

CARTOGRAFÍA GEOMORFOLÓGICA Y ANÁLISIS MORFOMÉTRICO PARA ESTUDIOS DE EROSIÓN ACELERADA. ESTUDIO DE CASO EN LA CUENCA DEL RÍO TLALPUJAHUA, MÉXICO.

Gerardo Bocco*

RESUMEN

Con el objetivo de fortalecer los fundamentos teórico-metodológicos de los estudios de erosión acelerada en México, se presenta la cartografía morfogenética como una herramienta para la elaboración de inventarios de erosión. Mediante la aplicación de técnicas estadísticas simples, se caracterizan y comparan las unidades morfogenéticas. Asimismo, estas técnicas permiten el diseño de unidades geomorfológicas pragmáticas, útiles como contexto ambiental para elaborar un inventario de erosión acelerada.

SUMMARY

This paper aims at strengthening the methodological background for erosion studies in Mexico. Morphogenetic mapping is presented as a tool for erosion inventories. Simple statistic techniques are used to characterize the morphogenetic units and to provide the basis for the design of a new, pragmatic, geomorphic legend, suitable for erosion inventories.

1. INTRODUCCION

1.1 Antecedentes.

Más de la mitad de la población mexicana vive en el Sistema Volcánico Transversal (SVT), bien en grandes asentamientos urbanos, tales como las ciudades de México, Toluca, Puebla, Tlaxcala y Morelia, bien en hábitats rurales donde la agricultura constituye la principal actividad económica.

Esta gran concentración de población se explica por razones de índole histórica y geográfica. Desde la época prehispánica, el México central ha sido densamente habitado, en parte por la disponibilidad de buenos suelos agrícolas, en especial de origen volcánico, y por la ocurrencia de una aceptable cantidad de precipitación (700/900 mm, promedio anual), en el contexto de un clima templado altitudinal.

Algunos problemas ambientales (erosión, contaminación o ambos), amenazan la estabilidad de la región y afectan las actividades económicas que allí se desarrollan. Los procesos de erosión acelerada (o antrópica, Toy, 1982), en especial los acaravamientos, son fenómenos muy desarrollados y han recibido la atención de instituciones académicas y gubernamentales.

* Becario. Instituto de Geografía, UNAM.

La Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH) ha desarrollado inventarios de erosión a escalas nacional y estatal, desde hace varios decenios. La Universidad de Agricultura (Chapingo) también ha desarrollado estudios de erosión, a veces en cooperación con la SARH. En general, las investigaciones han consistido en: (1) el mapeo de terrenos erosionados, conducente a (2) el desarrollo de trabajos de conservación de suelos y aguas (ver SAG, 1968; SARH, 1979; SARH, 1984).

El problema de erosión también concitó la atención del "Proyecto Puebla-Tlaxcala", un programa alemán de investigación multidisciplinaria que trabajó la porción centro-oriental del SVT durante los años setenta. El énfasis fue sobre la relación suelos-erosión (ver, entre otros, Wegener, 1979).

El Instituto de Recursos Bióticos Renovables (INIREB, Xalapa) trabajó problemas de erosión en la porción oriental del SVT. El mapeo de terrenos erosionados se realizó con base en un enfoque morfodinámico-morfopedológico (ver Campos, 1986).

En el Instituto de Geografía (UNAM) se ha iniciado investigación sobre el tema en el centro del SVT, utilizando un enfoque geomorfológico aplicado (ver Bocco, 1986; Palacio, 1986). El presente artículo se enmarca en esta línea de trabajo.

En síntesis, los problemas de erosión acelerada por la actividad antrópica están siendo analizados por un número creciente de instituciones, utilizando enfoques complementarios. Sin embargo, es preciso fortalecer los fundamentos teórico-metodológicos para este tipo de estudios en México.

1.2 Objetivos

El objetivo central de este trabajo consiste en presentar la cartografía geomorfológica como una herramienta básica, tanto para la elaboración de inventarios de erosión como para el análisis preliminar de los procesos erosivos acelerados.

Los objetivos subordinados son:

(a) Caracterizar las formas del relieve desde el punto de vista morfogenético y obtener una visión panorámica de los procesos erosivos en una cuenca vertiente del SVT.

(b) Establecer algunas relaciones entre formas del relieve y otros factores ambientales (geología, suelos, hidrología, uso del suelo) que juegan un papel relevante en el desarrollo de los procesos erosivos acelerados.

(c) Describir las unidades morfogenéticas a partir de criterios cuantitativos y establecer comparaciones objetivas entre las unidades de mapeo.

(d) Fundamentar el arreglo de las unidades morfogenéticas para elaborar la leyenda del mapa de inventario de erosión.

1.3 Metodología

El sistema del Instituto Internacional de Levantamientos Aeroespaciales y Ciencias de la Tierra (ITC) de levantamientos geomorfológicos (Verstappen, 1983:269) y el sistema ITC de clasificación del terreno (van Zuidam y van Zuidam C., 1979) fueron utilizados en forma combinada. Se hizo énfasis en los aspectos pragmáticos

de ambos sistemas, así como en su flexibilidad y simplicidad (Verstappen, 1983: 269, 282). La escala de trabajo es semidetallada (Verstappen, 1983: 379). Se utilizaron fotos aéreas pancromáticas, blanco y negro, a escalas aproximadas 1:25 000 y 1:50 000. Los mapas finales se elaboraron a 1:50 000. La secuencia de la investigación siguió los pasos acostumbrados en este tipo de levantamientos (van Zuidam y van Zuidam C., 1979):

RECOPIACIÓN DE LITERATURA,
CARTOGRAFÍA E IMÁGENES
FOTOINTERPRETACIÓN Y MAPEO PRELIMINARES
VERIFICACIÓN DE CAMPO (MAYO/JUNIO 1986)
FOTOINTERPRETACIÓN Y MAPEO FINALES
ANÁLISIS MORFOMÉTRICO
DISEÑO LEYENDA MAPA INVENTARIO EROSIÓN

2. Características geográficas de la zona: contexto ambiental y espacial de la erosión acelerada.

La localización de la cuenca se presenta en la fig. 1. El área es de aproximadamente 490 km², la longitud máxima es de 39 km y la anchura máxima de 23 km. La altitud máxima es de 3 230 msnm, la mínima de 2 030 m y la amplitud de relieve 1 200 m. La cuenca es tributaria del río Lerma.

