

ASOCIACION ENTRE ACTIVIDAD DE LA FAUNA Y TUBIFICACION (*PIPING*) EN CONDICIONES CLIMATICAS Y EDAFICAS CONTRASTADAS

A. SOLÉ BENET^{(1)*}, B. ALVERA⁽²⁾, J. PUIGDEFÁBREGAS⁽¹⁾

¹Estación Experimental de Zonas Áridas, CSIC, Carretera de Sacramento s/n, 04120-La Cañada de San Urbano, Almería.

²Instituto Pirenaico de Ecología, CSIC, Jaca, Huesca.

RESUMEN. Se presentan evidencias edáficas y argumentos geomorfológicos que ayudan a determinar si la fauna actúa como agente desencadenante de procesos de tubificación o piping en ambientes contrastados. Las evidencias se basan sobre todo en la morfología-micromorfología del suelo y en sus propiedades físicas, químicas y mineralógicas. En los bordes de antiguas terrazas de cultivo abandonadas del SE peninsular se presentan claras secuencias de actividad de la mesofauna (tarántulas) y de la macrofauna (conejos y zorros) que favorecen procesos de tubificación en condiciones de inundación de las terrazas agrícolas ahora abandonadas. En cambio, en laderas del Pirineo Central cubiertas por prado alpino (*Festuca eskia*), con pendientes de hasta 30°, una densa red de túneles de unos pocos centímetros de diámetro en el límite entre los horizontes A y B tiene su origen en la considerable agregación del suelo debido al hielo-deshielo que deja una importante macroporosidad que es aprovechada tanto por el agua del deshielo como por los topillos para hacer sus galerías. En el primer caso se considera que la fauna tiene un papel desencadenante y en el segundo acentuador del proceso de tubificación o piping. Asimismo se presenta un tercer caso de piping en el desierto de Tabernas en el que la fauna no parece tener un papel relevante.

Association between soil fauna activity and piping in contrasted environments

ABSTRACT. Pedological evidences and geomorphic reasons are presented to help determining if soil fauna acts as triggering agent of piping in contrasted environments. The evidences are based on soil properties, essentially soil morphology-micromorphology, but also on soil physics, chemistry and mineralogy. In the edges near the earthen banks of old, abandoned, agricultural terraces in SE Spain, clear sequences of fauna activity (both mesofauna, e.g. tarantules, and macrofauna, e.g. rabbits and foxes) can be seen in relation with piping processes

under flooding conditions (once every 4 years in average). Pipe diameters start with a few centimetres (with an estimated sediment production below $1 \text{ t ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$) and end up with over 0.5 m pipes which usually collapse and become gully heads, causing the partial destruction of large terraces of about 1 ha (with an estimated sediment production over $100 \text{ t ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$). However, in the Central Pyrenees, in hillslopes up to 30° covered by alpine meadow (e.g. *Festuca eskia*), a dense network of pipes of a few centimetres of diameter in the boundary between A and B horizons, has its origin in a well developed soil aggregation mainly due to freeze-thaw processes. Once created, this important macroporosity is used by melting waters and by voles (genus *Pitymys*) to form pipes. Daily subsurface flow measured in one of such pipes is over 9000 L/day and the estimated sediment production at catchment scale is $0.015 \text{ t ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$. It is discussed that in the first case soil fauna has a triggering role for piping. However, in the second case piping is only enhanced by fauna activity from an already existent network of soil macropores. In a third case, within the Tabernas desert also in semiarid SE Spain, soil fauna doesn't seem to play any relevant role in piping production.

Palabras clave: semiárido, prado supraforestal, mesofauna, macrofauna, micromorfología del suelo.

Key words: semiarid, alpine meadows, macrofauna, soil micromorphology.

Enviado el 26 de septiembre de 2010

Aceptado el 28 de enero de 2011

*Correspondencia: Estación Experimental de Zonas Áridas, CSIC, Carretera de Sacramento s/n, 04120-La Cañada de San Urbano, Almería. E. mail: albert@eeza.csic.es

1. Introducción

Se conoce como *piping*, en sentido amplio, a un conjunto de procesos o subprocesos de *erosión interna* del suelo, substrato o sedimento, en general escasamente definidos, y también conocidos como *erosión subterránea*, sobre los que se conoce el resultado consistente en una red de conductos por la que ha circulado y puede circular una cantidad notable de suelo y/o sedimento. Incluso a veces se confunde con *sufusión*, mecanismo que también puede derivar en *piping* s.l.

En Ingeniería Civil y/o en Geotecnia, estos procesos preocupan especialmente por las destrucciones catastróficas que pueden causar en presas de tierra, terraplenes, túneles y cimientos de edificios. A pesar de la confusión terminológica existente (ver trabajos de Bendahmane *et al.*, 2008; Bonelli y Brivois, 2008; Hanson *et al.*, 2010, Marot *et al.*, 2006; Wan y Fell, 2002), en dicha disciplina suele hablarse en general de *erosión interna* que a su vez puede dividirse en los siguientes mecanismos, según Fell y Fry (2007): a) *sufusión interna*, que es la migración de partículas a través de la matriz del suelo; b)

sufusión externa, que es la migración de partículas en la interfase entre materiales con granulometrías distintas; c) *piping* s.s., es la erosión regresiva, de abajo arriba siguiendo macroporos de origen diverso (antiguas raíces, túneles de fauna, etc.); d) ruptura del material por grietas, fisuras, de origen gravitatorio, sísmico, etc. Otros autores como Bonelli y Brivois (2008) consideran como verdadero *piping* a estos dos últimos mecanismos, consistentes en el ensanchamiento por el agua de una porosidad preexistente.

