
RO t	18.92	10.25	1.53	1.65	0.67	0.81	8.11	53.73
AF b	9.84	10.25	2.3	4.01	0.52	1.75	9.42	52.16
AF v	10.25	9.5	4.73	5.87	0.22	1.04	2.58	14.64

Los coeficientes de escorrentía son bastante altos en todas las zonas, pero las parcelas desnudas e incendiadas muestran los valores más altos en este parámetro. Las parcelas desnudas también presentan altos valores de erosión y los mayores de densidad aparente en todas las zonas. La pendiente es el factor discriminante en las diferencias en la producción de escorrentía entre espacios desnudos en la ladera y terrazas. En ambas superficies desnudas, la densidad aparente del suelo es ligeramente más elevada en las terrazas y la pendiente mayor en la ladera. Los valores de escorrentía y erosión son más elevados en los espacios desnudos de la ladera que en las terrazas, pero más elevados en las terrazas que en los espacios vegetados de la ladera.

En las zonas más elevadas, Omalos y Laki, las parcelas en espacios incendiados y en terrazas abandonadas alcanzaron más rápidamente el encharcamiento y el inicio de la escorrentía superficial, que en el caso de parcelas no incendiadas. En Rodoupos el tiempo al encharcamiento se alcanzaba más rápidamente en las parcelas no incendiadas que en las incendiadas, es importante considerar que en el momento de los experimentos el contenido en humedad era más bajo en las parcelas incendiadas que en las no quemadas, por lo tanto ese hecho estaba influenciando positivamente la capacidad de infiltración de los suelos quemados. En Afrata, la zona más baja, el encharcamiento y la escorrentía superficial aparecía antes en los espacios desnudos que en los vegetados.

4.3. Agregación del suelo

La zona más baja y árida (Afrata) presenta los valores más elevados de microagregados estables en agua (fracción > 0.106 mm) y el más elevado contenido de arcilla en el suelo. Afrata también presenta la distribución de agregados grandes (10-0 mm) más equilibrada con moderados porcentajes de agregados en todas las fracciones, y dominio de la fracción 5-2 mm.