Con base en la literatura (Acosta, 1971; Arzate, 1971; Demant, 1981 y Fries *et al.*, 1965), en la cartografía geológica existente (DGG, 1978) y en observaciones propias (especialmente para el cuaternario), la geología puede generalizarse de la siguiente manera:

- (a) Rocas metamórficas del cretácico (esquistos-pizarras),
- (b) Productos andesíticos del pleistoceno temprano y medio,
- (c) Productos andesíticos y basálticos del pleistoceno tardío,
- (d) Depósitos aluviales y lacustres del pleistoceno tardío y holoceno.

La actividad neotectónica (pleistoceno tardío y holoceno, postvolcánica) ha jugado un papel determinante en la génesis de todas las unidades geomorfológicas.

La localización de la cuenca en el SVT explica su clima templado subhúmedo (Cw según Köppen, modificado por García, 1981), con estaciones seca (noviembre a abril) y húmeda (mayo a octubre). La temperatura media anual varía entre 14 grados C arriba de los 2 500 msnm y los 16 grados C entre los 2 000 y 2 500 msnm (DGG, 1983).

La precipitación media anual varía entre 700 y 900 mm (DGG, 1983). Ello explica la presencia de varias corrientes permanentes (río Tlalpujahuá y arroyos San Miguel y Tultenango, entre otros), y de, por lo menos, 20 reservorios para irrigación de más de 0.75 km².

La descarga anual del río Tlalpujahuá (datos de la SRH para el periodo 1929-1936, únicos disponibles) fue de 52 millones de m³; el coeficiente de escurrimiento (gasto en mm como porcentaje de la precipitación) es del 12%. Las pérdidas por evapotranspiración (713 mm promedio anual, datos de SRH) y una elevada infiltración

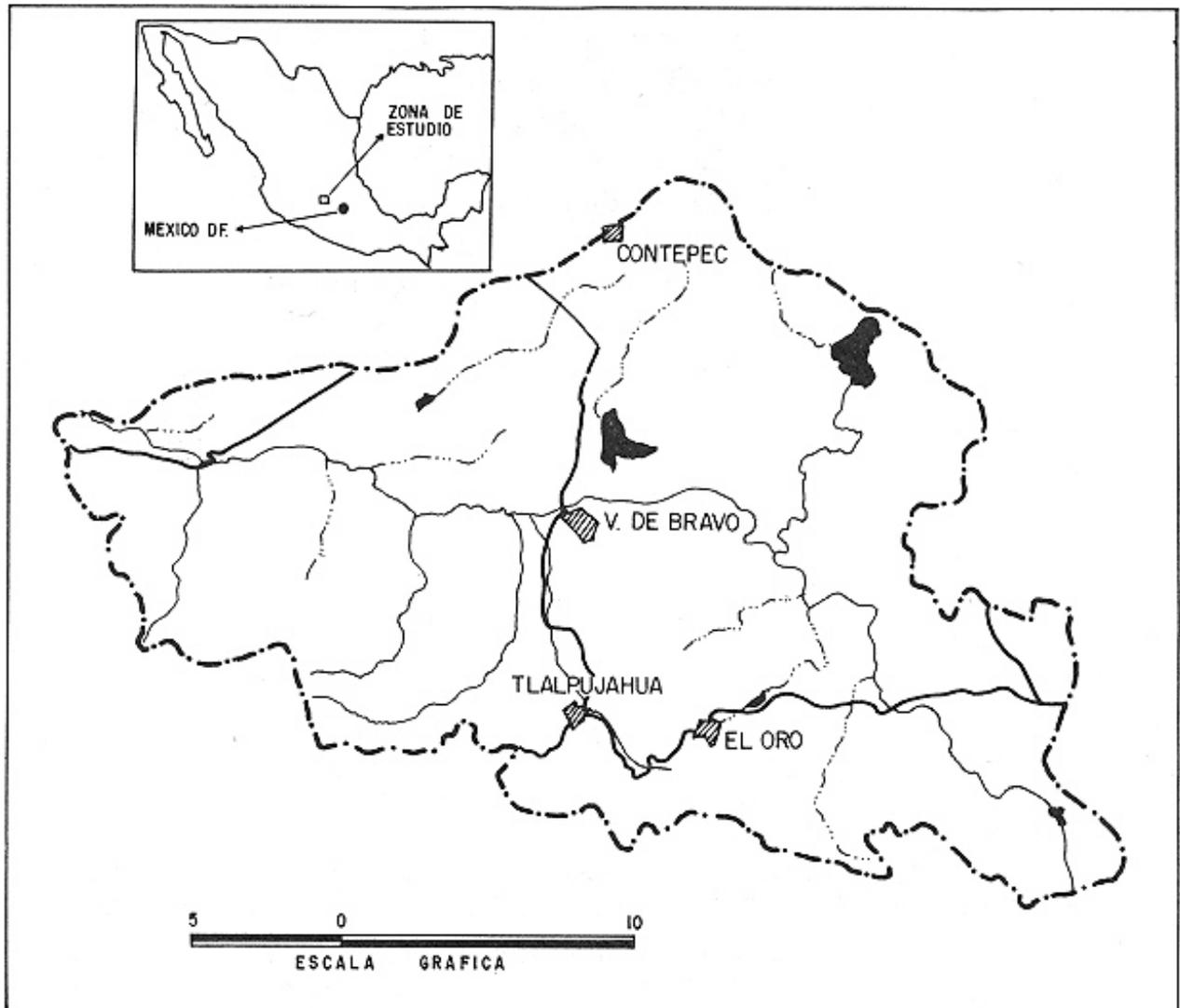


Fig. 1. Mapa de localización

dada la permeabilidad de los materiales volcánicos explican este relativamente bajo coeficiente de escurrimiento a nivel de la cuenca.