Todos estos mecanismos y/o procesos pueden producirse de manera individual o conjunta y, dado que el resultado es casi siempre el mismo, es muy frecuente que especialistas de distintas disciplinas (geólogos, hidrogeólogos, geomorfólogos, ingenieros civiles y agrónomos) los utilicen de manera desigual o incluso los confundan, bien por falta de comunicación entre dichas disciplinas (Ibáñez, 2010) o también por falta de una terminología clara y definida. El resultado de todos estos mecanismos y/o procesos es la mayoría de veces una tubificación o *piping* s.l. en el material que no solo provoca la pérdida de grandes cantidades de suelo y/o sedimento, sino que además, cuando se ensanchan y confluyen las galerías, puede producir colapsos de grandes masas de material que suelen ser el origen de socavones de costosas consecuencias en zonas agrícolas y urbanas.

Desde siempre ha preocupado conocer la naturaleza del material en el que se produce la tubificación o *piping* y aquí también la terminología complica todavía más la comprensión exhaustiva del fenómeno. Se conoce con el nombre de *colapsables* aquellos suelos cuyas partículas constituyentes pueden moverse entre sí cuando están sometidos a una determinada presión. Se conoce con el nombre de *dispersivos* aquellos suelos en los que su principal agente estructurante, la arcilla, está saturada total o parcialmente por cationes monovalentes que favorecen la desestructuración del material a partir de cierto contenido de agua que varía según el grado de saturación en el catión monovalente y de otras características físicas, químicas y mineralógicas del material.

En el proceso de la tubificación o *piping* intervienen varios factores esenciales (Gutiérrez *et al.*, 1997; García-Ruiz *et al.*, 1997):

a) Existencia de un gradiente hidráulico entre la zona de entrada de agua y la zona de salida. Ambas zonas deben encontrarse pues a cotas topográficas distintas. Cuanto mayor es el gradiente hidráulico mayor es la frecuencia del proceso.

b) Grado de cohesión de la roca, sedimento o suelo, que debe carecer de elementos estructurantes (como la materia orgánica y la arcilla) o cementantes o tenerlos escasos o bien tener propiedades fisicoquímicas que propicien la dispersión, como un elevado contenido de Na soluble y/o adsorbido en los minerales arcillosos (en general se consideran contenidos potencialmente peligrosos aquellos superiores al 13% del complejo de saturación). O bien que en la roca existan minerales fácilmente solubles que, una vez disueltos por la acción del agua, originen una red de macroporos. En el grado de cohesión de la roca, sedimento o suelo interviene también el rango de tamaños de sus partículas minerales: cuanto más estrecho sea este rango granulométrico menos cohesivo será el material (Terzhagi, 1945) puesto que los granos del mismo tamaño pueden

rotar fácilmente por una presión externa, lo cual no ocurre cuando tienen los granos son de diferente tamaño y se traban entre sí.

c) Existencia de fisuras y/o macroporos por los que el agua pueda desplazarse con más o menos facilidad. Gutiérrez et al (1997) encuentran que el grado de fisuración del substrato es proporcional a la frecuencia del proceso.

Cualquier proceso que afecte a cualquiera de los factores esenciales anteriores, podrá desencadenar *piping*: un aumento del gradiente hidráulico (por elevación de la cota superior o rebajamiento de la cota inferior), un ensanchamiento de la red de macroporos (por la fauna, por un movimiento sísmico, por disolución de granos minerales solubles, etc), entre muchos otros. En suelos naturales y agrícolas el *piping* ha sido ampliamente citado tanto internacionalmente como en la Península Ibérica, siendo los primeros trabajos los de Jones (1981) y los de López-Bemúdez y Torcal (1986) y García-Ruiz et al. (1986) respectivamente.

En este contexto teórico es indispensable conocer con el máximo detalle todos aquellos elementos que puedan tener una relación desencadenante o acentuadora de los procesos de *piping* s.l. En este sentido, la fauna, como elemento creador o acentuador de macroporosidad en el suelo, es uno de ellos, como indican varios autores: Banerjee (1972) citado por Bryan y Jones (1997) fue el primero en demostrar el efecto de “ratas, termitas y otros insectos”; Imeson y Kwaad (1976) explican los efectos geomorfológicos de la fauna en el loess belga; Jones (1981) en una de las primeras revisiones sobre *piping* también lo cita como importante; Onda y Itakura (1997) fueron los primeros en demostrar experimentalmente como los cangrejos contribuyen decisivamente a la erosión de taludes de cauce a través del *piping* que originan; Borghi et al. (1990) dan incluso tasas de erosión causadas por la actividad de los topillos en los prados supraforestales del Pirineo Central, aunque sin hablar de su posible conexión con los procesos de *piping* de dichas laderas; también en Ingeniería Civil es conocida la actividad excavadora de varios mamíferos como causa de *piping* en presas, taludes y terraplenes (MacCook, 2004, entre otros).

