

## DESTRUCCIÓN DE TIERRAS EN EL FLANCO ORIENTAL DEL NEVADO DE TOLUCA, EL CASO DE LA CUENCA DEL ARROYO EL ZAGUAN

José Luis Palacio Prieto\*

### RESUMEN

Las modificaciones en el uso del suelo y la presencia de una capa de grosor variable compuesta de lapilli pumítico son dos de los factores más importantes que han tenido como consecuencia la degradación acelerada de tierras en el flanco oriental del volcán Nevado de Toluca, Edo. de México. El estudio geomorfológico detallado de una cuenca ubicada en dicho volcán permitió reconocer sectores inestables desde el punto de vista de producción de sedimentos, los cuales requieren de acción prioritaria para evitar azolvamientos en la desembocadura y consecuentes daños a vías de comunicación, poblados y obras de ingeniería hidráulica. Dentro de las zonas inestables destacan los barrancos de primer orden en gestación y las curvaturas externas en los meandros y sinuosidades desarrollados sobre lahares y tefras pumíticas.

### SUMMARY

Changes in landuse and the presence of an erodible lithology (pumice lapilli) are the main factors controlling the accelerated erosion in the eastern slope of the Nevado de Toluca volcano, state of Mexico. A detailed geomorphological study of a small catchment allowed the recognition of several unstable sectors along the catchment, requiring prior attention in order to avoid problems due to silting in dams, roads and towns. Among the unstable sectors, first order streams and external portions in meanders developed in pumice lahars and tephra are included.

### INTRODUCCIÓN

En el caso del centro de México, el fenómeno de destrucción de tierras es frecuente sobre materiales volcanoclasticos, destacando por su velocidad la llevada a cabo por los arroyos en sedimentos pumíticos.

La causa de la generación de arroyos es, "obviamente, resultado de la interrupción de un estado previo de casi equilibrio que se manifiesta a través de alteraciones en la cantidad de agua y sedimentos liberada en el sistema" (Graf, 1988), lo que da como resultado el encajamiento de las corrientes y la generación de terrazas a lo largo del curso.

De manera general, las hipótesis que explican estos desequilibrios han sido agrupadas en tres categorías: cambios climáticos, cambios en el uso del suelo, y ajustes internos del sistema (Graf op cit).

---

\* Investigador. Instituto de Geografía, UNAM.

La primera de estas hipótesis implica cambios en el régimen fluvial, sean incrementos o decrementos en la precipitación o, bien, variaciones en la intensidad de la misma. En cuanto a los cambios en el uso del suelo, se ha discutido ampliamente la influencia del sobrepastoreo y de la deforestación sobre la generación de escurrimiento superficial y en el subsuelo, que modifican la capacidad de retención de agua dentro del sistema de la cuenca. En el caso de ajustes internos, se refieren cambios de orden natural producto, por ejemplo, de la acumulación de sedimentos a lo largo del lecho fluvial, lo que puede originar un incremento de la pendiente; al sobrepasar cierto umbral, se presentarán ajustes más o menos bruscos, en forma de erosión acelerada.

La influencia de los cambios climáticos en las alteraciones de la tasa de erosión se han aplicado para el caso de cuencas de varios miles de kilómetros de superficie, en donde el uso del suelo, por su carácter más local, difícilmente puede explicar variaciones importantes. Por el contrario, en cuencas de unos cuantos kilómetros cuadrados, en donde sugerir cambios climáticos como causa de la variación en la cantidad de sedimentos liberados es dudoso, la influencia de los cambios de uso del suelo adquiere mayor relevancia (Graf, 1986; Hereford, 1984). No obstante, es indispensable mencionar que, en el caso del centro de México, los cambios en el uso del suelo deben ser tomados en cuenta aun en el caso de cuencas de varios cientos y miles de kilómetros cuadrados, debido a la profunda modificación de la situación original en extensas áreas.

Dadas las condiciones del centro de México, en general, y del volcán Nevado de Toluca en particular, la generación de arroyos y torrentes, asociada con la destrucción acelerada de tierras en el centro de México, se encuentra relacionada con los cambios de uso del suelo, sea deforestación, sobrepastoreo o ambos, en conjunción con otros importantes factores entre los que destaca, en este trabajo, la presencia de materiales pumíticos no consolidados.

En la cuenca del arroyo El Zaguán, considerada por los técnicos de la SARH con sede en la ciudad de Metepec, como una de las más problemáticas de todo el Nevado de Toluca, debido a su dinamismo, los problemas causados por la degradación acelerada han reclamado la participación de especialistas quienes, sin embargo, se han concretado a la construcción de diversas obras con el fin de retener azolves y evitar afectaciones en la desembocadura. Esta tarea, lejos de atacar las causas del problema (la erosión), se aboca más al tratamiento de la consecuencia (la acumulación), debido a que no considera la dinámica de la cuenca en general, lo que trae como consecuencia que los problemas sigan presentándose.

Este trabajo plantea, en función de lo anterior, los siguientes objetivos generales:

- Definir el comportamiento geomorfológico general de la cuenca del arroyo El Zaguán, determinando el papel que desempeñan los distintos factores involucrados en su dinámica y sus interrelaciones; y
- Ubicar zonas problemáticas dentro de la cuenca, con el fin de establecer áreas de acción prioritaria.

Se presentan al inicio del escrito los datos generales de la cuenca en estudio, para pasar, en segundo término, a la descripción de la información geológica recabada en campo, fundamental para el entendimiento de la dinámica de la cuenca. A

continuación se analiza la dinámica del arroyo en cuestión, para, finalmente, ubicar y caracterizar los sectores inestables en la cuenca estudiada.

#### CARACTERÍSTICAS DE LA CUENCA DEL ARROYO EL ZAGUÁN

La cuenca del arroyo El Zaguán se encuentra ubicada en el flanco oriental del volcán Nevado de Toluca; su cabecera se localiza a los 3 620 m y su desembocadura hacia los 2 700 m de altitud, en los alrededores de la planicie lacustre donde tiene su origen el río Lerma. Posee esta cuenca una forma alargada orientada E-W, siendo su longitud máxima de unos 10 km y su superficie de unos 20 km<sup>2</sup>, aproximadamente (figura 1). La pendiente media del cauce principal es de unos 5 grados.

Las poblaciones aledañas a la cuenca son San Francisco Putla, asentada sobre el cono de deyección que se desarrolla en la desembocadura, y San Miguel Balderas, al suroeste de la primera. Estos poblados se han visto afectados por la actividad del torrente, de manera directa e indirecta. La primera de estas localidades ha sido afectada directamente por la invasión de sedimentos dada su ubicación sobre el cono de deyección. Indirectamente, el torrente ha inutilizado las vías de acceso a ambas poblaciones en repetidas oportunidades, lo cual obligó a tomar medidas consistentes en la construcción de presas de mampostería y gabiones para retener sedimentos y evitar, así, el azolvamiento en zonas bajas (figura 2).

La población de estas localidades se encuentra dedicada fundamentalmente a la agricultura y a la explotación forestal, lo que es causa de la casi desaparición de los bosques en la cuenca (figura 3); se presentan algunos manchones de vegetación sobre el cerro Putla, que conforma el parteaguas de la cuenca en su sector nororiental, y sobre las laderas del barranco principal en la parte alta. Destacan en dichos manchones diferentes especies de encino (*Quercus spp*), aile (*Alnus*) y oyamel (*Abies religiosa*), reflejando la existencia de un clima templado húmedo cuyas lluvias tienden a concentrarse en el verano, como lo señalan los registros de las estaciones meteorológicas más cercanas (figuras 4 y 5). Salvo estas reducidas áreas forestadas, los suelos desarrollados sobre material pumítico, que cubre toda la cuenca, se encuentran dedicados a la agricultura (figura 3).

#### CARACTERÍSTICAS GEOLOÓGICAS GENERALES

Para los efectos de este estudio, resulta de interés particular la historia reciente del volcán, toda vez que los fenómenos de erosión acelerada que se estudian se llevan a cabo sobre materiales asociados a la actividad volcánica durante el pleistoceno superior, definida por Bloomfield y Velastro (1974) y Bloomfield *et al.* (1977), que se resume en la figura 6.

Las barrancas que surcan a la cuenca de El Zaguán permiten apreciar en sus paredes la distribución de las unidades litoestratigráficas a lo largo de la zona (figura 7 y 8).

Hacia la cabecera extrema de la cuenca, sobre el barranco principal, queda expuesta una sección constituida por clastos predominantemente pumíticos (figura 7, columna A), hasta de unos 30 cm de diámetro, correspondientes a la Formación Pómez Toluca Superior (FPTS). El tamaño de estos clastos, máximo dentro de la cuenca, se explica por la cercanía al centro emisor.