Las características climáticas y el material parental dan como resultado la presencia de los siguientes tipos de suelos (según DGG, 1979, clasificación FAO modificada):

LITOLOGIA	CLASES DE SUELOS PRINCIPALES	DURIPANES
Metamórficos, cretácico	luvisoles	no
Volcánicos, pleistoceno temprano	acrisoles, luvisoles, litosoles, andosoles	si
Volcánicos, pleistoceno medio	vertisoles	si
Volcánicos, pleistoceno tardío	planosoles, vertisoles, andosoles	si
Depósitos aluviales y lacustres	fluvisoles, vertisoles, gleysoles	no

Cuadro 1. Relaciones entre material parental, suelos y duripanes.

Las evidencias de campo han indicado la dominancia de los flujos subsuperficiales en los terrenos volcánicos, favorecidos por la presencia de costras duras subyaciendo horizontes de buena permeabilidad. Este tipo de escurrimiento controla la génesis y, en buena medida, el desarrollo de la erosión en cárcavas en la cuenca.

La particular evolución tectónica de la zona ha permitido una mineralización muy intensa y una importante explotación minera desde la época colonia. El último auge fue hacia principios del siglo XX, en el distrito de El Oro. Esta explotación minera conllevó una fuerte deforestación de las zonas aledañas a las localidades de Tlalpujahuá y El Oro; como consecuencia, se desencadenaron, seguramente, procesos erosivos acelerados muy intensos en las laderas de la unidad metamórfica.

El uso actual del suelo se presenta en el cuadro 2. Es importante destacar que, si bien la población en la zona disminuyó drásticamente (90 000 habitantes a fines del siglo pasado, 20 000 en 1975; datos para el distrito El Oro, según el Gobierno del estado de México, 1976), la densidad de la población sigue siendo relativamente alta para una zona rural (110 habitantes por km², Gobierno del estado de México, 1976). Esto tiene, necesariamente, implicaciones en el desarrollo de la erosión.

TIPO DE USO DEL SUELO	AREA (KM ²)	%
Agricultura de temporal	232	47
Bosque mixto (encino/pino)	117	24
Pastos	87	18
Agricultura de irrigación	50	10
Presas	4	1
TOTAL	490	100

Cuadro 2. Cuantificación del uso del suelo (modificado de DGG, 1984; calculado usando el programa AREA (Donker, s/f))

3. Cartografía morfogenética.

3.1 Descripción de las unidades

La leyenda del mapa morfogenético se presenta en el cuadro 4. Ocho elementos de paisaje se utilizaron para describir en forma sistemática las unidades morfogenéticas y para permitir comparaciones rápidas: morfogénesis, morfometría, morfografía, morfohidrología, morfodinámica, tipo de roca, características del suelo y uso de suelo dominante.

Los parámetros morfométricos (cuadro 5, ítem 3) son valores promedio (en metros y grados), seguidos de su coeficiente de variación en porcentajes. Cuando fue posible, se incluyó la densidad de drenaje en km/km^2 (tomada de Lugo, 1981). Parte de la información litológica se tomó de la Dirección General de Geografía (DGG, 1978); los datos de suelos se obtuvieron de DGG, 1978. Los rangos de pendiente y relieve fueron establecidos según se indica en el cuadro 3.

PENDIENTE (GRAD.)	RANGO DE PENDIENTE (CLASE)	AMPLITUD DEL RELIEVE (M)	RANGO DE RELIEVE (CLASE)
0-2	Plana o casi plana	0-20	Plano o casi plano
2-4	Suave	20-50	Ondulado
4-8	Moderada	30-100	Ondulado a lomerío
8-16	Moderadamente fuerte	70-150	Lomerío a colina
16-35	Fuerte	> -150	Colina a montaña

Cuadro 3. Rangos de pendiente/relieve (modificado de van Zuidam y van Zuidam C., 1979:7)

3.2 Conclusiones

El volcanismo cuaternario y la actividad neotectónica están presentes en la génesis de todas las unidades geomórficas, con excepción de una porción de las unidades metamórficas, los piedemontes no tectonizados (denudatorios) y las planicies fluviales. Las planicies lacustres y fluvio-lacustres ocupan, en general, depresiones tectónicas.

Una primera inspección de la distribución espacial de los acarvamientos indica que:

a) estos rasgos erosivos son visibles en fotos aéreas 1:50 000; b) no se percibe a esta escala de trabajo una relación espacial clara entre rasgos erosivos y actividad neotectónica; c) la mayor parte de la erosión acelerada ocurre en las laderas metamórficas y en superficies cumbreles y laderas suaves de unidades volcánicas de pleistoceno temprano y tardío; en ambos casos, donde se acumulan considerables cantidades de materiales superficiales (metamórficos alterados, tefra).

Por estas razones, es posible concluir que:

- Un inventario de erosión acelerada se puede realizar con precisión a partir de fotos aéreas a escala 1:50 000.