Con la finalidad de contribuir a conocer el posible papel de la fauna en estos procesos, en este trabajo se aportan las características morfológicas, micromorfológicas, físicas, y químicas de los materiales de tres lugares contrastados y en base a ellas y a los diferentes grados de actividad de la fauna se discute su posible grado de intervención (desencadenante, acentuador, etc) en el *piping*.

2. Marco geográfico y geológico

Las tres áreas con *piping* objeto de este estudio se encuentran en dos zonas del SE peninsular y en una del Pirineo Central:



Figura 1. Bancales de Rambla Honda afectados por procesos de erosión originados por piping en sus muros.

a) Zona de Rambla Honda, en la vertiente S de la Sierra de Los Filabres, Almería, sobre micasquistos, descrita en Solé-Benet *et al.* (2010). Se trata de un conjunto de terrazas de cultivo abandonadas, hidrológicamente alimentadas por *boqueras*¹ de rambla, que presentan suelos y sedimentos cuaternarios procedentes de la erosión pleistocena y holocena, todavía activa, de micasquistos permotriásicos. Se trata de un sistema de terrazas en cascada, en general grandes (entre 0.2 y 0.5 ha) con muros de tierra de algo más de un metro de altura, sobre-elevados entre 10 y 30 cm respecto a la superficie del bancale y con vertedores de piedra (Fig. 1). Dada la pluviometría inferior a 300 mm, los campos solo se cultivan en aquellos años en los que el cauce principal lleva agua a consecuencia de lluvias otoñales y/o invernales copiosas, lo que ocurre en promedio cada 4 años (Domingo *et al.*, 2001). En Solé-Benet *et al.* (2010) se describen estas terrazas y se indica que la actividad excavadora (barrenadora y tuneladora) de algunos animales junto con las características del material (tabla 1) y el gradiente hidráulico, producen numerosos túneles y colapsos que, puntualmente, pueden erosionar cantidades de material superiores a varios centenares de toneladas por hectárea.

b) Zona de El Cautivo, en el conocido como “desierto de Tabernas”, en la depresión neógena de Sorbas-Tabernas, Almería, sobre margas yesíferas del Tortonense. La precipitación anual es algo superior a 200 mm y la temperatura media anual alrededor de 18°C. El *piping* de esta zona se produce en la interfase entre el substrato margoso mioceno y el suelo cuaternario suprayacente escasamente compactado (Fig. 2). La progresiva disolución del yeso por infiltración del agua de lluvia crea una red de fisuras que se van ensanchando (Cantón *et al.*, 2001a), formando una red de conductos que por colapso dan origen a cárcavas. La presencia de meso y macrofauna excavadora ha

Tabla 1. Características físicoquímicas de los suelos de Rambla Honda (RH), El Cautivo y de tres perfiles de Izas (Izas 1, Leptosol distrito; Izas 2, Regosol distrito; Izas 3, Cambisol distrito-espódico)

		AG %	AF %	LG %	LF %	Ar %	pH	CE mS/cm	CO ₃ ²⁻ %	MO %	RAS	cationes cambio (orden de abundancia)
RH	Horiz. A	24,4	51,1	9,8	10,9	3,8	7,3	0,16	1,7	1,6	-	Ca>>Mg>K>Na
	Horiz. C	50,9	36,2	3,7	6,9	2,4	7,8	0,07	0,75	0,8	-	Ca>>Mg>K>Na
Cautivo	Horiz. A	0,6	35,1	19,3	28,2	16,8	7,9	1,1	19,0	2,0	0,34	Ca>Mg>K>Na
	Horiz. C	0,4	10,8	20,5	45,2	23,1	7,5	3,1	27,4	0,5	4,4	Ca>Mg>K>Na
	Horiz. R	12,8	15,0	14,8	45,1	12,3	7,4	7,5	23,3	0,9	11,6	Ca>Mg>Na>K
Izas 1	Horiz. A	43,2	9,5	6,5	21,9	18,8	4,5	-	-	8,3	-	Al>>>Ca-Mg-Na-K
	Horiz. C	46,5	11,6	7,4	18,2	16,4	4,6	-	-	8,1	-	Al>>>Ca-Mg-Na-K
Izas 2	Horiz. A	40,2	14,6	12	23,4	9,5	5,4	-	-	1,3	-	Al>>>Ca-Mg-Na-K
	Horiz. C	44,9	14,2	9	22,1	9,8	5,6	-	-	1,0	-	Al>>>Ca-Mg-Na-K
Izas 3	Horiz. A	7,8	9,4	17	32,8	33	4,8	-	-	13,8	-	Al>>Ca>Mg-Na-K
	Horiz. C	47,8	14,9	7	17,4	13	5,1	-	-	2,0	-	Al>>Ca-Mg-Na-K

AG = arena gruesa, AF = arena fina, LG = limo grueso, LF = limo fino, Ar = arcilla, CE = conductividad eléctrica, MO = materia orgánica, RAS = relación de sodio absorbido



Figura 2. Pedimento de El Cautivo.

sido detectada si bien no se conoce su papel en la formación y/o evolución del *piping*. Aunque el *piping* no es el único proceso generador de cárcavas en la zona, su presencia en el paisaje es importante sobre todo en la cercanía de los canales de drenaje principales y muy puntualmente las tasas de erosión por *piping* alcanzan valores notables.