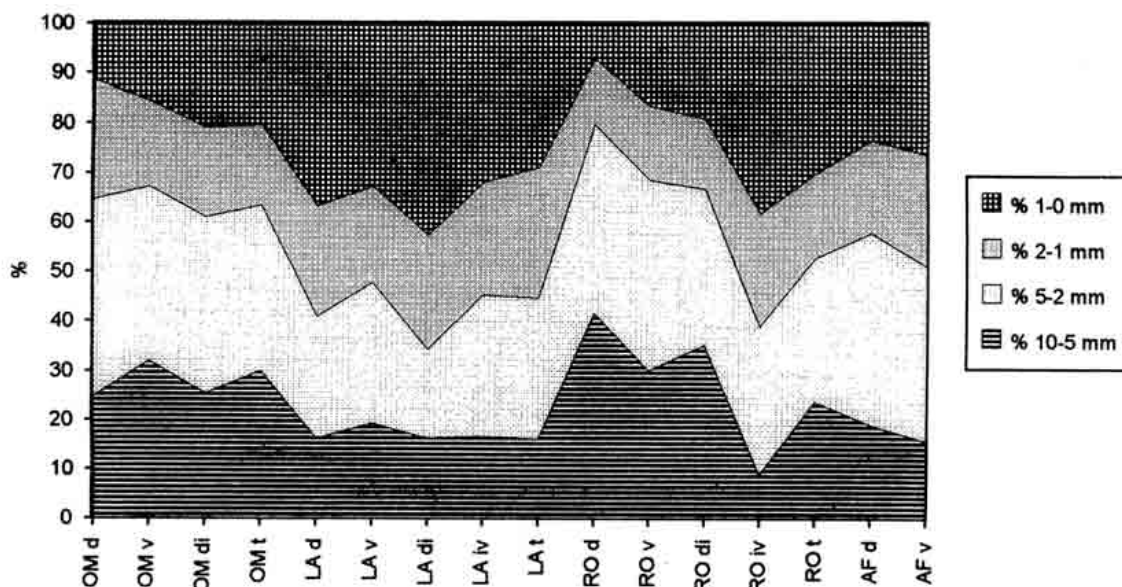


Fig. 3. Distribución del tamaño de los agregados en los distintos tipos de superficies estudiadas (OM: Omalos; LA: Laki; RO: Rodoupos; AF: Afrata; d: espacios desnudos; v: espacios vegetados; di: espacios desnudos e incendiados; iv: espacios vegetados e incendiados; t: terrazas abandonadas). Aggregate size distribution at the different studied soil surface (OM: Omalos; LA: Laki; RO: Rodoupos; AF: Afrata; d: bare patches; v: vegetated patches; di: burnt and bare patches; iv: burnt and vegetated patches; t: abandoned terraces).

Se observa una relación entre la fracción 5-2 mm con la de 1-0 mm, de forma que el aumento o disminución de la primera repercute en la segunda (Figura 3), este hecho es especialmente claro en el caso

de Laki, donde se obtienen altos valores de agregados en la fracción 1-0 mm frente bajos valores correspondientes a la fracción 5-2 mm. En este caso, las fuerzas de cohesión de los agregados de tamaño 5-2 mm son muy débiles debido a su bajo contenido en arcilla, y cuando estos agregados se rompen son incorporados a la fracción de 1-0 mm.

Algunos autores (Edwards & Bremner, 1967, Imeson & Verstraten, 1989) han encontrado una relación positiva entre el contenido de arcilla y materia orgánica con el porcentaje de microagregados estables en agua. En nuestro caso, se ha encontrado una relación positiva entre los microagregados estables en agua y el contenido en arcilla, y una relación inversa entre los agregados estables en agua y la producción de escorrentía. Así pues, Afrata, la zona más árida muestra altos valores de microagregados estables en agua y alto contenido en arcilla, presentando los más bajos valores de escorrentía y concentración de sedimentos (Figura 2).

Bajo condiciones específicas en las laderas la agregación del suelo muestra algunas diferencias. Los espacios quemados, en especial los espacios incendiados y desnudos, presentan los valores más bajos de microagregados estables en agua, mientras que los espacios vegetados y las terrazas presentan los valores más elevados.

Los espacios vegetados con altos valores de microagregados estables en agua, muestran bajos coeficientes de escorrentía y menor erosión que los espacios desnudos (Figura 4, Tabla 5).

En la figura 6 se muestra la variación del contenido de arcilla, estabilidad de microagregados en agua y los diámetros medios de microagregados bajo diferentes condiciones en las laderas de estudio. En general para los tres parámetros se observan tendencias paralelas. Las áreas vegetadas presentan altos valores de microagregados estables en agua, altos contenidos en arcilla y los mayores diámetros de microagregados.