Figura 1. Localización de la cuenca del Arroyo El Zaguán.

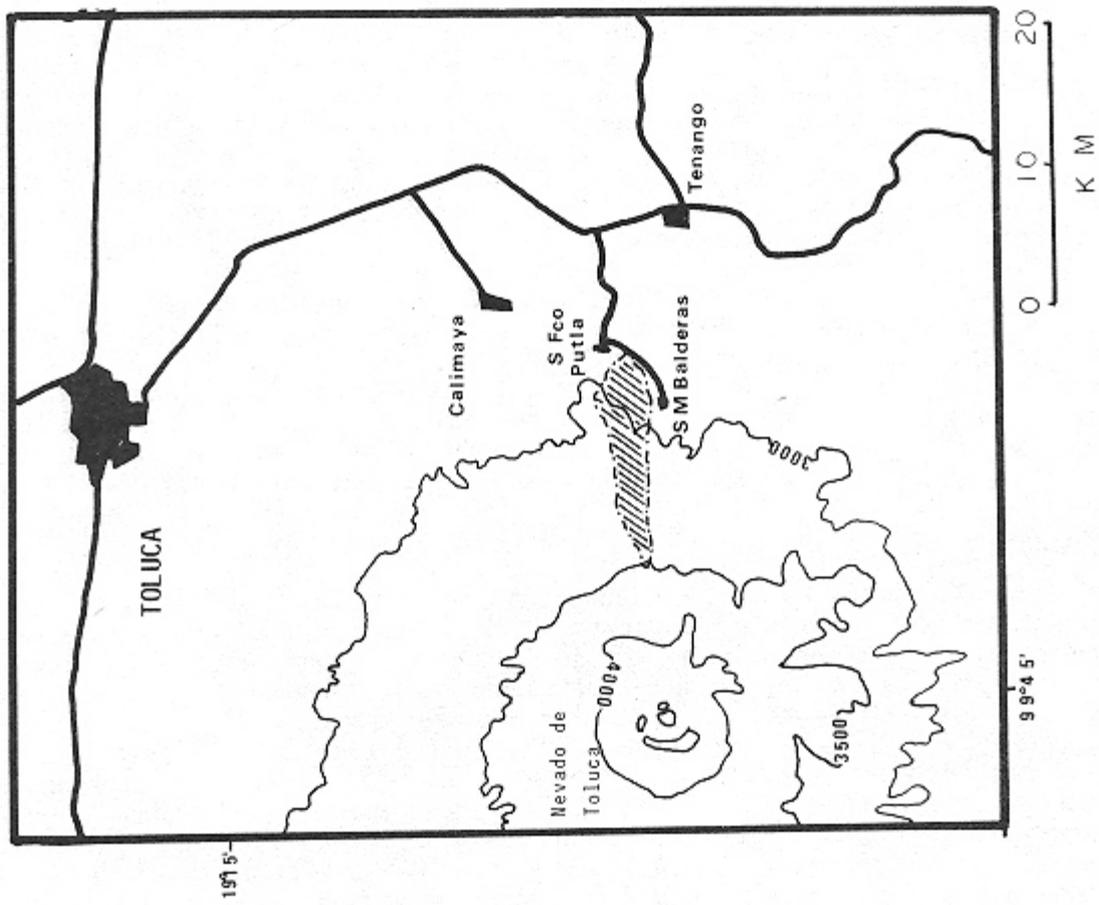
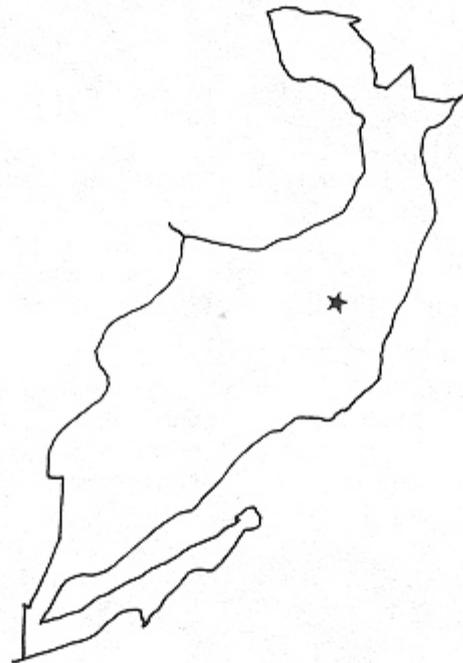


Figura 2. Obras de retención de azolves en la cuenca del Arroyo El Zaguán.

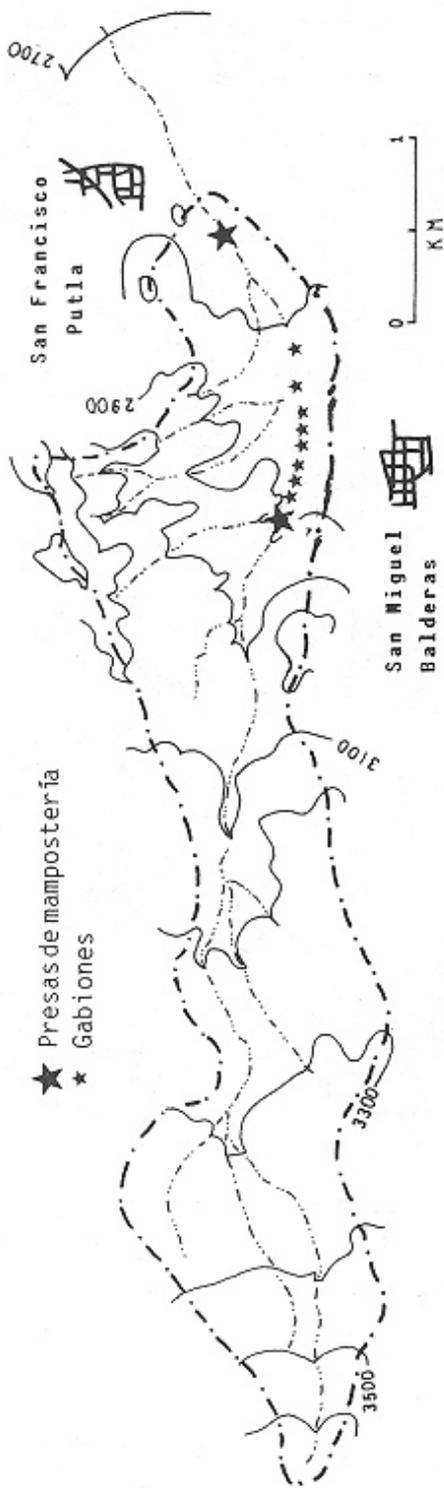


Figura 3. Uso del Suelo y vegetación.

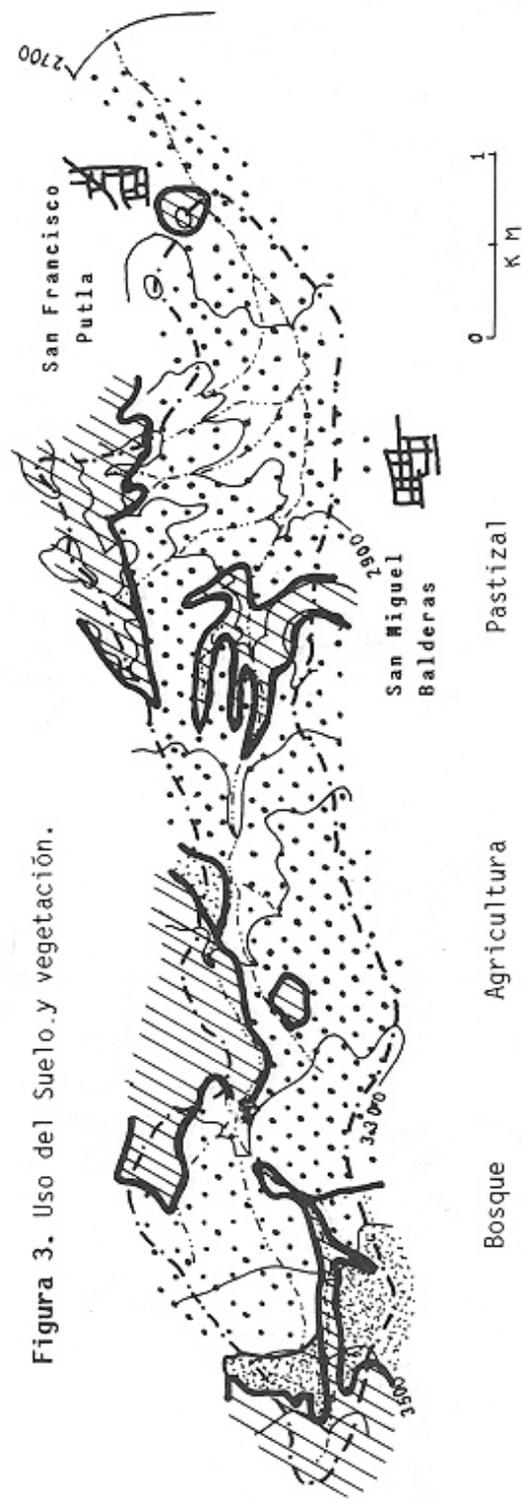


Figura 4. Registro de la estación Tenango (SARH).

