



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

---

FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS

COLEGIO DE GEOGRAFÍA

**REGIONES MORFOLÓGICAS DE ATLIXCO**

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

**LICENCIADO EN GEOGRAFÍA**

PRESENTA:

**RAFAEL HERNÁNDEZ BALBUENA**

**ASESOR: DR. JOSÉ FERNANDO ACEVES QUESADA**



CIUDAD UNIVERSITARIA, MÉXICO, D.F., 2015.



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

*A la memoria de mi padre Francisco Hernández Mejía.*

*Dedicada a Vicky Garza por darme la mano y caminar a mi lado.*

## Agradecimientos

A mi asesor, Dr. José Fernando Aceves Quesada por todo su tiempo para que este trabajo fuera realidad, por sus enseñanzas en el manejo del sistema de información geográfica ILWIS y por su amistad.

Al Dr. José I Lugo Hubp por sus valiosos y amplios consejos para dar mejor sentido a este trabajo, su ayuda en la revisión del trabajo me permitió despejar muchas dudas y obtener mejores resultados.

Al Dr. José Luís Palacio Prieto quien revisó el trabajo e hizo comentarios positivos que me ayudaron a mejorarlo, y por ser parte del jurado en mi exámen.

Al Dr. Lorenzo Vázquez Selem por ayudarme a despejar dudas y a que este trabajo finalizara de la mejor forma.

Al Mtro Víctor Manuel Martínez Luna por su ayuda invaluable en la revisión de esta tesis que permitió mejorarla sustancialmente, por sus grandes consejos, y por su plática alentadora.

Al Dr. Mario Arturo Ortiz Pérez por revisar esta tesis, por ser parte del jurado y por esa charla de vivencias en Atlixco en épocas de la infancia.

Al Lic. David Velázquez Mancilla, amigo y compañero quien me facilitó la consulta de libros, mapas y fotos aéreas existentes en el Instituto de Geografía.

# *Regiones Morfológicas de Atlixco*

## **CONTENIDO**

***Introducción.***

***Objetivo General.***

***Metodología.***

***1 Generalidades Físico-Geográficas.***

***1.1 Localización.***

***1.2 Vías de acceso.***

***1.3 Fisiografía.***

***1.4 Clima.***

***1.5 Hidrografía.***

***1.6 Suelos.***

***1.7 Uso de Suelo y Vegetación.***

***2 Geología y Evolución Tectónica.***

***2.1 Geología.***

***2.2 Evolución Tectónica.***

***3 Morfometría.***

***3.1 Introducción.***

***3.2 Análisis Hipsométrico.***

***3.3 Análisis de la Pendiente.***

**3.4 Análisis Hidrográfico.**

**3.5 Análisis de la Erosión Potencial.**

**3.6 Análisis de la Energía del Relieve.**

**3.7 Análisis de la Densidad de la Disección del Relieve.**

**3.8 Análisis de la Profundidad de la Disección.**

**4 Geomorfología.**

**4.1 Mapa de Unidades Morfológicas.**

**5. Conclusiones.**

**6. Bibliografía.**

### ***Introducción.***

El presente trabajo constituye un estudio de Regiones Morfológicas de Atlixco, región localizada en el estado de Puebla, y abarca un área de poco menos de 1000 km<sup>2</sup>.

Los aspectos geológicos y tectónicos de esta región han sido estudiados por Mooser, et al. (1996) en el Nuevo Mapa Geológico de las Cuencas Altas de Toluca, México y Puebla, donde incluye un mapa geológico con el nombre Atlixco.

Existen estudios recientes sobre el volcán Popocatepetl, sobre todo después del inicio del presente período eruptivo en diciembre de 1994, como el de Gómez-Arizmendi (1998), Siebe y Macías-Vázquez (2004), Franco-Ramos (2005 y 2009), Macías-Vázquez (2005), Espinasa-Pereña (2007), Muñoz-Salinas (2007). Por su parte, Silva-Gómez et al., (2002), Bonilla et al. (1995), Tamariz et al. (1996), Méndez-García et al. (2000), Navarro-Frometa et al. (2006), han estudiado la contaminación de manantiales, pozos y ríos de la región de Atlixco, señalando un riesgo de salud para la población y para la actividad agrícola.

Tanarro-García et al. (2004) llevaron a cabo un estudio de los glaciares del Popocatepetl aplicado a prevenir riesgos por lahares. Bollschweiler et al. (2009), estudiaron los anillos de árboles para entender el efecto de lahares que descienden del volcán Popocatepetl.

Para este trabajo se elaboraron mapas morfométricos con el sistema de información geográfica ILWIS 3.4, a partir de las curvas de nivel del mapa topográfico de INEGI (2000b) de la zona estudiada, y se analizaron para medir la cuantificación de los elementos morfométricos que permitieron caracterizar el relieve actual.

Se identificaron 21 unidades morfológicas delimitadas de acuerdo con el origen y tipo de relieve y su aspecto visto en fotografías aéreas y en el modelo digital de elevación, además de la base topográfica y geológica.

**Objetivo General.**

El presente trabajo tiene como objetivo la elaboración de cartografía y el análisis morfométrico de la región de Atlixco, como apoyo para el conocimiento del origen, tipo y edad del relieve.

**Metodología.**

Para su realización el trabajo se dividió en cuatro etapas:

a) En la primera etapa se recopiló la información relacionada con el área y tema estudiados.

La cartografía utilizada fueron las cartas topográfica y temáticas de Atlixco, clave E14B52 elaboradas por el INEGI a escala 1: 50 000.

b) En la segunda etapa se elaboraron los mapas morfométricos con base a las propuestas metodológicas de Palacio-Prieto (1983) y Lugo-Hubp (1988).

El mapa topográfico del INEGI de la zona de estudio se dividió en áreas de 25 km<sup>2</sup> y se cuantificaron los elementos del relieve; la longitud total de los cauces fluviales en km/km<sup>2</sup> (densidad de la disección), de la profundidad de corte vertical en metros (profundidad de la disección) y la diferencia de altura dentro de esta área.

Con los datos obtenidos se elaboraron los mapas densidad de la disección del relieve, profundidad de la disección del relieve y energía o amplitud del relieve con apoyo del sistema de información geográfica ILWIS 3.4.

Los mapas de altimetría, erosión potencial, modelo digital de elevación y pendiente, se construyeron con el sistema de información geográfica (SIG) a partir de la capa de altimetría digital del INEGI. Además se digitalizaron los mapas de clima, uso de suelo y vegetación, geológico, zonas de profundidad de la disección, regiones morfológicas y unidades morfológicas.

c) El análisis e interpretación de fotografías aéreas, de la cartografía elaborada y la observación en campo, se realizó durante la tercera etapa de este trabajo.

d) La última parte consistió en elaborar los mapas regiones morfológicas y unidades morfológicas resultado del análisis e interpretación, con base a la propuesta metodológica de Tapia-Varela y López-Blanco (2001).

El mapa unidades morfológicas se elaboró con base a la delimitación del aspecto del relieve en cartografía, fotografías aéreas, recorridos de campo y su verificación, en imágenes digitales de varias fuentes, tomando en cuenta su origen, tipo y edad.

## **1 Generalidades Físico-Geográficas.**

### **1.1 Localización.**

El área de estudio se localiza en el centro oeste del estado de Puebla, entre los 18°45' y 19°00' de latitud norte y los 98°20' y 98°40' de longitud oeste (Fig. 1). Abarca parte de los municipios de Atlixco, Tochimilco, Tianguismanalco, San Jerónimo Tecuanipan, San Gregorio Atzompa, Santa Isabel Cholula, Ocoyucan, Atzitzihuacán, Acteopan, Tepexmanalco, San Diego La Mesa Tochimiltzingo, y Tepeojuma, del estado de Puebla, y parte del municipio de Tetela del Volcán del estado de Morelos (INEGI 2000a).

Fisiográficamente, la zona de estudio pertenece a la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM) que se extiende unos 900 km desde el estado de Nayarit hasta el estado de Veracruz, ubicándose en la parte oriente de esta provincia (INEGI 2000a).



Figura 1. La zona de estudio está representada por el cuadro en color negro, se localiza en el centro-oeste del estado de Puebla, abarca casi 1000 km<sup>2</sup>.

## **1.2 Vías de Acceso.**

Para llegar a Atlixco, la ciudad más importante de la zona de estudio y que está ubicada casi en su parte central, viajando al oriente, desde la Ciudad de México, se puede tomar la carretera de cuota número 150 o la carretera libre número 190, ambas, con dirección a la Ciudad de Puebla y antes de llegar a esta ciudad se toma la carretera número 190 para llegar a Atlixco, o bien, tomar la autopista para llegar a esta ciudad. Para ingresar a la zona estudiada desde el estado de Morelos, saliendo de Cuernavaca, se viaja con dirección sureste hacia Cuautla, y de esta ciudad, por la carretera número 160, se llega a Jantetelco donde se puede tomar la carretera de cuota número 438 hacia Atlixco, o bien seguir hasta la ciudad de Izúcar de Matamoros y después tomar hacia el norte la carretera número 190 hacia Atlixco.

## **1.3 Fisiografía.**

El relieve de la región de Atlixco está conformado por parte de la ladera SE del volcán Popocatepetl a partir de los 4150 msnm, compuesta por derrames de lava, depósitos de ceniza y, en su parte baja, por depósitos de avalancha de escombros, a 1500 msnm en el límite sur.

La ladera ha sido cortada por las corrientes fluviales que se adaptan a la pendiente en dirección S-SE, tiene una zona intermedia con planicies de depósito aluvial y una zona baja de lomeríos producto de depósitos de avalancha que también están cortados por las corrientes fluviales por lo que ahí se observa una ladera disecada.

El valle de Atlixco es una amplia zona de acumulación de materiales piroclásticos y fluviales donde se localizan los principales asentamientos poblacionales. Esta zona de captación presenta bajos valores de pendiente, por lo que refleja una morfología de planicies de depósito. De este valle sobresalen pequeñas elevaciones de origen sedimentario antiguo, de poco más de 100 m de altura como los Cerros Crustépetl y Xochiltécatl en su parte media, y el Gordo y Cohello en el sur.

Al norte, noreste y este del valle, existen tres grupos de elevaciones de origen volcánico que separan al valle de Atlixco del valle de Puebla, el primero corresponde a las Vulcanitas Atlixco (Mooser, et al. 1996) que son pequeñas elevaciones localizadas al norte de la Ciudad de Atlixco, se levantan unos 200 m, son los Cerros El Charro, Tlapaltepec, Corona, Nanacase, Tecuitlacuelo y El Pochote. Al noreste se localiza la Sierra de San Bernardino que se eleva casi 400 m con la cima de los Cerros Xitlala, Cuaxuyo y Écatl de unos 300 m de altura, el Cerro Ixtacia sólo se eleva 220 m sobre el valle. Al este de Atlixco se localiza la Sierra de Santo Domingo cuya elevación mayor, el Cerro Tilcoayo, alcanza 520 m con respecto del valle de Atlixco.

La Sierra de Tentzo se localiza al SE de la zona de estudio, formada por un anticlinal y una zona de lomeríos de origen sedimentario del Cretácico. La edad y tipo de roca de esta sierra reflejan en las fotografías aéreas y en la imagen digital elevada, un área muy disecada por las corrientes fluviales en la zona de lomeríos y menos erosionada en la parte del anticlinal donde alcanza alturas hasta de 570 m en el Cerro Zoapiltepec, 350 m del Cerro El Tepemecate y de 300 m el Cerro Cuauhjotle, con respecto del valle de Atlixco.

La figura 2, un modelo digital de elevación de la zona estudiada, muestra el contraste de las formas originadas por los agentes creadores y la acción de los modeladores sobre los materiales expuestos en la superficie. La ladera del volcán, construida en varias etapas de actividad, refleja una desigual resistencia de los materiales, de acuerdo con el tipo de roca que la constituye, su edad, el clima, la pendiente, entre otros, factores que contribuyen para que las formas actuales tengan una explicación en la resistencia de los materiales a la erosión.

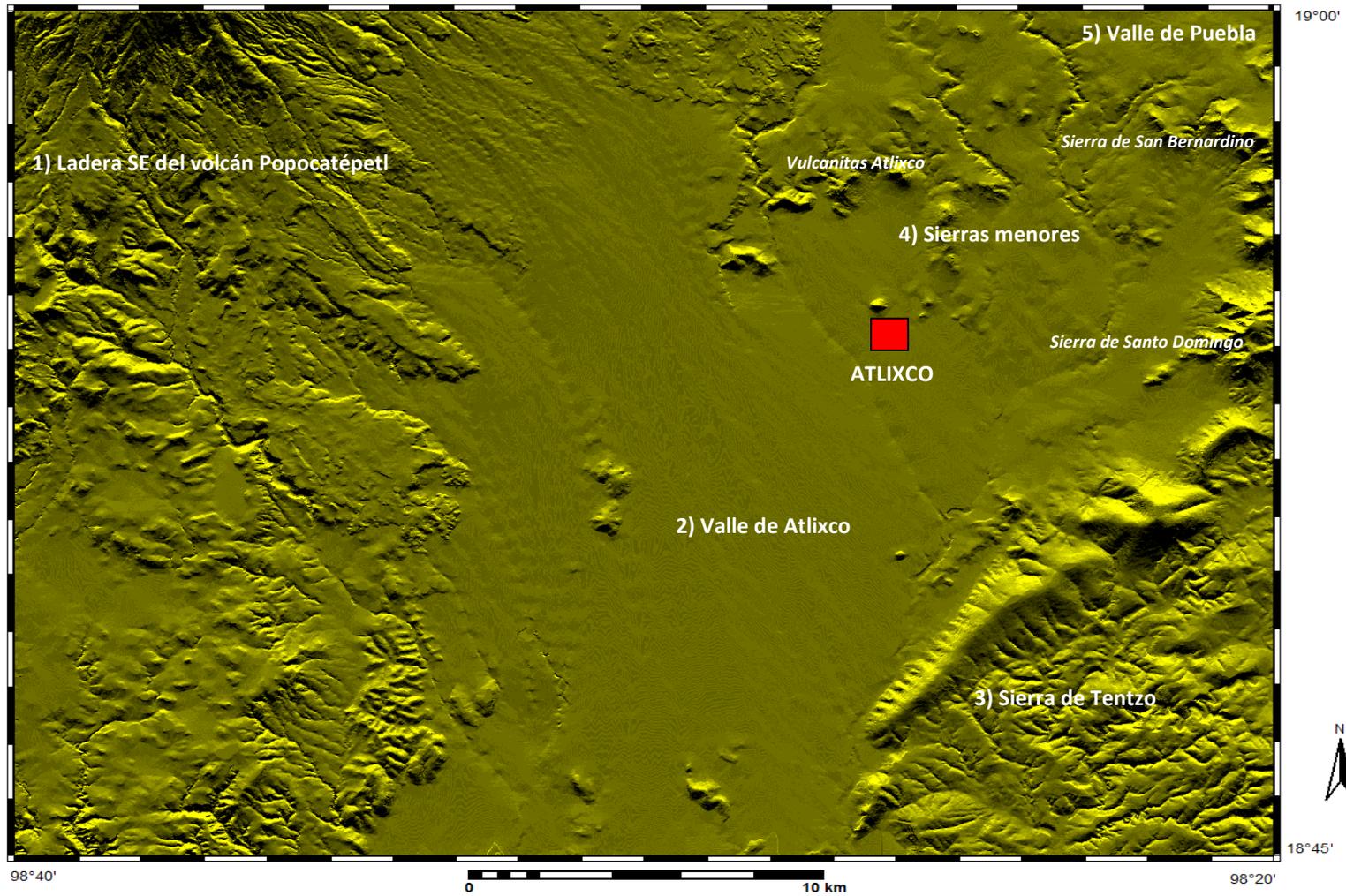


Figura 2. El relieve de Atlixco en general se clasifica en 5 regiones morfológicas: 1) Ladera SE del volcán Popocatepetl, 2) Valle de Atlixco, 3) Sierra de Tentzo, 4) Sierras menores; vulcanitas Atlixco, Sierras de San Bernardino y Santo Domingo, 5) Valle de Puebla.

### **1.4 Clima.**

En la zona estudiada se registran 4 tipos de clima (figura 3) condicionados por la variación de la altitud, y se relacionan con el valle de Atlixco, el piedemonte y la ladera superior del volcán Popocatepetl. La región tiene un clima templado en la mayoría del área que abarca este estudio, sólo se registra clima frío por arriba de los 4000 msnm.

**Clima frío,  $E(T)Hw$ :** Se presenta por arriba de los 4000 msnm, con temperatura media del mes más cálido de entre 0 y 6.5°C, y la temperatura media anual de entre -2 y 5°C. La precipitación total anual va de 800 a 1200 mm. La letra **w** indica que la precipitación máxima se presenta durante el verano. La letra **H** indica que este clima se presenta a grandes altitudes, sólo localizadas en pequeñas extensiones del país (García-Miranda, 1973).

**Clima templado subhúmedo con lluvias en verano,  $Cw_2b'$ :** Se localiza en la zona estudiada desde los 4000 m hasta los 2250 msnm; se caracteriza por presentar un verano largo y fresco, indicado con la **b'**, con temperatura media anual de 13.5°C, la temperatura media anual del mes más cálido, mayo, es de 16°C y la del mes más frío de 11.5°C, en diciembre. La precipitación media anual es de 910 mm, con un máximo en junio, con promedio de 168 mm. La precipitación invernal respecto a la total anual es entre 5 y 10 %. Es el más húmedo de los templados, el índice  $w_2$  significa un cociente P/T mayor de 55.0 (García-Miranda, 1973).

**Clima templado subhúmedo con lluvias en verano de humedad media,  $Cw_1$ :** Se registra en una franja que se extiende desde la cota de 2250 m a los 1600 msnm, con orientación aproximada SW-NE, entre las poblaciones de Tochimilco y San Baltazar Atlimeyaya, como parte norte de la franja, y los poblados Huaquechula y el sur de Atlixco.

Presenta una temperatura media anual de 18.3°C. En el mes de mayo se registra la temperatura promedio más alta con 20.6°C y el mes más frío, enero, tiene un promedio de 15.8°C. Con precipitación media anual de 967 mm, el mes de agosto el más lluvioso, con un promedio de 203 mm.