c) Cuenca de Izas, en el alto Pirineo de Huesca, entre 2060 y 2280 m de altitud, en la cabecera del río Escarra (tributario del Gállego por su margen derecha). Situada sobre la zona axial de los Pirineos, sobre pelitas esquistosas, con intercalaciones de areniscas, pizarras, areniscas micáceas y pelitas arenosas del Carbonífero. La cuenca es la cabecera de un valle glaciar, con lagos de sobreexcavación ya colmatados (Fig. 3). La precipitación anual es de unos 2000 mm, la mitad en forma de nieve y la temperatura media del aire 4°C. La gran mayoría de suelos de la zona son ácidos y su profundidad aumenta aguas abajo (Leptosoles en la cabecera y Cambisoles y Gleysoles en la parte inferior, estando las partes intermedias ocupadas por Regosoles dísticos y Cambisoles úmbricos y Cambisoles distrito-espódicos). La vegetación zonal corresponde a una estepa de alta montaña, dominando hemicriptófitos cespitosos de crecimiento amacollado en los que domina la *Festuca eskia*. Entre los horizontes A y B de los Cambisoles de las partes bajas se encuentra una red de túneles de unos pocos centímetros de diámetro que no ascienden mucho por las laderas, relacionadas con topillos del género *Pitymys*.



Figura 3. Cuenca de Izas.

3. Propiedades del suelo y presencia de fauna posiblemente relacionada con el *piping*

a) En Rambla Honda se observan fondos de rambla y terrazas adyacentes (tanto naturales como antrópicas) con suelos arenosos profundos y poco desarrollados (Puigdefábregas *et al.*, 1996; Solé-Benet *et al.*, 2010) procedentes del acarreo de la rambla y de la erosión de las laderas de micasquitos grafitosos. En este material detrítico predomina la arena fina (partículas entre 0,2 y 0,05 mm de diámetro) (Tabla 1). Tanto el suelo como el sedimento subyacente es un material fino escasamente coherente, con un contenido de arcilla no superior al 5% y un índice de plasticidad de Atterberg inferior a 5. La estabilidad de los agregados determinada tanto con el test de la gota como con el tamizado húmedo también es muy baja (Solé-Benet *et al.*, 2010). Estas características físicas explican una elevada conductividad hidráulica a saturación cercana a los 3 m día⁻¹ (Nicolau *et al.*, 1996). El contenido de materia orgánica no llega al 2% excepto bajo los arbustos en los que se forman islas de fertilidad con contenidos que pueden sobrepasar el 4%. La conductividad eléctrica es muy baja y los carbonatos son más bien escasos.

En años de cultivo, lo cual ocurre muy de vez en cuando y solo en algunas terrazas, el suelo está cubierto por cebada no muy densa sembrada por las sociedades de caza para atraer a perdices y codornices. El resto de los años el suelo está desnudo o cubierto por el terófito más común de la región, *Stipa capensis*, más o menos desarrollado según la pluviometría.

La fauna de la zona construye sus nidos y madrigueras en zonas alejadas del fondo de la rambla, tales como las terrazas naturales o antrópicas abandonadas. Las arañas de tipo tarántula (*Lycosa tarantula*) suelen hacer sus nidos de hasta 20 cm de profundidad



Figura 4. Pipes y excavaciones de conejos en un borde de bancale de Rambla Honda.

en los banales abandonados. Los conejos (*Oryctolagus cuniculus*) excavan preferentemente sus madrigueras en los taludes de las terrazas y además practican excavaciones de algunos centímetros en la superficie de los banales y preferentemente cerca de los muros de tierra de los mismos, precisamente muy cerca de donde aparecen *pipes* que conectan la superficie del bancale con la parte inferior del muro (Fig. 4). La aparición de excavaciones de conejos, sus madrigueras y su cercanía a los *pipes* hace pensar en el posible papel desencadenador de la fauna en el *piping* que se acentúa cuando las terrazas se inundan y el nivel de agua alcanza entre 10 y 30 cm de profundidad, generándose un gradiente hidráulico entre dicha cota y la base del muro, más de un metro por debajo. Sin embargo, no se tienen ni observaciones ni datos sobre los flujos de agua que circulan episódicamente por estos *pipes*.

b) En el Cautivo todos los suelos son esencialmente limosos con un rango granulométrico estrecho en el que predomina el limo fino (Tabla 1). El tamaño de sus granos minerales es esencialmente limoso y muy homogéneo, con un D_{60} entre 25 y 20 μm , un D_{10} entre 2 μm y 3,7 μm y un coeficiente de uniformidad (D_{60}/D_{10}) de 6,5 (Solé-Benet, 2009). La mayoría de los suelos de la zona son bastante someros (< 40 cm) por encontrarse en zonas con pendientes elevadas (entre 20° y > 40°), pero en los que se desarrolla *piping* son más profundos (entre 50 y 100 cm) por encontrarse en pedimentos y fondos de valle y/o en mesas (antiguos pedimentos disectados por la erosión) (Fig. 5) (Cantón *et al.*, 2003). Suelen tener un escaso grado de compactación, por lo que la infiltración en ellos es buena. Su contenido de arcilla oscila entre el 10 y el 15%, la mayoría es illita pero con un contenido de esmectita igual o superior al 3% (Cantón *et al.*, 2001a), por lo



