

JULIO MUÑOZ JIMÉNEZ\*, ARTURO GARCÍA ROMERO\*\* y ROCÍO M. ALANÍS ANAYA\*\*

\* Departamento de Análisis Geográfico Regional y Geografía Física.  
Facultad de Geografía e Historia. Universidad Complutense. Madrid.

\*\* Instituto de Geografía. Universidad Nacional Autónoma de México. México D. F.

## *Colonización y sucesión vegetal en el fondo de una barranca afectada por flujos hidrovulcánicos recientes: la barranca Huiloac (vertiente NE del estratovolcán Popocatepetl, México)*

### RESUMEN

La barranca Huiloac, situada en la vertiente NE del volcán Popocatepetl (5.452 m), fue afectada en 1997 y 2001 por flujos hidrovulcánicos (lahares) que rellenaron su fondo y destruyeron la vegetación. Se presentan algunos resultados, obtenidos mediante control y monitorización, acerca de la sucesión primaria de las formaciones vegetales que han recolonizado en una década el área generada por los citados lahares.

### RÉSUMÉ

*La colonisation et la succession végétale au fond d'une gorge affectée par des flux hydrovolcaniques récentes : la gorge Huiloac (versant NE du stratovolcan Popocatepetl, Mexique).*- La gorge Huiloac, situé dans le versant NE du volcan Popocatepetl (5.452 m), a été affecté en 1997 et 2001 par des flux hydrovolcaniques (lahars) qui ont rempli son fond et ont détruit la végétation. Quelques résultats, obtenus au moyen de contrôle et monitorization, se présentent à propos de la succession primaire des formations végétales qui ont recolonisé le long d'une décennie l'aire générée par les cités lahars.

### ABSTRACT

*Colonization and plant succession at the bottom of a canyon affected by recent hydrovolcanic flows: Huiloac canyon (NE slope of Popocatepetl stratovolcano, Mexico).*- The Huiloac canyon, which is located on the NE slope of Popocatepetl Volcano (5.452 m), was crossed by hydrovolcanic flows (lahars) in 1997 and 2001. The lahars filled the bottom of the canyon and destroyed the vegetation. This work exposes the results, obtained by annual monitoring of sample areas, about the primary vegetation succession which have re-colonized the bottom of the canyon during the last decade.

### PALABRAS CLAVE/MOTS CLÉ/KEYWORDS

México, barranca Huiloac, volcán Popocatepetl, flujos hidrovulcánicos. México, gorge Huiloac, stratovolcan Popocatepetl, flux hydrovolcaniques. Mexico, Huiloac canyon, Popocatepetl stratovolcano, hydrovolcanic flows.

### I. INTRODUCCIÓN Y PRESENTACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El estratovolcán Popocatepetl (5.424 msnm), ubicado a 50 km al SE de Ciudad de México, entró el año 1994 en una nueva fase de actividad que se ha prolongado hasta el presente, la cual se caracteriza por la repetida formación y destrucción, dentro de su cráter,

de domos lávicos que obturan los conductos de salida y provocan con relativa frecuencia violentos episodios explosivos, con formación de columnas eruptivas de material piroclástico que alcanzan gran altura y caen mayoritariamente sobre la parte alta del propio edificio volcánico (Palacios, 1996b; Valdés y otros, 2002). Este material suelto y constantemente renovado, en el que predominan las partículas de tamaño medio-fino (ceni-

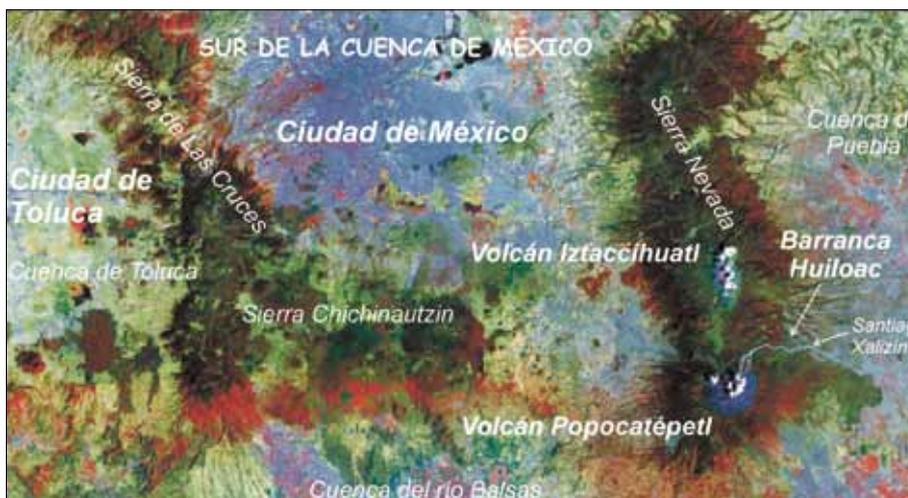


FIG. 1. Localización de la barranca Huiloac en la vertiente nororiental del volcán Popocatepetl.

zas y escorias), resulta particularmente favorable para absorber hasta la saturación los importantes aportes de agua provenientes, por un lado, de la fusión del hielo glaciar y de la nieve que se conservan en la parte alta y, por otro, de las intensas precipitaciones en forma de lluvia que también se registran (García y Muñoz, 2002). La concentración masiva de estos aportes de agua en las altas laderas del volcán coincidiendo, en unos casos, con eventos eruptivos y, en otros, con episodios meteorológicos de gran intensidad pluviométrica hace que considerables masas de material piroclástico fluyan a modo de coladas de derrubios, coladas de fango o corrientes hiperconcentradas (Pierson y Costa, 1987; Palacios y otros, 2001). Estos flujos hidrovulcánicos, a los que en geomorfología se denomina *lahares* (Thouret y Lavigne, 2000; Vallance, 2000; Capra y otros, 2004), se canalizan por los surcos torrenciales («barrancas») que inciden en las laderas y en cuyas cabezales o cuencas de alimentación se desencadena el proceso, descendiendo por ellas hasta donde lo permiten su caudal y su nivel de fluidez (Valdés y otros, 2002; Capra y otros, 2004).

En la actual fase eruptiva los principales flujos lahárlicos han descendido por la vertiente nororiental del Popocatepetl, canalizándose por tres barrancas (Tenepanco, Espinera y Tepeteloncocone), que confluyen a 3.590 m de altitud para dar origen a la barranca Huiloac. Dicha barranca tiene una longitud de 14 km y desciende con rumbo E, desde las proximidades del cráter hasta la rampa de piedemonte a 2.570 m, en el sector donde se ubican las poblaciones de Santiago Xalitintla y San Nicolás de los Ranchos (Palacios, 1996b; García y Muñoz, 2002). Este papel preferente en la dinámica

hidrovulcánica se relaciona con el hecho de que, hasta el año 1997, la cabecera de las dos primeras barrancas (por encima de los 4.800 m) estaba ocupada de forma continua por el único glaciar existente en el volcán, que entonces contaba con 0,50 km<sup>2</sup> de extensión y 100 m de espesor medio; sin embargo, en la actualidad estos hielos permanentes se sitúan por encima de los 5.000 m de altitud y se encuentran fragmentados, sumando un área de sólo 0,10 km<sup>2</sup> (Palacios, 1996a). Ello viene a significar una liberación suplementaria de agua, por fusión de hielo glaciar relicto, capaz de incrementar significativamente la frecuencia y la intensidad de la dinámica hidrovulcánica en la cuenca vertiente a la barranca Huiloac, de tal forma que en el período 1994-2010 ha sido posible la generación de tres tipos de flujos definibles como lahares: coladas de derrubios, corrientes vinculadas a oleadas piroclásticas y flujos hídricos hipersaturados (Palacios y otros, 2001; García y Muñoz, 2002).

Las coladas de derrubios, en las que más del 60 % de la masa desplazada corresponde a carga sólida heterogénea y heterométrica con predominio de partículas gruesas, se han producido al menos una decena de veces, siempre en relación con fenómenos importantes de fusión del hielo del glaciar al caer sobre él piroclastos a alta temperatura (Muñoz-Jiménez y otros, 2005). Su desplazamiento e impacto se ha circunscrito normalmente a las barrancas altas ubicadas por encima de los 3.600 msnm, dentro del ámbito colonizado por la vegetación herbácea supraforestal. Sólo en un caso, ocurrido el 30 de junio de 1997, un lahar de este tipo penetró en el canal principal de Huiloac, lo recorrió a través de todos los pisos de bosque y alcanzó la salida de éste hasta la población de Santiago Xalitintla (2.570 msnm) (Palacios y otros,



FIG 2. Columna eruptiva compuesta por piroclastos a alta temperatura que, al caer sobre el glaciar del Popocatepetl, dio lugar a la gran colada lahárica de derrubios del 30 de junio de 1997.

2001; Valdés y otros, 2002; Capra y otros, 2004; García y Muñoz, 2002).

Las corrientes vinculadas a oleadas piroclásticas, en las que también predomina la carga sólida (en este caso homogénea, homométrica y constituida por escorias de tamaño pequeño), se han producido no más de cinco veces durante el período de actividad volcánica indicado. Se trata de emisiones de piroclastos que incorporan agua de fusión y descienden a muy alta velocidad, transformándose progresivamente en flujos poco caudalosos y de elevada densidad. Destaca el caso ocurrido el 20 de enero de 2001, cuando una de estas corrientes se canalizó por el fondo de la barranca hasta los 2.800 m de altitud, sin alcanzar los pueblos del piedemonte (Valdés y otros, 2002; Capra y otros, 2004; Muñoz-Jiménez y otros, 2005; Alanís y otros, 2009).

A diferencia de los anteriores, los flujos hídricos hipersaturados o corrientes de lodo, en los que la carga sólida es mayoritariamente fina (limo, arena y arcilla) y representa entre el 20 y el 60 % de la masa movilizada, se producen varias veces todos los años y se relacionan con fusiones rápidas de la cubierta nival debidas al aumento de las temperaturas o con episodios de lluvia de gran intensidad en la parte alta del volcán. Estas aportaciones masivas de agua saturan los recubrimientos de cenizas reiteradamente acumulados en ella y dan lugar a corrientes turbulentas de lodo que, tras circular por las barrancas altas supraforestales, penetran en la barranca principal y la recorren en su totalidad, manteniendo una permanente inestabilidad geomorfológica en su fondo (Valdés



FIG. 3. Oleada piroclástica que produjo el lahar de 20 de enero de 2001.

y otros, 2002; Capra y otros, 2004; Muñoz-Jiménez y otros, 2005; Alanís y otros, 2009).