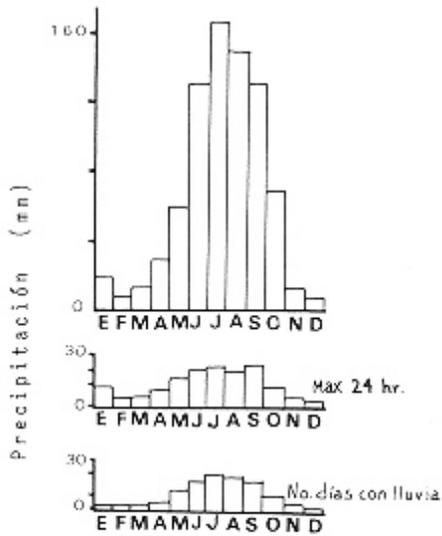


Figura 5. Registro de la estación Nevado de Toluca (SARH).

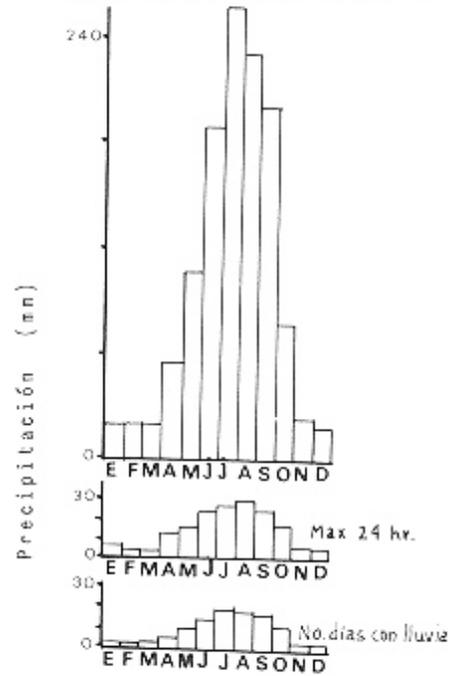


Figura 6. Sección representativa de los eventos volcánicos del Nevado de Toluca (Basado en Bloomfield y Valastro, 1977).

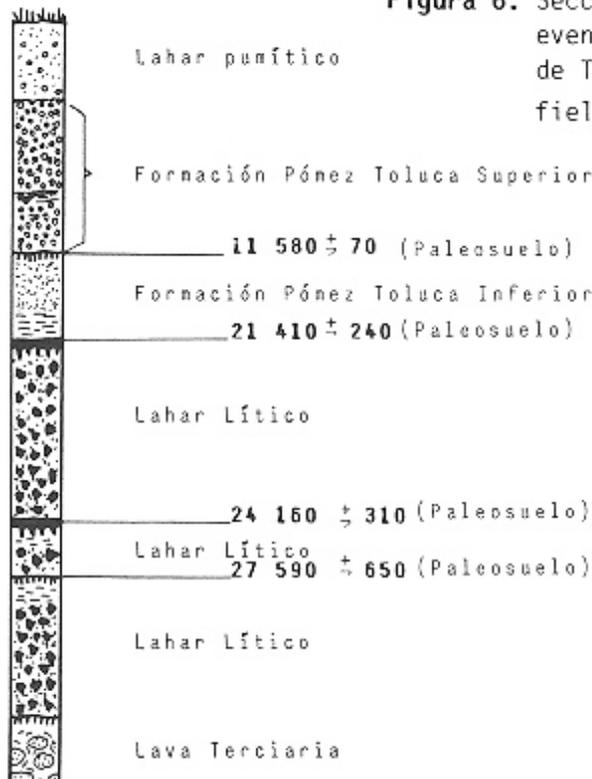
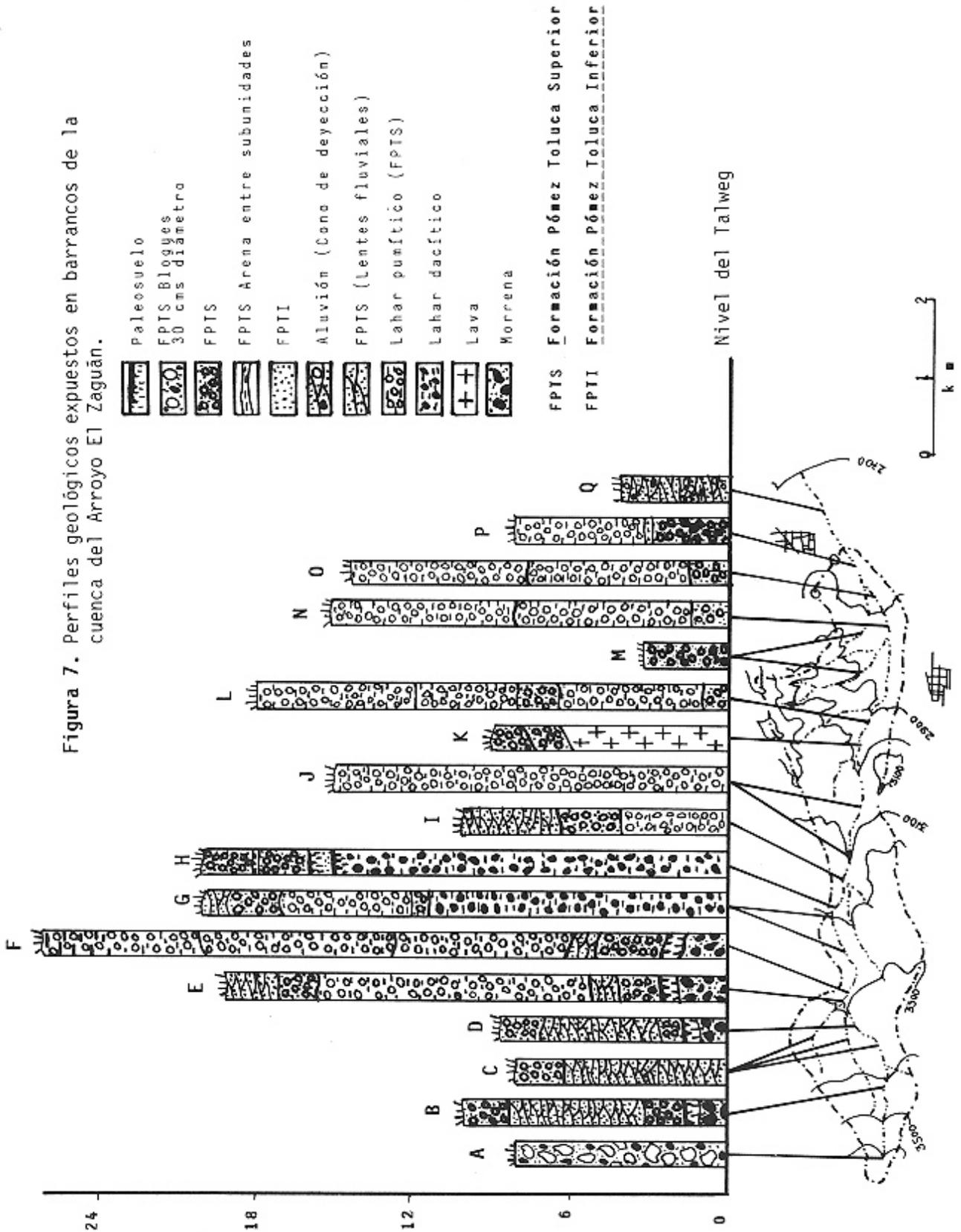


Figura 7. Perfiles geológicos expuestos en barrancos de la cuenca del Arroyo El Zaguán.