Figura 5. Socavón o colapso por piping en El Cautivo.

que el conjunto del material no está exento de sufrir expansión al humectarse. Su contenido de C orgánico es en general inferior al 1% y su conductividad eléctrica aumenta desde las partes altas (< 5 mS/cm) hasta la rambla de Tabernas en cuyas terrazas se alcanzan valores superiores a los 15 mS/cm. Los valores de PSI y/o RAS suelen ser inferiores o iguales a 13, es decir en el límite de la dispersibilidad (Cantón *et al.*, 2003). La vegetación de los pedimentos y fondos de valle es de tipo arbustivo bajo (*Salsola ginstoides*, *Helianthemum almeriense*, *Sideritis pusilla*, *Launaea lanifera*, *Euzomodendron bourgeanum*) y también terófito (*Stipa capensis*), y a pesar de que en general es bastante dispersa, en las exposiciones N se alcanzan tasas de cobertura elevadas (Fig. 1). Las raíces de los arbustos son generadoras de una importante macroporosidad dado que pueden alcanzar más de 1 m de longitud. La macrofauna de la zona es más bien escasa y se concentra en los taludes de las terrazas naturales anexas a la rambla de Tabernas. Como mesofauna escavadora cabe citar a la tarántula (*Lycosa tarantula*) que prefiere excavar sus nidos en los suelos profundos de pedimentos disectados o no y fondos de valle. Como macrofauna se observan conejos (*Oryctolagus cuniculus*) pero en menor cantidad que en Rambla Honda y, como allí, excavan preferentemente sus madrigueras en los taludes de las terrazas más recientes, con menor grado de compactación. En esta zona tampoco se dispone ni de observaciones ni de datos de los flujos de agua que circulan episódicamente por los *pipes*.

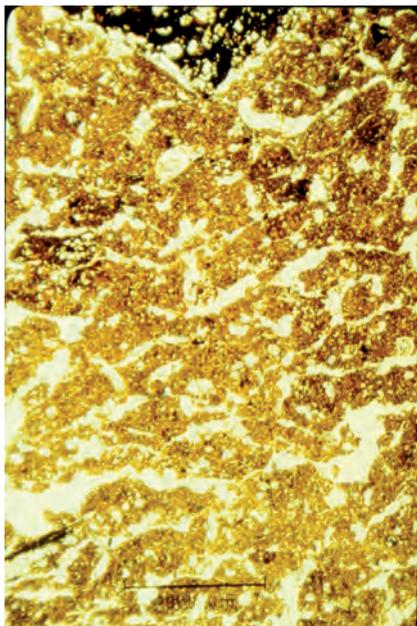


Figura 6. Microestructura representativa del un Cambisol dístico en Izas en la que se observa una considerable macroporosidad. Escala: barra negra parte inferior = 2 mm

c) En Izas, los suelos son en general francos en las partes elevadas de la cuenca, franco arcillosos en las intermedias llegando a ser arcillosos en las partes bajas y/o algunos rellanos. Todos tienen pH ácido ($5 \pm 0,5$), lo que hace que estén fuertemente desaturados, y con Al^{3+} como catión intercambiable dominante (tabla 1). Los contenidos de materia orgánica son en general elevados, oscilando entre el 1% y el 13%, lo que les confiere una buena estructura. Los procesos de hielo-deshielo contribuyen también a esta buena estructuración, como suele ser típico en los suelos de alta montaña. En la figura 6 se puede observar la elevada macroporosidad generada por este proceso típicamente periglacial. Esta elevada macroporosidad favorece tanto una elevada infiltración como el flujo subsuperficial durante el deshielo.

Las galerías de topillos pueden observarse en la época del deshielo (Fig. 7) y afectan esencialmente al horizonte superior del suelo, ya sea en el interior del mismo o en la inter-fase suelo-nieve. Sin embargo, los flujos de agua observados a la salida de dichas galerías no solo proceden del deshielo de las áreas colindantes a las galerías sino que, además, deben recoger el flujo subsuperficial de los propios macroporos del suelo presentes en toda la ladera. Se han medido flujos diarios promedio de 9216 L en un solo *pipe*. Considerando que la superficie de la pequeña cuenca es de 33 ha y que el número de *pipes* en la parte inferior de la cuenca se estima es unos 50, y asumiendo en todos ellos el mismo caudal que el medido en unos pocos, tendríamos un caudal diario de 460.800 L ó 460,8 m³.



Figura 7. Aspecto de una zona con toperas en el valle de Izas.

Borghi *et al.* (1990), en una zona cercana topográficamente algo más baja (porque en la cuenca de Izas, la actividad de los topillos era y es más escasa), midieron un gran número de toperas para saber su contribución a la erosión y encontraron tasas de erosión anuales de hasta 10 t/ha, restringidas a las zonas con una elevada concentración de toperas. Dichos autores no relacionaron la actividad de los topillos con los procesos de *piping*. Sin embargo nosotros pensamos que si tienen relación dada la morfología de los tubos y su papel canalizador del agua subsuperficial.