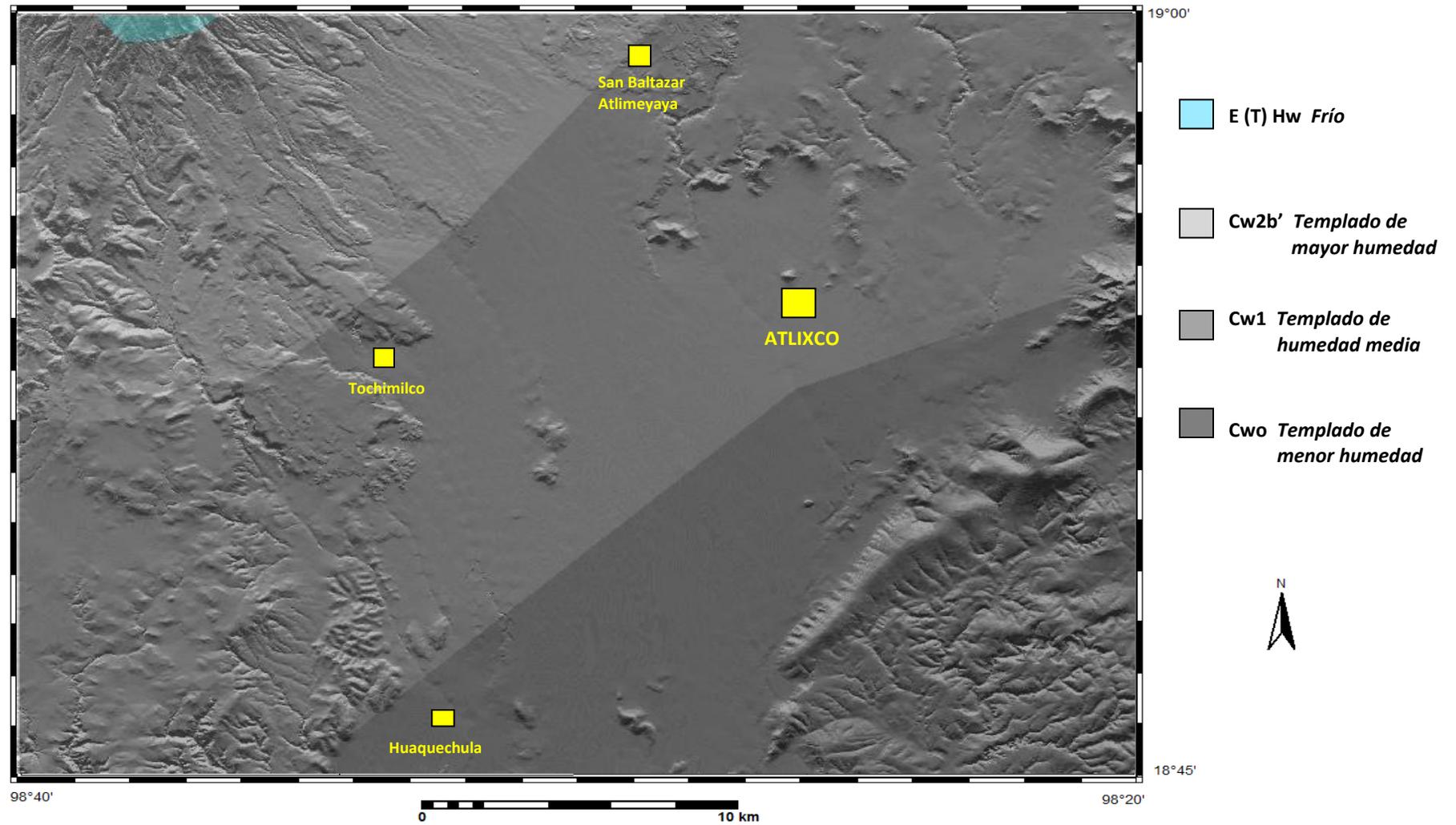


Figura 3. Climas de la región de Atlixco.

Febrero es el mes más seco del año, sólo se registran en promedio 4.1 mm de lluvia. Para este subtipo climático se calculó un cociente P/T de 52.8, señalado con el índice  $w_1$  (García-Miranda, 1973).

**Clima templado subhúmedo con lluvias en verano de menor humedad,  $Cw_0$ :**

Se registra entre los 1600 m de altitud, de Huaquechula y sur de Atlixco al límite sureste de la zona estudiada, es la transición hacia los climas cálidos del sur del estado de Puebla. La temperatura media anual es de 22°C, mayo es el mes más cálido con un promedio de 24.1°C. Enero es el mes más frío del año, con una temperatura promedio de 19.7°C. La lluvia total anual es de 857.5 mm, y es septiembre el mes más húmedo con 183.1 mm de precipitación en promedio. El mes más seco es febrero con 0.5 mm de lluvia. El cociente P/T, indicado con  $w_0$  señala que sólo alcanza valores menores a 43.2 (García-Miranda, 1973).

### **1.5 Hidrografía.**

Todas las corrientes fluviales del área estudiada pertenecen a la subcuenca del Río Nexapa, afluente del Atoyac, una de las 10 cuencas que forman la Región Hidrológica Río Balsas (RH18). De 4 regiones hidrológicas presentes en el estado poblano sólo la región del Río Balsas vierte sus aguas al Océano Pacífico. En territorio poblano sólo están incluidos parcialmente los ríos Atoyac, Balsas-Mezcala, Tlapaneco y Grande de Amacuzac (INEGI 2000a).

La cuenca del Río Atoyac, en el estado de Puebla incluye 9 subcuencas, una de ellas es la del Río Nexapa.

La subcuenca del Río Nexapa nace en la ladera oriental del volcán Popocatepetl y algunos de sus afluentes nacen en la ladera suroriente del volcán Iztaccíhuatl (INEGI 2000a).

La región incluida en este estudio se localiza en la zona tropical del país, aunque tiene clima templado por estar ubicada a más de 2000 msnm. En esta área se registran las mayores precipitaciones en el verano, recibe entre

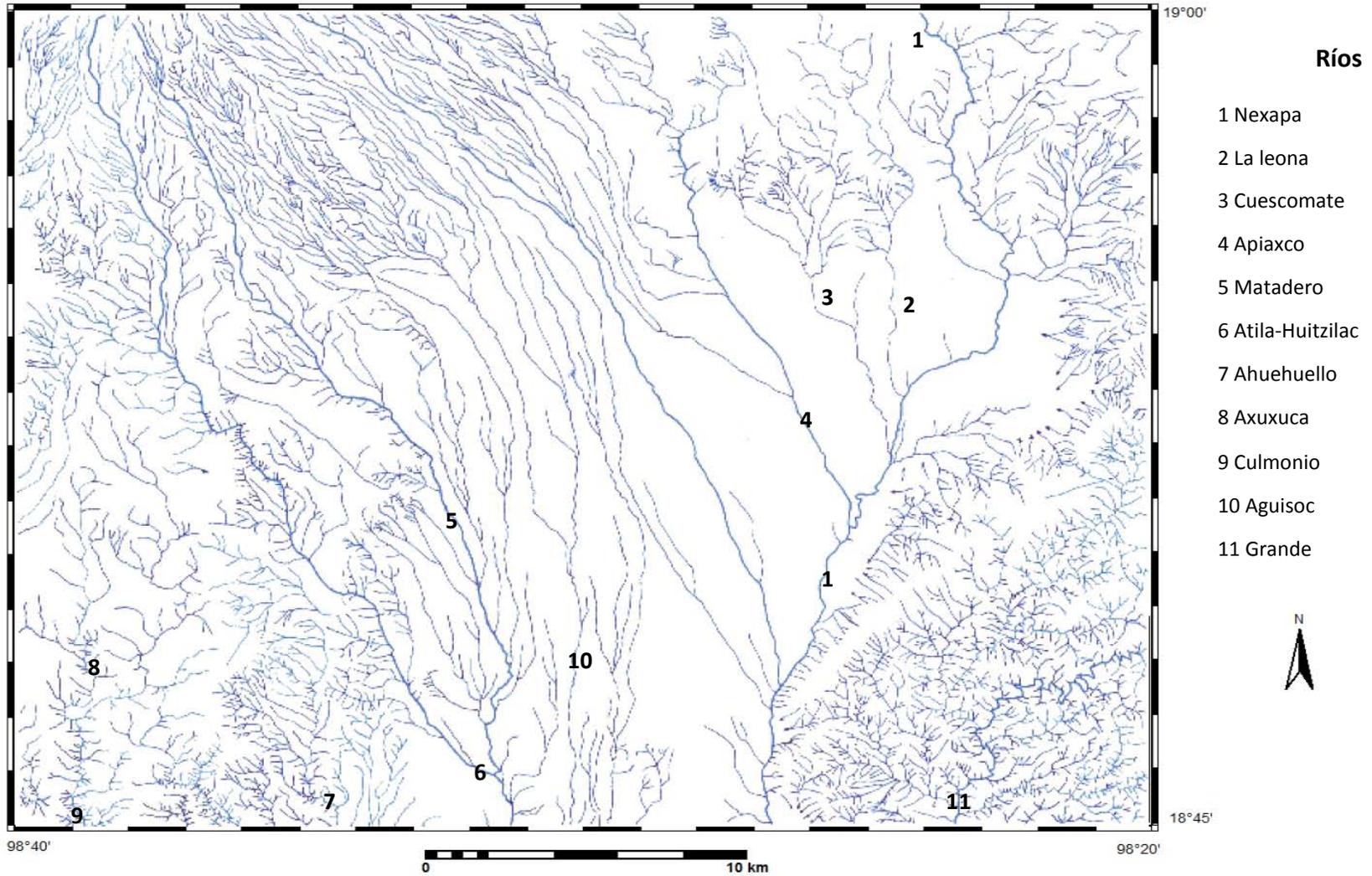


Figura 4. Hidrografía de Atlixco.

860 mm, en la menor altitud y hasta 1200 mm en la parte más alta, por arriba de los 4000 msnm (García-Miranda, 1973).

El régimen pluvial más el agua de deshielo de los volcanes Popocatepetl e Iztaccíhuatl alimentan las corrientes fluviales que descienden de las laderas de estas montañas.

El Río Nexapa fluye marcando el límite entre la roca caliza antigua y los depósitos de origen volcánico más recientes. De manera general las corrientes que se unen al Río Nexapa siguen la dirección NW-SE de la ladera del volcán Popocatepetl. Los ríos de esta región son el Nexapa, La Leona, El Cuescomate, Aguisoc, Matadero, Atila, Ahuehuello, Culmonio y Grande (figura 4).

Silva-Gómez et al. (2002) llevaron a cabo estudios en la región de Atlixco para medir la contaminación del agua de ríos, manantiales y pozos, señalando que los ríos Nexapa, Aguisoc, Apiaxco, entre otros, tienen un grado de contaminación preocupante para la salud humana y para los productos agrícolas que se cultivan en la región. Los autores encontraron presencia de cadmio (Cd), plomo (Pb), cromo (Cr), nitrógeno amoniacal y coliformes fecales (figura 5). Estos mismos autores atribuyen la causa de contaminación al desordenado crecimiento poblacional, al inadecuado sistema de depósito de desechos humanos, al inmoderado uso de agroquímicos para el cultivo de flores y hortalizas, además de las actividades industriales que se desarrollan en las ciudades vecinas de Puebla y Tlaxcala.



Figura 5. Agua turbia y maloliente, a causa de los contaminantes como coliformes fecales, plomo, cromo, agroquímicos, entre otros, corre por el Río Nexapa, al pie de la Sierra de Tentzo.

### **1.6 Suelos.**

Con base en la carta edafológica del INEGI (1983c), los suelos que se presentan en el área de estudio son, principalmente:

*Andosol*: Se desarrolla sobre la ladera volcánica, entre los 2000 y 3100 m, sobre derrames de lava del Popocatepetl.

*Cambisol*: Se localiza al sur del valle de Atlixco, se desarrolla como unidad dominante asociado al suelo *regosol*. Este tipo de suelo también se desarrolla en el límite del valle de Atlixco y el piedemonte de las sierras de San Bernardino y Santo Domingo, se extiende a la zona del valle de Puebla.

*Feozem*: Se encuentra sobre la ladera volcánica desde los 2800 m hasta el límite sur del área de trabajo, como unidad dominante asociado a suelos *cambisol*, *regosol* y *litosol*, así como asociación de suelo dominante *litosol*. También se desarrolla al NE y E de Atlixco como suelo dominante con suelo *vertisol*.

*Fluvisol*: Se desarrolla en la mayor parte del valle de Atlixco, además en asociación con suelo *feozem* al N, W, S y SE de la ciudad de Atlixco.

*Litosol*: Se localiza de los 3200 a 4150 m sobre la ladera superior del volcán Popocatepetl como unidad dominante asociado al suelo *regosol*. Además, se desarrolla al SE del área estudiada, en asociación con suelos *feozem* y *rendzina*. Así mismo, se localiza al SE de la zona de estudio, sobre la Sierra de Tentzo, en asociación con *rendzina* y sobre la cima de las sierras de San Bernardino y Santo Domingo, al NE y E de Atlixco.

*Regosol*: Se encuentra sobre la ladera volcánica de los 2100 a 3400 m como unidad dominante asociado a suelos *litosol*, *andosol*, *fluvisol* y *cambisol*. Además, se localiza en la parte media del depósito de avalancha de escombros y al norte de las vulcanitas Atlixco, sobre el valle de Puebla, asociado a suelo *feozem* y *cambisol*.

### **1.7 Uso de Suelo y Vegetación.**

En principio es notable el poblamiento y su dispersión espacial. En el amplio piedemonte del volcán Popocatepetl y valle de Atlixco se han establecido los principales centros poblacionales. En el valle se ubica Atlixco, la población más grande de la región, así como Santo Domingo, San Agustín, San Félix, San Diego, La Trinidad, Santa Lucía, Axocopan, Cabrera, entre otras, a los alrededores de Atlixco. Además Santa Ana, San Juan Huiluco, Cacalosuchil, Huaquechula y San Pedro, en la parte sur del valle.

Sobre el abanico volcánico se han establecido poblaciones como San Jerónimo Coyula, Tejupa, Ocotepc, San Pedro Benito Juárez, entre otras.

Sobre la parte baja de la ladera volcánica, hasta los 2400 msnm, existen poblados como Tochimilco, Magdalena Xancuitlalpan, Cuilotepec, Tepanapa, Zacatempa, Tecuanipa.

Sobre los antiguos depósitos de avalancha de escombros en el SW de la región se han establecido pequeñas poblaciones, San Juan Amecac, Tulcingo, Huilango, San Mateo Coatepec, Xochitliapan, San Pedro y Emiliano Zapata han ocupado las planicies.

Los factores determinantes que permiten localizar diferentes tipos de vegetación dentro del área de estudio son: la diferencia de altitud entre los 1470 m y 4150 msnm, el clima, el sustrato rocoso, el tipo de relieve existente como es el valle de Atlixco, la sierra baja plegada y lomeríos, la ladera del volcán Popocatepetl y los diferentes grados de pendiente en estas formas.

Sobre la ladera volcánica, por arriba de los 2600 m, la vegetación natural de bosque de pino y oyamel, convive con pastizales y matorrales, principalmente (INEGI, 1983b). Por debajo de este nivel altitudinal, la vegetación natural casi ha desaparecido, sólo existe sobre las pendientes abruptas donde no se ha ocupado para la agricultura que tiene amplio desarrollo desde la parte media de esta ladera hasta el sur de la misma, en el extremo SW de la región de estudio.

Por arriba de los 3700 m, en la ladera superior del volcán Popocatepetl, existe en su mayoría una vegetación de pradera de alta montaña, mezclada con pastizales, zonas sin vegetación aparente y bosque de pino (INEGI, 1983b).

De los 3700 m a los 2600 m, sobre la misma ladera montañosa, se puede observar un dominio de bosque de pino, encino y oyamel, con áreas de pastizal y matorral (INEGI, 1983b).

Del último nivel altitudinal a los 2100 m, sobre la ladera volcánica, se observa una variación del uso del suelo, es decir, la vegetación natural de bosque está presente sólo en las áreas donde la pendiente fuerte no permite que la tierra sea cultivada, se observa en la mayoría de esta área, zonas agrícolas con

cultivos de temporal y menores áreas de pastizales y de matorrales (INEGI, 1983b).

La ladera baja del Popocatepetl y el valle de Atlixco están utilizados, principalmente, para la actividad agrícola con cultivos de temporal y riego (INEGI, 1983b).

La ladera volcánica en su parte sur, el SW de la zona de estudio, presenta una alternancia con zonas agrícolas de temporal, con pastizal inducido y sobre los lomeríos al este de San Miguel Xicotzingo y hasta el límite con el valle de Atlixco, una vegetación de selva baja caducifolia y zonas con palmar (INEGI, 1983b).

El abanico volcánico, incluido el valle de Atlixco, es utilizado intensivamente para la actividad agrícola porque el relieve tiene mínimas pendientes que van de 0-6° con predominio sobre valores de entre 6-10° registrados en la parte superior de este piedemonte.

A lo largo del Río Nexapa, principal corriente de la zona, se puede observar una vegetación de galería con ahuehuete, marcando como límite la zona agrícola del valle de Atlixco y el comienzo de la elevación de la Sierra de Tentzo. En la parte SE del área de estudio se localiza la sierra baja plegada, la Sierra de Tentzo, esta zona de plegamiento calizo sostiene una vegetación de selva baja caducifolia mezclada con palmar y pastizales, algunas pequeñas áreas agrícolas de temporal y otras que sustentan bosque de encino y palmar (INEGI, 1983b).

Al este de la zona de estudio sobre el relieve volcánico de la Sierra de Santo Domingo y la Sierra de San Bernardino, se observa una vegetación de selva baja caducifolia, pastizal inducido y matorral inerme, así como sobre las vulcanitas Atlixco, montañas terciarias que bordean el norte de la ciudad de Atlixco (INEGI, 1983b).

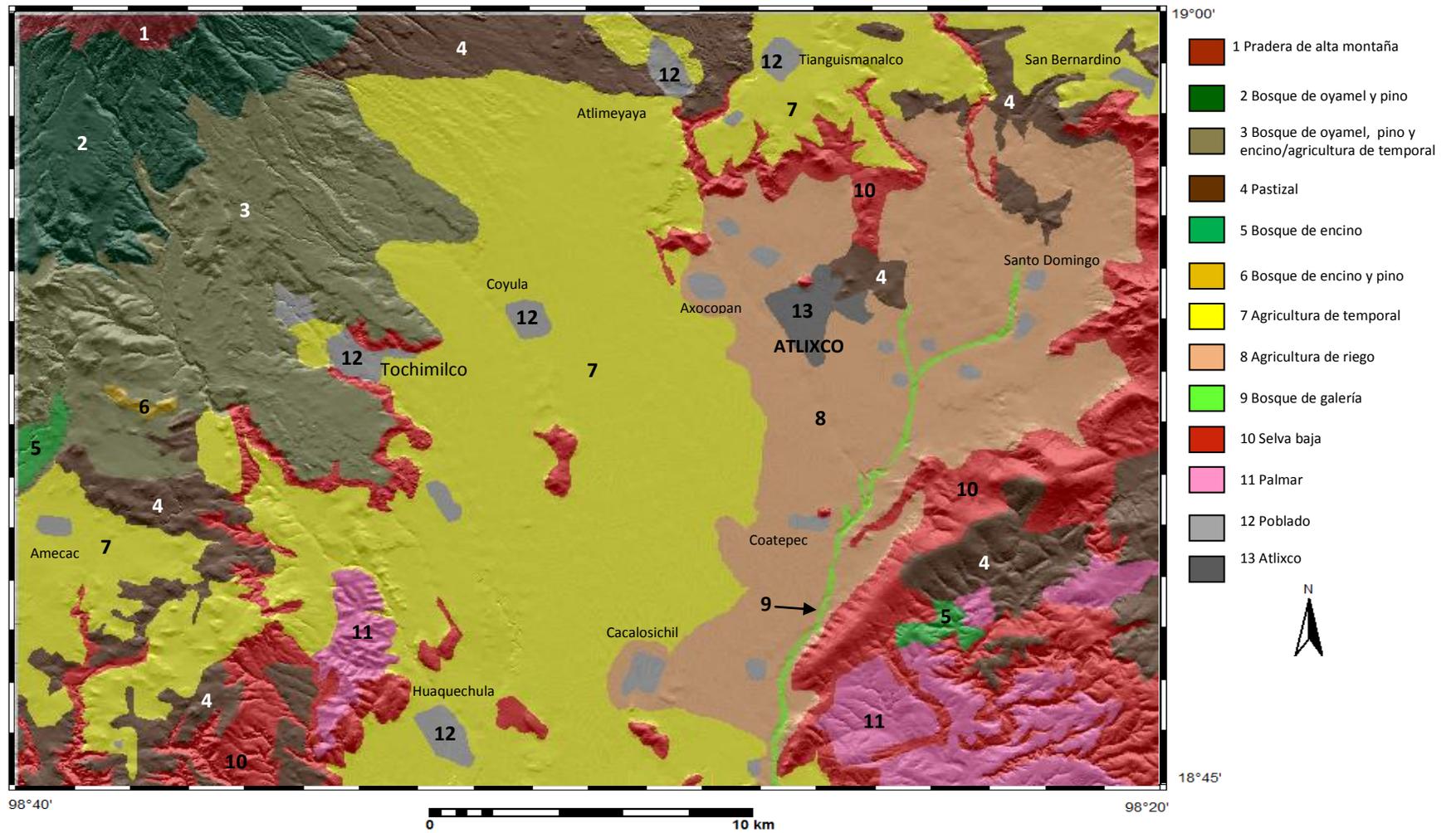


Figura 6. Mapa de uso de suelo y vegetación de Atlixco.