- A. FORMAS DEL RELIEVE DE ORIGEN VOLCÁNICO
 - 1.0 ESTRATOVOLCANES ANDESÍTICOS DEL PLEISTOCENO TEMPRANO
 - 2.0 CONOS MONOGENÉTICOS DEL PLEISTOCENO TARDÍO
 - 2.1 ESCORIACEOS
 - 2.2 LAVICOS
 - 3.0 FLUJOS VOLCÁNICOS
 - 3.1 ANDESÍTICOS DEL PLEISTOCENO TEMPRANO
 - 3.1.1 SUPERFICIES CUMBRALES
 - 3.1.2 LADERAS
 - 3.2 IGNIMBRÍTICOS DEL PLEISTOCENO MEDIO
 - 3.2.1 SUPERFICIES CUMBRALES
 - 3.2.2 LADERAS
 - 3.3 ANDESÍTICOS DEL PLEISTOCENO TARDÍO
 - 3.3.1 SUPERFICIES CUMBRALES
 - 3.3.2 LADERAS
 - 3.4 CAMPOS BASÁLTICOS DEL PLEISTOCENO TARDÍO
 - 3.4.1 CON COBERTURA (> 1 m) DE PIROCLASTOS
 - 3.4.2 SIN COBERTURA DE PIROCLASTOS
- B. FORMAS DEL RELIEVE DE ORIGEN NEOTECTÓNICO
 - 4.0 ESCARPE DE FALLA REGIONAL (METAMÓRFICO)
 - 5.0 FLUJOS ANDESÍTICOS Y BASÁLTICOS TECTONIZADOS
 - 5.1 SUPERFICIES CUMBRALES
 - 5.2 LADERAS
 - 6.0 PIEDEMONTES TECTONIZADOS
- C. FORMAS DEL RELIEVE DE ORIGEN TECTÓNICO/DENUDATORIO
 - 7.0 CUMBRES Y LADERAS TECTÓNICO/DENUDATORIAS PRE-PLEISTOCÉNICAS EN METAMÓRFICOS
 - 7.1 SUPERFICIES CUMBRALES
 - 7.2 LADERAS
- D. FORMAS DEL RELIEVE DE ORIGEN DENUDATORIO
 - 8.0 CUMBRES Y LADERAS DENUDATORIAS PRE-PLEISTOCÉNICAS EN METAMÓRFICOS
 - 8.1 SUPERFICIES CUMBRALES
 - 8.2 LADERAS
 - 8.3 PIEDEMONTES
 - 9.0 PIEDEMONTES ACUMULATIVOS VOLCÁNICOS CON SUPERFICIES DE EROSIÓN LOCALES, CUATERNARIO TARDÍO
- E. FORMAS DEL RELIEVE DE ORIGEN FLUVIAL Y LACUSTRE
 - 10.0 PLANICIES ACUMULATIVAS, CUATERNARIO TARDÍO
 - 10.1 PLANICIES FLUVIALES
 - 10.2 PLANICIES FLUVIO-LACUSTRES
 - 10.3 PLANICIES LACUSTRES

Cuadro 4. Leyenda del mapa morfogenético

A manera de ejemplo, en el cuadro 5 se presenta la descripción de una de las unidades de mapeo.

1. (Sub)Unidad: (3.4.1) Campos basálticos con cobertura (> 1 m) de piroclastos.
2. Morfogénesis/edad: volcánico/pleistoceno tardío.
3. Morfometría:
 - 3.1 Altitud máxima: 2 310 m (4.2%)
 - 3.2 Altitud mínima: 2 260 m (3.9%)
 - 3.3 Amplitud relieve: 50 m
 - 3.4 Pendiente: 3 grados (52.0%)
 - 3.5 Longitud pendiente: 1 190 m (43.2%)
 - 3.6 Rango pendiente/relieve: suave/ondulado
4. Morfografía
 - 4.1 Situación topográfica: laderas medias y bajas
 - 4.2 Forma de la pendiente (perfil/planta): recta/convexa
5. Morfohidrología:
 - 5.1 Densidad del drenaje: ligeramente disectada (< 1 km/km²)
 - 5.2 Patrón del drenaje: paralelo (incipiente)
 - 5.3 Observaciones: los basaltos pueden actuar como capa de control de la infiltración.
6. Morfodinámica:
 - 6.1 Erosión geológica (tipo/intensidad): barrancos/baja
 - 6.2 Erosión acelerada: acarcavamientos
 - 6.3 Remoción en masa (tipo/intensidad): ausente
7. Litología y materiales:
 - 7.1 Sustrato/edad: basaltos/pleistoceno tardío
 - 7.2 Depósitos superficiales: tefra retrabajada
 - 7.3 Duripanes: localmente, silcretas
 - 7.4 Espesor corteza alteración: < 50 cm
8. Suelos:
 - 8.1 Clase FAO dominante: planosoles, vertisoles
 - 8.2 Espesor: 50-100 cm
 - 8.3 Textura: fina
9. Uso del suelo dominante: agricultura de temporal

Cuadro 5. Descripción de una unidad morfogénica

CODIGO	UNIDAD MORFOGENETICA	CANT. MEDIC.	ALT. MAX. PROM. DS	ALT. MIN. PROM. DS	AMP. REL. PROM. DS	PENDIENTE PROM. DS	LONG. PTE PROM. DS
A.	UNIDADES DE ORIGEN VOLCANICO						
1.0	ESTRATOVOLCANES	9	3040	112 2680	201 360	112 18	4.5 1210 636
2.0	CONOS MONOGENETICOS	13	2520	177 2410	128 110	56 15	5.4 400 114
3.1	FLUJOS ANDESITICOS DEL PLEISTOCENO TEMPRANO						
3.1.1	SUP. CUMBRALES	11	2870	56 2740	123 130	122 3	1.4 1610 634
3.1.2	LADERAS	6	2770	50 2650	63 120	27 18	7.2 380 143
3.2	FLUJOS IGNIHIBRITICOS DEL PLEISTOCENO MEDIO						
3.2.1	SUP. CUMBRALES	4	2590	101 2520	68 80	36 4	1.5 1310 125
3.2.2	LADERAS	4	2500	71 2440	63 60	25 22	7.5 180 86
3.3	FLUJOS ANDESITICOS DEL PLEISTOCENO TARDIO						
3.3.1	SUP. CUMBRALES	11	2770	89 2730	95 40	26 6	2.4 380 231
3.3.2	LADERAS	5	2690	108 2520	84 170	28 24	3.4 390 96
3.4	CAMPOS BASALTICOS DEL PLEISTOCENO TARDIO						
3.4.1	CON CUB. TEFRA	6	2310	96 2260	89 50	34 3	1.5 1190 515
3.4.2	SIN CUB. TEFRA	8	2270	101 2220	94 50	29 6	2.0 650 495
B.	UNIDADES DE ORIGEN NEOTECTONICA						
4.0	ESCARPE FALLA REGIONAL	8	2530	102 2340	88 200	79 22	5.1 500 189
5.0	FLUJOS ANDESITICOS Y BASALTICOS TECTONIZADOS						
5.1	SUP. CUMBRALES	7	2640	81 2570	64 60	25 4	2.8 1160 782
5.2	LADERAS	10	2580	69 2480	89 100	44 26	6.0 210 79
6.0	PIEDEMONTES TECTONIZADOS	13	2520	162 2420	167 90	39 7	2.1 880 332
C.	UNIDADES DE ORIGEN TECTONICO/DENUDATORIO						
7.0	CUMBRES Y LADERAS PRE-PLEISTOCENO (METAMORFICAS)						
7.1	SUP. CUMBRALES	8	2670	50 2630	31 40	28 4	2.2 660 354
7.2	LADERAS	8	2610	30 2540	24 70	16 21	5.4 190 51
D.	UNIDADES DE ORIGEN DENUDATORIO						
8.0	CUMBRES Y LADERAS DENUDATORIAS PRE-PLEISTOCENO (METAMORFICAS)						
8.1	SUP. CUMBRALES	11	2660	39 2630	40 30	17 3	1.6 450 138
8.2	LADERAS (*)	10	2620	39 2540	23 70	39 8	2.1 510 180
9.0	PIEDEMONTES ACUMULATIVOS CON SUP. ERUSION	14	2430	140 2330	155 100	41 5	2.1 1310 738
E.	UNIDADES DE ORIGEN FLUVIAL Y LACUSTRE						
10.0	PLANICIES ACUMULATIVAS DEL CUATERNARIO TARDIO (**)	12	2420	196 2400	198 20	12 1	0.7 1400 0