La gran colada de derrubios glaciovolcánica de junio de 1997 relleno de depósitos heterométricos el fondo de la barranca Huiloac y destruyó toda la vegetación preexistente (Muñoz-Jiménez y otros, 2005; Alanís y otros, 2009), perteneciente a las formaciones forestales que se suceden en la ladera oriental del Popocatepetl: bosques monoespecíficos de *Pinus hartwegii*, entre 3.600 y 3.400 msnm; bosques mixtos de *P. ayacahuite*, *P. montezumae* y *P. leiophylla* con *Abies religiosa* y *Alnus firmifolia*, entre 3.400 y 3.100 msnm; bosques mixtos de *P. teocote* y *P. pseustrobis* con *Quercus crassipes*, *Q. laurina*, *Q. rugosa* y *Q. lanceolata*, entre 3.100 y 2.800 msnm; y bosques de *Q. mexicana*, *Q. castanea*, *Q. laeta* y *Q. centralis* con *P. teocote*, por debajo de 2.800 msnm (Sánchez, 1984; INEGI, 1986; Rzedowski, 1988; Muñoz-Jiménez y otros, 2005).

En una franja de 15-20 m de anchura y más de 14 km de longitud toda la vegetación, incluidos los árboles, fue arrancada, rota y arrastrada, incorporándose sus restos a la carga sólida de la colada (García y Muñoz, 2002). De este modo, la barranca adquirió un fondo nuevo y diferente tanto desde el punto de vista morfológico (se hizo más ancho y plano) como geológico (pasó a desarrollarse sobre sedimentos laháricos recientes) y biogeográfico (se convirtió en un pasillo carente de vegetación, e incluso de suelo, abierto entre bosques maduros). A partir de entonces este nuevo fondo fue reiteradamente incidido por flujos hipersaturados (coladas de lodo), adquiriendo una configuración aterrazada, y debió comenzar a ser recolonizado por las plantas; pero ambos procesos se interrumpieron tres años y medio después, en enero de 2001, por el impacto del lahar derivado de flujo piroclástico antes descrito (Muñoz-Jiménez y otros, 2005; Alanís y otros, 2009).



FIG. 4. Corriente de lodo circulando por el fondo de la barranca Huiloac en enero de 2004.

Con una masa muy inferior a la de la colada de derrubios de 1997 y una carga sólida compuesta por piroclastos ligeros y de tamaño pequeño, este flujo descendió primero como una densa nube de agua caliente pulverizada con partículas en suspensión y se transformó después en una corriente líquida fangosa, que no alcanzó la salida de la barranca. Su paso no implicó la creación de formas nuevas, sino el recubrimiento de las ya existentes por una fina capa de material piroclástico medianamente compactado. Por lo que se refiere a la vegetación, este lahar destruyó por arrastre o recubrimiento la vegetación herbácea y arbustiva de la parte inferior de la barranca hasta los 2.800 m de altitud, pero no tuvo capacidad para destruir de forma masiva el estrato arbóreo, que se mantuvo en pie y con vida, aunque con un impacto apreciable en la parte inferior de los troncos, cuyas cicatrices (pérdida de corteza y recubrimiento de lodo) todavía se aprecian (Muñoz-Jiménez y otros, 2005; Alanís y otros, 2009).

Antes y después de producirse los eventos laháricos primarios vinculados con la actividad volcánica y la fusión del hielo glaciario, han circulado por el fondo de la barranca Huiloac (y lo siguen haciendo) numerosos lahares secundarios (corrientes de lodo) que no siempre tienen una conexión directa con episodios eruptivos, sino que se relacionan muy frecuentemente con fenómenos meteorológicos de fuerte intensidad (tormentas y lluvias intensas) (Muñoz-Jiménez y otros, 2005; Alanís y otros, 2009). Su consecuencia principal no es la destrucción mecánica de la vegetación, sino la reducción al mínimo de las posibilidades de colonización vegetal y de desarrollo edáfico en la parte más baja del fondo, en la que varias veces al año realizan un importante y evidente trabajo de incisión, arrastre y acumulación.



FIG. 5. Impacto de la colada lahárica de derrubios de junio de 1997 sobre las formaciones forestales de la barranca Huiloac en la vertiente nororiental del Popocatepetl.

La dinámica lahárica reciente ha dado lugar en Huiloac a la aparición de una serie de unidades geomorfológicas nuevas en las que las condiciones (de edad, composición, espesor y morfología) para el establecimiento y el desarrollo de las plantas son claramente distintas (Vargas, 1985; Halpern y otros, 1990; Cano y Meave, 1996; Harrington y otros, 1998; Moral y Grishin, 1999; Lawrence y Ripple, 2000; Moral y Jones, 2002; Muñoz-Jiménez y otros, 2005). Cada una de estas unidades constituye un contexto ambiental bien diferenciado, siendo desde los márgenes al eje central de la barranca las siguientes:

- *Rellanos aterrazados de pendiente moderada*, en los que los depósitos de la colada de derrubios de 1997 se encuentran cubiertos por un manto centimétrico de piroclastos laxamente empastados como consecuencia del paso del flujo lahárico de 2001. En ellos la colonización vegetal se ha desarrollado sin interrupción y en condiciones de relativa estabilidad a lo largo de diez años.
- *Escarpes subverticales* de 1-4 m de desnivel, modelados y reiteradamente inestabilizados por la acción de zapa de los lahares secundarios. En ellos afloran sin recubrimiento los depósitos de la colada lahárica de 1997 y la vegetación se instala con gran dificultad y continuas interrupciones.
- *Fondo de canal, plano o suavemente escalonado*, relleno por sedimentos de textura arenosa y mantenido en permanente inestabilidad por las corrientes de lodo que descienden desde el área culminante de volcán varias veces al año (incluso varias veces al mes en la estación de lluvias). En

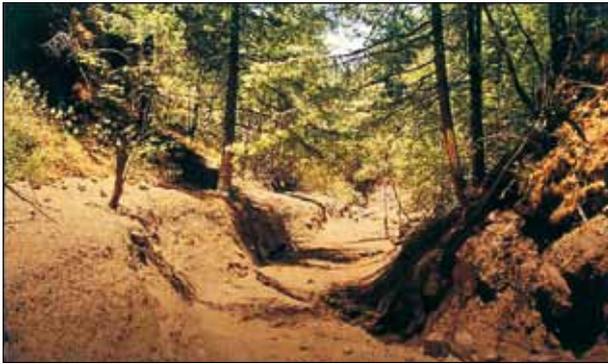


FIG. 6. Impacto de la oleada lahárica de enero de 2001 sobre la vegetación del fondo de la barranca Huiloac.

él la presencia y el mantenimiento de las plantas es difícil debido a la alta frecuencia de los flujos y a la constante renovación del material aflorante.

El fondo de la barranca Huiloac es, en consecuencia, un complejo geomorfológico recientemente creado por la dinámica hidrovulcánica y mantenido por ella en una situación de inestabilidad. Constituye, por ello, un espacio particularmente favorable para el estudio de la colonización y sucesión primaria de la cubierta vegetal en los ámbitos afectados por lahares en el Popocatepetl y, genéricamente, en los estratovolcanes tropicales activos (Lawrence y Ripple, 2000; Muñoz-Jiménez y otros, 2005).

II. OBJETO Y MÉTODO DE LA INVESTIGACIÓN

Con el objeto de controlar y analizar el proceso de colonización vegetal y apreciar sus interacciones con la actividad lahárica remanente (corrientes de lodo) se ha delimitado y cartografiado un tramo en sector central de la barranca con 0,65 km de longitud, 45 m de



FIG. 7. Configuración geomorfológica del fondo de la barranca Huiloac en el año 2002, con sus tres componentes: rellanos aterrazados de pendiente moderada, escarpes subverticales y canal de corrientes de lodo.

desnivel y 6,5° de pendiente longitudinal media. Se localiza entre los 3.200 y los 3.245 m de altitud, dentro del piso de vegetación de los bosques mixtos de pinos (*Pinus ayacahuite*, *P. montezumae* y *P. leiophylla*) con oyamel (*Abies religiosa*) y aile (*Alnus firmifolia*). Para su monitorización ha sido dividido en 28 segmentos de 20-25 m de longitud, separados por 29 perfiles transversales que se trazaron con el objeto de realizar su levantamiento topográfico y su reconocimiento geomorfológico. Utilizando éstos como referencia, se han establecido 68 parcelas de muestro para el registro de los caracteres y el desarrollo de la vegetación (Alanís y otros, 2009).

Las parcelas de muestreo tienen forma circular y 2 m de diámetro; su ubicación precisa está señalada por medio de varillas metálicas pintadas de rojo brillante y clavadas en el centro de cada parcela. El inventario efectuado en ellas comprende diversas variables que en conjunto reflejan la capacidad de recubrimiento de la vegetación colonizadora (Vitousek y otros, 1981; Uhl y Jordan, 1984; Muñoz-Jiménez y otros, 2005): el registro y recuento de las especies vegetales (riqueza), el número de individuos de cada especie (abundancia), el porcentaje de la superficie de la parcela ocupada por los órganos aéreos de los individuos de cada especie (cobertura) y la altura del tallo del individuo más alto de cada especie

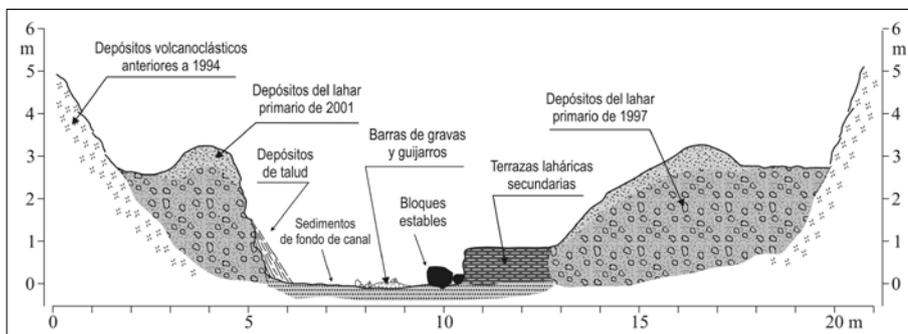


FIG. 8. Corte geomorfológico-sedimentológico, transversal al fondo de la barranca Huiloac en su sector central.