- + + + + FPTS → Lentas fluviales FPTS → FPTS
- ● → FPTS → Lentas fluviales FPTS → FPTS
- + + + + Lahar dacítico → FPTS → Lentas fluviales FPTS → FPTS
- — — — Lahares pumfíticos → FPTS
- >>>> Lava → FPTS
- · — · — FPTS

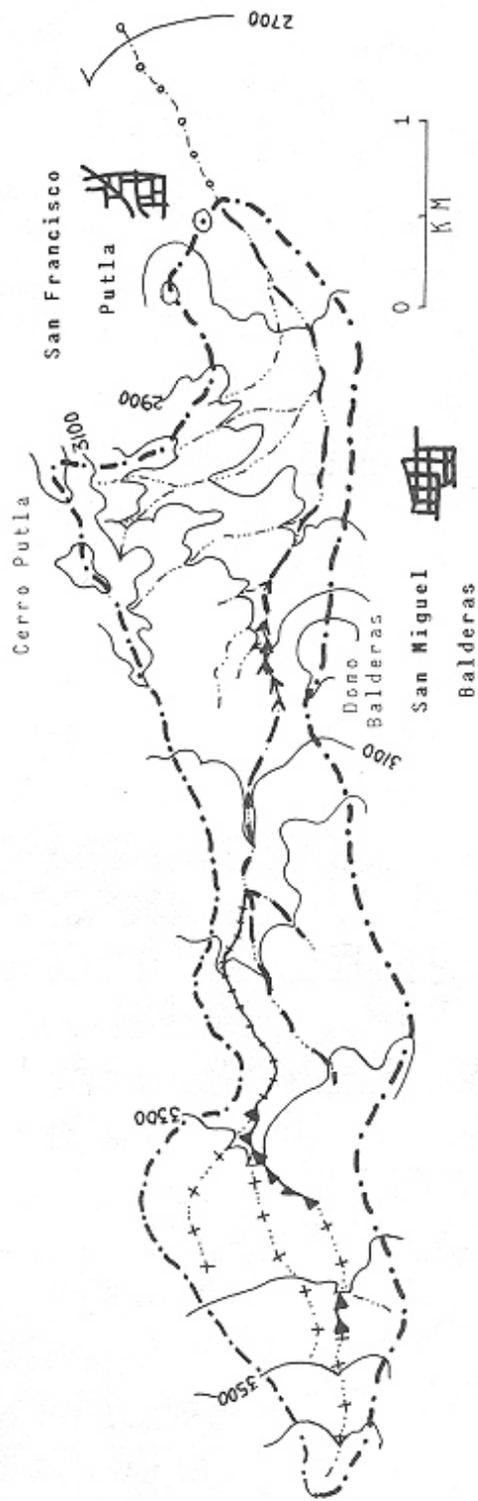


Figura 8. Sectores afines en cuanto a columnas expuestas en las laderas de los barrancos en la Cuena del Arroyo El Zaguán, de la base a la cima (globalizados). FPTS= Formación Pómez Toluca Superior.

Inmediatamente aguas abajo de la cabecera, hacia los 3 300 m de altitud, el corte en el barranco (figura 7, columna B) deja expuesta una secuencia en cuya base aparece una morrena que parece corresponder a un avance del hielo de hace menos de 25 000 años. Esta edad máxima se basa en la inexistencia de la Formación Pómez Toluca Inferior sobre el depósito glacial. La morrena muestra espacios rellenos con arcillas finamente estratificadas que atestiguan la anterior presencia de bloques de hielo dentro de la acumulación de rocas (foto 1); dicha morrena se encuentra cubierta por una capa de arena rojiza no pumítica que corresponde a un suelo cuyo horizonte A ha sido borrado por erosión, aunque localmente este horizonte húmico, de unos 50 cm de espesor, puede detectarse. Por encima de este paleosuelo los dos miembros de la FPTS se intercalan con lentes de material de esa misma Formación, que evidencian un trabajo fluvial. Los materiales que componen dichos lentes carecen, como sucede con los clastos de la FPTS, de coherencia, siendo fácilmente deleznable al tacto. Esta disposición o columna caracteriza al barranco principal prácticamente desde la cabecera hasta los 3 280 m, punto en el cual la morrena desaparece (figura 7, columnas B, D, E y F; figura 8). En este punto se presenta la confluencia del barranco principal con dos afluentes que muestran en toda su longitud, prácticamente, la misma secuencia descrita, diferenciándose únicamente por la ausencia de la morrena en la base (figura 7, columna C).

A partir de los 3 280 m, aproximadamente, aparecen gruesos depósitos de lahares de composición pumítica, que cubren a la morrena antes citada; se derivan de la FPTS (figura 7, columnas E y F).

Hacia los 3 250 m, aproximadamente, lahares, en este caso no pumíticos, sino dacíticos, constituyen el elemento más destacado de las columnas expuestas en las paredes del barranco principal (figura 7, columnas G y H). Estos lahares se presentan con esperos de hasta 16 metros; sus clastos muestran una mayor coherencia que los que componen a la FPTS (son deleznable sólo al golpe de martillo, no al tacto) y se encuentran, a su vez, cubiertos por lahares pumíticos y tefras de la FPTS. Puntualmente (figura 7, columna H), la serie expuesta corresponde a la columna descrita por Bloomfield y Velastro (1974) para el sur de Calimaya (figura 6).

Sobre la margen derecha del barranco principal, hacia los 3 160 metros de altitud, dos barrancos afluentes exponen, por el corte llevado a cabo, una secuencia predominante dentro de la cuenca (figura 7, columnas J, L, N, O y P; figura 8). Se trata de lahares pumíticos derivados de la FPTS intercalados con tefra de la misma Formación. La columna descrita se prolonga por las paredes del barranco principal prácticamente hasta la desembocadura y se interrumpe únicamente entre los 3 050 y los 2 960 m, sector en el cual el barranco corta las lavas del domo de Balderas, cubiertas directamente por la FPTS (figura 7, columna K; figura 8).

A partir de la desembocadura el cauce, canalizado artificialmente, muestra en sus paredes exclusivamente lentes fluviales de litología variada, con predominio de material pumítico.

#### DINÁMICA DEL ARROYO EL ZAGUÁN

La cuenca del arroyo El Zaguán se caracteriza por acelerados cambios morfológicos, como se ilustra en las fotos 4 y 5, 6 y 7 y 9, 10 y 11.

Cuando durante la época de lluvias se presentan aguaceros violentos en las laderas altas del Nevado de Toluca, se lleva a cabo un escurrimiento torrencial, de actividad excepcional que, sin embargo, dura sólo unas cuantas horas. Este tipo de

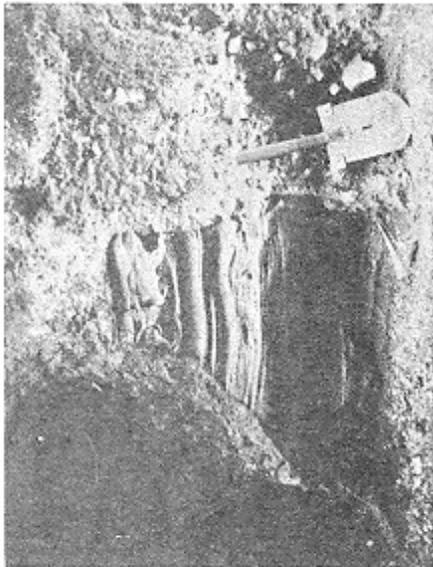
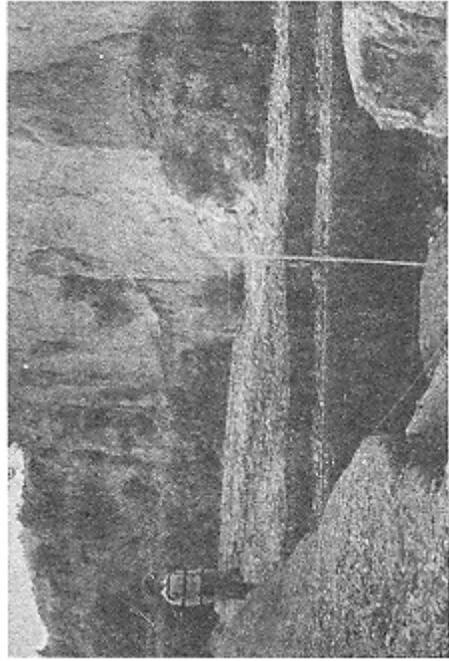
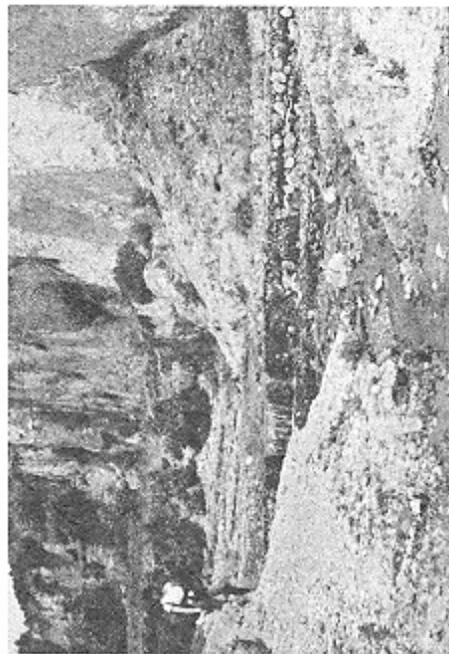


Foto 1. Arcillas varvadas en material de morrena.