(*) Incluye piedemontes (**) Incluye planicies fluviales y lacustres
Cuadro 6. Parámetros morfométricos por unidad: promedios y desviaciones estándar de altitudes máxima y mínima, amplitud del relieve, pendiente y longitud de pendiente (valores en metros y grados)

- Las unidades geomorfológicas pueden reagruparse, de manera pragmática, sin necesidad de considerar los aspectos neotectónicos.

- En cambio, el énfasis debe ponerse sobre la disponibilidad de materiales superficiales susceptibles a los abarrancamientos.

4. Tratamiento estadístico de los datos morfométricos.

El análisis de la cartografía morfogenética proporciona un conocimiento básico de las características del paisaje, que es muy útil como punto de partida para posteriores levantamientos de geomorfología aplicada (Verstappen, 1983).

En esta parte se propone un análisis cuantitativo de las unidades morfogenéticas (ver cuadro 4) para su utilización en estudios de erosión acelerada.

Varios parámetros (atributos) morfométricos fueron medidos en forma sistemática sobre la carta topográfica (escala 1:50 000; intervalo de las curvas de nivel, 10 m; DGG, 1976), para cada unidad morfogenética. Los datos obtenidos fueron sometidos a tratamiento estadístico utilizando un paquete estándar HP a nivel PC. Los resultados se presentan en el cuadro 6. Las 23 unidades originales (cuadro 4) fueron agrupadas en 20 clases; el número total de observaciones fue de 178.

4.1 Resultados del análisis de varianza.

Se aplicó análisis de varianza (ANOVA) con el objetivo de analizar la significatividad de las decisiones tomadas durante la fotointerpretación; es decir, para evaluar la homogeneidad interna de las unidades de mapeo. Los resultados se presentan en el cuadro 7.

ATRIBUTO	F	BARTLETT	TUKEY
1. Altitud máxima	23.05	76.38	202.58
2. Altitud mínima	15.02	91.23	211.76
3. Amplitud del relieve	18.03	119.76	95.50
4. Pendiente	44.37	101.44	6.59
5. Longitud de la pendiente	11.73	144.95	728.92

Cuadro 7. Resultados del análisis de varianza

Los valores de F son mucho mayores que el valor crítico de 1.6 (obtenido para 19 y 158 grados de libertad, con 95% de significatividad; Freese, 1984:169). Esto significa que la hipótesis nula (H_0) de que ninguna de las medias difiere en forma significativa de las demás, puede ser rechazada en favor de la hipótesis alternativa (H_1) de que al menos una de las medias difiere en forma significativa de las otras. Nótese que el valor mayor de F corresponde a pendiente.

El test de Bartlett fue aplicado para analizar la homogeneidad de la varianza, una de las condiciones para aplicar ANOVA (Dixon y Massey, 1969:308-310). Los valores son muy superiores (cuadro 7) que 30.1, el valor crítico de Chi cuadrado para 19 grados de libertad con 95% de significatividad. Esto implica que este requerimiento de homogeneidad no fue satisfecho. Por tanto, los resultados de este análisis, si bien no descartables, deben ser considerados con cautela.

El test de Tukey (que proporciona el parámetro R) fue utilizado para medir la significatividad entre las medias individuales (Kendall y Stuart, 1968: 43-44). El valor R es una medida de la diferenciación (o su recíproca, la sobreposición) de las medias de cada atributo por unidad de mapeo. Cuanto mayor sea el valor, tanto mayor es la sobreposición. Con los resultados del test de Tukey se elaboraron gráficas de dispersión (figs. 2 y 3). Se seleccionaron tres atributos: amplitud de relieve (que implica altitudes máxima y mínima), pendiente y longitud de la pendiente.

Estas figuras se acompañan, para su análisis, del cuadro 8.