El área NE perteneciente al valle de Puebla, es un sector que se utiliza para la actividad agrícola, aprovechando la poca pendiente que no rebasa los 6° y los casi 1000 mm de precipitación anual lo cual favorece el crecimiento de las plantas.

Sobre las sierras volcánicas del norte, noreste y este de Atlixco, la Sierra de Tentzo, sobre las elevaciones aisladas de origen sedimentario, en el sur y límite este del depósito de avalancha de escombros, se observa vegetación natural de selva baja (INEGI, 1983b). Esta zona, en especial la Sierra de Tentzo, se utiliza principalmente para la actividad de pastoreo. La zona de lomeríos plegados, se utiliza, sólo en parte, para la actividad agrícola.

## **2 Geología y Tectónica.**

### **2.1 Geología.**

La geología del área de estudio está fuertemente influenciada por el vulcanismo del Pleistoceno Tardío del volcán Popocatepetl, principalmente, y en menor grado, del complejo volcánico Iztaccíhuatl.

La región de Atlixco está compuesta por derrames de lava, flujos piroclásticos, depósitos de avalancha de escombros (DAE) y depósitos de caída del Popocatepetl, así como de depósitos de avalancha de escombros del Iztaccíhuatl. Este vulcanismo formó la mayoría de las rocas que se localizan en la zona de estudio (figura 7).

Afloran rocas volcánicas del Mioceno al norte de la ciudad de Atlixco, que Mooser y colaboradores (1996) identifican como vulcanitas Atlixco. En la parte suroeste de la zona estudiada, afloran rocas terciarias que subyacen al DAE del Popocatepetl (figura 7). Al este de la ciudad de Atlixco existen rocas volcánicas terciarias que subyacen al vulcanismo cuaternario que formó las sierras de San Bernardino y Santo Domingo (Mooser, et al. 1996).

Rocas más antiguas se localizan en la Sierra de Tentzo, localizada en la parte sureste de la región de estudio, la actividad tectónica que plegó los sedimentos mesozoicos dio origen al anticlinal de esta sierra y una zona de lomeríos adyacente a ésta.

La parte de la ladera SE del volcán Popocatepetl que se localiza en el área de este trabajo corresponde a un vulcanismo reciente. Este volcán cubrió las rocas calizas sobre las que se ha edificado el cono actual y sus antecesores (Espinasa-Pereña, 2007).

El volcán Popocatepetl (19° 03' N y 98° 35' W), es la segunda cima más alta del país con 5452 msnm, se sitúa a 70 km de la Ciudad de México y a 25 km de Puebla. Se localiza en la parte meridional de la Sierra Nevada, que junto con el Iztaccíhuatl (5230 m), Téyotl (4600 m), Papayo (3620 m), Telapón (4060 m) y Tlálloc (4120 m), forman una alineación de volcanes con

orientación N-S, en la parte oriental de la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM).

El actual cono del Popocatepetl creció en los últimos 23 000 años sobre una antigua caldera de un anterior volcán conocido como Ventorrillo (Espinasa-Pereña, 2007) que colapsó hacia el sur tras un evento tipo Bezymianny fechado por Siebe, et al. (1995) en 22 000 a 23 655 años antes del presente (A.P.) que fue seguida por una erupción de tipo pliniano que depositó pómez de caída y flujos piroclásticos (Espinasa-Pereña, 2007).

Anterior a este volcán existió otro, llamado Nexpayantla (Mooser, 1957), que también generó una caldera producto de un poderoso evento explosivo tipo Santa Elena, hace unos 196 000 años A. P., (Espinasa-Pereña, 2007), que produjo una avalancha de escombros que cubrió un área de 300 km<sup>2</sup> al sur del volcán (Robin y Boudal, 1987). Nelson, (1990) estima que el depósito de avalancha de escombros y los depósitos de ceniza que lo acompañaron pueden alcanzar entre 26 y 30 km<sup>3</sup>.

Las primeras etapas de construcción del actual cono fueron primordialmente actividades efusivas, seguidas de períodos de intensa actividad piroclástica durante los cuales, flujos piroclásticos fueron dirigidos hacia el este y al sureste del volcán (Nelson, 1990).

La historia eruptiva del Popocatepetl muestra una evolución que intercala etapas constructivas y destructivas. Las primeras son los eventos de emisiones de lava, fumarólica y columnas de ceniza expulsados por su cráter principal o de derrames de lava por bocas adventicias y que han contribuido al crecimiento del volcán. Se considera que en los últimos 20 000 años la actividad explosiva del volcán Popocatepetl ha estado caracterizada por cuatro principales eventos que produjeron pómez de caída y flujos de ceniza; 14 000, 5 000, 2 150 y 1 100 años AP, además de otros eventos menores de 11 000, 9 000, 7 000 y 1 800 años AP (Macías-Vázquez, 2005).

Las etapas destructivas se refieren a eventos de grandes proporciones que destruyen parte del cono a través de poderosos colapsos causados por

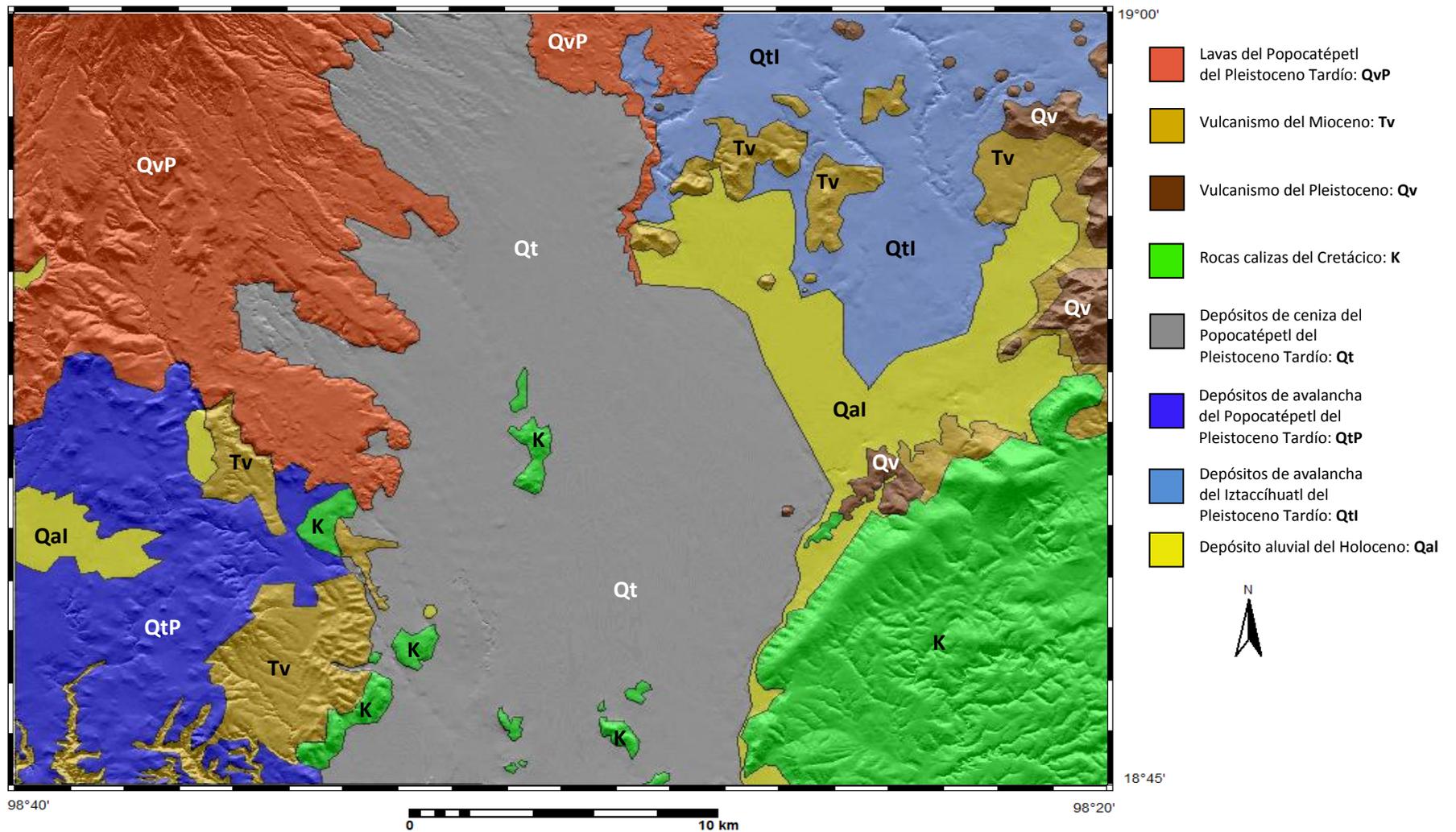


Figura 7. Mapa geológico de Atlixco.

actividad magmática que desarrollan grandes columnas plinianas, caída de pómez y de flujos piroclásticos y el emplazamiento avalanchas de escombros.

El volcán Popocatepetl y sus antecesores se edificaron sobre rocas sedimentarias plegadas del mesozoico (Fries, 1965) y rocas volcánicas terciarias (vulcanitas Atlixco) muy erosionadas (Espinasa-Pereña, 2007).

La mayor parte del área estudiada está cubierta por materiales de origen volcánico del Cuaternario de diferentes fuentes, principalmente, y por depósitos aluviales.

La parte sureste de la zona de estudio, se encuentra cubierta por rocas cretácicas que forman parte de la Sierra de Tentzo. Esta sierra se levanta sobre el nivel del valle de Atlixco unos 570 m en su parte más alta, con una dirección SW-NE forma una barrera para el emplazamiento de los sedimentos que han sido acarreados por las corrientes. Las aguas del Río Nexapa fluyen con dirección SW al pie de esta sierra plegada.

Asimismo, se localiza un área pequeña de caliza cretácica que se extiende con dirección N-S en la parte centro-sur de la zona de estudio, constituida por algunas cimas que se elevan poco más de 200 m sobre el valle de Atlixco. Otras elevaciones aisladas de menos de 150 m de altura se localizan sobre la parte central y centro-sur del valle de Atlixco, también de roca caliza del Mesozoico. Todas las rocas calizas dentro del área de estudio representan el 13.2 % del total.

Área en km<sup>2</sup>

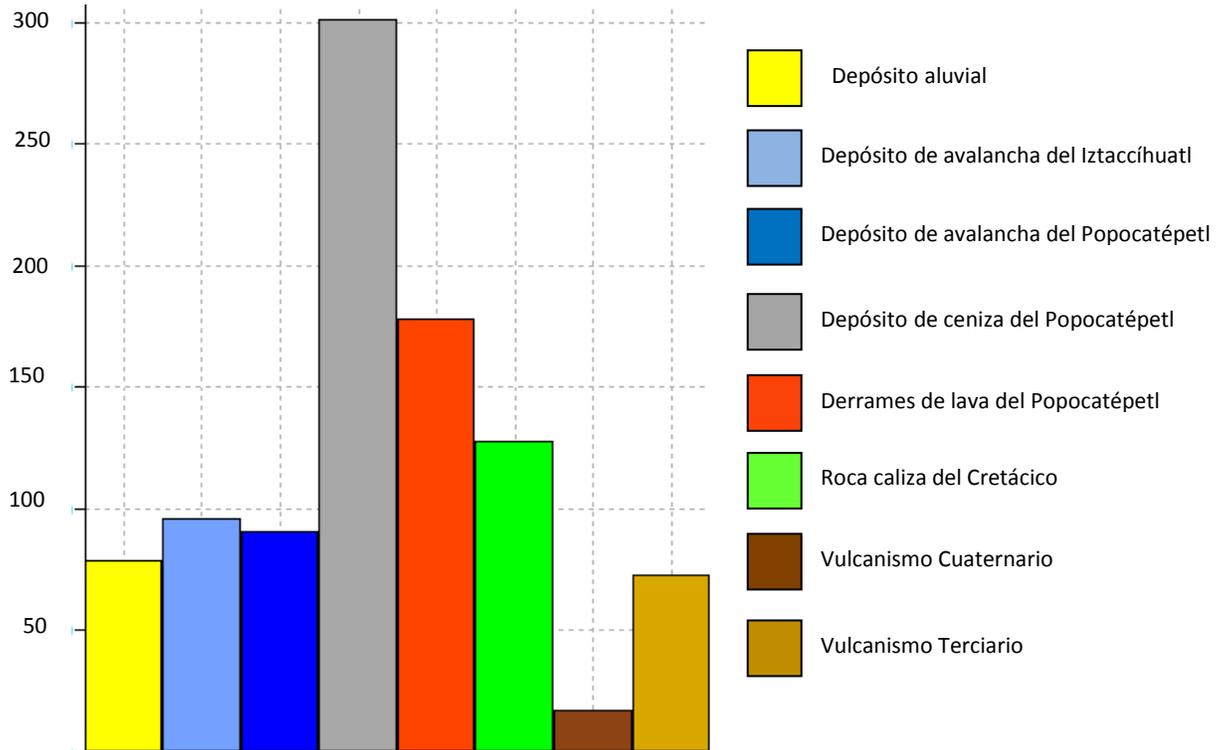


Figura 8. Histograma del mapa geológico de Atlixco.

Tabla 1

Valores en km<sup>2</sup> del área cubierta por las rocas de la región de Atlixco.

Color	Nombre	Área km <sup>2</sup>	%
Grey	<i>Depósitos de ceniza del Popocatépetl</i>	300.8	31.3
Orange	<i>Derrames de lava del Popocatépetl</i>	177.7	18.5
Green	<i>Roca caliza del Cretácico</i>	127.6	13.2
Light Blue	<i>Depósitos de avalancha del Iztaccíhuatl</i>	95.5	9.9
Dark Blue	<i>Depósitos de avalancha del Popocatépetl</i>	90.2	9.3
Yellow	<i>Depósito aluvial</i>	78.5	8.1
Tan	<i>Vulcanismo Terciario</i>	72.8	7.5
Brown	<i>Vulcanismo Cuaternario</i>	17.1	1.7

## **2.2 Evolución Tectónica.**

El área de estudio queda comprendida dentro del sector oriental de la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM), que se extiende unos 900 km desde Nayarit hasta la alineación volcánica Pico de Orizaba-Cofre de Perote (Demant, 1978).

La subducción de la Placa de Cocos con respecto a la Placa Norteamericana dio origen al vulcanismo que formó la FVTM durante el Oligoceno-Mioceno y se prolongó hasta el Cuaternario (Demant, 1982).

La amplitud de esta franja es variable, tiene unos 400 km de San Luis Potosí al estado de Morelos y unos 100 km de Teziutlán, Puebla a Orizaba, Veracruz en la vertiente del Golfo de México.

El movimiento de las placas, de Cocos al Noreste, Norteamérica al occidente, Caribe al oriente y la separación de la Península de Baja California hacia el noroeste, originaron que en la parte media de México se convirtiera en una zona de debilidad cortical con una expresión estructural conocida como FVTM que empezó su actividad de expulsión lávica de composición química y mineralógica que varía de andesitas, riolitas y dacitas, en el Oligoceno-Mioceno, con una etapa de inactividad que se reactiva en el Plioceno hasta la actualidad, por lo que varios autores han considerado a esta estructura de edad Plio-Cuaternaria.

Esta faja volcánica que cruza el país entre los paralelos 19° y 21°, está constituida por valles y cuencas escalonados, gobernada por un sistema de fallas y fracturas lo que la hacen una zona activa sísmica y volcánica. Se han distinguido cuatro regiones geomorfológicas mayores donde se localizan grandes fosas tectónicas: a) Tepic-Chapala, b) Colima, c) Michoacán, d) Cuencas de Toluca, de México, de Puebla-Tlaxcala y la Oriental. Estos valles y cuencas con una variabilidad en altitud, como la cuenca de Colima a unos 400 msnm y la cuenca de México a 2240 msnm y las de Toluca y Tlaxcala a 2600 m. En la región donde se localiza el área de este estudio la manifestación

tectónica está representada por eventos distantes cronológica y genéticamente uno de otro (Demant, 1978).

El vulcanismo actualmente activo del Popocatepetl, con registros históricos de antes, durante y después de la conquista de México, durante la colonia y después de ésta, además de la época más reciente hasta su reactivación en 1994, después de una relativa tranquilidad que duró 67 años, desde 1927.

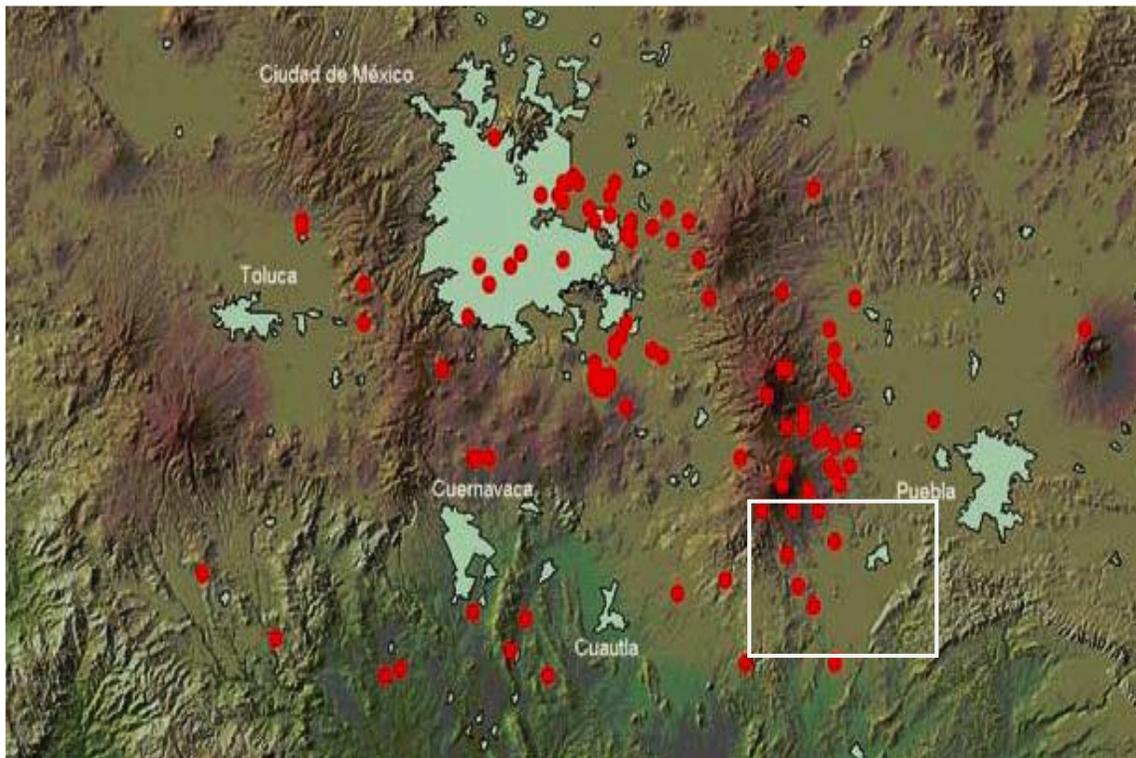


Figura 9. Distribución de los focos sísmicos registrados en la zona de estudio durante el período 1989-2008 donde se nota una alineación de epicentros con dirección SE-NW y a lo largo de la Sierra Nevada. Modificado de Mitre-Salazar (2011), Instituto de Geología, UNAM. El cuadro en color blanco señala el área de estudio.

En la zona de trabajo se localiza parte de la Sierra de Tentzo, cuya estructura es la manifestación del tectonismo más antiguo que afectó parte del sur de nuestro país. La Sierra de Tentzo es un pliegue que forma parte del extremo norte de un gran bloque de forma semicircular que sufrió una deformación durante el Cretácico Tardío-Terciario Temprano (Cerca-Martínez, 2004).