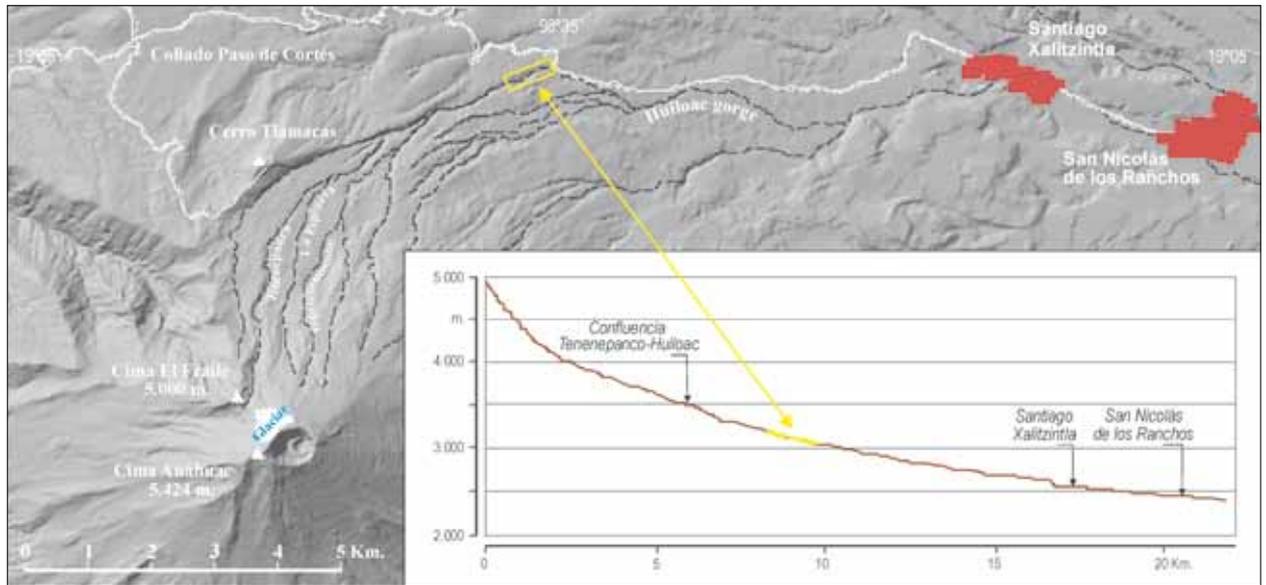


FIG. 9. Localización y perfil longitudinal del tramo monitorizado en la barranca Huiloac.

(talla máxima). Estos inventarios se han llevado a cabo sistemáticamente entre 2001 y 2010, siempre a finales de enero o comienzos de febrero, y su realización ha aportado un importante volumen de datos que ha permitido reconocer las formaciones vegetales que, tras el impacto de los lahares primarios, han ido colonizando los distintos ámbitos del fondo de la barranca.

Durante la década analizada los 29 perfiles topográficos han sido trazados en varias ocasiones para incorporar las modificaciones topográficas resultantes de la reiterada circulación de corrientes de lodo. Asimismo, se ha realizado cada dos años (2002, 2004, 2008 y 2010) una cobertura fotográfica desde tierra del tramo monito-

rizado, a partir de la cual se han marcado sobre los indicados perfiles los segmentos ocupados por los tres componentes geomorfológicos de la franja afectada (rellanos aterrizados, escarpes subverticales y fondo de canal) y por los distintos tipos de formaciones vegetales (desde plantas dispersas hasta matorrales densos) que a lo largo de la década analizada lo han ido colonizando.

El análisis de la relación entre la suma de las longitudes de los segmentos con distinto tipo de formación vegetal y la longitud total de los perfiles ha permitido obtener una valoración aproximada del porcentaje de dicha longitud total que ha ido siendo ocupada por cada uno de ellos, en las distintas fechas de análisis. De igual forma,

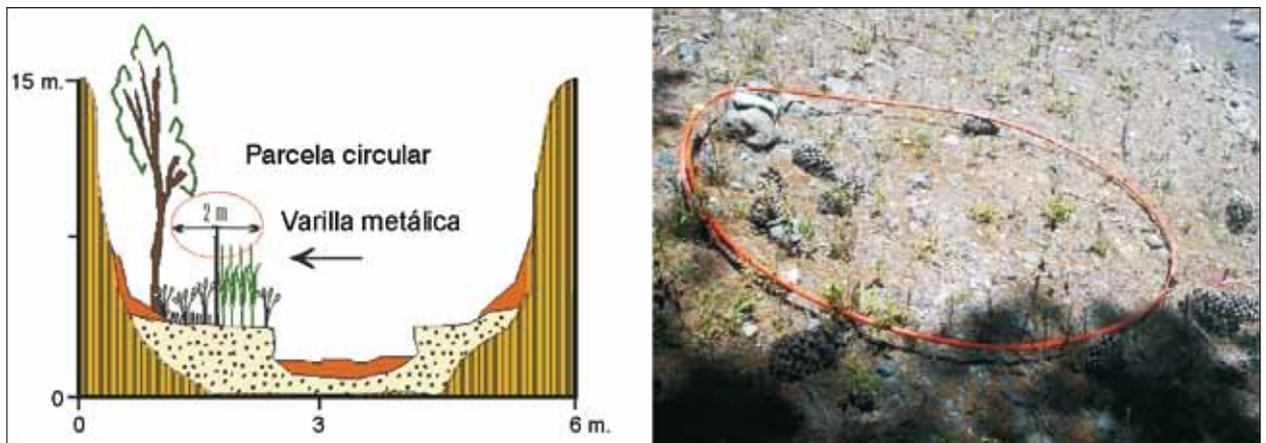


FIG. 10. Perfil tipo del fondo de la barranca Huiloac en tramo monitorizado, indicando el modo de localización y la forma de las parcelas.

CUADRO I. Evolución superficial de las unidades geomorfológicas del fondo de la barranca Huiloac a partir de las medidas realizadas sobre los perfiles

	2002	2004	2008	2010
RELLANOS	58,8 %	46,5 %	43,0 %	43,6 %
ESCARPES	25,4 %	32,5 %	35,1 %	34,2 %
FONDO CANAL	15,8 %	21,0 %	21,9 %	22,2 %

la relación entre las longitudes de los segmentos con distinto desarrollo vegetal y los correspondientes a los tres componentes geomorfológicos ha permitido apreciar el diferente ritmo y modo de progresión de la cubierta vegetal en cada uno de ellos. Se ha tenido en cuenta para ello que a lo largo de diez años de monitoreo la relación dimensional entre los rellanos, los escarpes y el fondo se ha modificado en una medida apreciable, incrementándose la extensión de los dos últimos a costa de la reducción de los primeros.

### III. RESULTADOS OBTENIDOS DE LOS INVENTARIOS ANUALES DE VEGETACIÓN EN LAS PARCELAS DE CONTROL

#### 1. COMPOSICIÓN, CARACTERES Y EVOLUCIÓN DE LA VEGETACIÓN COLONIZADORA

En el conjunto de los inventarios realizados entre 2001 y 2010 se ha registrado la presencia de 77 especies. Como se puede apreciar en el cuadro 2, la mitad de ellas (49,35 %) poseen una forma de vida fanerófita, una cuarta parte (24,68 %) son caméfitas y el resto se divide entre hemicriptófitas (11,69 %) y criptófitas (12,99 %), estando prácticamente ausentes las plantas terófitas (1,29 %). Por lo que se refiere a la forma de crecimiento, predominan con gran claridad las hierbas (70,12 %), las siguen a gran distancia los arbustos (23,37 %) y la presencia de especies arbóreas (siempre en forma de plántulas o de ejemplares de baja talla) es muy reducida (6,49 %). Desde la perspectiva del ciclo vital, la mayoría de las especies son perennes (79,73 %), aunque no faltan las anuales (20,27 %) (Alanís y otros, 2009).

En ninguno de los controles anuales llevados a cabo se ha reconocido la presencia simultánea de las 77 especies indicadas, pasando el número de éstas de 28 a 61 entre el comienzo y el final del período analizado. Los inventarios realizados en las parcelas ponen de manifiesto que la flora del nuevo fondo de la barranca tuvo desde el prin-

cipio una apreciable riqueza, la cual se ha incrementado significativamente entre 2001 y 2010; sin embargo, este incremento no ha tenido un ritmo homogéneo, sino que se ha concentrado en la primera parte de la década, manteniéndose a partir del año 2005 prácticamente estable el número de especies (entre 55 y 61). También se ha constatado un intercambio apreciable de éstas a lo largo del tiempo, aunque después del citado año tiene un volumen muy reducido. Puede decirse que, como consecuencia de un alto número de incorporaciones ocurridas en los primeros años, se constituyó un conjunto básico de entre 50 y 60 especies, que se ha mantenido (con un crecimiento muy leve) desde mediados de la década hasta el presente y ha desempeñado un papel principal en el proceso de colonización, al tiempo que la aparición y desaparición de especies se ha reducido al mínimo y prácticamente se ha equilibrado (cuadro 3).

Hay, en consecuencia, una veintena de especies que iniciaron la colonización de los lahares procedentes de la cumbre del Popocatepetl y se han mantenido en él durante todo el período analizado. Se trata fundamentalmente de *Compositae* (*Baccharis conferta*, *Bidens ostrutioides*, *B. triplinervia*, *Eupatorium glabratum*, *Gnaphalium bourgourei*, *Hieracium comatum*, *Roldana lobata*, *Senecio barba-johannis*, *S. cinerarioides*, *S. procumbens* y *Stevia salicifolia*), que representan aproximadamente la mitad del total de este grupo de plantas pioneras capaces de permanecer en un ámbito tan perturbado y difícil (Muñoz-Jiménez y otros, 2005). La otra mitad está formada por *Gramineae* (*Nassella mucronata* y *Trisetum kochianum*), *Scophulariaceae* (*Bacopa* sp. y *Castilleja arvensis*), *Rosaceae* (*Alchemilla procumbens*), *Umbelliferae* (*Eryngium monocephallum*), *Leguminosae* (*Lupinus campestris*), *Saxifragaceae* (*Ribes ciliatum*), *Polygonaceae* (*Rumex acetosella*) y *Pinaceae* (*Pinus ayacauhite*).