CODIGO	PENDIENTE (CLASE)	RELIEVE (CLASE)
1.0.0	Moderadamente fuerte a fuerte	Colina a montaña
2.0.0	Moderadamente fuerte	Lomerío a colina
3.1.1	Suave	Ondulado
3.1.2	Fuerte	Lomerío a colina
3.2.1	Suave	Ondulado
3.2.2	Fuerte	Colina
3.3.1	Moderada	Ondulado
3.3.2	Fuerte	Colina
3.4.1	Suave	Ondulado
3.4.2	Moderada	Ondulado a lomerío
4.0.0	Fuerte	Colina
5.1.0	Suave	Ondulado
5.2.0	Fuerte	Colina
6.0.0	Moderada	Ondulado a lomerío
7.1.0	Plana a suave	Plano a ondulado
7.2.0	Fuerte	Colina
8.1.0	Suave	Ondulado
8.2.0	Suave a moderada	Ondul./lomerío a lomerío/colina
9.0.0	Suave	Ondulado a colina
10.0	Plana o casi plana	Plana o casi plana

Cuadro 8. Rangos de pendiente y relieve por unidad morfogenética (cuadro 4).
Los rangos cuantitativos para cada clase se dan en el cuadro 3.

4.2 Discusión.

a) La graficación de la pendiente contra la amplitud de relieve (fig. 2), da el mejor agrupamiento de unidades de mapeo morfológicamente similares, independientemente de su génesis y de la litología. El grupo de relieve ondulado está compuesto por las superficies cumbrales de los flujos lávicos (con excepción de los más antiguos), las superficies cumbrales en metamórficos y los campos basálticos con cobertura de tefra. El grupo de relieve ondulado a colina está compuesto por las superficies cumbrales de los flujos lávicos más antiguos, la porción tectónico/denudatoria de las laderas metamórficas, los campos basálticos sin cobertura de tefra y los piedemontes. El grupo lomerío a colina está compuesto por los conos monogenéticos y por las laderas de los flujos volcánicos más antiguos. El grupo colina está formado por el escarpe de falla, la porción denudatoria de las laderas metamórficas y por las laderas ignimbríticas y laderas de flujos volcánicos más jóvenes.

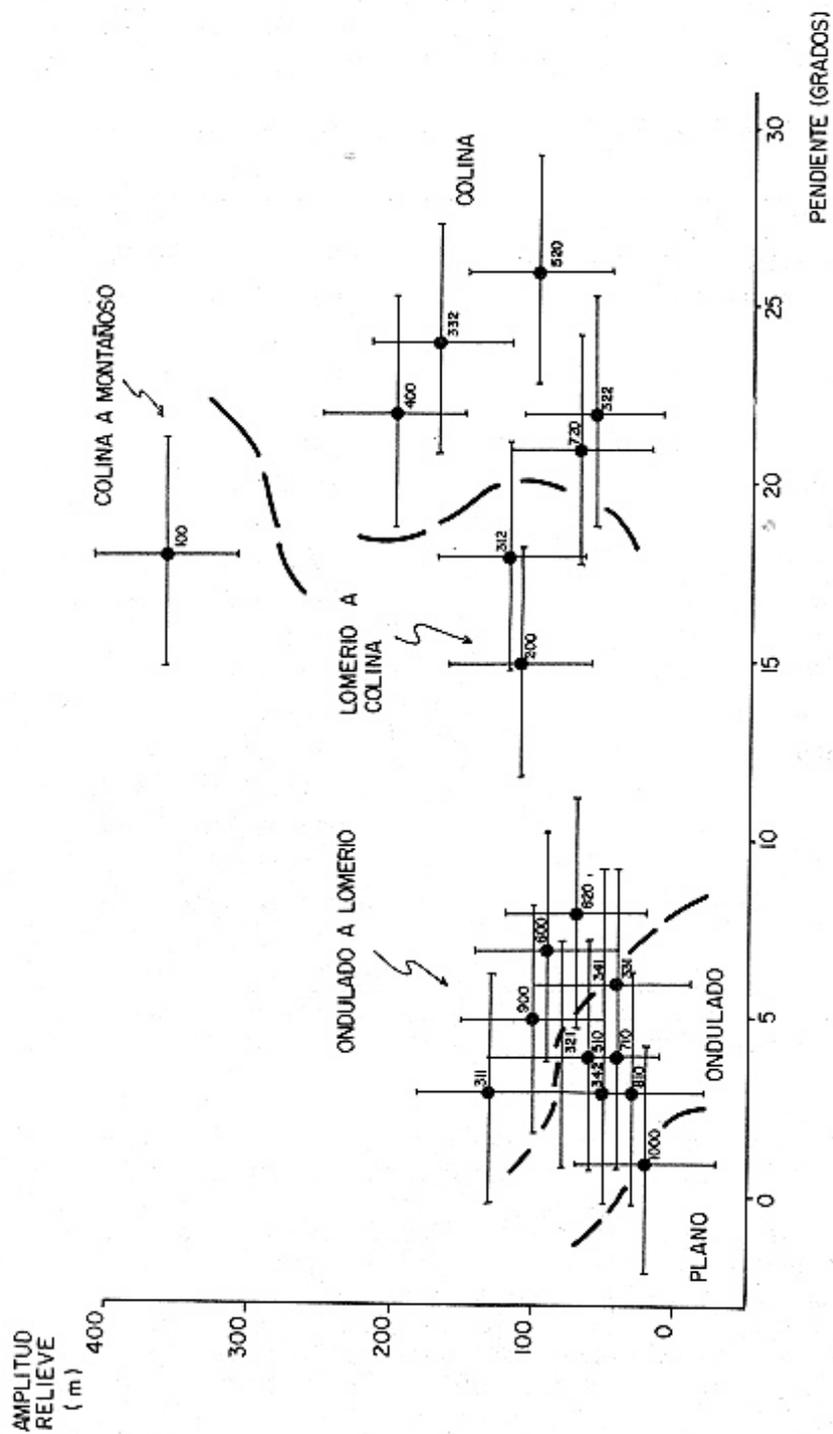


Fig. 2. Pendiente media contra amplitud de relieve, utilizando R como una medida de dispersion