La sismicidad en esta zona es una manifestación de la tectónica reciente, es de gran importancia ya que se han registrado frecuentemente sismos con epicentro en esta zona continental, en el norte de Oaxaca y sur de Puebla, que afectan la región de este estudio. Ramírez y Lugo (2000) señalan eventos sísmicos de magnitud de entre 6.5 y 7.3 grados, con epicentros en profundidades de entre 65 y 96 km en esta región desde 1928 hasta 1999 que han afectado la infraestructura y habitantes de las poblaciones de esta amplia zona de México (figura 9).

### **3 Morfometría.**

#### **3.1 Introducción.**

La cuantificación de los elementos del relieve es un método que permite estudiar la superficie terrestre y los procesos actuales endógenos y exógenos que desarrollan las formas (Lugo-Hubp, 1988).

La longitud, superficie, volumen, pendiente, densidad, profundidad, altura, orientación, frecuencia, son elementos numéricos que se pueden obtener por medio de métodos morfométricos que facilitan el estudio de las formas, la interpretación de su génesis, su edad relativa y la dinámica actual de las formas sobre la superficie de la tierra (Lugo-Hubp, 2011).

#### **3.2 Análisis Hipsométrico.**

Un mapa altimétrico o hipsométrico es un mapa topográfico con colores asignados en intervalos determinados de curvas de nivel. Al observar un mapa de altimetría da una idea clara de cómo está conformado el relieve en la superficie que representa porque el uso de colores crea una impresión de verlo en tercera dimensión (Lugo-Hubp, 1988).

Dentro del área de estudio existe una diferencia de altura de 2700 m entre el punto más bajo que está a 1450 msnm, en el talweg del Río Grande, al sur de la localidad Santa María Xoyatla, al sureste del área estudiada y los 4150 msnm como el punto más alto, al noroeste de la zona de trabajo, en la ladera superior del volcán Popocatepetl.

El mapa altimétrico elaborado para este trabajo con el sistema de información geográfica (SIG) ILWIS 3.4 muestra, de manera general, que la altitud aumenta gradualmente con una dirección SE-NW, las franjas de colores asignados en secuencia, que van de los fríos a los cálidos, para 14 rangos, son más angostas en la zona alta puesto que la pendiente es mayor.

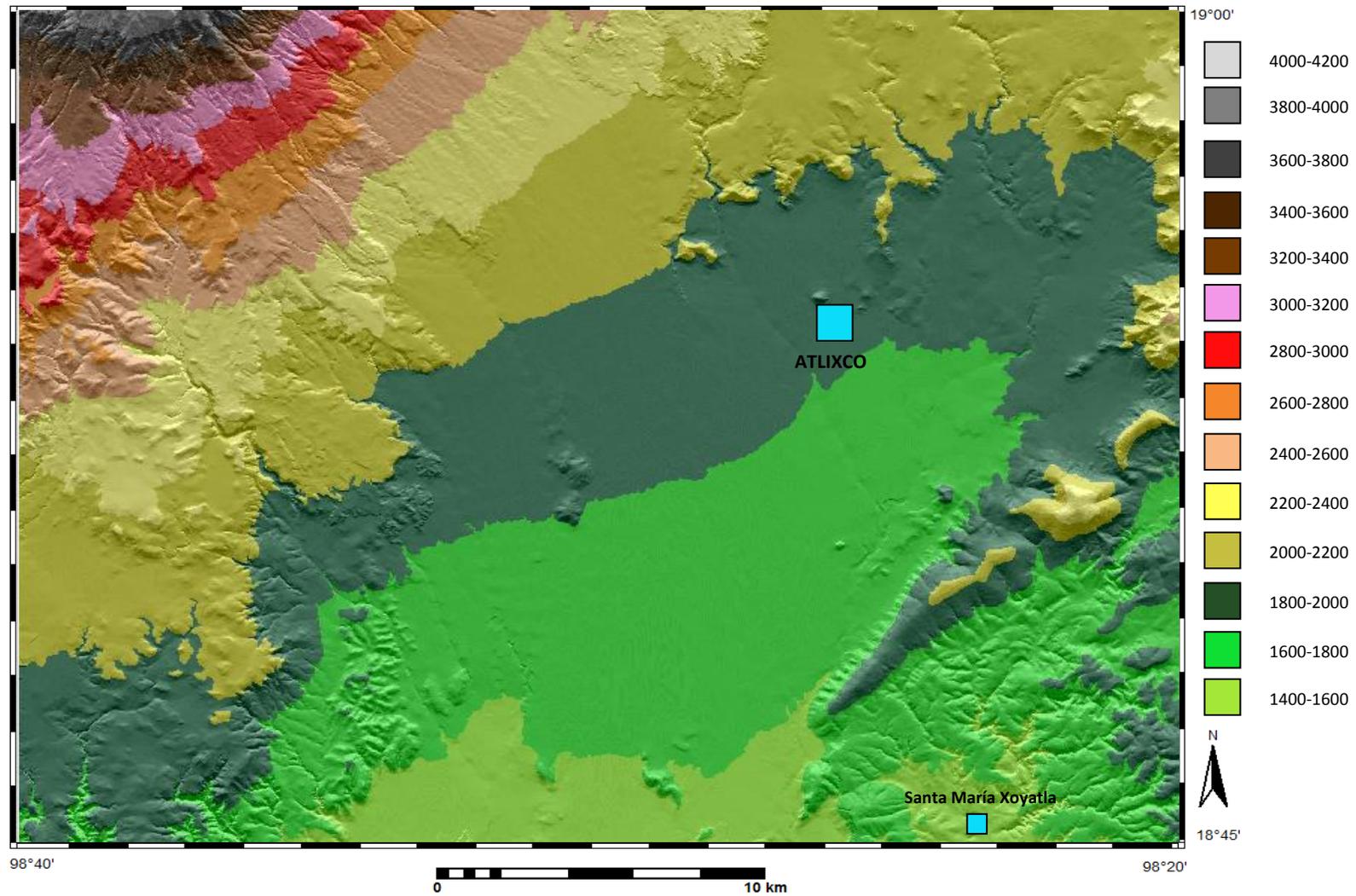


Figura 10. Mapa altimétrico de Atlixco.

Al mapa altimétrico se le asignaron colores que van de los grises para las partes más altas, tonos de café y rojo para los siguientes niveles, amarillos y verdes para señalar la parte más baja. Cada franja de color separa áreas que tienen el mismo valor altitudinal con rangos de 200 m cada uno.

Las franjas de colores grises, cafés y rojos presentan una configuración semicircular, adoptando la forma cónica de la ladera volcánica. Aquí, en esta zona de nivel altitudinal entre 2400 y 4200 msnm, la actividad agrícola se desarrolla pero con la limitante de practicarse sobre una pendiente variable entre 6 y 20°, sobre suelos como regosol, andosol, cambisol y feozem, los que se desarrollaron sobre coladas de lava y cenizas del volcán. Además se desarrolla vegetación natural de bosque de pino y oyamel, matorral inerme y pastizal inducido hasta los 3700 m, aproximadamente. Sobre esta altitud, hasta el límite del área de trabajo, se encuentra la pradera de alta montaña y algunas áreas sin vegetación aparente. Pendientes mayores a 60° se observan en las laderas de los barrancos que han sido excavados sobre esta ladera del volcán, en los frentes y bordes de lava.

Los amarillos y verdes son los colores que representan una mayor área, por tanto, se entiende que dentro del área de trabajo predomina una extensión areal que está entre 1400 y 2400 msnm. Es en esta amplia zona donde se localiza la principal ciudad, Atlixco, y demás poblaciones menores, donde se desarrollan, principalmente, las actividades agrícolas, sobre suelo fluvisol, principalmente, además de cambisol y feozem, y pequeñas áreas con chernozem, rendzina, vertisol y regosol, al pie de la Sierra de Tentzo, con una pendiente de entre 2 y 6°.

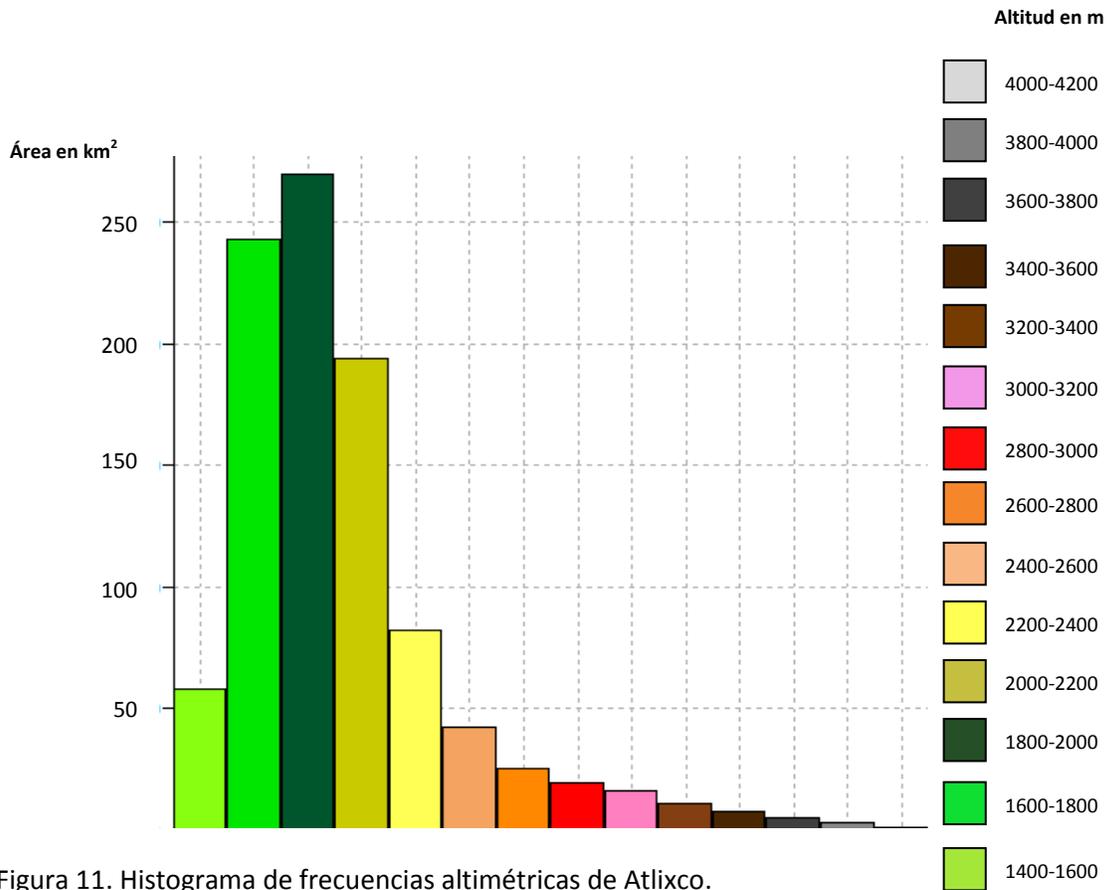


Figura 11. Histograma de frecuencias altimétricas de Atlixco.

Tabla 2  
Áreas en km<sup>2</sup> cubiertas por rangos altitudinales.

Franja color	Rango en msnm	Área km <sup>2</sup>	%
	1800-2000	269.9	27.6
	1600-1800	242.8	24.8
	2000-2200	194.2	19.8
	2200-2400	82.3	8.4
	1400-1600	57.8	5.9
	2400-2600	42.1	4.3
	2600-2800	25.2	2.5
	2800-3000	19.4	1.9
	3000-3200	15.9	1.6
	3200-3400	10.4	1.07
	3400-3600	7.2	0.74
	3600-3800	5.1	0.52
	3800-4000	3.1	0.32
	4000-4200	0.8	0.09

### **3.3 Análisis de la Pendiente.**

La pendiente es el grado de inclinación que presenta una porción de la superficie terrestre. La pendiente medida entre dos puntos resulta de la relación de la distancia horizontal y vertical, se puede expresar en grados o tanto por ciento.

La pendiente es uno de los factores más importantes dentro de un estudio geomorfológico porque determina la evaluación y la dinámica de la erosión de las formas del relieve (Palacio-Prieto, 1983).

Para este trabajo el mapa de pendientes se calculó y se elaboró con el SIG ILWIS 3.4. A partir de la zona más elevada, sobre la ladera superior del volcán Popocatepetl y en franca dirección al sur, los derrames de lava y los depósitos de avalancha de escombros, de este volcán y sus antecesores, (Espinasa-Pereña, 2007) que se pueden apreciar en el modelo digital de elevación (DEM) elaborado para este trabajo, presentan diferentes grados de pendiente. La parte superior de esta porción de la ladera presenta pendientes entre 6 y mayores de 60°, en la parte media donde la inclinación disminuye predominan los valores inferiores a 20°, y en la parte baja se observan pendientes de 6° en su mayoría, sobre los materiales emplazados. En esta porción sur de la ladera sólo se registran pendientes mayores a 60° en los barrancos excavados por las corrientes fluviales, y en los frentes y bordes de los derrames de lava (Figura 12).

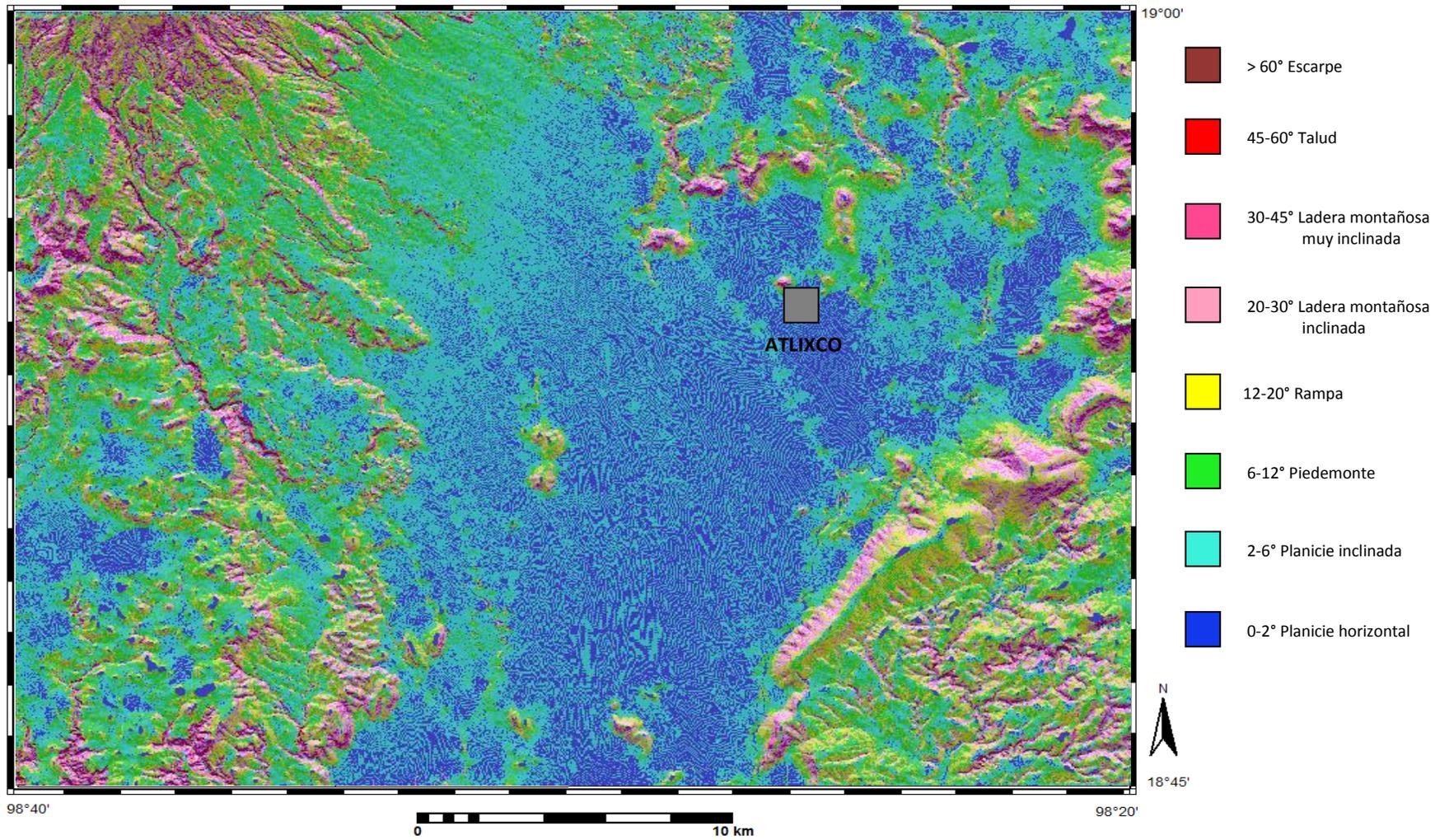


Figura 12. Mapa de pendientes de Atlixco.

En el piedemonte del relieve terciario de las vulcanitas Atlixco, que rodea la parte norte de la ciudad de Atlixco, y la sierra menor de San Bernardino, localizada al este de esta ciudad, se observa una pendiente de entre 6 y 12°, y sobre las laderas es variable entre los rangos de 12 a 20°, 20 a 30° y 30 a 45° y 45-60° (Figura 12).

En la porción sureste del área de estudio, se localiza parte de la Sierra de Tentzo, que se levanta sobre el valle de Atlixco con dirección del eje anticlinal SW-NE. Sobre el parteaguas de los principales cerros: Texistle (310 m), Zoapiltepec (510 m), El Tepemecate (370 m), Cuauhjotle (270 m) y Tenayo (230 m), la pendiente no es mayor de 12°, pero hacia sus laderas con amplia inclinación se registran >60°, sobre todo en la ladera oeste. El resto del área de esta porción territorial está cubierta también por rocas del Mesozoico muy disecadas por las corrientes fluviales, es en esta área donde se localiza el punto más bajo de toda la superficie estudiada, localizado a 1450 msnm, en el curso del Río Grande. Esta parte de lomeríos tiene pendientes no mayores a 20°, pero en los barrancos llega a ser >60°.

Las pendientes que van de 0° a 6° corresponden a la planicie de poca inclinación del valle de Atlixco, un abanico volcánico de piedemonte del Popocatépetl y de depósito de avalancha de escombros (DAE) del volcán Los Pies, del complejo volcánico Iztaccíhuatl (CVIZ).

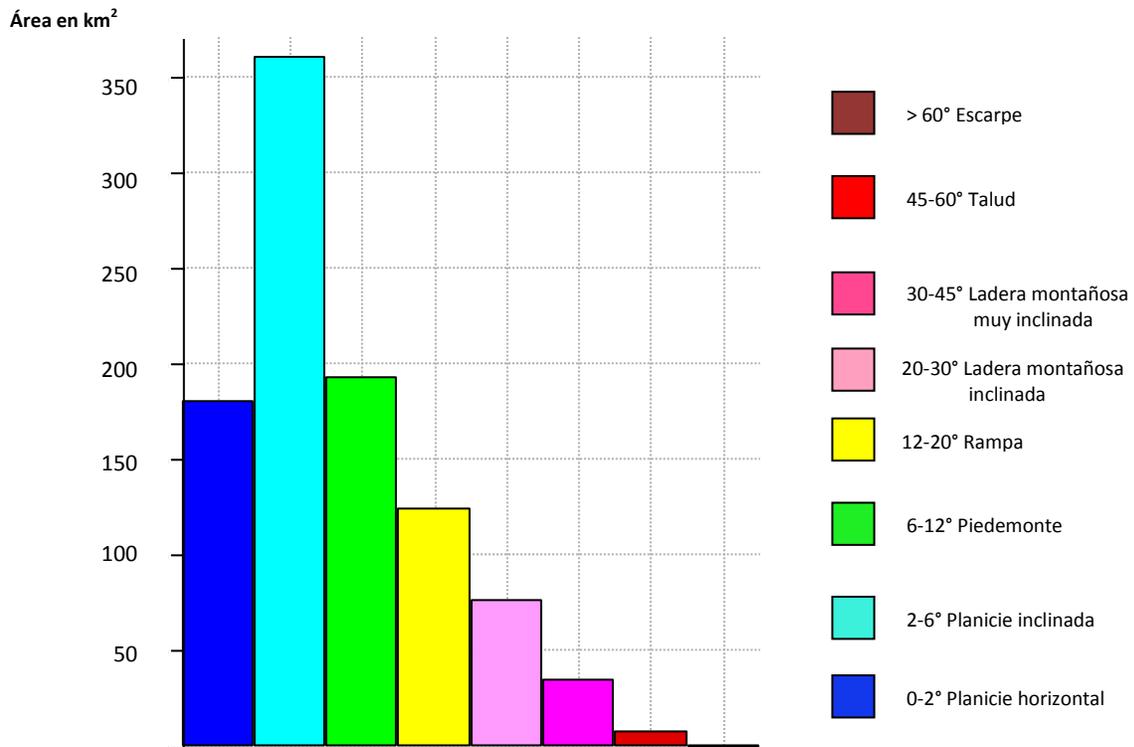


Figura 13. Histograma de áreas de pendientes.