A este conjunto inicial se unieron en los primeros años otra treintena de especies para constituir el núcleo básico o estable de la flora a partir de mediados de la década. En ella destacan de nuevo las *Compositae* (*Conyza schiedeana*, *Eupatorium cardiophyllum*, *Gnaphalium liebmannii*, *G. oxyphilum*, *Cirsium ehrenbergi*, *Senecio callosus*, *S. parayanus*, *Silybum marianum*, *Stevia tomentosa* y *Vernonia* sp.), seguidas de las *Gramineae* (*Muhlenbergia ramulosa*, *Stipa ichu*, *Trisetum irazuense* y *Vulpia myurus*), aparecen nuevas *Pinaceae* (*Abies religiosa*) y *Scophulariaceae* (*Sibthorpia repens*) y se registra la incorporación de *Caryophyllaceae* (*Arenaria reptans* y *Stellaria nemorum*), *Geraniaceae* (*Geranium mexicanum*), *Rubiaceae* (*Hedyotis cervantessii*), *Bora-*

CUADRO II. Relación de las especies presentes en el fondo de la barranca Huiloac durante el período 2001-2010, con indicación de su forma de vida, forma de crecimiento y ciclo de vida

ESPECIE	FORMA DE VIDA	FORMA DE CRECIMIENTO	CICLO DE VIDA	ESPECIE	FORMA DE VIDA	FORMA DE CRECIMIENTO	CICLO DE VIDA
<i>Abies religiosa</i>	Fanerófito	Árbol	Perenne	<i>Muhlenbergia ramulosa</i>	Caméfito	Hierba	Perenne
<i>Alchemilla procumbens</i>	Caméfito	Hierba	Perenne	<i>Nassella mucronata</i>	Fanerófito	Hierba	Perenne
<i>Alnus firmifolia</i>	Fanerófito	Árbol	Perenne	<i>Notholaena aurea</i>	Criptófito	Hierba	Anual
<i>Arenaria lanuginosa</i>	Hemicriptófito	Hierba	Perenne	<i>Pellaea ternifolia</i>	Criptófito	Hierba	Perenne
<i>Arenaria reptans</i>	Hemicriptófito	Hierba	Perenne	<i>Penstemon gentianoides</i>	Fanerófito	Hierba	Perenne
<i>Baccharis conferta</i>	Fanerófito	Arbusto	Perenne	<i>Pinus</i> sp.	Fanerófito	Árbol	Perenne
<i>Baccharis</i> sp.	Fanerófito	Arbusto	Perenne	<i>Potentilla ranunculoides</i>	Caméfito	Hierba	Perenne
<i>Bacopa chamaedryoides</i>	Fanerófito	Hierba	Perenne	<i>Potentilla rubra</i>	Caméfito	Hierba	Perenne
<i>Bidens ostrutioides</i>	Caméfito	Hierba	Perenne	<i>Ribes ciliatum</i>	Fanerófito	Arbusto	Perenne
<i>Bidens triplinervia</i>	Caméfito	Hierba	Perenne	<i>Roldana lobata</i>	Fanerófito	Arbusto	Perenne
<i>Bidens</i> sp.	Caméfito	Hierba	Perenne	<i>Rubus schideanus</i>	Caméfito	Arbusto	Perenne
<i>Buddleia cordata</i>	Fanerófito	Arbol	Perenne	<i>Rumex acetosella</i>	Caméfito	Hierba	Perenne
<i>Castilleja arvensis</i>	Fanerófito	Hierba	Anual	<i>Salix oxylepis</i>	Fanerófito	Árbol	Perenne
<i>Cirsium ehrenbergi</i>	Fanerófito	Hierba	Perenne	<i>Sedum moranense</i>	Caméfito	Hierba	Perenne
<i>Claytonia perfoliata</i>	Criptófito	Hierba	Anual	<i>Senecio barba-johannis</i>	Fanerófito	Arbusto	Perenne
<i>Conyza schideana</i>	Terófito	Hierba	Anual	<i>Senecio callosus</i>	Fanerófito	Hierba	Perenne
<i>Dugesia mexicana</i>	Fanerófito	Hierba	Perenne	<i>Senecio cinerarioides</i>	Fanerófito	Arbusto	Perenne
<i>Echeveria secunda</i>	Caméfito	Hierba	Perenne	<i>Senecio parayanus</i>	Fanerófito	Hierba	Perenne
<i>Eryngium monocephallum</i>	Fanerófito	Hierba	Perenne	<i>Senecio prenanthoides</i>	Fanerófito	Arbusto	Perenne
<i>Eupatorium cardiophyllum</i>	Fanerófito	Arbusto	Perenne	<i>Senecio procumbens</i>	Fanerófito	Hierba	Perenne
<i>Eupatorium glabratum</i>	Fanerófito	Arbusto	Perenne	<i>Senecio reticulatus</i>	Fanerófito	Hierba	Perenne
<i>Fuchsia thymifolia</i>	Fanerófito	Arbusto	Perenne	<i>Senecio roseus</i>	Fanerófito	Hierba	Perenne
<i>Geranium mexicanum</i>	Fanerófito	Hierba	Perenne	<i>Senecio salignus</i>	Fanerófito	Hierba	Perenne
<i>Geranium potentillaefolium</i>	Fanerófito	Hierba	Perenne	<i>Sibthorpia repens</i>	Caméfito	Hierba	Anual
<i>Geranium</i> sp.	Fanerófito	Hierba	Perenne	<i>Silybum marianum</i>	Fanerófito	Hierba	Perenne
<i>Gnaphalium bourgourei</i>	Hemicriptófito	Hierba	Anual	<i>Stellaria cuspidata</i>	Hemicriptófito	Hierba	Perenne
<i>Gnaphalium leptophyllum</i>	Hemicriptófito	Hierba	Anual	<i>Stellaria nemorum</i>	Hemicriptófito	Hierba	Perenne
<i>Gnaphalium liebmannii</i>	Hemicriptófito	Hierba	Anual	<i>Stevia salicifolia</i>	Fanerófito	Hierba	Perenne
<i>Gnaphalium nuvicola</i>	Hemicriptófito	Hierba	Anual	<i>Stevia tomentosa</i>	Fanerófito	Hierba	Perenne
<i>Gnaphalium oxyphilum</i>	Hemicriptófito	Hierba	Anual	<i>Stipa ichu</i>	Fanerófito	Hierba	Perenne
<i>Gnaphalium</i> sp.	Caméfito	Hierba	Anual	<i>Trisetum irazuense</i>	Fanerófito	Hierba	Perenne
<i>Hedyotis cervantessii</i>	Fanerófito	Hierba	Perenne	<i>Trisetum kochianum</i>	Fanerófito	Hierba	Perenne
<i>Heliotropium pringlei</i>	Caméfito	Hierba	Anual	<i>Vaccinium caespitosum</i>	Fanerófito	Arbusto	Perenne
<i>Hieracium comatum</i>	Caméfito	Hierba	Perenne	<i>Vernonia</i> sp.	Fanerófito	Hierba	Anual
<i>Loeselia glutinosa</i>	Fanerófito	Arbusto	Anual	<i>Villadia batesii</i>	Fanerófito	Hierba	Perenne
<i>Loeselia mexicana</i>	Fanerófito	Arbusto	Perenne	<i>Vulpia myurus</i>	Caméfito	Hierba	Perenne
<i>Loeselia</i> sp.	Fanerófito	Arbusto	Perenne	<i>Woodwardia spinulosa</i>	Caméfito	Hierba	Anual
<i>Lupinus campestris</i>	Fanerófito	Arbusto	Anual				

ginaceae (*Heliotropium pringlei*), Salicaceae (*Salix oxylepis*), Crassulaceae (*Sedum moranense*) y Adiantaceae (*Pellaea ternifolia*).

Así, a lo largo de diez años de monitoreo el protagonismo en el proceso de colonización vegetal del área afectada por los lahares ha correspondido a especies de la familia de las compuestas, en especial a las pertenecientes a los géneros *Senecio* y *Gnaphalium*; a notable

distancia las han seguido las especies de la familia de las gramíneas, correspondientes a los géneros *Trisetum*, *Muhlenbergia*, *Stipa* y *Vulpia* y las escrofulariáceas de los géneros *Bacopa* y *Castilleja*. Ello no impide afirmar que la flora que ha intervenido en el citado proceso de colonización ha sido relativamente diversa, ya que en ella están representados 55 géneros pertenecientes a 26 familias. Esta diversificación florística parece haber alcanzado su

CUADRO III. Evolución numérica de la flora en el fondo de la barranca Huiloac durante el período 2001-2010

	2002	2004	2005	2008	2010
TOTAL ESPECIES	<b>28</b>	<b>51</b>	<b>57</b>	<b>58</b>	<b>61</b>
Especies nuevas	28	31	10	5	5
Especies iguales		20	47	53	56
Especies desaparecidas		8	8	7	6

máximo muy pronto, en el año 2004, y se ha mantenido desde entonces casi estable, aunque se aprecia una leve tendencia a la disminución del número de familias y un aumento apreciable del porcentaje de las compuestas, que al final del período se aproxima al 50% de las especies presentes en el fondo de la barranca (Alanís y otros, 2009) (cuadro 4).

Correlativamente, con el incremento del número de especies se aprecia también en los primeros años un marcado crecimiento de la riqueza florística media, que pasa de 5,5 especies/parcela en 2002 a 10,5 especies/parcela en 2005, y una estabilización posterior en valores medios de 10-11 especies/parcela.

2. LA FRECUENCIA Y EL NIVEL DE DIFUSIÓN DE LAS PLANTAS

Tomando en consideración el total de los inventarios efectuados a lo largo del período estudiado, las especies que más se han difundido sobre el fondo lahárico de la barranca son *Baccharis conferta* y *Senecio barba-johannis*, presentes en más del 60 % de dichos inventarios, seguidas por *S. callosus*, *Hieracium comatum* y *Castilleja arvensis*, cuya frecuencia supera el 50 %, y *Eupatorium glabratum*, *Bacopa* sp., *Gnaphalium bourgoureei* y *Stipa ichu*, que se encuentran en más del 40 % de los recuentos. También han alcanzado un nivel de difusión apreciable *S. procumbens*, *Ribes ciliatum*, *Roldana lobata* y *Alchemilla procumbens*, que aparecen en algo más de un tercio de los inventarios. En este conjunto de plantas de presencia más frecuente destacan de nuevo las compuestas (de los géneros *Baccharis*, *Senecio*, *Hieracium*, *Gnaphalium* y *Roldana*), acompañadas en este caso por alguna escrofulariácea (*Castilleja* y *Bacopa*), gramínea (*Stipa*), saxifragácea (*Ribes*) y rosácea (*Alchemilla*).

Las especies citadas de la familia de las compuestas son también las más difundidas en todo el período de estudio. Sin embargo, se aprecian ciertos cambios conforme avanza la colonización vegetal: en los primeros años comparten protagonismo con ellas otras dos especies de la misma familia (*Senecio cinerarioides* y *Stevia*

CUADRO IV. Evolución del número de familias florísticas, del número de especies y del porcentaje de especies correspondientes a cada una de las familias identificadas en el fondo de la barranca Huiloac

	2002	2004	2005	2008	2010
NÚMERO TOTAL FAMILIAS	<b>10</b>	<b>22</b>	<b>20</b>	<b>20</b>	<b>18</b>
NÚMERO TOTAL ESPECIES	<b>28</b>	<b>51</b>	<b>57</b>	<b>58</b>	<b>61</b>
<i>Adiantaceae</i>		1,9 %	1,8 %	1,7 %	
<i>Apiaceae</i>				1,7 %	
<i>Betulaceae</i>			1,8 %	1,7 %	1,6 %
<i>Blechnaceae</i>		1,9 %			
<i>Boraginaceae</i>			1,8 %	1,7 %	1,6 %
<i>Caryophyllaceae</i>		5,9 %	3,5 %	5,3 %	4,8 %
<i>Compositae</i>	39,3 %	38,2 %	44,6 %	47,1 %	48,5 %
<i>Crassulaceae</i>	7,1 %	1,9 %	1,8 %	1,7 %	1,6 %
<i>Ericaceae</i>			1,8 %	1,7 %	1,6 %
<i>Geraniaceae</i>		1,9 %	1,8 %	1,7 %	3,3 %
<i>Gramineae</i>	14,2 %	7,8 %	10,5 %	10,2 %	8,0 %
<i>Leguminosae</i>	3,6 %	1,9 %	1,8 %	1,7 %	1,6 %
<i>Loganiaceae</i>		1,9 %	1,8 %		
<i>Onagraceae</i>		1,9 %	1,8 %	1,7 %	
<i>Pinaceae</i>	3,6 %	3,9 %	3,5 %	3,4 %	3,3 %
<i>Polemoniaceae</i>		3,9 %			
<i>Polygonaceae</i>	3,6 %	1,9 %	1,8 %	1,7 %	
<i>Portulacaceae</i>		1,9 %			1,6 %
<i>Pteridaceae</i>		1,9 %			1,6 %
<i>Rosaceae</i>	10,7 %	7,8 %	5,7 %	3,4 %	4,8 %
<i>Rubiaceae</i>		1,9 %	1,8 %	1,7 %	3,3 %
<i>Salicaceae</i>		1,9 %	1,8 %	1,7 %	1,6 %
<i>Saxifragaceae</i>	3,6 %	1,9 %	1,8 %	1,7 %	1,6 %
<i>Scrophulariaceae</i>	10,7 %	5,9 %	7,0 %	6,8 %	8,0 %
<i>Umbelliferae</i>	3,6 %	1,9 %	1,8 %	1,7 %	1,6 %