Foto 2. Derrumbes obtenidos al paso de la corriente.



Fotos 3 y 4. Se aprecian cambios sustanciales en la morfología de los taludes y talweg; ambas fotografías corresponden al mismo punto, ubicado en el sector referido en la figura 17. Las fotografías fueron tomadas en julio de 1983 y enero de 1984, respectivamente.

Fotos 5 y 6. Cambios sustanciales en el fondo del barranco producto de una intensa acumulación. Con base en el sepultamiento de los pilares que soportan a la tubería se calculó una elevación en el nivel del fondo del orden de 1.5 m. El lugar se encuentra en el sector referido en la figura 16. Las fotografías fueron tomadas en julio de 1983 y enero de 1984, respectivamente.

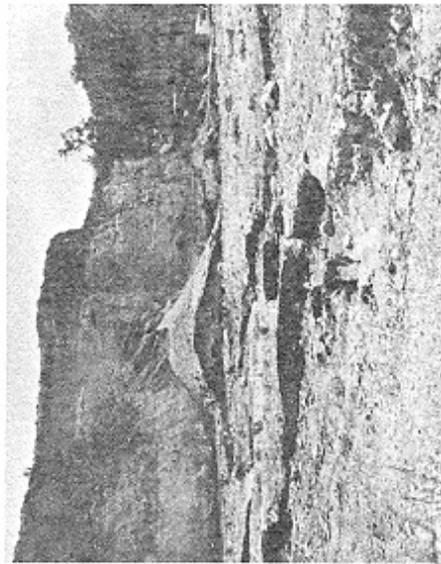
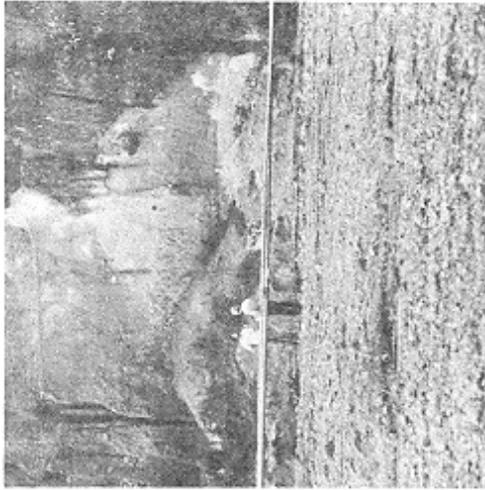
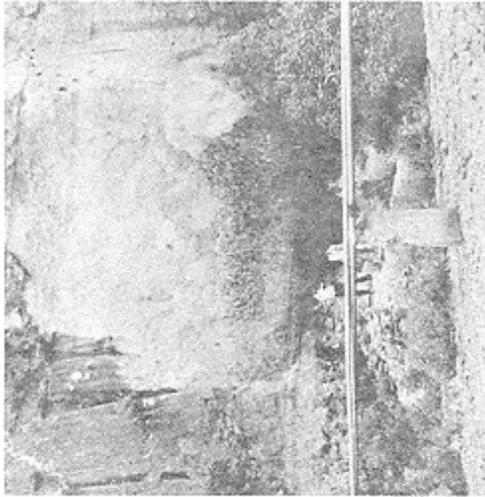


Foto 7. Derrumbes producto de la socavación de base. Este mecanismo es el principal aportador de sedimentos al flujo.



Foto 8. Terrazas, resultado de la variación en el gasto. Se trata de formas ampliamente distribuidas a lo largo del barranco.

Fotos 9,10 y 11. Presa de El Zaguán, rellena a medida que era levantada; actualmente se encuentra completamente colmatada (Tomadas de Patiño, 1956 ). Fueron tomadas el 13 y 14 de julio y el 3 de agosto de 1956, respectivamente.

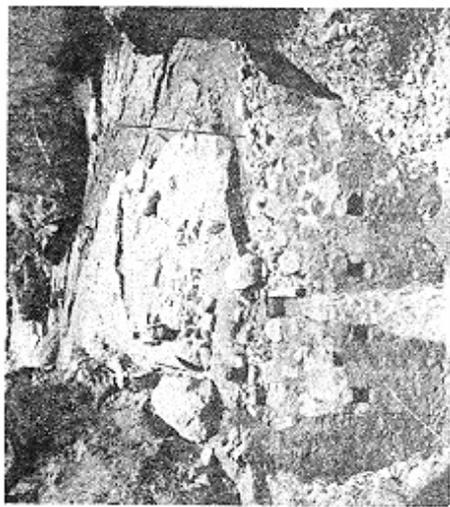


Foto 12. Presa de mampostería ubicada en el sector referido en la figura 17. Una vez colmatada, la presa sufrió dislocaciones notables, lo que provocó su inutilización. La fotografía fué tomada en julio de 1983.

precipitaciones ocurre pocas veces y de manera irregular durante la temporada de lluvias, de manera que los profundos cambios, observables de un año a otro, son producto de una dinámica concentrada en unas cuantas horas durante la época de lluvias.

Las estaciones cercanas a la cuenca permiten apreciar que el inicio de la estación lluviosa se presenta en el mes de mayo. Ella se prolonga hasta octubre, siendo los meses de junio, julio, agosto y septiembre los que concentran los mayores valores (figuras 4 y 5).

La presencia de escurrimientos torrenciales se manifiesta preferentemente durante los meses de agosto y septiembre, a decir de los lugareños, lo cual parece registrarse en los datos meteorológicos. En dichos meses, la precipitación máxima en 24 horas alcanza promedios cercanos a los 25 mm; con relativa frecuencia llegan a presentarse lluvias de 30 mm y excepcionalmente superiores a los 60 mm.

Aunque en atención a los datos diarios parecen presentarse precipitaciones torrenciales durante los meses de junio y julio, el escurrimiento torrencial no es frecuente en esos meses. La lluvia durante mayo, junio y julio parece ocuparse en la saturación del sustrato permeable y, una vez saturado éste, las lluvias de agosto y septiembre ocasionan los escurrimientos importantes.

A partir de la distribución anual de la precipitación pueden definirse tres tipos de escurrimiento en la cuenca:

1. Escurrimiento en la temporada de estiaje. Se trata de flujos alimentados por manantiales bien localizados a lo largo del barranco, o canal de desagüe. Son permanentes y generalmente cortos; escurren poco más de 100 m antes de infiltrarse. Poseen un cauce definido, de unos centímetros de profundidad y aproximadamente unos 50 cm de ancho. Los datos obtenidos para la velocidad de este tipo de escurrimiento, según el método de Manning, varían entre 25 y 45 cm por segundo, en diferentes sectores del cauce.

2. Escurrimiento durante la temporada de lluvias. Ya entrada la estación de lluvias, aparecen escurrimientos a partir de numerosos manantiales temporales que surgen en la base de las laderas del barranco. Como en el caso anterior, se trata de escurrimientos cortos, poco profundos y angostos, que se infiltran después de recorrer unos metros. Las velocidades del escurrimiento son similares al caso anterior.

3. Escurrimiento torrencial. Se trata de un flujo extraordinario de corta duración; los aportes de agua subsuperficial presentes en las laderas del barranco se incrementan notablemente y dan lugar, junto con el agua pluvial captada directamente en el barranco, a la formación de un flujo que recorre de manera continua todo el cauce, abarcando gran parte del fondo plano, llegando a tener profundidad métrica. Las velocidades para este tipo de escurrimiento, según el método referido, se estiman alrededor de 5 m por segundo, valor por encima del promedio general, pero aceptables en el caso de torrentes (Costa, 1987).

Los diferentes tipos de escurrimiento señalados implican un comportamiento específico del agua en las vertientes de la cuenca. Por un lado, los piroclastos pumíticos no facilitan el escurrimiento superficial debido a su capacidad de infiltración, lo que explica la falta de rasgos erosivos superficiales, por lo cual el

flujo hipodérmico adquiere gran relevancia, como lo refleja la aparición de numerosos manantiales temporales y el aumento del gasto en los permanentes. Así, el escurrimiento hipodérmico reconoce hacia los barrancos, surgiendo a manera de lloraderos en la base de las laderas de ellos. En la temporada de lluvias, además, la saturación de las laderas de los barrancos con agua, hace que se presenten frecuentes desplomes que en algunos casos llegan a obturar total o parcialmente el cauce (foto 2).