**Tabla 3**  
Rangos de pendiente representados en km<sup>2</sup> y porcentaje.

Color	Rango de pendiente	Área km <sup>2</sup>	%
	>60° Escarpe	0.4	0.05
	45-60° Talud	7.6	0.7
	30-45° Ladera montañosa muy inclinada	34.4	3.5
	20-30° Ladera montañosa inclinada	76.1	7.7
	12-20° Rampa	124.1	12.7
	6-12° Piedemonte	192.8	19.7
	2-6° Planicie inclinada	360.4	36.9
	0-2° Planicie horizontal	180.7	18.5

### **3.4 Análisis Hidrográfico.**

La configuración de la red hidrográfica está controlada por el tipo y edad de la roca, estructura geológica, pendiente del terreno, cubierta vegetal, el clima, y de este la precipitación, principalmente. La variación en cualquiera de estos factores que influyen en la configuración del drenaje, se refleja en un comportamiento de las corrientes fluviales.

El drenaje es uno de los rasgos geomorfológicos más sobresalientes que se observan en las fotografías aéreas e imágenes de satélite.

El conjunto de corrientes que componen la red fluvial de la región de Atlixco es de tipo paralela y subparalela, además de tipo dendrítica en el SE y SW, tienen diferente expresión de acuerdo con la zona por donde fluyen, porque existen diferentes factores que controlan su comportamiento (figura 14).

En la ladera volcánica, compuesta de derrames de lava, depósitos de avalancha de escombros, y depósitos de ceniza y pómez, se observa que las corrientes fluviales tienen una expresión heterogénea porque se desarrollan sobre materiales de diferente edad y tipo, y distinta precipitación. En la parte más alta de la zona, a partir de 2200 hasta 4150 msnm, donde se localizan algunos derrames de lava, la densidad de drenaje es mayor, las corrientes que componen la red dendrítica excavan rocas y cenizas volcánicas del Popocatepetl ubicadas sobre pendientes que van de 12° a 60° y más. El curso del Río Atila-Huitzilac está controlado por el contacto litológico de los derrames Popocatepetl y El Fraile, y el depósito de avalancha de escombros. En la parte sur de este depósito, la configuración del drenaje es más denso, las corrientes fluviales han cortado este material antiguo que ha estado expuesto a la erosión los últimos 23 000 años (Macías-Vázquez, 2005), donde las pendientes alcanzan valores mayores a 60°.

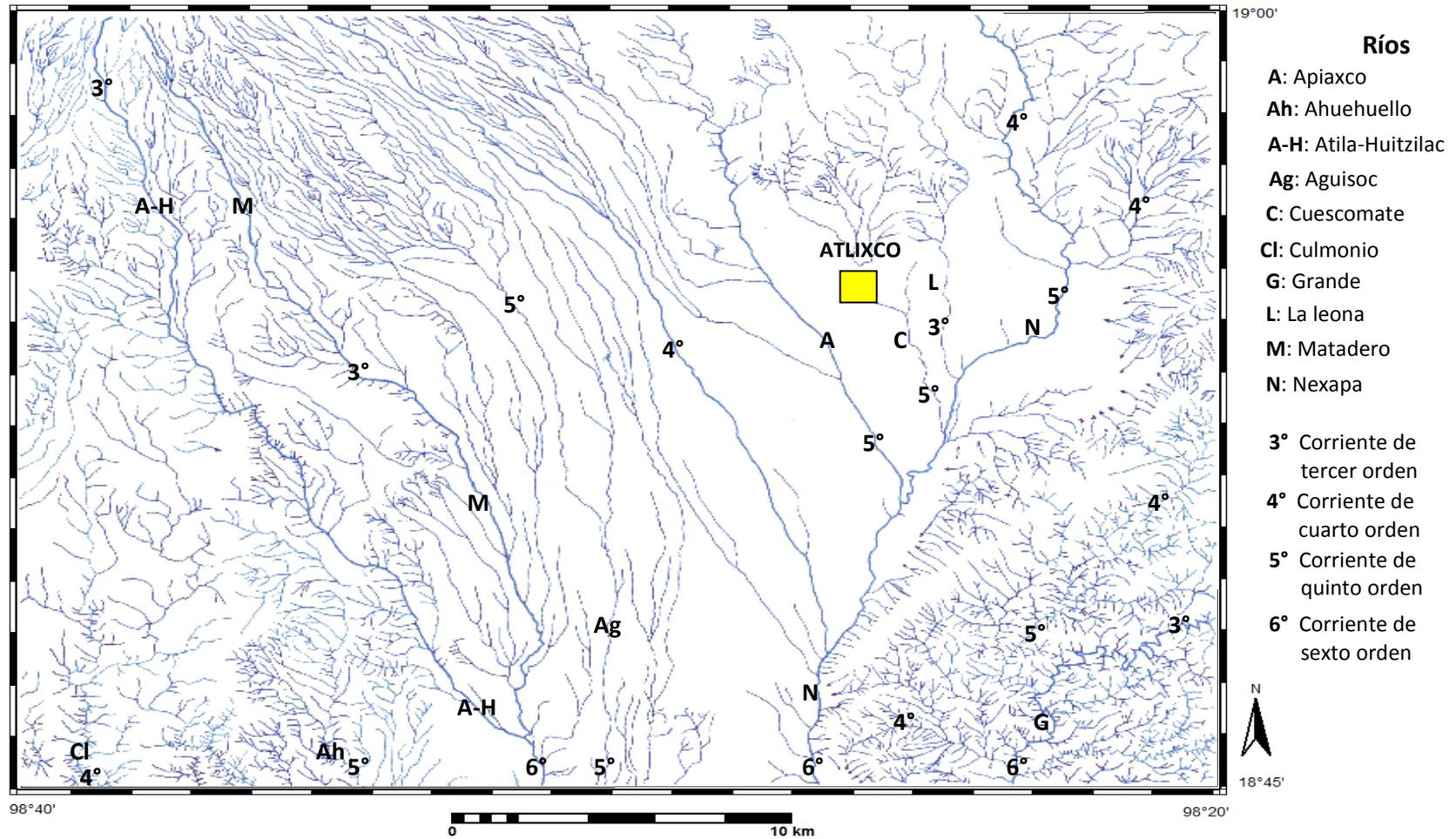


Figura 14. Configuración de la red de drenaje, principales ríos y órdenes de las corrientes de la región de Atlixco.

De acuerdo con la clasificación en órdenes de las corrientes fluviales, el Río Culmonio, que desarrolla una configuración de drenaje dendrítica, localizado en la parte sur del depósito de avalancha de escombros (DAE) del Popocatepetl, en el límite sur de la zona de trabajo, alcanza un cuarto orden, tomando en cuenta sólo las corrientes fluviales localizadas dentro de la zona de trabajo. El Río Ahuehuello, localizado en la misma zona, se clasifica como de quinto orden.

Las corrientes fluviales que se observan sobre el amplio piedemonte del Popocatepetl han tenido mayor desarrollo longitudinal (fig. 14). En la parte superior del piedemonte, con pendientes de 6-12°, con derrames de lava sepultados por capas de ceniza (Espinasa-Pereña, 2007), la configuración del drenaje es más desarrollado, existen más afluentes de primer orden. Al salir de esta zona de lavas sepultadas, donde la pendiente sólo alcanza valores de entre 2 y 6°, las corrientes fluviales se hacen más largas, tienen menos tributarios que se unen de forma paralela conforme avanzan sobre el piedemonte, para ir a unirse en el valle de Atlixco al Río Nexapa, de sexto orden, principal corriente que capta el agua de todos los afluentes de la región, donde la pendiente sólo registra valores de entre 0 y 2°.

Al N y NE de Atlixco existen dos campos volcánicos que dividen los valles de Atlixco y Puebla, se observa que la configuración del drenaje dendrítica es más densa, los ríos Nexapa, La Leona, Cuescomate y Apiaxco y sus afluentes, están erosionando estas montañas bajas, que presentan pendientes de hasta 60°, al entrar al valle de Atlixco, donde la pendiente desciende drásticamente con valores de 0-6°, las corrientes pierden su capacidad transportadora y tienden a depositar materiales, por lo que los afluentes son escasos y de menor longitud (figura 14).

Sobre la Sierra de Santo Domingo, vulcanismo cuaternario al E de Atlixco, se observa una configuración del drenaje de tipo dendrítico que desaparece en cuanto desciende al valle de Atlixco al encontrar mínimas pendientes de 0-2°, la infiltración del agua en esta zona permite calcular una muy débil erosión potencial, como se indica más adelante.

En la Sierra de Tentzo y Iomeríos, localizados al SE de la región de estudio, se observa un patrón de drenaje bien desarrollado de tipo dendrítico, donde algunas corrientes son controladas por un sistema de fallas y fracturas. La mayoría de las corrientes fluviales de esta zona son afluentes del Río Grande, de 6º orden, excepto las que fluyen en la ladera W del anticlinal de la Sierra de Tentzo, de primero y segundo orden, que descienden hacia el valle de Atlixco, incorporándose al cauce del Río Nexapa, unas, y otras infiltrándose en esta misma planicie. La homogeneidad en el tipo de roca permite el desarrollo uniforme del sistema de drenaje.

### ***3.5 Análisis de la Erosión Potencial.***

La erosión es el conjunto de procesos por medio de los cuales se separan los productos del intemperismo del sustrato original o de depósitos sin consolidar. Los principales agentes de la erosión son: el agua superficial, el hielo, el viento, el agua subterránea, los organismos, el hombre, entre otros. La intensidad con que los agentes actúen depende de factores como: La topografía, clima, litología, estructura geológica, la actividad tectónica, cubierta vegetal, uso de suelo, entre otros (Lugo-Hubp, 2011).

La erosión potencial es un pronóstico cualitativo de pérdida de productos del intemperismo en un área determinada. Los factores que condicionan la intensidad de los agentes de la erosión actúan de manera diferencial pero conjuntamente sobre rocas y suelos expuestos sobre la superficie de un área.

El mapa de erosión potencial de Atlixco se elaboró con el SIG ILWIS 3.4, se le asignaron 7 rangos de valores basados en la clasificación de la pendiente de acuerdo a los rangos propuestos por Palacio-Prieto (1983), (figura 15). Las categorías y su ubicación espacial se describen a continuación:

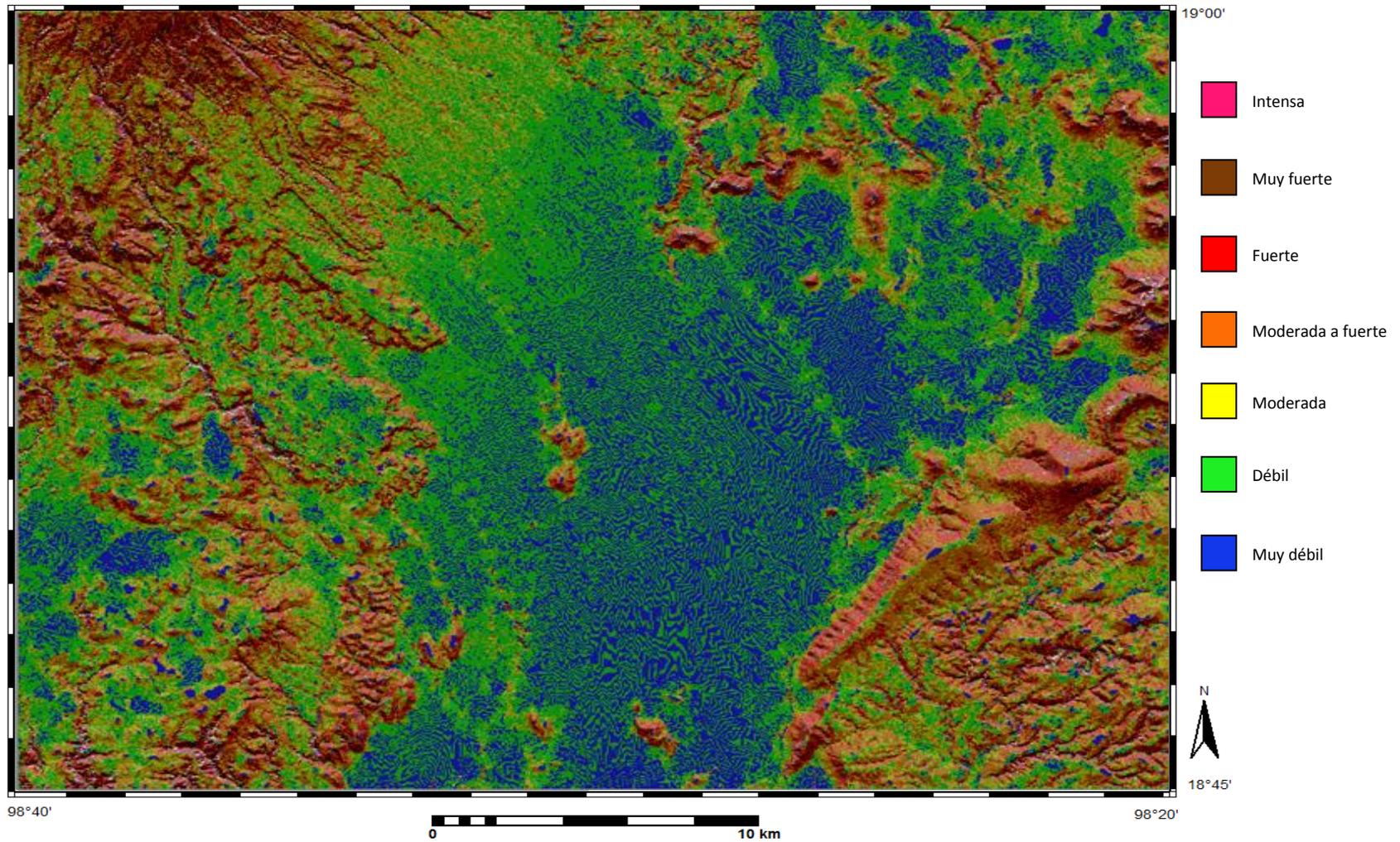


Figura 15. Mapa de erosión potencial.

a) **Débil**; cubre un área de 360.4 km<sup>2</sup>, tiene un predominio sobre las otras categorías, representa el 37 % del total. Esta categoría de erosión potencial se presenta en las planicies poco inclinadas, con pendiente del terreno no mayor a 6°, como el valle de Atlixco, valle de Puebla, donde se desarrolla intensamente la actividad agrícola, y áreas localizadas en la parte sur del depósito de avalancha del Popocatepetl (DAE) (figura 15).

b) **Muy Débil**; cubre un área de 180.7 km<sup>2</sup> que representa el 18.5 % del total, donde el grado de pendiente no es mayor a 2°. Se observa en la zona central del valle de Atlixco, una gran zona de acumulación de materiales, parte del valle de Puebla y para la zona central de las planicies en el sur del DAE del Popocatepetl, principalmente (figuras 12 y 15).

c) **Moderada a Fuerte**; cubre un área de 167.8 km<sup>2</sup>, representa el 17.2 % del total del área de estudio. Esta categoría se observa en zonas donde el grado de pendiente tiene valores de entre 12 y 20°, corresponde a la ladera superior del volcán Popocatepetl, donde la temperatura media anual es de entre -2 y 5° C, con lluvias anuales que alcanzan 1200 mm, lo que hace que la intensidad de la erosión se incremente porque el conjunto de factores como la pendiente, el clima, la escasa cubierta vegetal, entre otros, permiten que los agentes erosivos agua y hielo actúen intensamente. Esta categoría se extiende a los derrames de lava El Fraile y en parte del depósito de avalancha de escombros del Popocatepetl. Asimismo se midió sobre las laderas de las lomas plegadas que se levantan sobre el valle de Atlixco y sobre las sierras de San Bernardino y Santo Domingo, al NE y E de Atlixco, y sobre la Sierra de Tentzo y los lomeríos adyacentes. La Sierra de Tentzo y los lomeríos plegados antiguos se localizan en un área donde el clima templado de menor humedad presenta una temperatura media anual de 22° C y 857.5 mm de lluvia total anual (García-Miranda, 1973). El factor climático provee el agua que erosiona la caliza del Cretácico y que ha excavado profundos barrancos cuyas paredes tienen pendientes superiores a 60°, en la microcuenca del Río Grande.

d) **Moderada**; cubre un área de 149.2 km<sup>2</sup>, representa el 15.3 % del total. En estas zonas, la pendiente tiene valores de entre 6 y 12°. Esta categoría

corresponde a la parte superior del piedemonte del Popocatepetl, en parte de los derrames de lava de este sector, a lo largo del DAE del Popocatepetl, en las laderas del vulcanismo terciario y cuaternario, al N, NE y E de la ciudad de Atlixco, en parte de las laderas de la Sierra de Tentzo y en parte de los lomeríos plegados antiguos, adyacentes a la sierra (figura 15).

e) **Fuerte**; cubre un área de 76.1 km<sup>2</sup>, que representa el 7.8 % del total. La pendiente de este sector corresponde a valores de entre 20 y 30°. Esta categoría de erosión potencial se presenta en la parte superior de la ladera volcánica, sobre los derrames Popocatepetl y derrames El Fraile, y sobre el DAE del Popocatepetl, marca los límites, frentes y bordes de los derrames lávicos, los barrancos excavados por las corrientes fluviales y los bordes del DAE, que limita con el valle de Atlixco. En el sector de ladera volcánica y derrames, la pendiente del terreno y la acción de las corrientes fluviales, son los factores más importantes que intervienen para que el proceso erosivo alcance este nivel. Esta categoría de erosión potencial también se presenta en parte de las laderas de los lomeríos plegados del centro-sur del valle de Atlixco, en el vulcanismo terciario y conglomerados antiguos del SE de la región, en parte de la ladera superior de las sierras terciarias y cuaternarias del N, NE y E de la ciudad de Atlixco, además de parte de las laderas de la Sierra de Tentzo y parte de la zona de lomeríos plegados antiguos, donde la pendiente también alcanza valores de entre 20 y 30°. En la zona de lomeríos, se presenta en las paredes de los barrancos desarrollados por las corrientes fluviales que alimentan al Río Grande, localizado al SE del área de estudio (figura 14). El clima templado de la región de estudio, provee alrededor de 1000 mm de precipitación media anual, la erosión fluvial actúa diferencialmente en conjunto con otros factores, como la pendiente del terreno y los contactos litológicos, principalmente.

f) **Muy Fuerte**; cubre un área de 34.4 km<sup>2</sup>, representa el 3.5 % del total. Esta categoría de erosión potencial se presenta a lo largo de las paredes de los barrancos que se han desarrollado radialmente sobre la ladera volcánica, en los frentes y bordes de derrames de lava del volcán Popocatepetl, y en los bordes y barrancos que han excavado las corrientes fluviales en el DAE del

Popocatepetl donde la pendiente alcanza valores de entre 30 y 60° (figura 12). También se calculó en parte de las laderas de las lomas plegadas antiguas del centro-sur del valle de Atlixco, sobre la ladera superior de las sierras volcánicas del N, NE y E de Atlixco, además de la ladera superior de la Sierra de Tentzo y en las laderas de los barrancos que han excavado los afluentes del Río Grande, en la zona de lomeríos plegados antiguos del SE de la zona de estudio, donde la pendiente alcanza valores altos que van de 30 a 45°.

g) **Intensa**; sólo cubre un área de 3.9 km<sup>2</sup> y representa el 0.4 % del total de la zona de estudio. Esta categoría de erosión potencial comprende las laderas de los barrancos excavados por las corrientes fluviales que descienden de la parte alta del volcán Popocatepetl y las localizadas en la parte sur del depósito de avalancha de este volcán, en los bordes y frentes de derrames de lava, en parte de la ladera superior de las sierras terciaria y cuaternarias del N, NE y E de la ciudad de Atlixco, además de partes de la ladera superior de la Sierra de Tentzo y sobre las paredes de los barrancos de la microcuenca del Río Grande. En todas las zonas mencionadas dentro de esta categoría, la pendiente es superior a 60° (figuras 12 y 15).