*salicifolia*) junto con la gramínea *Nassella mucronata*, siendo muy baja la frecuencia de las escrofulariáceas y las rosáceas; a mediados de década *Stipa ichu* pasa a ser la gramínea más difundida y adquieren un papel destacado *Castilleja arvensis* y *Ribes ciliatum*; y en los años finales se incorporan al grupo de especies más difundidas la compuesta *Senecio parayanus* y la rosácea *Alchemilla procumbens*, al tiempo que disminuye la frecuencia de *S. salicifolia* y *S. cinerarioides*.

No puede hablarse, en consecuencia, de una sustitución en el grupo de 10-15 especies de cuya difusión ha dependido de forma prioritaria la ocupación de los depósitos laháricos recientes, aunque hayan existido variaciones en lo relativo a las plantas acompañantes (algunas de las cuales son indicadores de ambientes o etapas seriales).

CUADRO V. Evolución de la talla (en cm) de las plantas en el fondo de la barranca Huiloac

	2002	2004	2005	2008	2010
Talla media de los individuos más altos de cada especie	18	20	22	31	37
Talla media de los individuos más altos de cada parcela	23	55	63	99	122
Talla máxima registrada en el conjunto de las parcelas	80	85	117	177	185
	( <i>Cirsium ehrenbergi</i> )	( <i>Eupatorium glabratum</i> )	( <i>Baccharis conferta</i> )	( <i>Roldana lobata</i> )	( <i>Senecio barba-johannis</i> )

### 3. LA ABUNDANCIA Y LA DENSIDAD DE POBLACIÓN DE LAS ESPECIES VEGETALES

En el conjunto de las parcelas de control, que se considera representativa del tramo monitorizado en el fondo de la barranca, se aprecia un claro incremento del número de plantas en el período 2001-2010. Esta abundancia total creció de forma apreciable y sostenida en los siete primeros años de dicho período, al pasar de 53,0 a 112,8 individuos/parcela entre 2002 y 2007; sin embargo, en los tres últimos años el número total de plantas se redujo ligeramente, al obtenerse una densidad de 91,7 individuos/parcela en 2010. Como se verá más adelante, dicho incremento de la densidad de plantas no ha tenido un ritmo espacialmente homogéneo, ya que fue muy bajo en el canal afectado por los flujos de lodo, moderado en los escarpes inestables que lo enmarcan y francamente alto en los rellanos aterrazados modelados por la oleada lahárica del año 2001 (Muñoz-Jiménez y otros, 2005).

Tomando en consideración el conjunto de los inventarios realizados en la década, las especies que cuentan con una mayor abundancia promedio por parcela son, de nuevo, cuatro compuestas: *Eupatorium glabratum*, *Senecio barba-johannis*, *Baccharis conferta* y *S. callosus*, que cuentan con 5-10 individuos/parcela. Las siguen otras dos compuestas (*Hieracium comatum* y *S. procumbens*) y una escrofulariácea (*Bacopa* sp.), con abundancias promedio de 3-5 individuos/parcela.

Desde este punto de vista, se aprecian algunas modificaciones significativas conforme avanza el proceso de colonización vegetal. Al comienzo, las que alcanzan una mayor abundancia promedio son *Senecio procumbens*, *Bacopa* sp. y *Hieracium comatum*; en los años centrales estas especies pioneras pierden relevancia al tiempo que el mayor nivel de abundancia pasa a *Eupatorium glabratum*, *Senecio barba-johannis*, *Alchemilla procumbens*, *Salix oxylepis* y *Nassella mucronata*; y al final del período se consolida la primacía de las tres primeras, siendo sustituidas la otras dos por *Senecio callosus* y *Trisetum*

*irazuense*. Se aprecia, por lo tanto, que las compuestas desempeñan un papel protagonista claro y persistente en la instalación de la vegetación sobre los depósitos aportados por los lahares. Ello no impide que se vaya produciendo una sustitución de especies y que sean acompañadas sucesivamente por diversas plantas de las familias de las escrofulariáceas, las rosáceas y las gramíneas.

### 4. LA COBERTURA Y LA PARTICIPACIÓN DE LAS ESPECIES VEGETALES EN LA OCUPACIÓN DEL SUELO

En el año 2010 la vegetación cubre (de forma apreciable mediante fotografía desde tierra) las dos terceras partes del fondo de la barranca Huiloac creado en 2001 por el último lahar primario y, de acuerdo con los inventarios realizados, queda bajo los órganos aéreos de las plantas casi el 60 % de la superficie de las parcelas. Ello es resultado de un proceso de ocupación muy rápido en la primera mitad de la década (la cobertura vegetal se aproximaba en 2005 al 30 %) y progresivamente ralentizado después (50 % en 2008 y próxima al 60 % en el último año del período). En este proceso han tenido una diferente participación las especies que han sido capaces de instalarse y difundirse en un ámbito tan intensamente perturbado. Si se considera el porcentaje de la superficie de las parcelas cubierto por los órganos aéreos de las plantas dentro en el conjunto del período analizado, se observa que *Eupatorium glabratum*, *Senecio barba-johannis* y *Baccharis conferta*, destacadas ya por su frecuencia y su abundancia, son las especies que cuentan con las mayores tasas de cobertura promedio. También son relevantes otra compuesta (*Senecio procumbens*), una gramínea (*Stipa ichu*) y una rosácea (*Alchemilla procumbens*).

En el primer tercio de la década las especies con más capacidad para cubrir el suelo son *Alchemilla procumbens*, *Baccharis conferta* y *Senecio procumbens*. En el segundo pasan a primer plano *Senecio barba-johannis*,

CUADRO VI. Evolución de la talla máxima media de las siete especies que combinan altos niveles de frecuencia, abundancia y cobertura, así como de cuatro especies que en su madurez alcanzan porte arbóreo

	2002	2004	2005	2008	2010
<i>Eupatorium glabratum</i>	26	28	45	87	104
<i>Senecio barba-johannis</i>	10	11	31	55	56
<i>Roldana lobata</i>	3	16	22	46	64
<i>Baccharis conferta</i>	17	24	25	34	37
<i>Senecio callosus</i>	-	11	15	32	37
<i>Castilleja arvensis</i>	18	24	28	40	42
<i>Stipa ichu</i>	-	7	25	29	22
<i>Abies religiosa</i>	-	5	21	22	33
<i>Alnus firmifolia</i>	-	-	6	66	88
<i>Pinus ayacahuite</i>	1	8	8	20	26
<i>Ribes ciliatum</i>	3	11	12	25	38

*Stipa ichu* y *Eupatorium glabratum*. Y en los años finales esta última planta destaca con claridad sobre las otras dos, alcanzando tasas de cobertura medias por encima del 15 %, al tiempo que *B. conferta* y *A. procumbens* recuperan protagonismo.

##### 5. LA TALLA MÁXIMA Y EL RITMO DE CRECIMIENTO DE LAS PLANTAS

En los inventarios anuales se ha medido la talla máxima, es decir, la del individuo más alto de cada una de las especies por parcela. De acuerdo con los datos obtenidos en 2010, después de una década de colonización la talla máxima promedio alcanzada por el conjunto de las especies en el fondo de la barranca es de 37 cm; el promedio de la talla de la planta más alta reconocida en cada parcela (sea cual sea la especie) es de 122 cm; y el ejemplar más alto encontrado en el conjunto de la superficie monitorizada es de la especie *Senecio barba-johannis* con 185 cm. Este nivel de desarrollo vertical de los órganos aéreos de la vegetación representa el estado más reciente de un proceso de crecimiento que se inicia en el año 2002 con una media de las tallas máximas/especie de 18 cm, una media de las tallas máximas/parcela de 23 cm y una talla máxima absoluta de 80 cm, que corresponde entonces a un ejemplar de *Cirsium ehrenbergi*. Este proceso, sostenido y bastante regular, registra una disminución de ritmo en los últimos años y es de destacar que siempre la mayor talla registrada ha correspondido a una compuesta.

Puede decirse que la instalación de las plantas sobre los depósitos laháricos generó inicialmente una cubierta vegetal herbácea relativamente laxa, la cual se ha ido

transformando en un matorral cada vez más denso y alto. En ello han participado de forma cada vez más marcada las mismas especies que ya han destacado por su frecuencia, su abundancia y su capacidad de cobertura. Los arbustos perennes de la familia de las compuestas *Eupatorium glabratum*, *Senecio barba-johannis* y *Baccharis conferta*, junto con la hierba erecta anual de la familia de las escrofulariáceas *Castilleja arvensis*, determinan en la actualidad el porte de la cubierta vegetal. Y lo han hecho prácticamente desde el comienzo de la colonización del fondo de la barranca, con la colaboración de otras hierbas erectas (*Cirsium ehrenbergi*, *Conyza schiedeana* y *Pentstemon gentianoides*) en la primera fase de la misma, y de otros arbustos (*Roldana lobata* y *Senecio callosus*), de alguna gramínea (*Stipa ichu*) e incluso de especies capaces de alcanzar tamaño arbóreo (*Abies religiosa*, *Alnus firmifolia*, *Pinus ayacahuite* y *Ribes ciliatum*), en los últimos años.

De acuerdo con lo que se indica en los repertorios florísticos, las especies arbustivas más relevantes están próximas a conseguir su talla máxima normal y lo mismo ocurre con gran parte de las herbáceas más frecuentes. Ello lleva a pensar que a partir de 2010 los individuos de las especies arbóreas han de desempeñar un papel cada vez más decisivo en el desarrollo de la vegetación en el fondo de la barranca Huiloac, dentro del que las formaciones de matorral arbolado habrán de tener una extensión creciente.