Pero, sin duda alguna, el modelado más activo se presenta en el canal de desagüe, como consecuencia de los escurrimientos torrenciales (fotos 3,4,5 y 6). El agua desciende a gran velocidad fuertemente cargada de sedimentos arrancados de las paredes y de su propio lecho, lo que da poder abrasivo a la corriente. El escurrimiento socava los márgenes, desequilibrando las paredes del barranco que se desploman en paquetes por la falta de soporte. Los materiales caídos conforman un talud y posteriormente son incorporados al flujo. Donde el cauce presenta una disminución de pendiente o un ensanchamiento brusco, la corriente pierde energía y deposita su carga; ésta tiende a obstaculizar a la corriente desplazándola hacia los márgenes, donde socava y se recarga de materiales arrancados a las paredes (foto 7). Se presenta, de esta manera, un mecanismo de sustitución de carga (Tricart, 1959).

Algunas estimaciones realizadas indican que en un mes pueden ser acarreados volúmenes superiores a los 1000 m<sup>3</sup>, como en el caso de la presa "El Zaguán" (fotos 9, 10 y 11) misma que fue rellena a medida que era construida. Si bien éste puede ser un dato máximo, en otros casos los volúmenes de sedimentos retenidos en gabiones se estiman en 800 m<sup>3</sup> para una estación de lluvias.

Cuando se presenta el escurrimiento torrencial, la erosión es básicamente lateral, se socavan los márgenes y, consecuentemente, se presenta el ensanchamiento del barranco; la acumulación debida a una disminución local de la pendiente o a una ampliación súbita del barranco es también común bajo estas circunstancias.

Cuando los escurrimientos son alimentados básicamente por aporte freático, el agua cristalina retoma sedimentos depositados durante el flujo torrencial y predomina la incisión vertical sobre la lateral, aunque ésta llega a presentarse lentamente. Esto se traduce en la formación de terrazas, comúnmente de dimensiones métricas, a lo largo del barranco (foto 8).

#### CARACTERIZACIÓN DE SECTORES INESTABLES DENTRO DE LA CUENCA EN ESTUDIO.

Un sector inestable es aquí considerado como un área que es emisora o receptora de sedimentos en cantidades suficientes como para repercutir en un cambio morfológico a corto plazo, siendo este plazo de carácter anual y aun menor.

De manera general, se distinguen dos tipos de factores ligados a la inestabilidad a lo largo del torrente, que aquí llamamos generales y locales. Los primeros son aquellos que se consideran relativamente homogéneos para toda la cuenca; los locales, por el contrario, son aquellos factores que, lejos de ser homogéneos, presentan variaciones constantes a lo largo del área estudiada.

#### Factores generales.

Un factor general que considerar en la mecánica de los procesos de modelado es el comportamiento de la pendiente.

Si bien este rasgo es variable a lo largo del barranco -por lo cual se incluiría dentro de los factores locales-, debe hacerse notar que la dirección general del barranco no sigue la inclinación neta de la ladera, sino que se desarrolla de manera sensiblemente oblicua a ella. La figura 9 esquematiza este hecho, lo que explica, junto con otros factores, la asimetría del barranco.

Por otro lado, en el caso que se estudia se considera también como factor general al uso del suelo; como se dijo anteriormente, la casi totalidad de la superficie de la cuenca está sujeta a un uso agrícola (figura 3), lo que constituye, a nuestro parecer, un aspecto clave para explicar el funcionamiento y el origen mismo del barranco. Lo anterior se basa en la coincidencia del fenómeno en áreas agrícolas y su ausencia en áreas forestadas, no solamente en el área que se estudia, sino prácticamente en toda la estructura del Nevado de Toluca y en el área circundante en la cual se presenta la tefra pumítica. Lo anterior permite suponer, por un lado, el papel que desempeñan las raíces de árboles y arbustos en el movimiento del agua en el subsuelo, y el papel que desempeña el cambio de uso del suelo en el proceso. Sin embargo, no resulta fácil caracterizar con datos lo anterior debido, en gran medida, a la falta de modelos que expliquen con aceptable precisión el movimiento del agua infiltrada en sedimentos con las características que presenta la tefra aludida, y de técnicas que permitan la evaluación de la infiltración bajo condiciones de alta permeabilidad.

#### Factores locales.

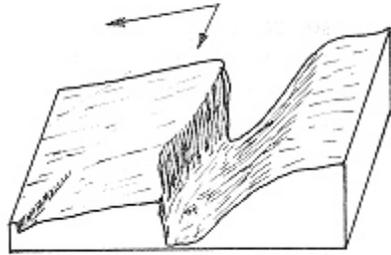
Dentro de los factores locales que intervienen de manera notable en el proceso de erosión-acumulación en la cuenca estudiada, destaca la litología. Dadas las diferentes características de las unidades presentes en la cuenca, los procesos morfogénicos sufren modificaciones importantes, lo que se identifica a partir de las formas que tiene el barranco (figura 10). De esta manera, el barranco es profundo y angosto cuando corta lavas, lahares dacíticos y morrenas relativamente coherentes, lo que define una sección estable a lo largo de algunas décadas. Cuando, por el contrario, el barranco corta sedimentos poco consolidados, como las tefras y lahares pumíticos, el perfil transversal característico presenta laderas prácticamente verticales y un fondo plano, consecuencia del activo modelado lateral y de la acumulación, respectivamente.

Igualmente importante para el establecimiento de sectores inestables son las sinuosidades descritas por el barranco. Las porciones externas de las curvaturas son, casi generalmente, emisoras de grandes cantidades de sedimentos, mientras que en las porciones internas de las mismas se aprecian distintos niveles de terraza que atestiguan tanto la acumulación de sedimentos como los diferentes procesos de incisión vertical de la corriente.

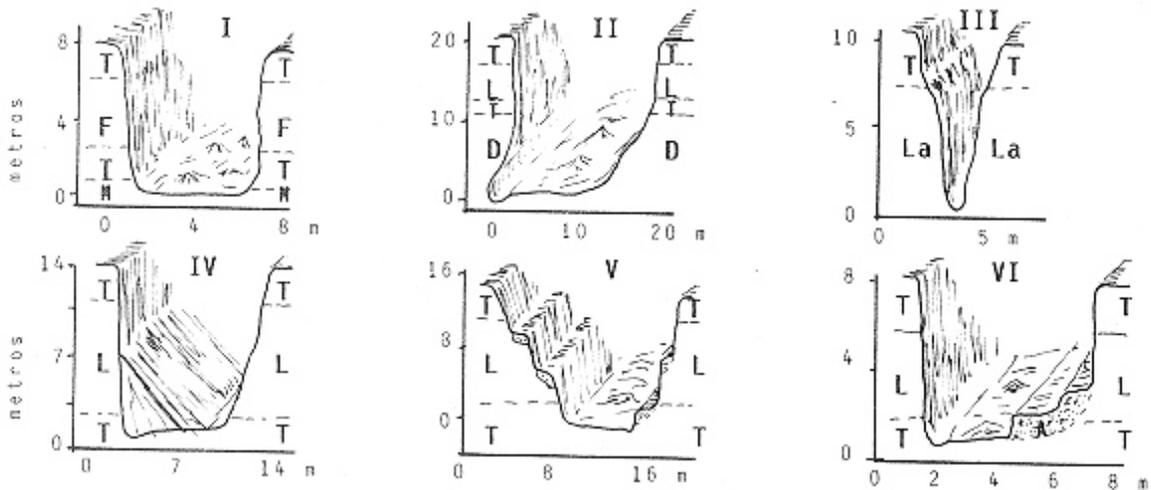
Por otra parte, los cambios locales de pendiente y amplitud en el barranco definen, asimismo, sectores en los cuales la erosión o acumulación adquieren importancia.

La presencia de una densa cubierta vegetal en ciertos sectores del barranco es causa y consecuencia de la estabilidad a lo largo de él.

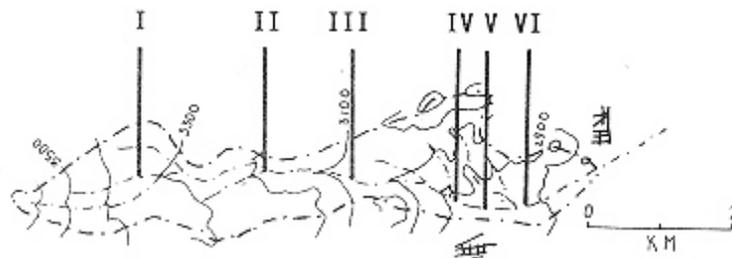
Por último, las zonas de confluencia de barrancos tributarios al principal son, comúnmente, sectores de gran inestabilidad en los cuales se manifiestan mecanismos de erosión acelerada, dada la concentración de energía y carga de las corrientes que confluyen.



**Figura 9.** La asimetría en el barranco se explica en parte por influencia general de la pendiente; el barranco discurre de manera oblicua a la pendiente general de la ladera del volcán, lo que ocasiona un mayor modelado sobre la margen derecha que sobre la izquierda. Lo anterior es particularmente claro entre los 2 800 y los 3 000 m a lo largo del barranco principal, tramo en el cual aparecen lahares y tefras de la Formación Pómez Toluca Superior.