La erosión dentro de esta categoría se lleva a cabo de forma lineal, por cauces bien definidos, que marca los límites entre algunos derrames de lava o desarrollados dentro de ellos. Esta categoría se mide en el límite de los derrames Popocatepetl y El Fraile, donde se desarrollan profundos barrancos por las corrientes fluviales del Río Atila y sus tributarios. Además, dentro de los cauces de los ríos Culmonio y Ahuehuello que han desarrollado linealmente profundos barrancos en rocas de origen volcánico terciarias, al SE de la región de estudio (figuras 12 y 15).

El cauce principal del Río Grande, que ha erosionado linealmente profundos barrancos, en la parte SE de la zona de estudio, también presenta esta categoría de erosión potencial.

**Tabla 4**  
Rangos de erosión potencial en km<sup>2</sup> y porcentaje.

Color	Rango de erosión potencial	Área km <sup>2</sup>	%
	<i>Débil</i>	360.4	36.9
	<i>Muy débil</i>	180.7	18.5
	<i>Moderada a fuerte</i>	167.8	17.1
	<i>Moderada</i>	149.2	15.2
	<i>Fuerte</i>	76.1	7.7
	<i>Muy fuerte</i>	34.4	3.5
	<i>Intensa</i>	3.9	0.4

### **3.6 Análisis de la Energía del Relieve.**

La energía del relieve expresa la diferencia de alturas en áreas determinadas dentro de una superficie estudiada.

El mapa morfométrico de energía del relieve se elaboró calculando la diferencia de alturas en áreas de 25 km<sup>2</sup> sobre el mapa topográfico de Atlixco, y los valores fueron interpolados en SIG ILWIS 3.4, para su presentación final.

La medición de la diferencia de alturas de las áreas en que se dividió el mapa topográfico dio como resultado la obtención de 10 rangos de valores (figura 16).

Los valores máximos de diferencia altitudinal por área se obtuvieron en la región más alta de la zona de este estudio, el área de mayor actividad volcánica, sobre la ladera superior del volcán Popocatepetl, las áreas que resultan de dicha diferencia de valores están representadas en el mapa de energía del relieve, adaptándose a la forma cónica del edificio volcánico, disminuyen de manera gradual conforme se avanza ladera abajo. Los valores mínimos de diferencia de alturas o energía del relieve se registraron en el valle de Atlixco y en el piedemonte del Popocatepetl, zonas de mayor estabilidad.

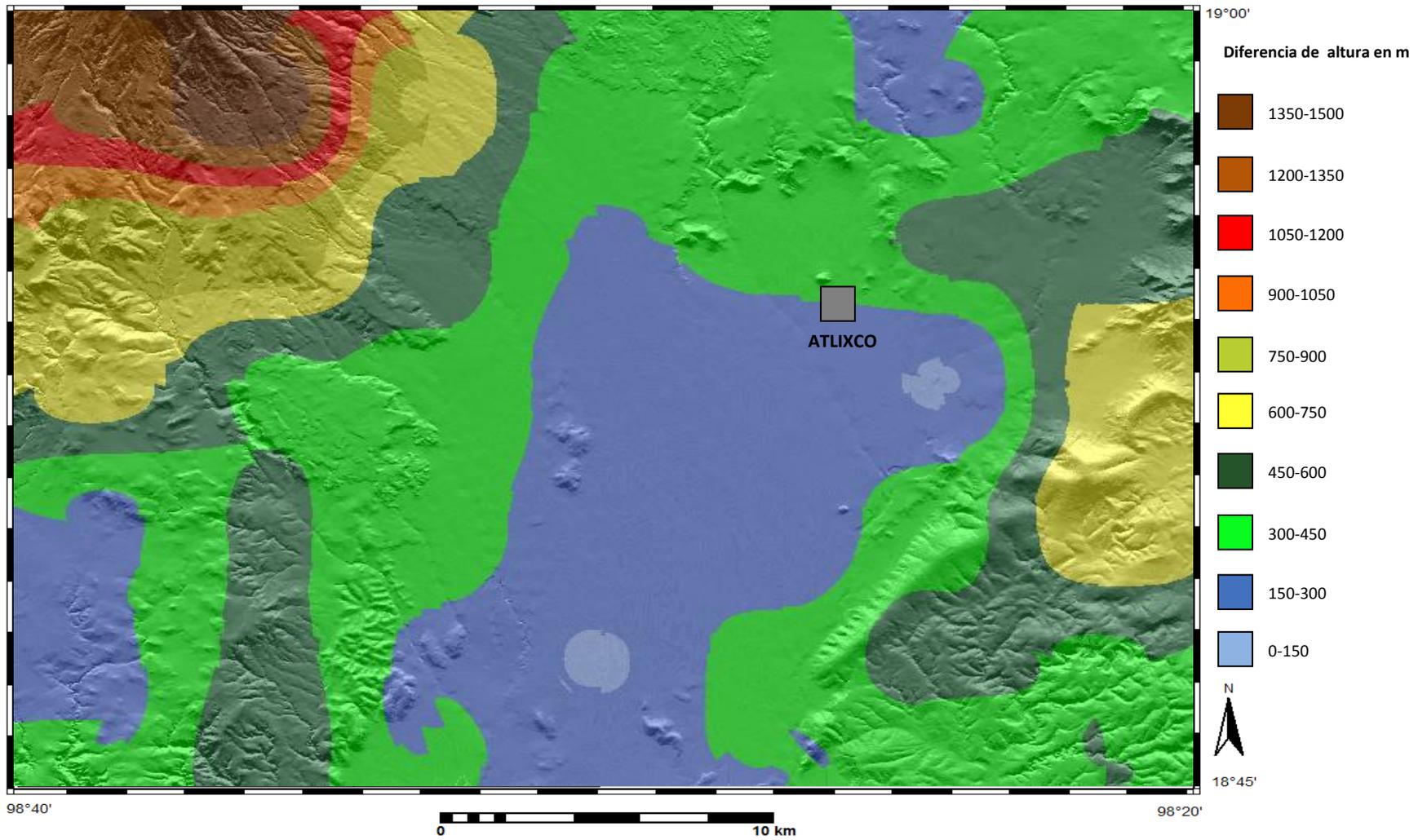


Figura 16. Mapa de energía del relieve de Atlixco.

El rango de 1350-1500 m cubre la parte más alta de la zona de estudio, en ladera sureste del volcán Popocatepetl, es un área de 18.5 km<sup>2</sup>, representa el 1.9 % del total.

El valor de amplitud del relieve de 1200-1350 m se desarrolla en forma semicircular en la ladera alta del volcán, cubre un área de 27.5 km<sup>2</sup> y representa el 2.8 % del total (Figura 16).

Representando el 1.5 % del total y cubriendo un área de 14.9 km<sup>2</sup>, el rango de 1050-1200 m también se desarrolla con forma semicircular en la parte media de la ladera volcánica.

El rango de 900-1050 m cubre un área de 15.8 km<sup>2</sup> y representa el 1.6 % del total, se desarrolla sobre la parte media de la ladera volcánica en forma semicircular (Figura 16).

El rango de 750-900 m cubre un área de 36.9 km<sup>2</sup> y representa el 3.7 % del total. El área que cubre tiene forma semicircular en la parte media de la ladera del Popocatepetl.

Cubriendo un área de 82.7 km<sup>2</sup>, el rango de 600-750 m representa el 8.4 %. Se desarrolla con forma semicircular en la parte media de la ladera del volcán. Además, sobre parte de la sierra volcánica de Santo Domingo y la zona adyacente a esta de la planicie del valle de Atlixco, y en parte de la Sierra de Tentzo (Figura 16).

El rango de 450-600 m de diferencia altitudinal cubre un área de 170.8 km<sup>2</sup>, representa el 17.5 % del total desarrollándose sobre la parte media del piedemonte del Popocatepetl, sobre el límite oriental del DAE y las lavas antiguas del sur de la zona de estudio, en parte de la sierra y lomeríos plegados de Tentzo y sobre la Sierra de Santo Domingo y parte del valle de Atlixco, adyacente a esta sierra, localizados al E de la ciudad de Atlixco. Este rango es el tercero en cuanto al área que ocupa dentro de la zona de trabajo.

El rango de 300-450 m cubre un área de 363.4 km<sup>2</sup>, representa el 37.2 %, se desarrolla en el piedemonte del Popocatepetl, en parte del depósito de

avalancha de este volcán, sobre el campo volcánico del Mioceno y derrames de lava del norte de Atlixco, en el valle de Puebla y en parte de la Sierra de Tentzo y lomeríos adyacentes a ésta.

El valor de amplitud del relieve de 150-300 m representa el 24.6 % del total, cubre un área de 240.6 km<sup>2</sup>, se desarrolla ampliamente en los valles de Atlixco y Puebla, y en la parte Inferior del DAE del Popocatepetl. Este valor es el segundo en cuanto al área que ocupa dentro del total.

El último rango de diferencia altitudinal es de 0-150 m, cubre un área de 5.4 km<sup>2</sup>, representa el 0.5 % del total y se desarrolla en dos áreas sobre el valle de Atlixco, zona de estabilidad, poca pendiente y poca erosión potencial, razón del bajo valor de diferencia de altitudes de toda la zona de este estudio (Figura 16).

**Tabla 5**  
**Rangos de diferencia de altura.**

Área color	Diferencia de altura en m	Área km <sup>2</sup>	%
	300-450	363.4	37.2
	150-300	240.6	24.6
	450-600	170.8	17.5
	600-750	82.7	8.4
	750-900	36.9	3.7
	1200-1350	27.5	2.8
	1350-1500	18.5	1.9
	900-1050	15.8	1.6
	1050-1200	14.9	1.5
	0-150	5.4	0.5

### **3.7 Análisis de la Densidad de la Disección del Relieve.**

El mapa de densidad del drenaje o densidad de la disección del relieve se elaboró a partir del mapa topográfico "Atlixco" del INEGI en escala 1:50000. Sobre el mapa topográfico se marcaron todas las corrientes fluviales impresas e inferidas, y se dividió el mapa en figuras geométricas de 25 km<sup>2</sup>. En cada figura se midió la longitud de todos los talwegs y se dividió el valor entre el área. El resultado es la densidad de disección en km/km<sup>2</sup> (Lugo-Hubp, 1988). Los valores obtenidos se integraron en el SIG ILWIS 3.4 y con apoyo del módulo de kriging, se interpolaron para obtener el mapa de densidad de la disección del relieve.

Cada corriente fluvial que observamos en las fotografías aéreas, en los mapas, o en el terreno, representa el trabajo de la erosión sobre la superficie.

La densidad de corrientes fluviales se debe a varios factores que se combinan. El clima, la pendiente, el tipo de roca, la estructura geológica, son algunos de los factores que favorecen o no el desarrollo de cauces.

Para facilitar la descripción del mapa, se asignaron las letras **A, B, C, C1, D, D1, D2, D3, E, F, F1, F2, G** a las áreas de colores que cubren los rangos de densidad de disección (figura 17).

**A.** En esta parte es donde existe la mayor densidad de disección del relieve con una variable de entre 6 y 7 km/km<sup>2</sup>. Partiendo con dirección SE del punto más alto de la zona de este trabajo, localizado a 4150 msnm sobre la ladera superior del volcán Popocatepetl, hasta los 2600 msnm, al norte del poblado San Pedro Benito Juárez, y hacia el sur, hasta los 3100 m, se observan pendientes de entre 6 y 20° sobre los derrames de lava, y de entre 20 y 45° sobre sus bordes y frentes, en las laderas de los numerosos barrancos que se han desarrollado sobre los productos volcánicos son mayores a 60°. Las barrancas Quimichule, Xalteluco, Icuitlapamoyo y Hueyetlaco se han desarrollado siguiendo fracturas en roca andesita y en asociaciones de

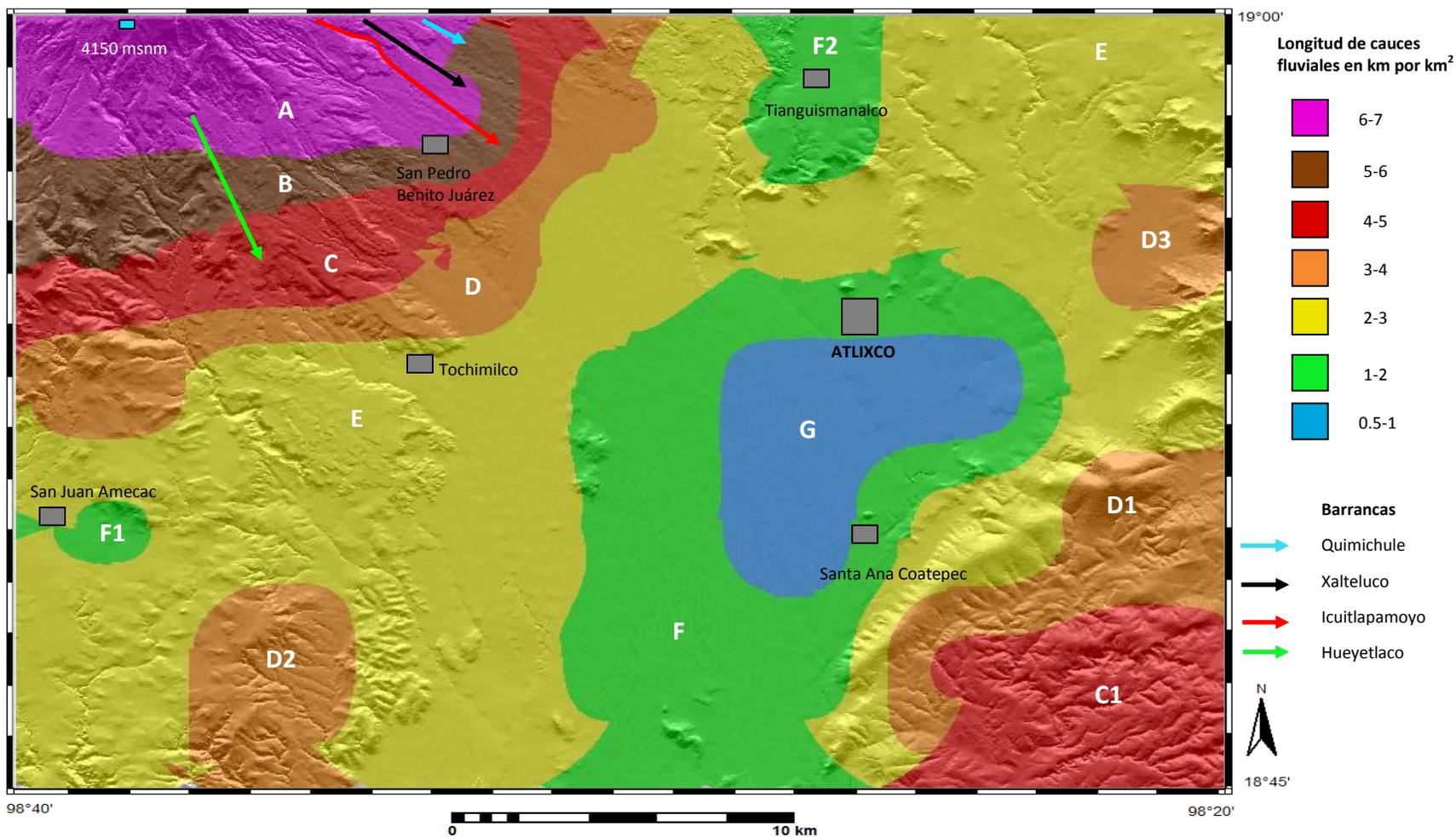


Figura 17. Mapa de densidad de la disección del relieve. Las letras fueron asignadas a las áreas de rangos de densidad de disección que se explica en el texto.

toba basáltica-brecha volcánica basáltica y toba-brecha volcánica andesítica. Algunas fracturas se han desarrollado en contactos litológicos en donde se forman barrancas.

La alta densidad fluvial en este nivel altitudinal se desarrolla en materiales volcánicos recientes del Popocatepetl y en laderas fuertemente inclinadas que favorecen el escurrimiento, y en consecuencia la disección del relieve. El mapa de erosión potencial elaborado con el SIG ILWIS 3.4 muestra que existe una posibilidad de erosión *moderada a fuerte* en esta área. A lo largo de los barrancos y en los frentes y bordes de los derrames de lava la erosión potencial se eleva a rangos de *fuerte, muy fuerte e intensa*. Esto es entendible puesto que a lo largo de estas formas la pendiente se incrementa hasta más de 60°. A mayor densidad de corrientes fluviales mayor erosión potencial.

En esta zona las lluvias de verano alcanzan su máximo en el mes de junio con 168 mm, con promedio anual de más de 900 mm. Sobre los 4000 m de altitud la precipitación alcanza los 1200 mm en promedio anual, con bajas temperaturas menores a -2°C como promedio anual. La denudación en altitudes mayores a 4000 m es favorecida por ser una zona sometida a bajas temperaturas, la gran disponibilidad de precipitación y las muy inclinadas pendientes son elementos importantes que contribuyen a que los valores registrados de densidad de disección del relieve sean los más altos.

**B.** Sobre la misma ladera montañosa del Popocatepetl, en altitudes menores a 3100 m, este elemento morfométrico alcanza valores de entre 5 y 6 km/km<sup>2</sup>. Este valor se reconoce también en los depósitos volcánicos recientes, en pendientes de entre 6 y 12° y 12 y 30°, y una menor extensión con pendientes que van de 45 hasta más de 60°, medidas en las barrancas y los bordes y frentes de los derrames lávicos. Se nota que también algunos cauces son controlados por fracturas (figura 17).

Con clima templado subhúmedo lluvioso en verano, que alcanza los 910 mm en promedio anual, se observa una disminución en la densidad de las corrientes fluviales, que estaría controlada por los valores bajos de

pendiente, como factor principal, pues los factores litológico y climático son prácticamente los mismos. Por lo tanto, se puede decir que la erosión también disminuye en esta zona en relación con la primera descrita.

Las dos áreas descritas anteriormente, con los mayores valores de densidad de la disección del relieve de toda el área de trabajo, es donde se desarrolla la vegetación natural, principalmente, compuesta por bosques de pino, encino y oyamel (INEGI, 1983b). Es, por lo tanto, una zona importante de infiltración hídrica que alimenta los mantos acuíferos de las zonas bajas del valle de Atlixco.

**C.** Un área de densidad de la disección del relieve de entre 4 y 5 km/km<sup>2</sup> se localiza, de forma aproximada, dentro de las franjas altitudinales de 2800 m y 2200 msnm rodeando la ladera del volcán Popocatepetl (figura 17). Este rango de densidad se desarrolla sobre depósitos de avalancha de escombros anteriores al actual volcán Popocatepetl, derrames de lava del Popocatepetl y en parte del abanico volcánico en su parte superior. En esta zona se observa un control del curso del Río Atila que ha sido excavado en el límite de los derrames Popocatepetl, y el depósito de avalancha de escombros (DAE). La disección del relieve ha sido más intensa sobre el depósito de avalancha, de edad mínima de 23 000 años, que sobre los derrames Popocatepetl que sobreyacen al primero y son de edad más reciente.