##### 6. LA VARIABILIDAD DE LOS PARÁMETROS FLORÍSTICOS, ESTRUCTURALES Y EVOLUTIVOS DE LA VEGETACIÓN EN LAS UNIDADES GEOMORFOLÓGICAS DEL FONDO DE LA BARRANCA

La dinámica lahárica reciente ha generado nuevas unidades geomorfológicas en el fondo de la barranca Huiloac, cada una de las cuales constituye un contexto ambiental bien diferenciado para la colonización vegetal (Vargas, 1985; Halpern y otros, 1990; Cano y Meave, 1996; Harrington y otros, 1998; Moral y Grishin, 1999; Lawrence y Ripple, 2000; Moral y Jones, 2002), incluyendo: los rellanos aterrazados de pendiente moderada, tapizados por el recubrimiento centimétrico de piroclastos depositados por el flujo de 2001; los escarpes subverticales modelados en los depósitos de la colada de 1997 por la acción de zapa de los lahares secundarios; y el fondo de canal, plano o suavemente escalonado, mantenido en permanente inestabilidad por las corrientes de lodo y relleno por los sedimentos de textura arenosa aportadas por ellas (Muñoz-Jiménez y otros, 2005; Alanís y otros, 2009). En



FIG. 11. Fotografías del recubrimiento vegetal de un tramo del fondo de la barranca Huiloac en 2002 (izquierda) y en 2007 (derecha), en las que se aprecia la diferente cobertura, riqueza y composición de la vegetación en cada uno de los tres ambientes (rellanos, escarpes y canal).

los primeros la colonización vegetal se ha desarrollado sin interrupción y en condiciones de relativa estabilidad a lo largo de los diez años, mientras que en los segundos y el tercero la instalación y el mantenimiento de las plantas han sido notablemente difíciles.

El 80 % de las parcelas se localiza en los rellanos aterrazados, que representan la mitad de la superficie creada por la actividad hidrovulcánica reciente (entre el 59 % y 43 % de la superficie al inicio y final de la década estudiada, respectivamente). Ello se debe a la mayor estabilidad geomorfológica, diversidad ambiental e idoneidad para el análisis evolutivo que se registra en estas unidades, en las que los recintos monitorizados pueden identificarse con facilidad y ser objeto de inventario un año tras otro. Por el contrario, en los márgenes escarpados y el fondo del canal los frecuentes lahares secundarios y la inestabilidad hacen difícil y en cierto modo innecesaria la permanencia plurianual de un alto número de parcelas; de ahí que sólo el 12 % de ellas se haya instalado en los escalones escarpados (entre el 35 % y 24 % del fondo de la barranca) y el 8 % en el canal de los flujos de lodo (entre el 16 % y el 22 % de dicho fondo).

La comparación de los resultados obtenidos entre estos tres grupos de parcelas deja ver diferencias importantes en el comportamiento de los parámetros de la vegetación. La primera de ellas es la tasa de cobertura total, que siempre ha tenido un valor más alto en los rellanos, donde creció muy deprisa hasta alcanzar a mediados de década el 90 % y progresó después lentamente hasta acercarse al 100 % de la superficie. En el otro extremo, el fondo del canal siempre ha mantenido un recubrimiento vegetal muy escaso, con crecimiento sostenido pero que sólo ha podido pasar del 2,4 % en 2002 al 12,8 % en 2007. Por su parte, los escarpes que enmarcan este fondo de canal, donde en los primeros años apenas existía una cubierta

vegetal apreciable (1,9 %), registraron un fuerte crecimiento hasta 2007-2008 y una posterior estabilización, con una tasa de cobertura actual algo superior al 60 %.

También la riqueza, la composición y la evolución de la vegetación son significativamente distintas en los tres ámbitos. Mientras en el conjunto de las parcelas de los rellanos aterrazados se han registrado a lo largo de la década 67 especies (87 % del total de las identificadas), en las situadas en los escarpes se han encontrado 33 (43 % del total) y en las establecidas en el fondo del canal sólo 21 (27 % del total). Es de destacar que a partir de 2004, al tiempo que el valor de la riqueza florística en la primera de estas unidades ha ido creciendo regularmente, en las dos últimas se ha mantenido significativamente estable, y en cada una de ellas se ha reconocido la persistencia de algunas especies que, por su ausencia o escasa presencia en las otras, pueden considerarse indicadoras de sus respectivos ambientes: se trata de *Cirsium ehrenbergi*, *Eryngium monocephallum* y *Alchemilla procumbens*, características de los márgenes escarpados creados por lahares secundarios en los depósitos de la colada de derrubios de 1997; y de *Lupinus campestris* y *Senecio cinerarioides*, características de los depósitos arenolimosos del fondo de canal, por donde dichos lahares secundarios circulan de forma esporádica.

#### IV. EVOLUCIÓN DE LAS FORMACIONES VEGETALES QUE OCUPAN LOS PERFILES TOPOGRÁFICOS TRANSVERSALES TRAZADOS EN EL FONDO DE LA BARRANCA

Como se señaló al comienzo, todos los años se ha efectuado una cobertura fotográfica completa desde tierra del tramo monitorizado y, a partir de ella, se han marcado

CUADRO VII. Evolución de la tasa de cobertura (en porcentaje) en las tres unidades geomorfológicas del fondo de la barranca Huiloac

	2002	2004	2008	2010
RELLANOS	38,7	88,5	91,2	97,8
ESCARPES	1,9	20,3	59,4	62,5
FONDO CANAL DE FLUJOS DE LODO	2,4	9,8	13,1	12,8

sobre los perfiles topográficos (sistemáticamente actualizados) los segmentos ocupados por los distintos tipos de formaciones vegetales que a lo largo de la década lo han ido colonizando. Estas formaciones visualmente identificables, tanto sobre el terreno como en las fotografías, han ocupado tras el impacto del último lahar primario en el año 2001 unas áreas más o menos extensas del fondo de la barranca Huiloac y lo han hecho de forma diferente en cada una de las unidades geomorfológicas que la constituyen (rellanos aterrazados, escarpes subverticales y fondo de canal). Para su análisis evolutivo se han seleccionado cuatro cortes temporales, correspondientes a los años 2002, 2004, 2008 y 2010.

#### 1. LA VEGETACIÓN DEL FONDO DE LA BARRANCA EN EL AÑO 2002

Un año después del paso de la oleada lahárica que destruyó la cubierta vegetal previa y recubrió de piroclastos cementados el fondo de Huiloac, tanto el canal de las corrientes de lodo como sus márgenes escarpados aparecen aún prácticamente descubiertos y sólo en algunos rellanos aterrazados se encuentran plántulas muy dispersas de *Senecio* y *Gnaphalium* con alguna gramínea (*Trisetum* y *Nasella*). Dichas plantas estaban ausentes en el 76,4 % de la superficie, y sólo eran reconocibles con muy escasas talla y densidad en el 23,6 % restante, perteneciente de forma casi exclusiva a los rellanos más estabilizados. En éstos, no obstante, la superficie cubierta por las plántulas no pasaba del 38,7 %.

#### 2. LA VEGETACIÓN DEL FONDO DE LA BARRANCA EN EL AÑO 2004

En 2004, al concluir la fase inicial del proceso de colonización, los rellanos recubiertos por los aportes del lahar de 2001 aparecen ocupados de forma generalizada (88,5 %) por una formación herbácea abierta y de muy baja talla, dominada por las compuestas de los géneros *Senecio*, *Gnaphalium* y *Hieracium* y diversas gramíneas. En

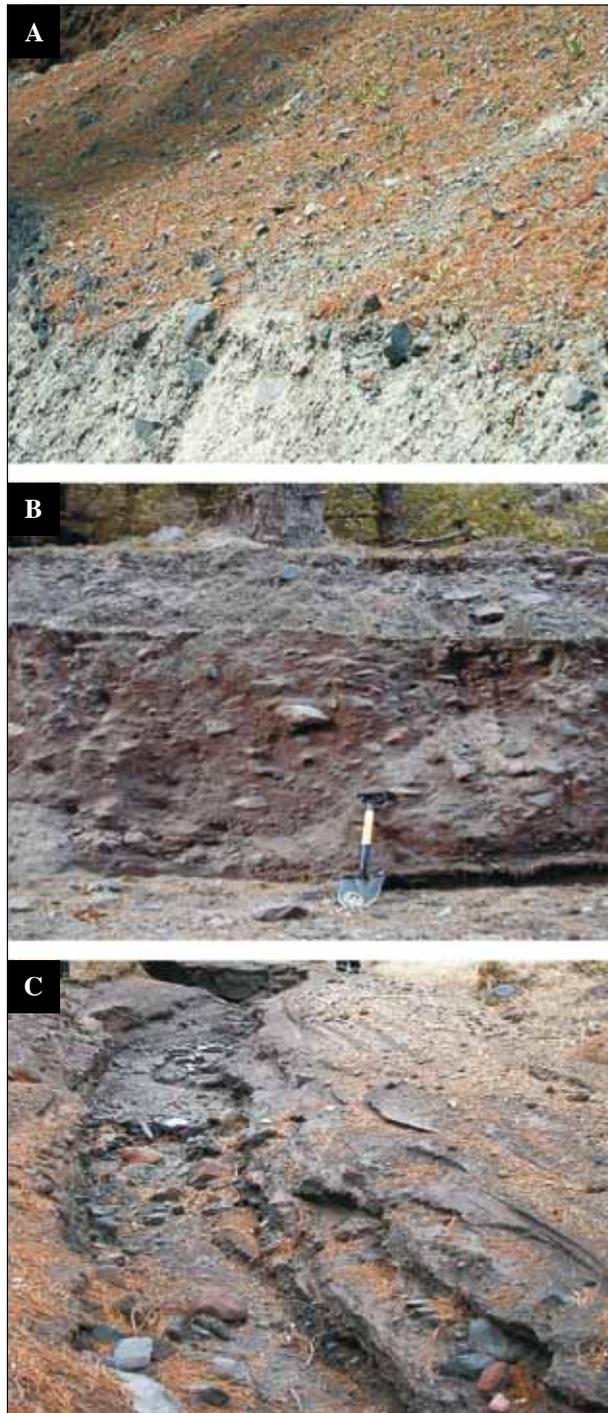


FIG. 12a. Año 2002. Formación muy dispersa de plántulas de *Senecio* y *Gnaphalium* en rellano aterrazado.

FIG. 12b. Año 2002. Escarpe de margen de canal carente de vegetación.

FIG. 12c. Año 2002. Fondo del canal de corrientes de lodo carente de vegetación.