4. Consecuencias directas del *piping* en las tres zonas de estudio

4.1. Rambla Honda

Los volúmenes exportados en las fases iniciales del *piping*, y sin considerar la posible carga sólida del agua que se canaliza por ellos, se consideran muy bajos puesto que son tubos entre 5 y 10 cm de diámetro y de una longitud que se estima no superior a 2 m, lo que da un volumen entre 0,004 m³ y 0,016 m³. Una estima basada en el conteo del número de pipes en cinco bancales, da un promedio por hectárea de 10, por lo que las tasas de erosión aumentan un orden de magnitud, es decir entre 0,04 y 0,16 m³/ha lo



Figura 8. Pipe de grandes dimensiones en Rambla Honda.

cual da tasas de erosión siempre inferiores a 1 t/ha. Respecto al tiempo durante el que se desarrollan no tenemos datos concretos pero deben estar relacionados con la población de conejos que aumenta en años húmedos (Pettersson, 2001) los cuales tienen una frecuencia aproximada de 10 años y una duración de 2-3 años. Por ello, para conocer la tasa de erosión anual, habría que dividir los anteriores valores por 10.

Sin embargo, una vez cada 4 años en promedio (Domingo *et al.*, 2001) ocurre una avenida en la rambla que permiten el funcionamiento de las boqueras y la inundación de las terrazas. Durante este período el paso del agua por los *pipes* y dada la naturaleza tan inestable del material ocasiona el ensanchamiento de los mismos pudiéndose generar en un evento de gran magnitud (en general son aquellos asociados a lluvias superiores a los 50 mm en 24 h) *pipes* de más de 50 cm de diámetro y colapsos de varios metros (Fig. 8). En dichas condiciones, los volúmenes afectados han podido medirse y han alcanzado hasta 5 m³ o 6,5 t. Sin embargo su ocurrencia en el espacio es muy pequeña (5 *pipes* de dimensiones aproximadamente similares en todos los sistemas de terraza de Rambla Honda que cubre unas 10 ha).

En condiciones de no abandono agrícola los agricultores tapan los socavones y *pipes* provocados por la riada y el proceso puede empezar de nuevo en la próxima riada. Sin embargo, en condiciones de abandono agrícola, las siguientes riadas tienen un efecto devastador sobre esos socavones y túneles casi métricos: actúan de desagüe del bancal puesto que están a su mismo nivel (los desagües de piedra suelen encontrarse sobre-elevados respecto al nivel del propio bancal) y el socavón inicial se convierte en una cárcava cuyo ancho inicial va aumentando hasta alcanzar dimensiones enormes como las



Figura 9. Terraza destruida por colapso de pipes y acarreamiento posterior en Rambla Honda.

descritas Solé-Benet et al (2010), que alcanza ya más de 1000 metros cúbicos que se producen puntualmente en una sola terraza de menos de 1 ha (Fig. 9), por lo que erosión es muy superior a 1000 t/ha.

4.2. El Cautivo

Como en la zona de Rambla Honda, el proceso inicial produce tubos o *pipes* de escasos centímetros de diámetro y longitudes inferiores a 1 m, los volúmenes erosionados en cada punto son inferiores a 0,004 m³. Considerando una proporción espacial del proceso de unos 100 por hectárea, tendríamos una tasa de erosión solo por *piping* tampoco superior a 1 t/ha. Aquí los *pipes* se desarrollan cuando se producen eventos de escorrentía de cierta magnitud que puedan provocar una infiltración profunda y el inicio y/o desarrollo del proceso, lo cual ocurre con mayor frecuencia que en Rambla Honda, dado que aquí las áreas susceptible de *piping* se alimentan hidrológicamente de las laderas desnudas adyacentes, fuertemente productoras de escorrentía (Cantón *et al.*, 2001b). Al iniciarse el proceso en una zona relativamente profunda, justo en la interfase suelo-substrato, es más frecuente la observación de socavones y/o desplomes por colapso de galerías enterradas, que de *pipes*. A pesar de haber medido puntualmente cantidades superiores a 1 t (en una hectárea el número de dichos desplomes no sería muy superior a 10 por lo que podríamos estimar tasas de erosión de 10 t/ha) pero en general es un proceso recurrente de baja frecuencia (cada 10 años en promedio). Las observaciones de campo no permiten atribuir a la mesofauna y macrofauna el papel que tienen otros



Figura 10. Rill derivado de un pipe en la cuenca de Izas.

procesos creadores de macroporosidad: la vegetación en suelos de pedimento y las grietas de disolución en el substrato margoso.

4.3. Izas

Basándonos en las tasas de erosión proporcionadas por Borghi *et al.* (1990) en 1 ha en la que contabilizaron 1060 toperas, y que podía ser superior a $10 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ y considerando que en nuestra zona el número de toperas no sobrepasa las 50 en unas 5 ha, tendríamos una erosión anual de $0,1 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, que, referidas al conjunto de la cuenca, 33 ha, dan un valor de $0,015 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. Por otro lado, este dato tampoco es de erosión neta puesto que Borghi *et al.* (1990) indican que una parte del suelo excavado permanece in situ al ser recolonizado por la vegetación.

Independientemente del material excavado por los topillos que se acaba de mencionar, se han medido durante varios meses concentraciones promedio de sólidos en suspensión en el flujo de un solo *pipe* de $1,3 \text{ mg L}^{-1}$ lo que multiplicado por el caudal promedio total, 9216 L (ver apartado 3.c) y por 50 pipes, da una producción de sedimentos diaria de 718 g. Si asumimos que el caudal se mantiene al año entre 50 y 100 días, tendremos una tasa anual entre 36 y 72 kg de sedimentos en el conjunto de la cuenca es decir entre $0,001$ y $0,002 \text{ t ha}^{-1}$. Esta tasa es aproximadamente igual a la producida directamente por la actividad de los topillos.