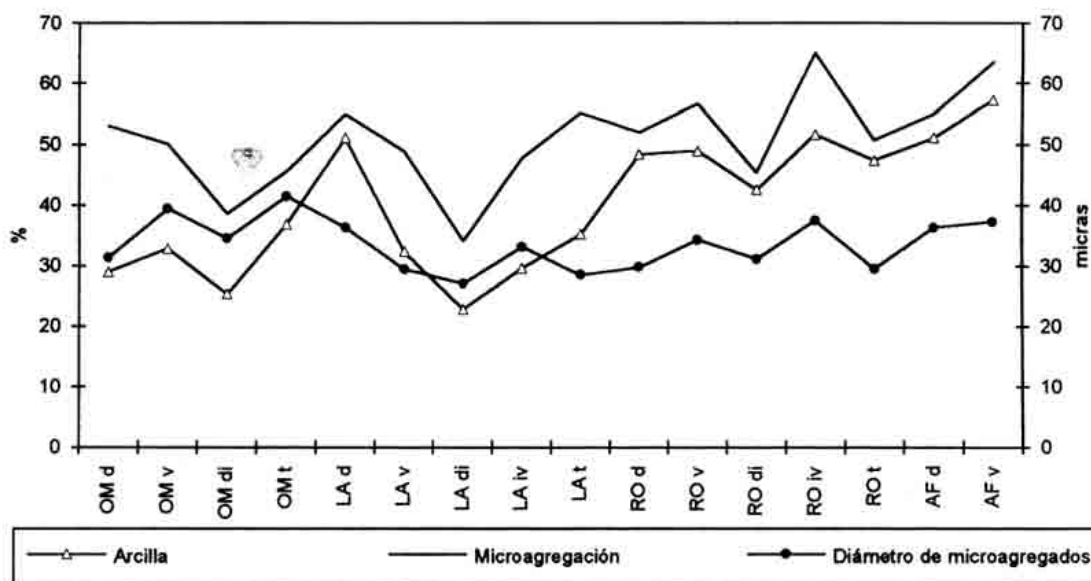


Fig. 4. Contenido de arcilla, microagregados estables en agua y diámetro de microagregados en los distintos tipos de superficies estudiadas (OM: Omalos; LA: Laki; RO: Rodoupos; AF: Afrata; d: espacios desnudos; v: espacios vegetados; di: espacios desnudos e incendiados; vi: espacios vegetados e incendiados; t: terrazas abandonadas). Clay content, waterstable microaggregation and average diameter of the microaggregates at the different studied soil surfaces (OM: Omalos; LA: Laki; RO: Rodoupos; AF: Afrata; d: bare patches; v: vegetated patches; di: burnt and bare patches; iv: burnt and vegetated patches; t: abandoned terraces).

En el caso de Omalos las parcelas sobre terrazas abandonadas presentan altos valores de estos tres parámetros. La combinación de áreas quemadas con áreas de regeneración de la vegetación (caso de Rodoupos) parece garantizar una buena agregación del suelo.

4. Discusión

Los valores de erosión obtenidos a lo largo de este gradiente altitudinal descrito en Creta, son máximos para las zonas de estudio más elevadas y húmedas, y mínimos en las zonas de estudio más bajas y áridas.

Al mismo tiempo observamos que en el gradiente estudiado el uso del suelo ejerce una gran influencia sobre la erosión. Omalos, la zona de estudio más elevada, está sometida a un pastoreo intensivo. Debido a las buenas condiciones de humedad del suelo existe una alta producción de biomasa durante todo el año adecuada para la alimentación del ganado. A consecuencia del pastoreo, las cabras pisotean el suelo, compactándolo, aumentando de esta forma su densidad aparente. Los agregados de las fracciones grandes se encuentran en la superficie del suelo siendo fácilmente transportados por la escorrentía y originando altos valores de concentración de sedimentos (Tabla 4).

Afrata, la zona más baja, fue una zona de pastoreo intensivo en el pasado pero no actualmente. Debido a sus condiciones más áridas, la producción de biomasa es mucho menor con una consecuente disminución del grado de pastoreo. En esta zona no se encontraron signos de los pequeños incendios provocados por los ganaderos para la regeneración de la vegetación.

Hemos utilizado la cantidad de microagregados estables en agua como indicadora de la condición de la estructura de los suelos, estableciéndose una correlación directa entre el contenido de arcilla y los microagregados estables en agua. A escala de ladera, se obtienen altos valores de erosión para los suelos con más bajos contenidos en arcilla y baja estabilidad de microagregados. La ladera de Afrata, con menor actividad de pastoreo presenta bajos contenidos en humedad y altos valores de arcilla y microagregación en sus suelos, así como los valores más bajos de erosión. A escala de parcela, los espacios no vegetados y los incendiados muestran mayores coeficientes de escorrentía, mayor erosión y menor microagregación estable en agua que los espacios vegetados. Las terrazas abandonadas de la zona intermedia (Laki y Rodoupos), presentan de erosión que los espacios vegetados, estos valores de las terrazas son, sin embargo, menores a los esperados y pueden ser debidos a los elevados porcentajes de arcilla y a la escasa pendiente del terreno.