Sobre las coladas de lava la pendiente predominante alcanza valores de entre 6° y 12°, incluso menores, y sobre el depósito de avalancha hay un predominio de valores de pendiente de entre 12° y 20°, con una pequeña área de depósito aluvial que presenta bajos valores de pendiente de entre 0 y 6°. En barrancos, frentes y bordes de derrames las pendientes de entre 20° y 45° son las que dominan, pero se observan también mayores a 60°.

La franja de este rango se vuelve más angosta al salir de la zona antes descrita y al ingresar al abanico volcánico donde se nota una disminución del valor de la pendiente de entre 2° y 12°. La erosión potencial se ajusta claramente a lo descrito, disminuye en la zona del abanico.

**C1.** Existe otra área dentro de la zona estudiada que presenta el rango de disección fluvial de entre 4 y 5 km/km<sup>2</sup>, localizada en la porción SE. Se desarrolla sobre un lomerío de rocas calizas del Mesozoico que forman parte de la Sierra de Tentzo, en altitud de entre 1450 y 1800 msnm. El Río Grande, principal corriente de esta zona, y sus afluentes, han hecho una fuerte disección sobre estas rocas sedimentarias plegadas, hasta de más de 150 m la profundidad de los barrancos que se han desarrollado en fracturas con orientación NW-SE. Con clima templado de menor humedad que aporta 860 mm de lluvia en promedio anual, con temperatura de 22°C como promedio anual, 24.1°C para el mes más cálido del año y 19.7°C para el más frío, esta área está sujeta a un intenso intemperismo físico.

La intensa disección del relieve se presenta sobre rocas antiguas con pendientes de entre 6° y 20° principalmente, y desde 30 hasta 60° y más, sobre las paredes de los barrancos. Existen dentro de esta área pendientes de entre 0 y 2°, localizadas en el límite sur de esta zona y sobre el curso de algunas corrientes fluviales, donde se ha ido depositando el material aluvial. Se presenta una erosión potencial de *débil a moderada*. De *moderada a fuerte* se calculó para el área con intensa disección y pendientes entre 6° y 20°. Para la zona de barrancos, con pendientes mayores, se determinó que existe una erosión potencial *fuerte*, principalmente.

**D.** El rango de densidad de disección del relieve de entre 3 y 4 km/km<sup>2</sup> se desarrolla como una franja casi paralela a la franja anterior, sobre litología, clima y pendientes similares (figura 17). La precipitación media anual registrada en Tochimilco es de 967 mm. La densidad de las corrientes es mayor sobre los derrames Popocatepetl y sobre el depósito de avalancha de escombros, este hecho se refleja por el ancho que tiene esta franja en esta zona.

Donde la franja sale de esta zona y entra al abanico volcánico abarca un área más angosta, puesto que el número y extensión de las corrientes fluviales disminuyen de forma notoria, con pendientes dominantes de entre 2° y 12°. Esta franja se desarrolla en parte de un derrame de lava que en este trabajo

se identifica como colada 1, en el centro-norte de la zona estudiada. Potencialmente, la erosión estaría desarrollándose entre los rangos de *moderada a fuerte* y *fuerte* en la zona donde las corrientes fluviales cortan los derrames lávicos y el depósito de avalancha, con pendientes que van desde los 2 a 12° sobre las mesetas de los derrames, y mayores a 60° en los barrancos. Una erosión potencial de entre *débil* y *moderada* se estaría desarrollando en la zona del abanico volcánico acumulativo de poca pendiente que no presenta gran densidad de disección hídrica.

**D1.** Otra zona con estos valores de densidad de la disección del relieve de entre 3 y 4 km/km<sup>2</sup>, y separada de la descrita, se localiza sobre parte de la vertiente oriental del anticlinal de la Sierra de Tentzo y en parte de la zona de lomeríos de roca caliza, al oriente de esta sierra (figura 17). La litología, el clima templado subhúmedo con lluvias de 860 mm anuales y el fracturamiento son algunos factores que ayudan a que la erosión por las corrientes del Río Grande y sus tributarios hayan desarrollado una pequeña área con un patrón dendrítico en este espacio. Presenta pendientes de entre 12 y 20° principalmente, de 30 a 45° en algunas partes de la ladera oriental de la Sierra de Tentzo y mayores a 60° en los barrancos. A las primeras pendientes les corresponde una erosión potencial de *moderada a fuerte*, a las de 30 a 60° se le asignó un valor *fuerte* y a las mayores de 60° *muy fuerte* e *intensa*, en el mapa de erosión potencial.

**D2.** Otra área con valores de 3 a 4 km/km<sup>2</sup> se localiza sobre el depósito de avalancha de escombros en la parte sureste de la zona de estudio, donde la disección es favorecida por fracturas, en terrenos con pendientes entre 12 y 20°, la inclinación aumenta a 60° y hasta más en las laderas de las barrancas que han sido excavadas por los tributarios del Río Atila, que escurre a lo largo de una extensa fractura que divide una zona de pequeños lomeríos de roca caliza en la parte sur de la zona de estudio.

**D3.** Otro lugar con estos mismos valores de disección de 3 a 4 km/km<sup>2</sup>, corresponde a una parte de la Sierra de Santo Domingo, en la ladera oeste y en la planicie contigua (figura 17). La pendiente mayor en esta zona se ubica

en las laderas altas de la sierra y alcanza hasta más de 60°. El resto de la zona presenta pendientes que disminuyen desde 12 a 20° en la ladera montañosa, hasta menores de 2° en la planicie. Es en este lugar donde la erosión potencial sólo presenta valores que van de *muy débil* a *débil*. En la sierra alcanza valores *muy fuerte* e *intensa* y en su ladera un rango de *moderada a fuerte*.

E. Una extensa superficie que presenta valores de disección de entre 2 y 3 km/km<sup>2</sup>, se desarrolla sobre la parte baja del antiguo depósito de avalancha, anterior al actual volcán Popocatepetl, sobre parte de los derrames Popocatepetl y El Fraile (figura 22), abarca áreas con altitudes desde los 2300 a los 1700 msnm, de forma aproximada, en el límite sureste de la zona de estudio. Se extiende, asimismo, en parte del piedemonte volcánico en su parte media, entre 1900 y 2100 m de altitud, también abarca la parte noroeste, norte y noreste de la ciudad de Atlixco, sobre lavas del Mioceno conocidas como vulcanitas Atlixco, sobre parte de la colada 1 (ver figura 22) y sobre los antiguos depósitos de avalancha de escombros del volcán Los Pies del complejo volcánico Iztaccíhuatl (García-Tenorio, 2008), localizado en la parte norte de las vulcanitas Atlixco. Esta extensión continúa sobre la pequeña Sierra de San Bernardino, en la esquina noreste de la zona de estudio, y se extiende al sur sobre la Sierra de Tentzo. Esta área presenta pendientes de entre 2 y 6° en su mayoría, además de entre 6 y 20°. Las pendientes de entre 30 y 60°, y más, se ubican en el depósito de avalancha, en el frente y borde de los derrames de lava, sobre las vulcanitas Atlixco, en la Sierra San Bernardino y en la Sierra de Tentzo. La erosión potencial calculada presenta valores de *muy débil* y *débil* en donde la franja de disección se extiende sobre los depósitos del piedemonte del Popocatepetl, y con valores que van de *moderada a fuerte* y *fuerte* sobre la colada 1 y las sierras, volcánica y caliza.



Figura 18. En primer plano se observa la planicie de poca inclinación del valle de Atlixco, al fondo la barrera para los sedimentos de la Sierra plegada de Tentzo. Al pie de la sierra corre el Río Nexapa, principal corriente de la zona de estudio. Vista hacia el SE desde el sur de Santa Ana Coatepec.

**F.** La Sierra de Tentzo ha funcionado como una barrera para el emplazamiento de los depósitos que constituyen el abanico volcánico de piedemonte del volcán Popocatepetl (Fig. 18). Al pie de la ladera oeste de esta sierra está el cauce del Río Nexapa, principal corriente de toda la zona estudiada, marcando el límite con el abanico volcánico. En esta parte del valle de Atlixco se obtuvieron valores de densidad de disección del relieve de entre 1 y 2 km/km<sup>2</sup>, en pendientes de 0 a 2° (figura 17). Las pendientes de entre 2 y 6° son secundarias. La poca inclinación de esta área refleja una erosión potencial *muy débil* de forma general, con áreas de valor *débil*.

La poca inclinación, la débil pérdida de suelo y el clima, hacen que esta zona baja sea utilizada ampliamente para la actividad agrícola, de temporal y riego, sobre suelo fluvisol.

**F1.** Un área pequeña que presenta también valores de densidad de disección de entre 1 y 2 km/km<sup>2</sup> se localiza justo sobre el poblado San Juan Amecac, en una planicie con pendientes de entre 0 y 2°, en la parte media del depósito de avalancha de escombros. Con valor *muy débil* en cuanto a erosión potencial, esta zona se utiliza para la agricultura de temporal.

**F2.** Por último, en este rango entre 1 y 2 km/km<sup>2</sup> se encuentra un área dentro de la cual se ubica la población Tianguismanalco, al norte de la zona de estudio. La baja densidad de disección del relieve, con pendientes de entre 0 y 6° y *muy débil* erosión potencial, permiten la actividad agrícola (figura 17).

**G.** El área con los valores de la densidad de la disección del relieve de toda la zona estudiada, de entre 0.5 y 1 km/km<sup>2</sup>, se calculó para el área que ocupa parte de la ciudad de Atlixco hasta el sur del poblado Santa Ana Coatepec. Con predominio de pendientes de entre 0 y 2° y de entre 2 y 6° con menor expresión, hay pocas corrientes fluviales. El Río Cuescomate ha excavado esta planicie de manera escasa con profundidades de entre 10 m, en la ciudad de Atlixco, hasta de 30 m en el punto de unión con el Río Nexapa, al sureste de Atlixco. Esta área es utilizada para la actividad agrícola de temporal y riego, la precipitación en promedio anual es casi 1000 mm, la región cuenta con un sistema de acequias para conducir el agua de las partes altas para el riego de los cultivos.

El valle de Atlixco es utilizado para la agricultura de temporal o de riego, pero siempre se observan áreas coloridas por la variedad de productos.

**Tabla 6**  
Longitud de cauces en km por km<sup>2</sup>.

Área color	Longitud de cauces km por km <sup>2</sup>	Área km <sup>2</sup>	%
	2-3	411.8	42.1
	1-2	162.3	16.6
	3-4	144.3	14.7
	4-5	101.4	10.3
	6-7	62.8	6.4
	0.5-1	52.0	5.3
	5-6	41.3	4.2

### **3.8 Análisis de la Profundidad de la Disección.**

La profundidad de disección es la altura o distancia vertical medida desde el talweg a la divisoria, en metros. Los valores obtenidos de profundidad son un reflejo del proceso erosivo durante un tiempo determinado en que la superficie ha estado expuesta a la disección (Lugo-Hubp, 1988). El clima, relieve, litología, tectónica, son factores que controlan el trabajo erosivo.

La pendiente es tal vez el factor más importante que controla la profundidad de la disección en esta zona de trabajo. La correlación espacial de los mapas de pendiente y profundidad se ajustan de manera casi exacta.

El mapa de profundidad de la disección complementa otros elementos morfométricos, el análisis del relieve debe incluir varios factores que intervienen en el proceso que crea las formas que observamos sobre la superficie.

En el mapa de profundidad de la disección se nota una zonificación del relieve que refleja diferente intensidad del proceso erosivo en el área que cubre este trabajo y que es consecuencia de la diferencia entre los factores que intervienen en el proceso (figura 19).

Para facilitar el análisis y explicación del mapa de profundidad de la disección del relieve y de la zonificación observada, se elaboró el mapa de zonas de profundidad de la disección (figura 20).

**Zona A.** En el mapa de profundidad de la disección se observa una zona con orientación N-S, desde el límite norte hasta el límite sur, un gran bloque equivalente a un tercio del total de la zona de estudio (figura 20).

En esta zona se observan dos áreas en forma de franjas alargadas con dirección N-S. Otras tienen forma semicircular. Se describen numeradas más adelante.

Esta zona A está compuesta, partiendo de la zona alta, por algunos derrames de lava de diferente edad del Popocatepetl, depósitos de ceniza y de pómez. Después de los derrames y hasta el límite sur, se localizan antiguos depósitos de avalancha de escombros. Se observa un sistema de fracturas que controlan la mayoría de las corrientes fluviales que alimentan al Río Atila, que ha excavado barrancas hasta de 280 m al salir de los derrames de lava, e ingresar al abanico de depósito de avalancha (Espinasa-Pereña, 2007).

**1.** En la ladera superior del volcán, con pendientes variables de entre 6 y 60° y más, se obtuvieron valores de profundidad de disección de entre 150 y 200 m. Los climas frío y templado con 1000 mm de precipitación media anual, favorecen la erosión con valores altos.

El área se extiende, como una lengüeta más delgada, hasta el límite sur de la zona de estudio. Sale de la zona de derrames de lava como una franja delgada y se amplía al entrar al abanico de depósito de avalancha, donde se adapta a la zona donde el Río Atila y sus tributarios han disecado el depósito de escombros. Este río sigue su curso sobre una fractura que divide los lomeríos de caliza. En general, la vertiente occidental del río presenta mayor número de tributarios los cuales erosionaron esta parte del relieve. Se ha desarrollado en pendientes desde 0° hasta más de 60°.

**2.** El rango de disección del relieve de 200 a 250 m de profundidad se midió en dos secciones separadas.

La primera en parte de derrames de lava y del depósito de avalancha, con pendientes de 2 a más de 60°. Esta variación se debe a que engloba las mesas

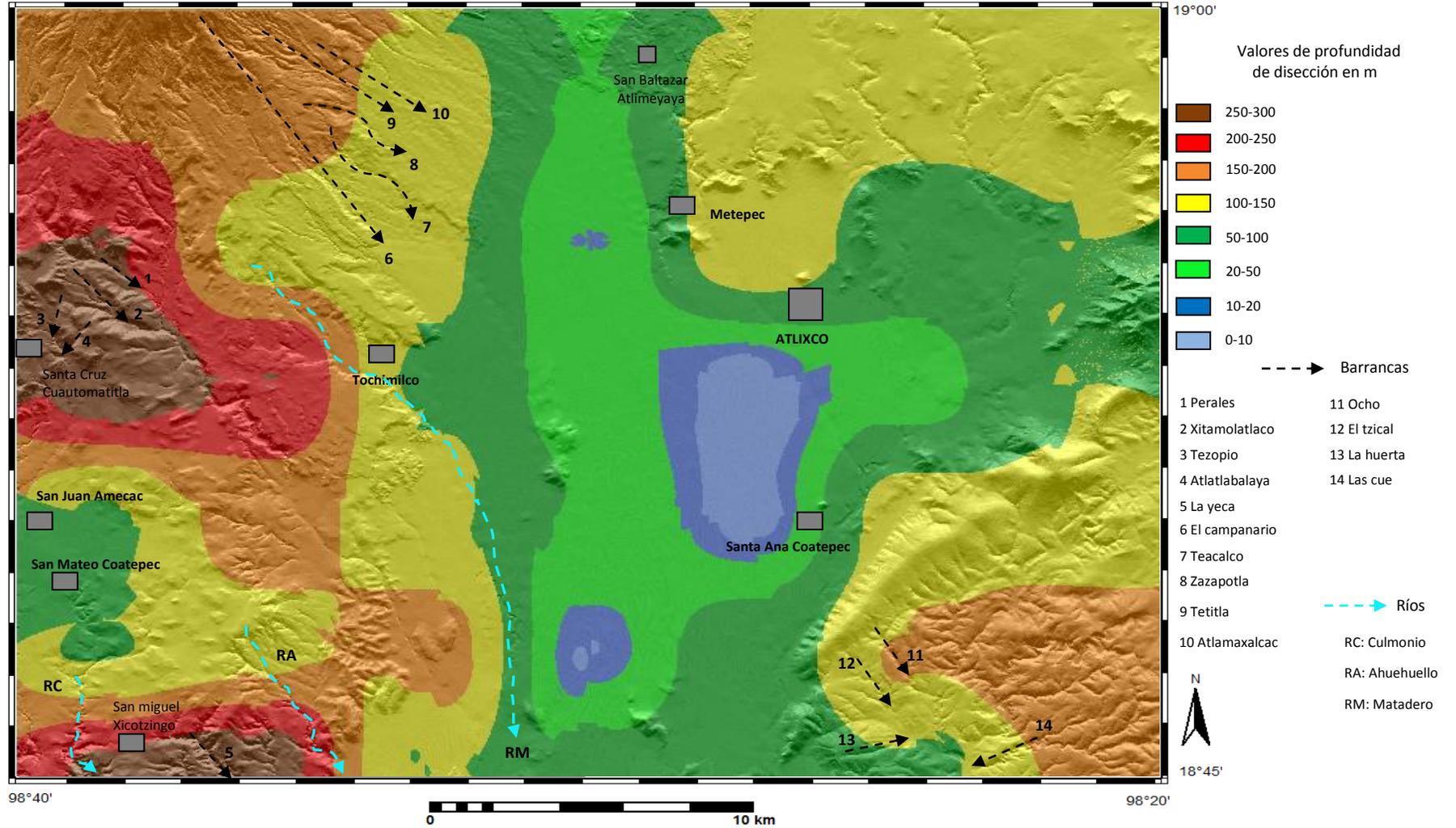


Figura 19. Mapa de profundidad de la disección del relieve.

de lava, y pequeñas áreas de depósito aluvial sobre la zona de la avalancha. El clima templado a altitud de 3000 m, favorece una precipitación de más de 900 mm principalmente en verano, que junto con el agua de deshielo del volcán, contribuyen a la disección fluvial (figura 19).

La segunda zona que presenta una disección alta con valores de entre 200 y 250 m de profundidad, se localiza al sur del bloque. Aquí, se han desarrollado barrancos profundos por el Río Culmonio, que ha cortado antiguos depósitos de avalancha de escombros.

**3.** Los mayores valores de profundidad de disección del relieve de toda el área se reconocen en esta zona de la ladera sur del volcán Popocatepetl, son de entre 250 y 300 m (figura 19).

**3.1** La primera se localiza al norte del poblado Santa Cruz Cuautomatitla que se asienta sobre la avalancha de escombros en su parte superior, a 2500 msnm. Este depósito fue excavado por corrientes fluviales que son controladas por fracturas, dando origen al desarrollo de las barrancas Perales de 310 m de profundidad, Xitamolatlaco con 280 m, Tezopio de 130 m y Atlatlabalaya de 130 m. Estos valores altos de disección del relieve coinciden con dos rangos de valor de densidad de corrientes fluviales, de entre 3 y 5  $\text{km}/\text{km}^2$ , en pendientes de 6 a 60° y más.

**3.2** La segunda área con valores de entre 250 y 300 m de profundidad, se localiza en los alrededores del sur del poblado San Miguel Xicotzingo, en el extremo sur del bloque. Alcanzan hasta de 270 m en la Barranca La Yeca, al SE de este poblado, y la del Río Culmonio. En esta zona se calcularon valores *fuerte*, *muy fuerte* e *intenso* para la erosión potencial, que corresponden a los altos valores de profundidad de la disección, que coincide con una densidad de corrientes fluviales de entre 2 y 4  $\text{km}/\text{km}^2$  (figura 19).