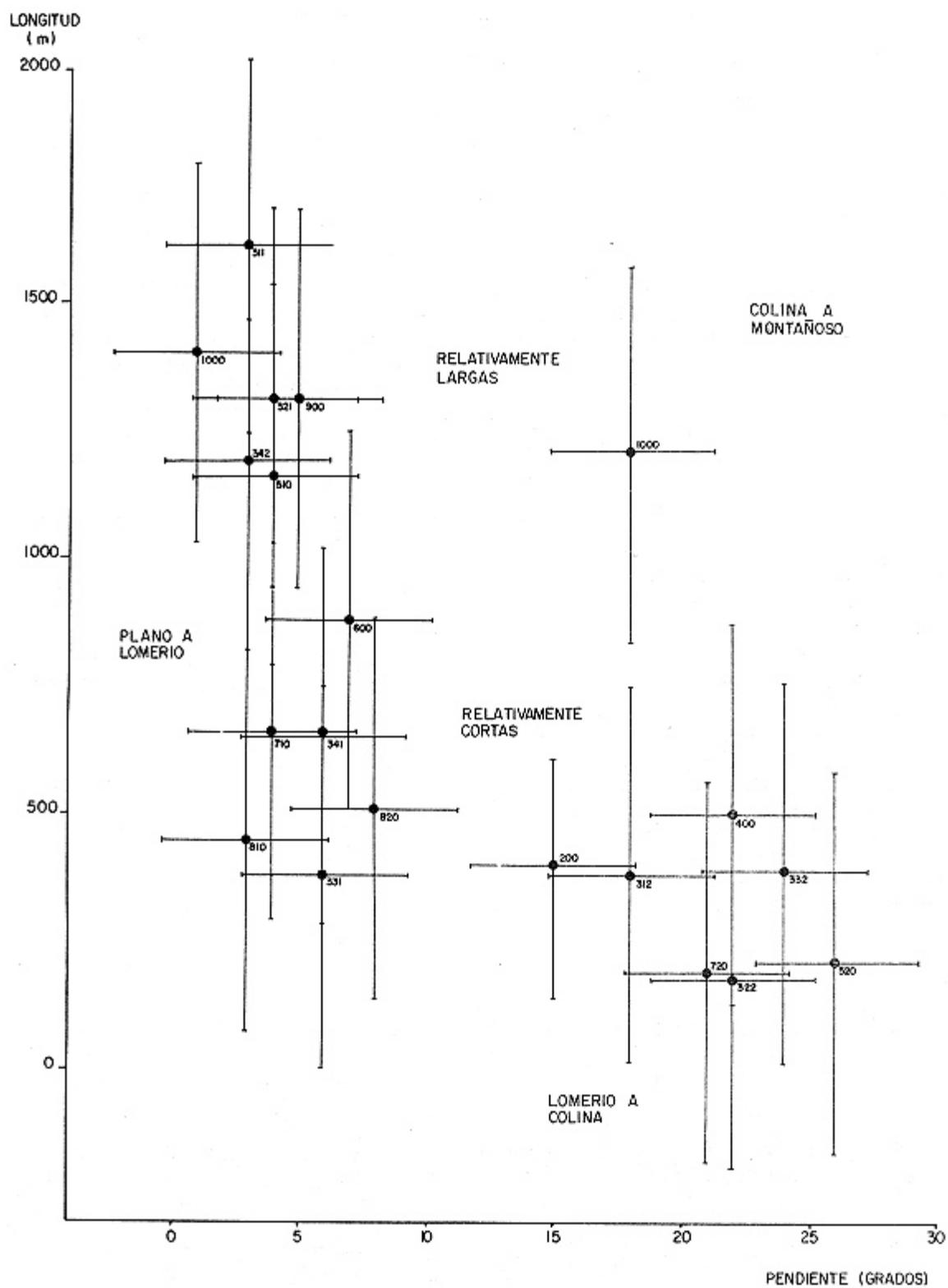


Fig. 3. Pendiente media contra longitud de la pendiente, utilizando R como medida de dispersión

Es claro que cuanto más jóvenes los flujos, tanto más planas sus cumbres y más fuertes las pendientes de sus laderas. Nótese, asimismo, que las pendientes más fuertes (> 26 grados) pertenecen al grupo de flujos lávicos neotectonizados. En forma análoga, las laderas tectónico/denudatorias metamórficas son más fuertes que las laderas denudatorias. Obviamente, el tectonismo explica esta diferencia.

Los estratovolcanes y las planicies quedan completamente separadas. Las características morfológicas distintivas de ambas unidades quedan claramente indicadas: pendientes fuertes y alta amplitud del relieve para los primeros; pendientes planas o casi planas y baja amplitud del relieve para las segundas.

En síntesis, las unidades planas y onduladas tienen pendientes suaves y muy poca amplitud de relieve. El grupo ondulado a lomerío tiene pendientes ligeramente más fuertes y mayor amplitud del relieve. Ambos grupos quedan bien diferenciados del grupo lomerío a colina, que presenta pendientes más fuertes, si bien la amplitud de relieve es similar. El grupo colina presenta un incremento en pendiente y parcialmente en amplitud de relieve. Por tanto, no hay correlación entre pendiente y amplitud de relieve excepto en los casos extremos (plano a ondulado y colina a montaña). Entonces, una gran población (unidades de ondulado a colina) sólo puede ser diferenciada con base en la pendiente.

b) Al graficar pendiente contra longitud de la pendiente (fig. 2), la diferenciación entre los grupos plano, ondulado y ondulado a lomerío ya no es posible, porque estaba basada en la amplitud de relieve. El grupo plano a lomerío se ubica en el área de la gráfica de pendiente baja; sólo puede ser diferenciado por la longitud de la pendiente: la frontera se ubica entre los 800 y 900 metros. En general, los flujos volcánicos se localizan en la porción de las pendientes más largas, excepto por los flujos andesíticos más recientes. Las planicies y la mayoría de los piedemontes también se localizan en el área de las pendientes largas. Los grupos lomerío a colina y colina se localizan en la porción de pendientes más fuertes pero más cortas de la gráfica.