A. Aluvión D. Lahar Dacítico F. Lentes pumíticas fluviales L. Lahar pumítico La. Lava M. Morrena T. Tefra pumítica.



**Figura 10.** Variantes morfológicas en el perfil transversal a lo largo del barranco principal y su relación con la litología (comparar con figura 7).

Es claro, finalmente, que la inestabilidad y la estabilidad se definen por la participación conjunta de los factores señalados y no por la de uno de ellos únicamente.

#### SECTORES INESTABLES EN LA CUENCA DEL ARROYO EL ZAGUAN.

De los rasgos geomorfológicos en la porción superior de la cuenca se infiere la existencia de fenómenos de remoción en masa los cuales tienen relación con el sobrepastoreo y el comportamiento hidrológico de las laderas; pueden apreciarse terracetas producto de la compactación por el pisoteo de los animales.

A lo largo del barranco principal, desde la cabecera del mismo hasta el punto de unión con el primer tributario de importancia (hacia los 3 400 m), la actividad erosiva no es de consideración. Las laderas del barranco, e incluso parte del lecho de inundación, se encuentran cubiertos por una densa cubierta de bosque y matorral que evidencian, claramente, la estabilidad del sector. Sobre el tributario mencionado, sin embargo, se detecta un primer sector inestable (figura 11).

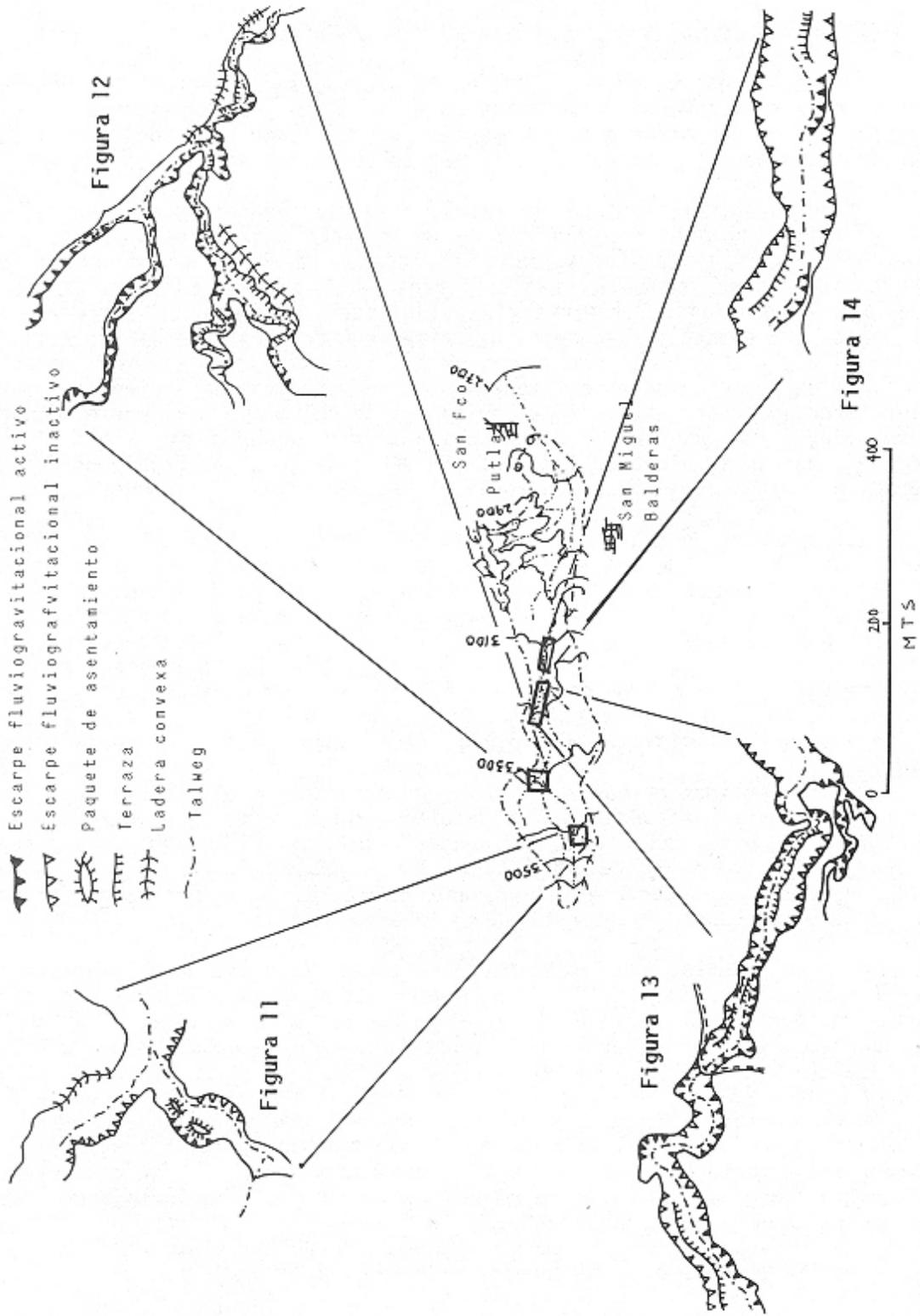
La disposición de este tributario, transversal a la pendiente, constituye un factor importante para explicar la inestabilidad del mismo. El movimiento del flujo hipodérmico, al aflorar en el barranco tributario en cuestión, afecta fundamentalmente a la margen izquierda del mismo. En dicha margen, los problemas de sufosión y saturación de agua en la base ocasionan el desprendimiento de paquetes.

Otro sector de gran inestabilidad se presenta hacia los 3 300 m (figura 12). En este punto tiene lugar la confluencia de varios barrancos con el principal. Todos los barrancos tributarios son activos desde el punto de vista erosivo y en varios casos muestran influencia antrópica; algunas porciones de estos barrancos corresponden a antiguos caminos o bien a límites entre parcelas. El cambio de uso del suelo, de forestal a agrícola, ha favorecido la remoción de los sedimentos retrabajados y de las tefras pumíticas (figura 7). Pueden apreciarse escarpes activos en la mayor parte del sector, coincidentes, en un buen número de casos, con curvaturas meándricas, lo que hace del mismo un área importante de producción de material de arrastre.

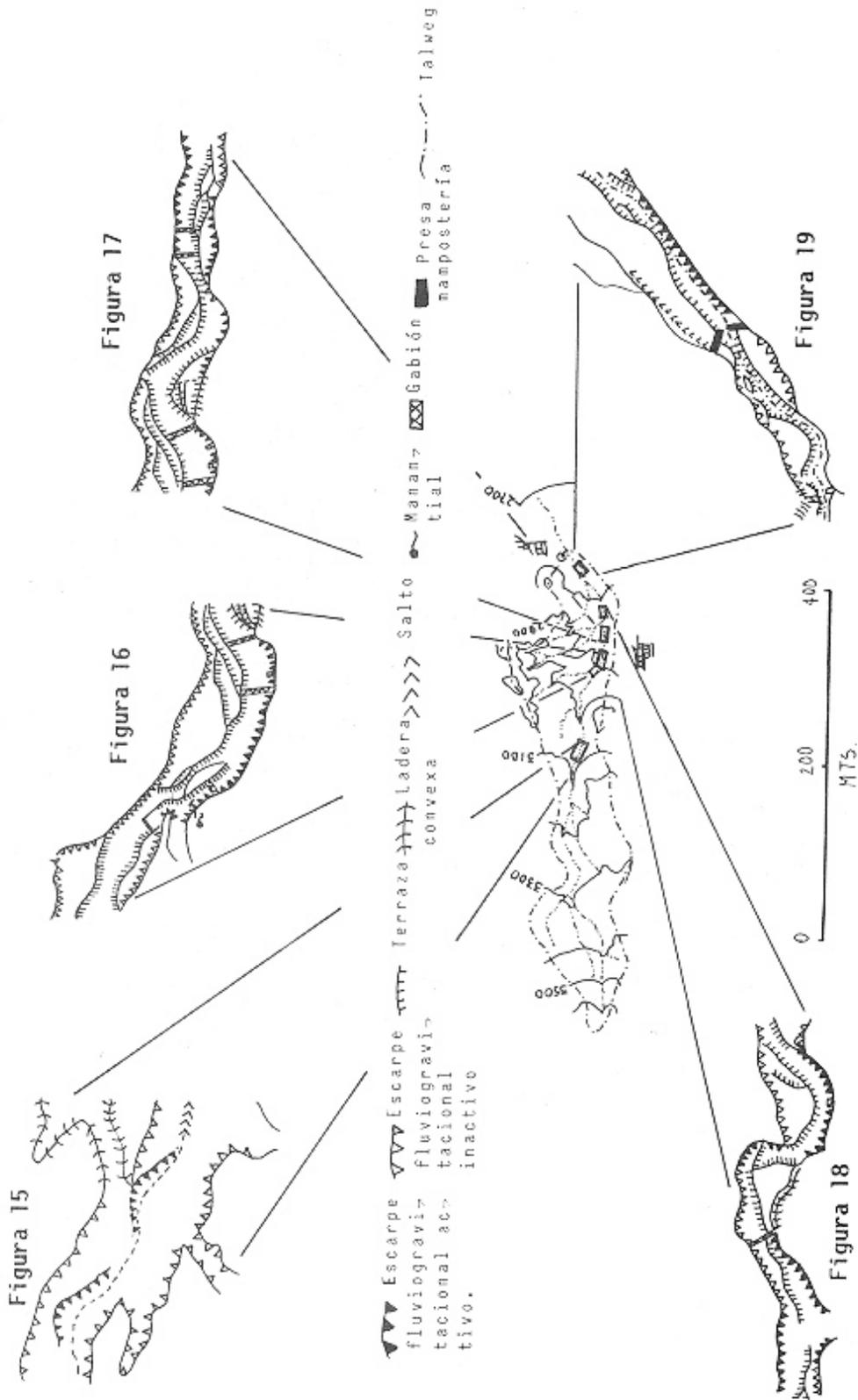
El tercer sector inestable de importancia se presenta hacia los 3 200 m (figura 13). En este caso se presentan también escarpes activos asociados a la socavación fluvial de base, que genera frecuentes desplomes. El mismo esquema se presenta en otros dos sectores, entre los 3 000 y los 3 100 m (figuras 13 y 15). La inestabilidad de estos tres sectores se presenta sobre tefras y lahares pumíticos, aunque en algunos pocos casos se desarrollan en lahares dacíticos.