En las zonas más áridas Rodoupos y Afrata, se desarrollan suelos del tipo Luvisol crómico, con altos contenidos en arcilla y alta capacidad de infiltración, elevados valores de microagregación estable en agua y como consecuencia bajos valores de erosión.

Los Regosoles eútricos desarrollados en Omalos y Laki, zonas más húmedas, con más bajos contenidos de arcilla y de capacidad de infiltración (principalmente en los espacios quemados) son suelos más erosionables, que presentan escaso porcentaje de microagregados estables en agua. En los resultados obtenidos hay que considerar la humedad del suelo en el momento del experimento, que influye sobre la capacidad de infiltración y el coeficiente de escorrentía resultante. Por ello en Rodoupos, frente a bajos valores de erosión y de concentración de sedimentos se obtienen muy altos coeficientes de escorrentía, debido a la elevada humedad en el momento del experimento de lluvia simulada.

5. Conclusión

Las diferencias en la respuesta erosiva de los suelos a lo largo del gradiente parecen ser el resultado de la acción combinada del factor uso del suelo y el factor precipitaciones. La mayor disponibilidad de humedad favorece el desarrollo de una densa vegetación, lo cual provoca un sobrepastoreo. La acción continuada del pastoreo da lugar a una compactación del suelo que unido a valores más elevados de humedad y una peor estructura del suelo proporciona mayor escorrentía y concentración de sedimentos.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por la Commission of the European Communities in the Climatology and Natural Hazards program, a través del proyecto EV5V-CT91-0023.

Referencias bibliográficas

- Boix, C., Calvo, A., Soriano, M.D. & Tiemessen, I.** (1994): Variabilidad espacio temporal de la agregación de suelos en laderas mediterráneas. En Arnáez Vadillo, J., García Ruiz, J.M., Gómez Villar, A. (eds.). *Geomorfología en España*. Tomo II. Logroño, 289-302.
- Calvo, A.** (1988): Un simulador de lluvia portátil de fácil construcción. En Sala, M. & F. Gallat, F. (eds.). *Métodos y Técnicas para la medición en el campo de procesos geomorfológicos*. Monogr. nº 1, Sociedad Española de Geomorfología. Zaragoza.
- Calvo Cases, A., Soriano Soto, M.D., Boix Fayos, C. & Tiemessen, I.** (1994): Suelos y procesos geomórficos en un gradiente climático altitudinal. (Alicante). En Arnáez Vadillo, J., García Ruiz, J.M., Gómez Villar, A. (eds.) *Geomorfología en España*. Tomo II. Logroño, 29-40
- Edwards, A. P. & Bremner, J.M.** (1967): Microaggregates in soils. *J. Soil Sci.*, 18, 65-73
- F.A.O.- U.N.E.S.C.O.** (1988): *Soil Map of the World*. 1:5.000.000. I. Revised Legend. Roma.
- Imeson, A.C. & Verstraten, J.M.** (1989): The microaggregation and erodibility of some semi-arid and mediterranean soils. *Catena*, supplement 14, 11-24.
- Imeson, A.C., Lavee, H., Calvo, A. & Cerdá, A.** (1994): The erosional response of calcareous soils along a climatological gradient in Alicante. (In press).
- Lavee, H., Imeson, A.C., Pariente, S. & Benyamini, Y.** (1991): The response of soils to simulated rainfall along a climatological gradient in an arid and semi-arid region. *Catena*, 19, 19-37.