En síntesis, no hay correlación entre pendiente y longitud de la pendiente. Este hecho se explica, básicamente, por la presencia de pendientes largas y fuertes de los estratovolcanes y por las pendientes relativamente suaves y cortas de las laderas denudatorias metamórficas. El resto de las pendientes cortas y suaves consiste en superficies cumbrales. Su comportamiento es entonces diferente de las laderas, donde una baja amplitud de relieve debería correlacionarse con laderas suaves y largas.

4.3 Conclusiones.

- Técnicas estadísticas simples aplicadas a atributos seleccionados del relieve medidos sobre el mapa topográfico proporcionan una herramienta importante en la caracterización y comparación de propiedades intrínsecas de las unidades de mapeo.

- El análisis prueba que las observaciones realizadas pertenecen a diferentes poblaciones y que su variación no puede ser explicada por la variabilidad interna de una de ellas.

- El análisis de varianza da una idea objetiva de cuáles atributos son más significativos en la diferenciación entre las unidades de mapeo. En este caso, la

pendiente proporciona una buena separabilidad, la amplitud de relieve una separabilidad media y la longitud de la pendiente resulta pobre.

- El tratamiento estadístico ha probado que los criterios morfológicos y morfogenéticos utilizados durante la fotointerpretación son razonablemente buenos. Asimismo, han proporcionado una base simple y comprensiva para el reagrupamiento de las unidades de mapeo para el inventario de erosión. Las conclusiones estadísticas solamente no justifican todo el proceso de toma de decisiones, pero permiten agrupar unidades de manera pragmática, caracterizadas objetivamente. Las nuevas unidades geomorfológicas, útiles como contexto para elaborar un inventario de erosión, se presentan en el cuadro 9.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece la colaboración de Arturo Recéndiz en la elaboración de las figuras, de José L. Palacio y Lorenzo Vázquez en el trabajo de campo, de N. Donker en el procesamiento de datos, Mario A. Ortiz en la revisión del manuscrito y de Bárbara Hernández en la mecanografía. Esta investigación fue financiada por la UNAM y el Gobierno de Holanda. El Instituto de Geografía (UNAM) proporcionó la infraestructura para el trabajo de campo. El Dr. H.T. Vertappen supervisó globalmente el proyecto.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Acosta del C., C. 1971. "Some practical results of remote sensing over Test Site 701, El Oro-Tlalpujahua, México". Proc. Int. Workshop on Earth Resources Survey Systems. 1:203-210. NASA. Ann Arbor.
- Arzate, F. 1971. "Remote sensing program at Test Site 701, El Oro-Tlalpujahua, México". Proc. Int. Workshop on Earth Resources Survey Systems. 1:211-213. NASA. Ann Arbor.
- Bocco, G. 1986. Aspects of the Anthropic Erosion in the Tlalpujahua river basin, central Mexico: An Applied Geomorphological Approach. Tesis de Maestría no publicada. ITC. Enschede.
- Campos, A. 1986. "Cartografía de la erosión en el municipio de Casautlán, Ver.". Resúmenes de la I Reunión Nacional de Geomorfología. Instituto de Geografía. UNAM. México.
- Demant, A. 1981. L'Axe Néo-volcanique Transmexicain. Etude volcanologique et pétrographique. Signification géodynamique. Tesis III Ciclo. Aix-en-Marseille.
- Dirección General de Geografía (DGG). 1976. Carta topográfica "El Oro de Hidalgo". 1:50 000. SPP. México.
- _____ 1978. Carta Geológica "El Oro de Hidalgo". 1:50 000. SPP. México.
- _____ 1979. Carta Edafológica "El Oro de Hidalgo". 1:50 000. SPP. México.
- _____ 1983. Carta Hidrológica "Morelia". 1:250 000. SPP. México.
- _____ 1984. Carta de Uso del Suelo y Vegetación "Morelia". 1:250 000. SPP. México.

- Dixon, W. and F. Massey. 1969. Introduction to Statistical Analysis. McGraw Hill. N. York.
- Donker, N. s/f. AREA. Computer program for area calculations. BASIC. ITC. Enschede.
- Freese, F. 1984. Statistics for Land Managers. Paeony Press. Jedburgh.
- Fries, C., C.S. Ross y A. Obregón. 1965. "Mezcla de vidrios en los derrames cineríficos Las Américas de la región de El Oro Tlalpujahua, edos. Méx. y Mich., parte centro-meridional de México". Boletín del Instituto de Geología 70. UNAM. México.
- García, E. 1981. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana). Instituto de Geografía, UANM. México.
- Gobierno del Estado de México. 1976. Panorama Socioeconómico en 1975. México.
- Kendall, M. y A. Stuart. 1968. The Advanced Theory of Statistics. Vol. 3. Griffin. Londres.
- Lugo, J. 1981. "La disección del relieve en la porción centro-oriental del Sistema Volcánico Transversal". Boletín del Instituto de Geografía, UNAM. México.
- Palacio, J.L. 1986. "Dinámica del torrente El Zaguán, en la vertiente oriental del Nevado de Toluca". Resúmenes de la I Reunión Nacional de Geomorfología. Instituto de Geografía, UNAM. México.
- Secretaría de Agricultura y Ganadería (SAG). 1968. "Conservación del suelo y agua en la montaña La Malinche". Bol. Div. México.
- Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH). 1979. Inventario de Areas Erosionadas en el Estado de Guanajuato. México.
- Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH). 1984. Inventario de los diferentes grados de afectación por erosión en el Estado de Campeche mediante imágenes de satélite escala 1:250 000. Desarrollo Agropecuario DIC SA. México.
- Toy, T. 1982. "Accelerated erosion: processes, problems and prognosis". Geology. 10:524-529.
- Verstappen, H.T. 1983. Applied Geomorphology. Elsevier. Amsterdam.
- Wegener, H. 1979. "La erosión acuática de los suelos en la región Puebla-Tlaxcala". Comunicaciones Proyecto Puebla-Tlaxcala 16. Puebla.
- Zuidam van, R. y F. van Zuidam C. 1979. Terrain Analysis and Classification Using Aerial "Photographs. ITC Text Book VII-6. ITC. Enschede.