A partir de los 2 900 m el barranco corta exclusivamente lahares y tefras de composición pumítica (figura 7). Las figuras 16, 17, 18 y 19 muestran escarpes activos coincidentes con márgenes fluviales exteriores, presentándose éstas de manera preponderante, si bien no exclusiva, sobre la orilla derecha del barranco, debido a la influencia general de la pendiente (figura 9). Es a partir de la cota señalada donde se ubican las obras de retención de sedimentos (presas de mampostería, gabiones y gabiones laterales). Los gabiones han sido colmatados, en general, en unas cuantas temporadas de lluvia (fotos 3 y 4); los gabiones laterales, cuya función es desviar la corriente hacia al centro del barranco y evitar, así, la socavación lateral, no han cumplido su misión de manera totalmente satisfactoria, toda vez que los derrumbes siguen presentándose debido a que se encuentran demasiado separados. De las obras de mampostería (2), una de ellas, situada hacia los 2 900 m (figura 16) constituye la primera obra de retención de sedimentos en la cuenca (data de 1956) y

Sectores inestables de la cuenca El Zaguán



Sectores inestables de la cuenca El Zaguán (cont...)



la que a mayor altitud se encuentra. Fue prácticamente rellena a medida que era levantada (fotos 9, 10 y 11). La segunda presa ubicada hacia los 2 780 m de altitud (figura 19), fue colmatada y destruida por deficiencia en el diseño, por lo cual actualmente no cumple función alguna (foto 12). Aguas abajo de esta presa, a unos 200 m, se desarrolla el cono de deyección del torrente.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Como ha quedado expuesto a lo largo del presente estudio, el problema de la destrucción de tierras se encuentra estrechamente vinculado con la dinámica general de la cuenca hidrológica.

Este primer hecho nos permite afirmar que el problema, para el caso de la cuenca estudiada, ha sido tratado de manera insuficiente y, en algunos casos, equivocada. Como primer aspecto concreto que apoya lo anterior está la distribución de las obras de retención de sedimentos. Las obras hasta ahora realizadas carecen de un marco general que considere la dinámica general de la cuenca; es de esperarse que atacando solamente la parte inferior de la cuenca no se llegue a resolver el problema, toda vez que se ataca exclusivamente la consecuencia de él y no su causa. De este modo, a las obras realizadas en la parte baja de la cuenca deben agregarse medidas, en la porción más alta, en aquellos lugares cuya probada inestabilidad erosiva esté relacionada con la salida de sedimentos que afectan a los sectores más bajos. En este sentido destacan fundamentalmente dos tipos generales de sectores característicos: los barrancos en gestación y las curvas meándricas.

Los barrancos en gestación son afluentes al principal que poseen una dinámica excepcionalmente acelerada, tal vez mayor que la que presenta el propio barranco colector. Entre los factores que contribuyen a ello destaca el geológico, dado que el desarrollo inicial de cualquier barranco en la cuenca tiene lugar sobre una litología en extremo erodable, como son las tefras de la Formación Pómez Toluca Superior, que cubren prácticamente toda la superficie. De esta manera, la etapa inicial en el desarrollo de barrancos afluentes se caracteriza por cambios profundos en corto tiempo; si se considera que estos barrancos se desarrollan sobre zonas de cultivo, puede entenderse fácilmente por qué se consideran estas áreas como prioritarias para ser corregidas. La construcción de gabiones, así como la utilización de otras técnicas complementarias, a partir de sus cabeceras, como fajas de vegetación paralelas al borde del barranco (Tricart y Kilian, 1982) seguramente contribuiría a su corrección.

En el caso de las curvaturas meándricas el problema es distinto; siendo la socavación de base provocada por la corriente fluvial el principal mecanismo causante de inestabilidad, las medidas correctivas deben encaminarse a evitar esta acción más que a la retención de sedimentos, como en el caso anterior. La construcción de gabiones laterales es imprescindible para evitar la socavación de base y la desestabilización de las márgenes; podría realizarse, incluso, el enrocamiento general de la base de estas márgenes inestables, sobre todo en aquellas curvaturas muy pronunciadas, en donde los gabiones laterales requieren de un espaciamiento mínimo para dar resultados satisfactorios. La sugerencia anterior cuenta con la ventaja de que a lo largo prácticamente de todo el cauce, se presentan rocas de diversos tamaños que pueden utilizarse para el enrocamiento citado, con lo cual se abatirían costos por transporte.

Resulta importante señalar que la introducción de cualquier alteración al funcionamiento actual provocaría cambios en el funcionamiento del torrente en su

conjunto; se busca que estos cambios sean, evidentemente, benéficos, pero sin lugar a dudas, durante la fase de acondicionamiento a las nuevas condiciones se pueden presentar mecanismos de modelado no previstos, por lo cual el trabajo no puede considerarse terminado, sino que, sencillamente, se ha iniciado una nueva dinámica geomorfológica distinta a la anterior. Por ello, en esta etapa, será recomendable y necesario continuar evaluando la dinámica de la cuenca en su conjunto, no únicamente algunos sectores de la misma.

#### REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Bloomfield, K.; Sánchez Rubio, G.; y Wilson, L. 1977. "Plinian eruptions of Nevado de Toluca volcano, México". En Geologischen Rundschau # 66-1, Stuttgart, pp. 120-146.
- Bloomfield, K. y Valastro, S. 1974. "Late pleistocene eruptive history of Nevado de Toluca volcano, central Mexico". En Geological Society of American Bulletin vol. 85 num. 5, pp. 901-906.
- \_\_\_\_\_ 1977. "Late quaternary tephrochronology of Nevado de Toluca volcano, central Mexico". Overseas Geol. & Miner Resour N° 46, p. 15.
- Costa, J.E. 1987. "Hydraulics and basin morphometry of the largest flash floods in the conterminous United States". Journal of Hydrology, 93 (1987), Elsevier Science Publishers B.V. Amsterdam, pp. 313-338.
- Graf, W.L. 1986. "Fluvial erosion and federal public policy in the Navajo region" Physical Geography, 7 pp. 97-115.
- \_\_\_\_\_ 1988. Fluvial processes in Dryland rivers. Springer-Verlag, Berlín.
- Hereford, R. 1984. Climate and ephemeral-stream processes: twentieth century geomorphology and alluvial stratigraphy of the Little Colorado Arizona River, Geol. Soc. American Bulletin 95 pp. 654-668.
- Patiño, Lorenzo R. 1956. Corrección de las barrancas de la cuenca alta del río Lerma (Febrero-Abril). Srta. de Recursos Hidráulicos, Dirección de Aprovechamientos. Depto. Agrológico, México, p. 18.
- Tricart, J. y Kilian, J. 1982. La eco-geografía y la ordenación del medio natural. Editorial Anagrama, Barcelona.
- Tricart, J. 1959. "L'evolution du lit du Guil Au cours de la crue de juin 1957". Bulletin de la Section de Géographie, Comité de Travaux Historiques et Scientifiques, LXXII pp. 169-403.