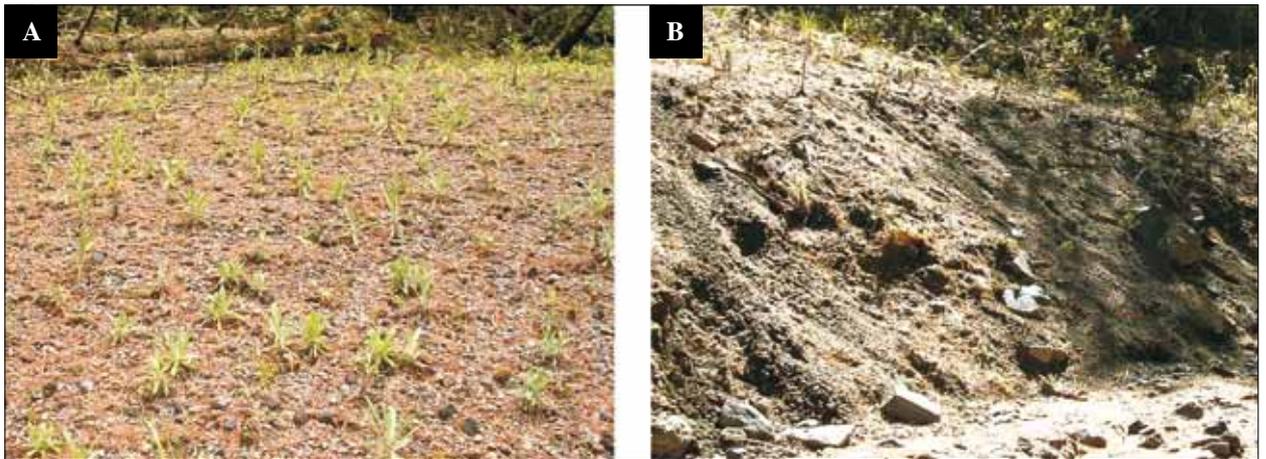


FIG. 13a. Año 2004. Formación herbácea muy abierta de *Senecio* y *Gnaphalium* en rellano aterrazado.

FIG. 13b. Año 2004. Formación muy dispersa de *Cirsium ehrenbergi*, *Alchemilla procumbens* y *Senecio cinerarioides* en un tramo de escarpe no afectado recientemente por la acción de zapa de los flujos de fango.



FIG. 13c. Año 2004. Área desprovista de vegetación correspondiente a un tramo de escarpe afectado recientemente por la acción de zapa de los flujos de fango.

FIG. 13d. Año 2004. Grupo de ejemplares de *Lupinus campestris* en terracilla dentro del fondo del canal de flujos de fango.

los escarpes predominan las áreas desprovistas de vegetación, pero en los sectores menos afectados por la acción de zapa basal de los flujos de fango (20,3 % de estos ámbitos) aparecen ejemplares muy dispersos de *Eryngium monocephallum*, *Cirsium ehrenbergi*, *Alchemilla procumbens* y *Senecio cinerarioides*. Igualmente, en el fondo del canal se reconocen algunos ejemplares o grupos de *Lupinus campestris* establecidos en pequeñas terracillas modeladas por los lahares secundarios y cuya tasa de cobertura total sólo llega al 9,8 % de la superficie de dicho canal.

Aunque muy abiertas, de talla reducida y desigualmente repartidas, las formaciones vegetales se extienden prácticamente por la mitad (el 49,8 %) de la superficie creada sólo tres años antes por los lahares primarios.

### 3. LA VEGETACIÓN DEL FONDO DE LA BARRANCA EN EL AÑO 2008

La cobertura fotográfica desde tierra realizada en 2008, transcurridos más de dos tercios del período analizado, muestra un desarrollo vegetal muy diferente en el fondo lahárico de la barranca, sobre todo desde el punto de vista de la densidad y la talla. Aunque el incremento de la cobertura es significativo tanto en el conjunto (que alcanza el 62,9 %) como en los tres ambientes (91,2 % en los rellanos; 59,4 % en los escarpes y 13,1 % en el canal de corrientes de lodo), lo decisivo es el predominio de las formaciones arbustivas moderadamente densas y altas, que colonizan el 34,0 % de la superficie total

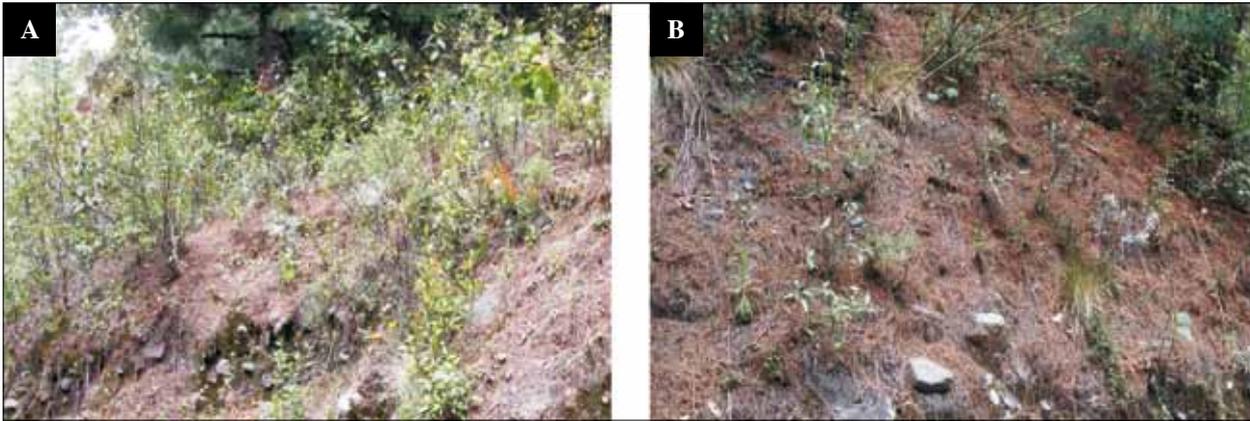


FIG. 14a. Año 2008. Matorral moderadamente denso y alto de *Eupatorium glabratum*, *Senecio barba-johannis* y *Roldana lobata* con *Castilleja arvensis* y gramíneas en rellano aterrazado.

FIG. 14b. Año 2008. Formación de matorral abierto de *Senecio cinerarioides*, *Alchemilla procumbens* y *Stipa ichu* en escarpe marginal estabilizado.



FIG. 14c. Año 2008. Tramo de escarpe desnudo de vegetación como consecuencia de la acción de zapa de corrientes de lodo recientes.

FIG. 14d. Año 2008. Formación abierta de *Lupinus campestris* y *Senecio cinerarioides* en terracilla dentro del fondo del canal de corrientes de lodo.

y más del 85,0 % de la correspondiente a los rellanos recubiertos por el depósito piroclástico de 2001. Sobre estas últimas unidades, donde se registra la mayor estabilidad geomorfológica, se extiende un matorral de talla media en el que destacan fisionómicamente *Eupatorium glabratum*, *Senecio barba-johannis*, *Roldana lobata* y *Baccharis conferta*, con *Castilleja arvensis* y diversas gramíneas.

En los márgenes escarpados del canal se sigue manifestando el contraste entre los sectores inestabilizados por la acción de zapa de los flujos de fango inmediatamente anteriores a la fecha de observación, que representan menos de la mitad de la superficie, donde la vegetación no se ha podido desarrollar, y los sectores o tramos no inestabilizados recientemente por la acción de zapa de los lahares secundarios, que ya son mayoritarios y donde se encuentran formaciones abiertas de *Senecio cinera-*

*rioides*, *Cirsium ehrenbergi* y *Alchemilla procumbens* con gramíneas del género *Stipa*.

Por su parte, en el fondo del canal se consolida la diferencia entre el surco de las corrientes fangosas más recientes, que permanece desnudo de vegetación, y las terracillas heredadas de episodios laháricos acaecidos en años anteriores, donde se desarrollan formaciones abiertas de *Lupinus campestris* y *Senecio cinerarioides*.

#### 4. LA VEGETACIÓN DEL FONDO DE LA BARRANCA EN EL AÑO 2010

Tras una década de colonización, sólo interferida en el fondo y los márgenes del canal por las acciones de acumulación, incisión y zapa de las corrientes de lodo, la franja de la barranca afectada por los lahares prima-



FIG. 15a. Año 2010. Matorral alto de *Eupatorium glabratum* con *Baccharis conferta*, *Senecio barba-johannis*, *Roldana lobata*, *Castilleja arvensis* y gramíneas en rellano aterrazado orientado al N.

FIG. 15b. Año 2010. Matorral alto de *Senecio barba-johannis* y *Roldana lobata* con *Castilleja arvensis*, *Senecio cinerarioides* y gramíneas en rellano aterrazado orientado al S.

FIG. 15c. Año 2010. Sector de escarpe marginal afectado recientemente por la zapa de las corrientes de fango, en el que la vegetación está ausente.

FIG. 15d. Año 2010. Formación arbustiva abierta de *Senecio cinerarioides*, *Alchemilla procumbens* y *Baccharis conferta* en sector de escarpe marginal no afectado recientemente por la zapa de las corrientes de fango.

FIG. 15e. Año 2010. Fondo de canal lahárico de la barranca Huiloac con terracillas colonizadas por grupos poco densos de *Lupinus campestris*, *Senecio cinerarioides* y *Stipa ichu*.

rios presenta en la cobertura fotográfica desde tierra una vegetación notablemente desarrollada constituida por formaciones más numerosas y diferenciadas, con claros contrastes entre las tres unidades o ambientes que constituyen el tramo monitorizado de Huiloac.

Teniendo en cuenta la tasa de cobertura, que en conjunto alcanza el 67,1 %, resalta la diferencia entre los rellanos aterrazados, en los que el recubrimiento vegetal es prácticamente completo (97,8 %), y el fondo del canal, donde dicho recubrimiento no progresa y permanece en

CUADRO VIII. Evolución de la superficie ocupada por los tipos genéricos de cubierta vegetal (en porcentaje)

	2002	2004	2008	2010
SIN VEGETACIÓN APRECIABLE	76,4	50,2	37,1	32,9
INDIVIDUOS DISPERSOS	0,4	2,1	2,6	2,8
COBERTURAS MUY ABIERTAS	23,2	16,9	19,1	22,0
MATORRALES ABIERTOS	0,0	20,5	7,2	3,5
MATORRALES DENSOS	0,0	10,3	34,0	38,8

tasas muy bajas (12,8 %). En los escarpes marginales se aprecia también una práctica estabilización de la superficie colonizada, pero con porcentajes más altos de ocupación del suelo (62,5 %). Y desde el punto de vista de la densidad, la talla y la composición florística, las diferencias también son claras, dentro de un fuerte predominio de las formaciones arbustivas.

Las rampas y rellanos cubiertos por los depósitos del lahar de 2001 y básicamente estables con posterioridad a este episodio están colonizados en casi toda su superficie por matorrales densos y altos, dentro de los cuales se pueden diferenciar, por su composición y su fisionomía, dos tipos: de un lado, matorrales de *Eupatorium glabratum* con *Baccharis conferta*, *Senecio barba-johannis*, *Roldana lobata*, *Castilleja arvensis* y gramíneas, que se encuentran preferentemente en orientación N (ladera derecha de la barranca); y de otro, matorrales de *Senecio barba-johannis* y *Roldana lobata* con *Castilleja arvensis*, *Senecio cinerarioides* y gramíneas, mayoritariamente establecidos en orientación S (ladera izquierda de la barranca). En ambas formaciones arbustivas se detecta la presencia de pequeños ejemplares de *Abies religiosa*, *Pinus ayacahuite*, *Ribes ciliatum* y *Alnus firmifolia*, especies que en su madurez alcanzan talla arbórea y que son dominantes en los bosques que cubren las laderas del Popocatepetl y en el tramo analizado rodean el fondo lahárico de Huiloac.