Así pues tenemos dos procesos que pueden parecer independientes: por un lado las aguas que arrastran material procedente de los macroporos del suelo desde las partes altas de la cuenca y por otro el material que excavan los topillos y depositan en la superficie del suelo. Sin embargo, las galerías de los topillos recogen el agua procedente de las laderas (Fig. 10) y que circula por los macroporos del suelo por lo que ambos procesos parecen estar relacionados.

5. Discusión y conclusiones

En Rambla Honda tenemos suelos arenosos muy poco coherentes que se han formado por la acción de sucesivas riadas y que la acción humana ha transformado en terrazas de cultivo regadas episódicamente por boqueras. En condiciones de agricultura activa, las madrigueras de conejos productoras de *piping* eran tapadas por los agricultores. En condiciones de abandono agrícola los *pipes* producidos por los conejos, de no más de 10 cm de diámetro se amplían con cada riada hasta afectar una gran parte de la terraza que es destruida. Dado que se encuentran *pipes* de tamaño muy superior a los que pueden excavar los conejos, se deduce que el papel de la fauna en esta situación es sólo desencadenante del proceso.

En El Cautivo los suelos limosos de acarreo de las partes bajas de los pedimentos reciben agua frecuentemente de las laderas pero los procesos de *piping* no se manifiestan hasta que se produce un socavón o colapso después de una serie de años húmedos. El papel de la mesofauna (tarántulas) es incierto y caso de tenerlo, sería un desencadenante parcial dado que hay otros tipos de macroporos en el suelo mucho más abundantes que los nidos de tarántulas, como las raíces de arbustos y las grietas de solubilización de sales. El papel de los conejos es parecido al de Rambla Honda pero al ser su población mucho menor, su impacto es también mucho menor.

En Izas, una pequeña cuenca de alta montaña, los suelos franco arcillosos sometidos a procesos de hielo-deshielo dejan una macroporosidad considerable en el suelo que permite un importante flujo subsuperficial con arrastre de sedimentos. Además en la parte baja de la cuenca los topillos tienen una intensa actividad excavadora que remueve menos de una tonelada por hectárea aunque solo una parte del material es arrastrado fuera de la cuenca junto con el procedente de los *pipes* que recogen las aguas de fusión y las pluviales de toda la ladera. Las tasas de sedimentos exportados por las aguas de escorrentía subsuperficial son más o menos equivalentes a las tasas de remoción de suelo de los topillos. El papel de la fauna es solo acentuador del *piping* que se produciría por las propias condiciones de los suelos de la cuenca aunque no existiera dicha fauna.

La fauna del suelo es solo uno de los factores que contribuyen al *piping* y la caracterización morfológica, micromorfológica, física, química y mineralógica de los materiales edáficos y/o sedimentarios implicados es esencial para conocer el proceso y sus mecanismos y evaluar su grado y riesgo de ocurrencia.

Agradecimientos

Se agradece el apoyo financiero del Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino en el Proyecto RESEL (Red de Estaciones Experimentales de Seguimiento y Evaluación de la Erosión y Desertificación), así como al Plan Nacional de I+D en los proyectos PROBASE (ref. CGL2006-11619/HID) y PREVEA (ref. CGL2007-63258/

BOS), a la Junta de Andalucía en el proyecto COSTRAS (ref. RNM 3614) y al 6º Programa Marco de la Comisión Europea, punto 1.1.6.3, Investigación sobre Desertificación, proyecto DESIRE (contrato 037046).

Referencias bibliográficas

- BENDAHMANE, F., MAROT, D., ALEXIS, A., (2008). Experimental Parametric Study of Suffusion and Backward Erosion. *J. Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 134: 57- 67.
- BONELLI, S., BRIVOIS, O., (2008). The scaling law in the hole erosion test with a constant pressure drop. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 32: 1573–1595.
- BORGHI, C.E., (1992). *Los micromamíferos subterráneos del Pirineo Aragonés: impacto sobre la vegetación y papel bioerosivo*. Tesis doctoral inédita, Universidad Autónoma de Madrid.
- BORGHI, C.E., GIANNONI, S.M., MARTÍNEZ-RICA, J.P., (1990). Soil removed by voles of the genus *Pitymys* in the Spanish Pyrenees. *Pirineos*, 136: 3-18.
- BRYAN, R.B., JONES, J.A.A., (1997). The significance of soil piping processes: inventory and prospect. *Geomorphology*, 20: 209-218.
- CANTÓN, Y., SOLÉ-BENET, A., QUERALT, I., PINI, R., (2001a). Weathering of a gypsum calcareous mudstone under semi-arid environment at Tabernas, SE Spain: laboratory and field-based experimental approaches. *Catena*, 44: 111-132.
- CANTÓN, Y., DOMINGO, F., SOLÉ-BENET, A., PUIGDEFÁBREGAS, J., (2001b). Hydrological and erosion response of a badlands system in semiarid SE Spain. *J. Hydrol.*, 252 (1-4): 65-84.
- CANTÓN, Y., SOLÉ-BENET, A., LÁZARO, R., (2003). Soil-geomorphology relations in gypsiferous materials of the Tabernas desert (Almería, SE Spain). *Geoderma*, 115: 193-222.
- DOMINGO, F., VILLAGARCÍA, L., BOER, M. M., ALADOS-ARBOLEDAS, L., PUIGDEFÁBREGAS, J., (2001). Evaluating the long-term water balance of arid zone stream bed vegetation using evapotranspiration modelling and hillslope runoff measurements. *Journal of Hydrology*, 243: 17-30.
- FELL, R., FRY, J.J., (2007). *Internal erosion of dams and their foundations*. Taylor & Francis, London.
- GARCÍA-RUIZ, J.M., LASANTA, T., ORTIGOSA, L., ARNÁEZ, J., (1986). Pipes in cultivated soils of La Rioja: origin and evolution, *Z. Geomorphol.*, Suppl. 58: 93-100.