Al igual que en años anteriores, en los márgenes escarpados del canal de lahares secundarios se aprecia un fuerte contraste entre los sectores recientemente afectados por las acciones de zapa basal, en los que la vegetación está ausente, y los sectores que han quedado a cubierto de dichas acciones, los cuales se encuentran ocupados por una formación arbustiva abierta de *Senecio cinerarioides*, *Alchemilla procumbens*, *Baccharis conferta* y *Castilleja arvensis*.

Finalmente, en el fondo del canal, donde la inestabilidad se ha mantenido a lo largo de la década, la situación no difiere apreciablemente de la registrada en el año anterior, ya que sólo en las terracillas respetadas por los últimos flujos de lodo se encuentran grupos muy abiertos

de *Lupinus campestris* y *Senecio cinerarioides* con gramíneas (en especial *Stipa ichu*).

## V. CONCLUSIONES

En los diez años posteriores a la fase de actividad lahárica primaria (1997-2001) la barranca Huiloac ha sido afectada por un proceso de colonización de amplitud y ritmo muy apreciables, teniendo en cuenta que dicho proceso se ha desarrollado en un ambiente de inestabilidad geomorfológica mantenida por el flujo de los lahares secundarios, aunque espacialmente limitada.

Esta colonización ha sido llevada a cabo por casi un centenar de especies, aunque lo normal es que sólo coexistan entre 30 (en los primeros años) y 60 (en los últimos). Se ha producido, por lo tanto, un intercambio de especies vegetales a lo largo del período controlado, aunque son numerosas las plantas que han pervivido durante todo él.

Las especies inventariadas y clasificadas pertenecen a un alto número de familias (26), pero por su abundancia, su nivel de cobertura del suelo y su talla destacan muy claramente tres: las compuestas, las gramíneas y las escrofulariáceas. A ellas se pueden añadir, por su significativa participación en la colonización en los sectores y las fases de mayor disturbio lahárico, las rosáceas y las leguminosas.

La colonización vegetal no ha sido homogénea, sino que ha tenido unas características y un ritmo diferentes en los tres sectores o hábitats generados por la actividad de los lahares: las rampas y rellanos recubiertos por los depósitos de clastos pumfíticos y andesíticos con matriz arenosa aportados por el lahar de 2001; los escarpes excavados por las corrientes de fango en los depósitos de gravas, arenas y arcillas aportados por el gran lahar de 1997, y los fondos de canal por donde reiteradamente circulan los lahares secundarios. En cada uno de los tres hábitats citados la colonización vegetal ha sido realizada no sólo con una intensidad y una rapidez diferentes, sino también por un *stock* florístico bastante diferenciado.

Pese a la persistencia de la actividad lahárica secundaria, las plantas han colonizado aproximadamente las tres cuartas partes de la superficie que había quedado desnuda de vegetación en febrero de 2001, pasando por las fases de individuos dispersos, formaciones herbáceas muy abiertas, matorrales de escasa densidad y talla, y matorrales altos y densos.

Sólo en las laderas y rampas recubiertas por los depósitos del lahar de 2001, no afectadas de forma directa por

las coladas de fango, la sucesión de las formaciones vegetales ha recorrido las cuatro fases indicadas. En los escarpes marginales y en el fondo de los canales por donde siguen fluyendo estas coladas no se ha pasado casi nunca de las dos primeras.

El hecho de que las principales especies hayan alcanzado la talla máxima que se les atribuye y la presencia creciente de plantas capaces de alcanzar a medio plazo porte arbóreo, junto con la práctica desaparición del glaciar que ocupaba la cabecera de la barranca Huiloac, próxima a la cumbre del Popocatepetl, y la progresiva disminución de la frecuencia de los eventos explosivos en el volcán, hacen pensar que en pocos años las formaciones arbustivas actuales darán paso a matorrales salpicados de árboles (abetos, pinos y ailes), los cuales evolucionarán a formaciones forestales análogas a las del entorno y a las que existían en el fondo de la barranca antes del impacto de la colada de derrubios lahárica el día 30 de junio de 1997.

Finalmente, todo indica que las especies y las formaciones vegetales reconocidas tienen un significado cronológico. De modo que su presencia, su nivel de desarrollo y su tasa de cobertura pueden servir para determinar el intervalo de retorno y la probabilidad de los diversos tipos de eventos laháricos y ser utilizados por la prevención de los riesgos que se relacionan con ellos.

#### AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha realizado dentro del marco de los proyectos de investigación Recursos Hídricos y Prevención de Riesgos Hidrovolcánicos en Estratovolcanes Tropicales Activos (CGL2006-01983/BTE), financiado por el Ministerio de Educación, e Impacto del Cambio Climático en las Reservas Hídricas Sólidas y Riesgos Naturales Asociados en Estratovolcanes Tropicales (CGL2009-07434), financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación. Los autores agradecen su apoyo a los componentes y colaboradores de los equipos investigadores de ambos.

#### BIBLIOGRAFÍA

- ALANÍS, R. M., A. GARCÍA-ROMERO y J. MUÑOZ (2009): «Respuesta de las interacciones vegetales a los disturbios laháricos del volcán Popocatepetl (Parque Nacional Izta-Popo)», en *VII Convención Internacional sobre Medio Ambiente y Desarrollo*. La Habana, pp. 616-628.
- CANO, Z., y J. MEAVE (1996): «Sucesión primaria en derrames volcánicos: el caso del Xitle». *Ciencias*, 41, pp. 58-68.
- CAPRA, L., M. POBLETE y R. ALVARADO (2004): «The 1997 and 2001 lahars of Popocatepetl volcano (Central Mexico): textural and sedimentological constraints on their origin and hazards». *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 131, pp. 351-369.
- GARCÍA, A., y J. MUÑOZ (2002): «La actividad lahárica reciente del volcán Popocatepetl (México) y su incidencia sobre los paisajes forestales de una barranca de su vertiente nororiental: la barranca Huiloac», en *Aportaciones geográficas en memoria del prof. L. Miguel Yetano Ruiz*. Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio, Universidad de Zaragoza, Zaragoza, pp. 267-278.
- HALPERN, C. B., P. M. FRENZEN, J. E. MEANS y J. F. FRANKLIN (1990): «Plant succession in areas of scorched and blown-down forest after the 1980 eruption of Mount St. Helens, Washington». *Journal of Vegetation Science*, 1, pp. 181-194.
- HARRINGTON, L. M. B., J. A. HARRINGTON y P. M. FRENZEN (1998): «Vegetation change in the Mount St. Helens (USA) blast zone, 1979-1992». *Geocarto International*, 13-1, pp. 75-82.
- INEGI (INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA, GEOGRAFÍA E INFORMÁTICA) (1986): *Uso del suelo y vegetación*. Carta E14-B42 (esc. 150,000), México.
- LAWRENCE, R. L., y W. J. RIPPLE (2000): «Fifteen years of revegetation of Mount St. Helens: a landscape scale analysis». *Ecology*, 8-10, pp. 2742-2752.
- MORAL, R. del, y S. Y. GRISHIN (1999): «Volcanic disturbances and ecosystems recovery», en L. R. Walker (ed.): *Ecosystems of disturbed ground*. Elsevier, Amsterdam (col. Ecosystems of the World, 16).
- y C. JONES (2002): «Vegetation development on pumice at Mount St. Helens, USA». *Plant Ecology*, 162, pp. 9-22.
- MUÑOZ-JIMÉNEZ, J., K. RANGEL-RÍOS y A. GARCÍA-ROMERO (2005): «Plant colonization of recent lahar deposits on Popocatepetl volcano». *Physical Geography*, 26-3, pp. 192-215.
- PALACIOS D. (1996a): «Recent geomorphologic evolution of a glaciovolcanic active stratovolcano: Popocatepetl (Mexico)». *Geomorphology*, 16, pp. 319-335.
- (1996b): «Rockslide processes at the North slope of Popocatepetl volcano». *Permafrost and Periglacial Processes*, 6-4, pp. 345-359.
- J. J. ZAMORANO y A. GÓMEZ (2001): «The impact of present lahars on the geomorphologic evolution of

- proglacial gorges. Popocatepetl (Mexico)». *Geomorphology*, 37, pp. 15-42.
- PIERSON, T. C., y J. E. COSTA (1987): «A rheologic classification of subaerial sediment-water flows», en J. E. Costa y G. F. Wieczorek (eds.): *Debris flows/avalanches: process, recognition and mitigation*. Geological Society of America Reviews in Engineering Geology, vol. 7, pp. 1-12.
- RZEDOWSKI, J. (1988): *Vegetación de México*. Limusa, México.
- SÁNCHEZ, O. (1984): *La flora del valle de México*. Herrero, México.
- THOURET, J. C., y F. LAVIGNE (2000): «Lahars: occurrence, deposits and behavior of volcano-hydrologic flows», en H. Leyrit y Ch. Montenat (eds.): *Volcanoclastic rocks. From magmas to sediments*. Gordon & Breach Science Publishers, Londres, pp. 151-174.
- UHL, C., y C. F. JORDAN (1984): «Succession and nutrient dynamics following forest cutting and burning Amazonia». *Ecology* 65, pp. 1.476-1.490.
- VALDÉS C., S. de la CRUZ, A. MARTÍNEZ, W. R. QUAAS y O. E. GUEVARA (2002): «Resumen de la actividad del volcán Popocatepetl de diciembre de 1994 a mayo 2001» en *Las cenizas volcánicas del Popocatepetl y sus efectos para la aeronavegación e infraestructura aeroportuaria*. Centro Nacional de Prevención de Desastres, México, pp. 21-41.
- VALLANCE, W. J. (2000): «Lahars», en H. Sigurdsson, B. Houghton, S. McNutt, H. Rymer y J. Stix (eds.): *Encyclopedia of volcanoes*. Academic Press, San Diego, pp. 601-616.
- VARGAS G. (1985): «La sucesión vegetal primaria en una región de vulcanismo reciente en el volcán Arenal y sus alrededores, Costa Rica». *Revista de Biología Tropical*, 33-2, pp. 171-183.
- VITOUSEK, P. M., W. A. REINERS, J. M. MELILLO, C. C. GRIER y J. R. GOSZ (1981): «Nitrogen cycling and loss following forest perturbation: the components of response», en G. W. Barret y R. Rosenberg (eds.): *Stress effects on natural ecosystems*. John Willey & Sons, Londres.

Recibido: de de 2011

Aceptado: de de 2011