- GARCÍA-RUIZ, J.M., LASANTA, T., ALBERTO, F., (1997). Soil erosion by piping in irrigated fields. *Geomorphology*, 20: 269-278.
- GUTIÉRREZ, M., SANCHO, C., BENITO, G., SIRVENT, J., DESIR, G., (1997). Quantitative study of piping processes in badland areas of the Ebro basin (NE Spain). *Geomorphology*, 20: 237-253.
- HANSON, G.J., TEJRAL, R.D., HUNT, S.L., TEMPLE, D.M., (2010). Internal erosion and impact of erosion resistance. *Proceedings of the 30th U.S. Society on Dams Annual Meeting and Conference*, Sacramento, California, pp 773-784.
- IBÁÑEZ, J.J., (2010). Abismos bajo el suelo: erosión por sufusión y desastres naturales. En *Un universo invisible bajo nuestros pies*. MI+D un lugar para la ciencia y la tecnología, 5-09-2010, <http://www.madrimasd.org/blogs/universo/>
- IMESON, A. C., KWAAD, J. P. M., (1976). Some effects of burrowing animals on slope processes in the Luxembourg Ardennes. Part 2: The erosion of animal mounds by splash under the forest. *Geografiska Annaler*. 58A: 115-125.
- JONES, J.A.A., (1981). *The Nature of Soil Piping, a Review of Research*. Geobooks, Norwich, 301 pp.
- LÓPEZ-BERMÚDEZ, F., TORCAL, L., (1986). Procesos de erosión en túnel (*piping*) en cuencas sedimentarias de Murcia (España). Estudio preliminar mediante difracción de rayos X y microscopio electrónico de barrido. *Papeles de Geografía Física*, 11: 7-20.
- MAROT, D., BENDAHMANE, F., ALEXIS, A., (2006). Experiments on backward erosion and suffusion. In *EWG Internal Erosion*, Stockholm, Sept 11-12, 2006.
- MC COOK, D. K., (2004). A comprehensive discussion of piping and internal erosion failure mechanisms. *Proc. of the 2004 Annual Association of State Dam Safety Officials*, Phoenix, Arizona, USA, pp 1-6.
- NICOLAU, J.M., SOLÉ-BENET, A., PUIGDEFÁBREGAS, J. GUTIÉRREZ, L., (1996). Effects of soil and vegetation on runoff along a catena in semi-arid Spain. *Geomorphology*, 14:297-309.
- ONDA, Y, ITAKURA, N., (1997). An experimental study on the burrowing activity of river crabs on subsurface water movement and piping erosion. *Geomorphology*, 20: 279-288.
- PETTERSON, D., (2001). *The effects of the wild rabbit (Oryctolagus cuniculus) on soils and vegetation in semi-arid, south-eastern Spain*. Tesis doctoral inédita, Universidad de Leeds, Reino Unido.
- PUIGDEFÁBREGAS, J., AGUILERA, C., BRENNER, A., CLARCK, S., CUETO, M., DELGADO, L., DOMINGO, F., GUTIÉRREZ, L., INCOLL, L., LÁZARO, R., NICOLAU, J.M., SÁNCHEZ,

- G., SOLÉ, A., VIDAL, S., (1996). The Rambla Honda field site. Interactions of soil and vegetation along a catena in semi-arid SE Spain. En *Mediterranean Desertification and Land Use*, (Thornes, J., Brandt, J., Eds.) pp 137-168, John Wiley & sons, Reino Unido.
- SOLÉ BENET, A., CANTÓN, Y., LÁZARO, R., PUIGDEFÁBREGAS, J., (2009). Meteorización y erosión en el sub-desierto de Tabernas, Almería. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 35: 151-163.
- SOLÉ BENET, A., LÁZARO, R., DOMINGO, F., CANTÓN, Y., PUIGDEFÁBREGAS, J., (2010). Why most agricultural terraces in steep slopes in semiarid SE Spain remain well preserved since their abandonment 50 years ago? *Pirineos*, 165: 215-235.
- TERZAGHI, K., PECK, R.B., (1967). *Soil Mechanics in Engineering Practice*. 2nd Ed., John Wiley & sons, New York.
- WAN, C.F., FELL, R., (2002). Investigation of internal erosion and piping of soils in embankment dams by the slot erosion test and the hole erosion test-interpretative report. *UNICIV REPORT R-412*, The University of New South Wales, Sydney, Australia, 358 p.