**4.** Una franja con valores de profundidad de disección de entre 100 y 150 m se extiende desde el norte hasta el sur del bloque. En su parte norte y central se desarrolla abarcando parte de los derrames Popocatepetl y en

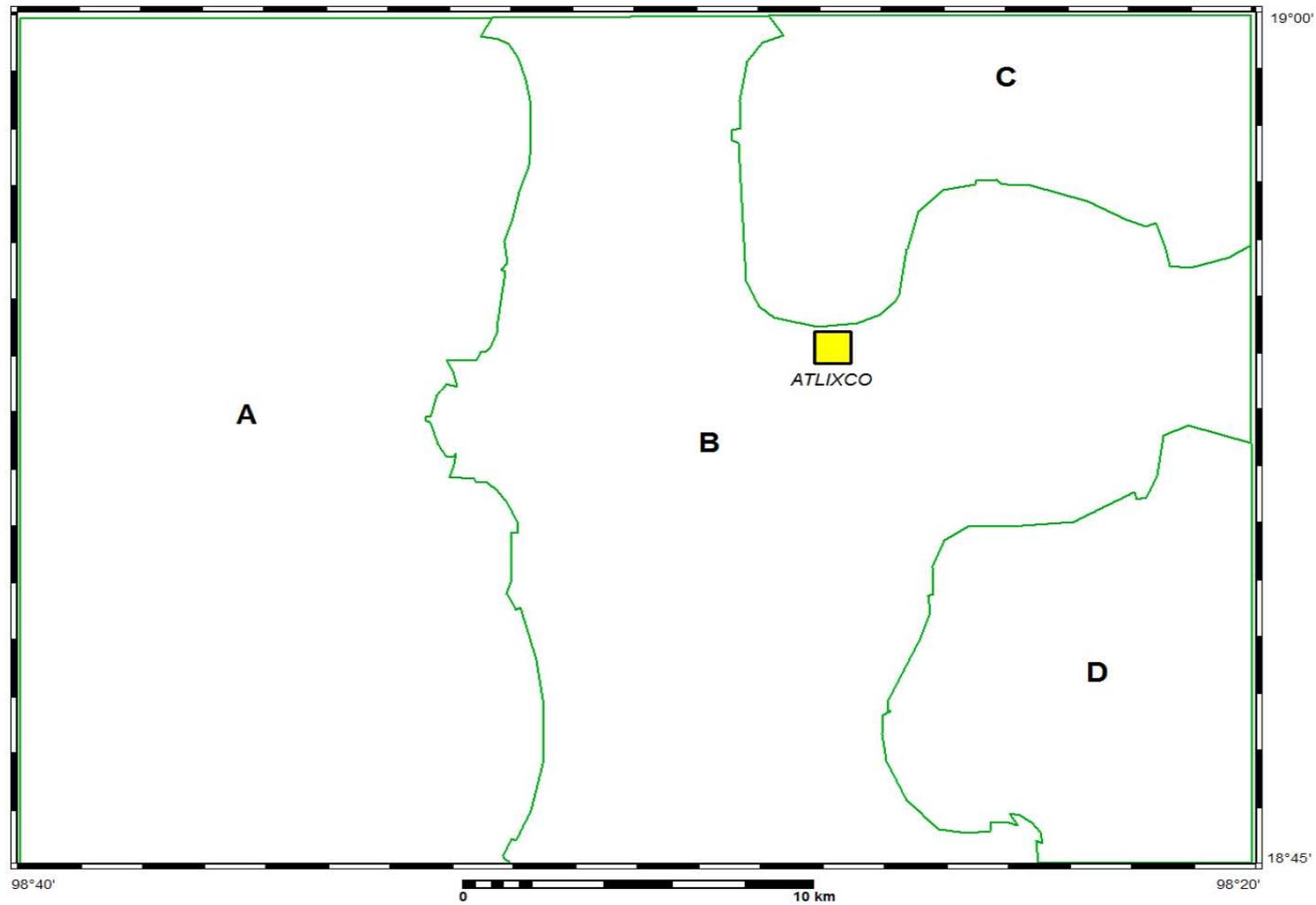


Figura 20. Mapa de zonas de profundidad de la disección. Se elaboró a partir del mapa de profundidad de la disección, para facilitar el análisis y su explicación se asignaron las letras A, B, C y D a las áreas que muestran un agrupamiento de los rangos de profundidad de la disección.

parte del abanico de piedemonte del volcán Popocatepetl. La parte sur de esta franja se ubica en el límite oeste de la planicie del valle de Atlixco.

La sección norte de esta franja cubierta de lavas, presenta una densidad de corrientes fluviales de 3 a 6 km/km<sup>2</sup>, en pendientes de 2 a 45°, puesto que la franja abarca zonas de depósito, derrame, borde y frente de lava. Aquí se han desarrollado las barrancas El Campanario, Teacalco, Zazapotla, Tetitla, Cualacayo, Atlamaxalcac, entre otras, que siguen la dirección NW-SE que presentan las fallas y fracturas.

En la parte central de esta franja, al sur del poblado Tochimilco, el Río Matadero divide los derrames Popocatepetl y al abanico volcánico. La sección central y sur de esta franja se localiza en áreas con pendiente reducida de entre 2 y 6°. En la mesetas de derrames se registran pendientes de entre 2 a 20°, el frente y borde hasta de más de 60°.

**4.1** Otra área que presenta valores de profundidad de la disección de entre 100 y 150 m se localiza alrededor del este de los poblados San Juan Amecac, San Mateo Coatepec y San Pedro Ixhuatepec, y dentro del área de San Francisco Xochitiopa. La zona de depósito presenta topografía hummocky (Mooser, et al. 1996), montículos característicos de avalanchas de escombros (figura 19).

Esta área es excavada por el Río Oxpanco, que al unirse con el Axuxuca forman el Culmonio, y por el Río Ahuehuello, ambos se desarrollan sobre fracturas.

Se registran pendientes de los 2 a 6°, en menor medida, de 6 a 20°, y hasta de más de 60° en los barrancos y en el relieve antiguo volcánico.

**5.** Adyacente al área anterior, con valores de pendiente de 0 a 6°, la profundidad de la disección es de entre 50 y 100 m. En esta zona de depósito de escombros están asentadas las poblaciones San Juan Amecac y San Mateo Coatepec, es utilizada para la agricultura de temporal. El clima es templado subhúmedo con más de 967 mm de precipitación anual. La erosión potencial es *muy débil*, y en menor grado *débil*, sólo presenta un valor de *moderado a*

*fuerte* en la Barranca Cuitlaxteca de unos 60 m de profundidad y de 12 a más de 60° de pendiente, al sur de San Mateo (figura 19).

**Zona B.** Esta zona se extiende desde el centro-norte al centro-sur del área de estudio (figura 20). A partir de su parte media tiene una extensión hacia el oriente, hasta el límite estudiado. Los valores de profundidad de la disección son de 50 a 100 m. En el mapa de profundidad de la disección se observan otras zonas de valores en la parte más plana del abanico volcánico de piedemonte del volcán Popocatepetl, que corresponde al principal asentamiento poblacional, la ciudad de Atlixco.

En la parte norte se observan dos derrames de lava andesítica de conos adventicios que continúan fuera de la zona de estudio, la colada 1 y la colada 2 al NW y NE, respectivamente, del poblado San Baltazar Atlimeyaya.

Este rango de profundidad de la disección se relaciona con valores de densidades de corrientes fluviales de hasta 3 km/km<sup>2</sup>, en pendientes máximas de 6° del abanico, en un clima templado por arriba de los 2200 msnm y el semicálido de la zona baja, que aportan 967 mm y 857.5 mm, respectivamente, de precipitación necesaria para que en esta zona sea aprovechada la actividad agrícola de temporal y riego. Ahí se calcularon valores potenciales de *muy débil* y *débil* erosión. Este abanico ha tenido su desarrollo hasta encontrar la barrera que forma la Sierra de Tentzo con una dirección SW-NE. Los cauces descienden casi paralelamente de las partes altas del volcán a través del amplio abanico, con rumbo NW-SE vierten sus aguas al Río Nexapa. El emplazamiento de este abanico y su continuo crecimiento alimentado por la histórica actividad del Popocatepetl, sólo ha dejado al descubierto algunas pequeñas elevaciones de caliza cretácica apenas mayores de 100 m sobre esa superficie de depósito.

La extensión hacia el oriente de esta zona abarca parte de la Sierra de Santo Domingo, con pendientes de hasta 60° en sus laderas, y de entre 6 y 20° en su piedemonte. La erosión potencial es *moderada a fuerte y fuerte*, principalmente.

Un área con valores de profundidad de la disección de entre 20 y 50 m, se extiende de la parte norte hasta casi el sur de toda la zona de estudio. En su parte norte las corrientes han excavado la parte final de la colada 1, donde se calcularon pendientes de entre 20 y 45° sólo en el frente y borde del flujo de lava y algunas áreas pequeñas con pendientes de entre 2 y 12° en la mesa del derrame. El resto de esta zona sólo presenta pendientes de entre 0 y 6°, a excepción de las áreas que abarcan parte de las elevaciones calizas en la porción centro y sur, que presentan pendientes de 20 a 45° (Figura 19).

En el valle de Atlixco se determinaron valores de profundidad de la disección de 10 a 20 m, y de 0 a 10 m. Estos rangos corresponden a la Ciudad de Atlixco, a San Diego Acapulco, La Trinidad y Juan Ubera, extendiéndose al sur a Santa Ana Coatepec. Asimismo, separada de ésta, el área que rodea la población Cacaloxuchitl, en el sur de la zona de estudio.

**Zona C.** La Zona C sólo comprende un rango de profundidad de la disección del relieve con valores de entre 100 y 150 m, en lavas terciarias localizadas al norte de la Ciudad de Atlixco, y sobre las rocas volcánicas cuaternarias de la Sierra de San Bernardino, en la esquina NE del área estudiada, y en parte de la colada 2. Sobre las laderas y piedemonte de estas estructuras se calcularon pendientes de entre 6 y 30° y en las cimas alcanza hasta 60° (Figuras 19 y 20).

Entre este vulcanismo terciario y cuaternario que divide los valles de Atlixco y de Puebla, se adentra hacia Atlixco el Río Nexapa y su tributario, el río La Leona. Se observa un desnivel entre los valles en forma de escalón. En el modelo digital de elevación (DEM) se observa que los cauces de los ríos Nexapa y La Leona, y los tributarios, han excavado barrancos más profundos en la parte que pertenece al valle de Puebla, y que en cuanto ingresan a la zona del valle de Atlixco su capacidad erosiva disminuye con la pendiente. Al norte del escalón la pendiente de los cauces es de entre 12 y 60°, pero en cuando baja al valle de Atlixco es de entre 0 y 6°, lo cual repercute en la profundidad de la disección.

**Zona D.** Esta zona se localiza en la porción SE de la región de estudio, abarca dos rangos de profundidad que se calcularon para esta zona de rocas calizas (figura 20).

Un área que corre a lo largo del límite entre el abanico volcánico del Popocatepetl y la Sierra de Tentzo presenta valores de profundidad de disección del relieve de entre 100 y 150 m. Esta franja cubre el anticlinal de la sierra y parte de la zona de lomeríos plegados (Figura 19).

Sobre la vertiente occidental de la Sierra de Tentzo, donde los cauces se dirigen hacia el Río Nexapa, la pendiente es de 45°, en la ladera oriental sólo de 20°, el parteaguas tiene de 6°. La porción de la zona de lomeríos dentro de este rango presenta una pendiente de 20°, y en los barrancos de más de 60°.

El rango 150-200 m se calculó en el resto de la zona de lomeríos, con pendiente de entre 6 y 20°, y menores áreas con pendientes entre 0 y 6°.

Pendientes mayores a 60° se calcularon en las barrancas Ocho, El Tzical, La Huerta y Las Cuevas, fueron excavadas sobre fracturas en la roca caliza. Todos los cauces alimentan al Río Grande que junto con sus tributarios presentan una alta densidad de disección del relieve, de entre 4 y 5 km/km<sup>2</sup>, condicionada por la edad de estas rocas.

**Tabla7**  
Valores de la profundidad de disección.

Área color	Valor de la profundidad de disección en m	Área km <sup>2</sup>	%
	100-150	323.5	33.1
	50-100	228.8	23.4
	150-200	169.9	17.4
	20-50	117.0	11.9
	200-250	59.8	6.1
	250-300	39.9	4.0
	10-20	20.5	2.1
	0-10	17.1	1.7

#### **4 Geomorfología.**

Con ayuda del modelo digital de elevación (DEM), la interpretación de fotografías aéreas y trabajo en campo, se identificaron cinco regiones morfológicas dentro de la zona de estudio. En el DEM se aprecian las formas del relieve. La ladera volcánica ha sido cortada por las corrientes fluviales; el amplio piedemonte, los sedimentos fluviales y los depósitos volcánicos de caída en el valle de Atlixco (figura 21).

La cartografía morfométrica elaborada para este trabajo sirvió de apoyo para la elaboración del mapa de unidades morfológicas de Atlixco, se identificaron 21 principales formas de relieve existentes en la región, a partir del trabajo de interpretación de fotografías aéreas y el trabajo de campo para verificar los datos obtenidos.

En la construcción de este mapa se recurrió a la metodología empleada por Tapia-Varela y López-Blanco (2001), clasificando las unidades de relieve o unidades morfológicas (UM), con base en el origen, temporalidad y geometría.

Las cinco regiones morfológicas son:

- 1. Ladera sureste del volcán Popocatepetl.** Compuesta por derrames de lava, depósitos de avalancha de escombros, y depósitos de ceniza.
- 2. Valle de Atlixco.** En la parte central, el área más extensa, consiste en depósitos fluviales y de caída y pequeñas elevaciones de roca caliza.
- 3. Sierra de Tentzo.** Sierra baja plegada y lomeríos adyacentes de roca caliza del Cretácico, en la porción sureste de la región estudiada.
- 4. Sierras menores.** Comprende tres campos volcánicos: Vulcanitas Atlixco; localizado al norte de la ciudad de Atlixco, Sierra de San Bernardino; al noreste de esta ciudad, Sierra de Santo Domingo; al este de Atlixco.

**5. Valle de Puebla.** Al noreste de la región estudiada, compuesto de material aluvial, depósitos de avalancha de escombros del complejo volcánico Iztaccíhuatl y de lomas volcánicas del Cuaternario.

Las cinco regiones se subdividieron en 21 unidades morfológicas (UM).

#### **4.1 Mapa de unidades morfológicas.**

Las formas que reconocemos sobre la superficie terrestre y que podemos cartografiar se deben clasificar de acuerdo con su origen, como principio de un estudio geomorfológico.

A continuación se describen las 21 unidades morfológicas mostradas en la figura 22, se ordenaron de mayor a menor área cubierta.

**1 Planicie inclinada de piedemonte** cubre un área de 256.9 km<sup>2</sup>, que representa el 26.5 % del total, se ubica entre 1550 y 1900 msnm. Este gran abanico volcánico presenta valores de pendiente de 0-2° y 2-6°, sobre él se localizan la mayoría de las poblaciones de la región estudiada y es donde se desarrolla en gran medida la actividad agrícola.

**2 Derrames Popocatepetl** cubre un área de 123.3 km<sup>2</sup>, representa el 12.7 % del total, entre 4150 y 2000 msnm. Los derrames Popocatepetl subyacen a los *derrames El Fraile* (Espinasa-Pereña, 2007), se emplazaron en el límite oriental del *depósito de avalancha de escombros del Popocatepetl* y en el límite occidental del abanico de piedemonte del valle de Atlixco (*planicie inclinada de piedemonte*). Los bordes y frente de estos derrames presentan valores de pendientes altos, de 30 a más de 60°, sobre las mesas sólo presenta valores de 20°.

**3 Lomeríos plegados antiguos** esta unidad está compuesta por rocas calizas del Cretácico muy disecadas por las corrientes fluviales. Cubre un área de 86.5 km<sup>2</sup>, es el 8.9 % del total, se ubican entre 1450 y 1800 msnm.

**4 Depósito aluvial** cubre un área de 82.5 km<sup>2</sup>, el 8.5% del total. Dentro de esta unidad están contempladas 7 áreas, la de mayor extensión se ubica

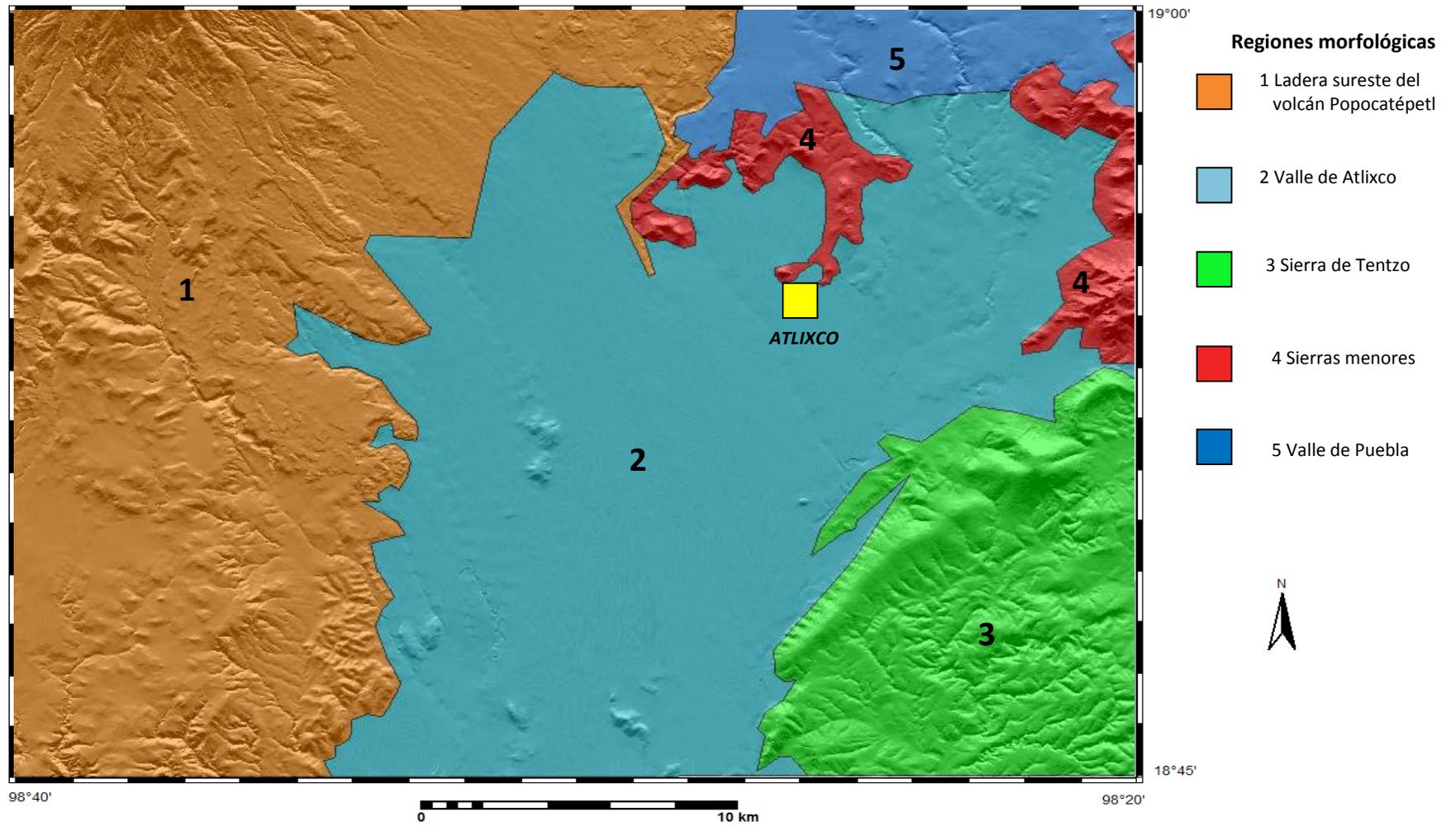


Figura 21. Mapa de regiones morfológicas.

entre 1550 y 2000 msnm en el valle de Atlixco, una pequeña área se localiza en el sur del valle, es una depresión con depósitos fluviales. 5 áreas aluviales se localizan sobre el depósito de avalancha del Popocatepetl.

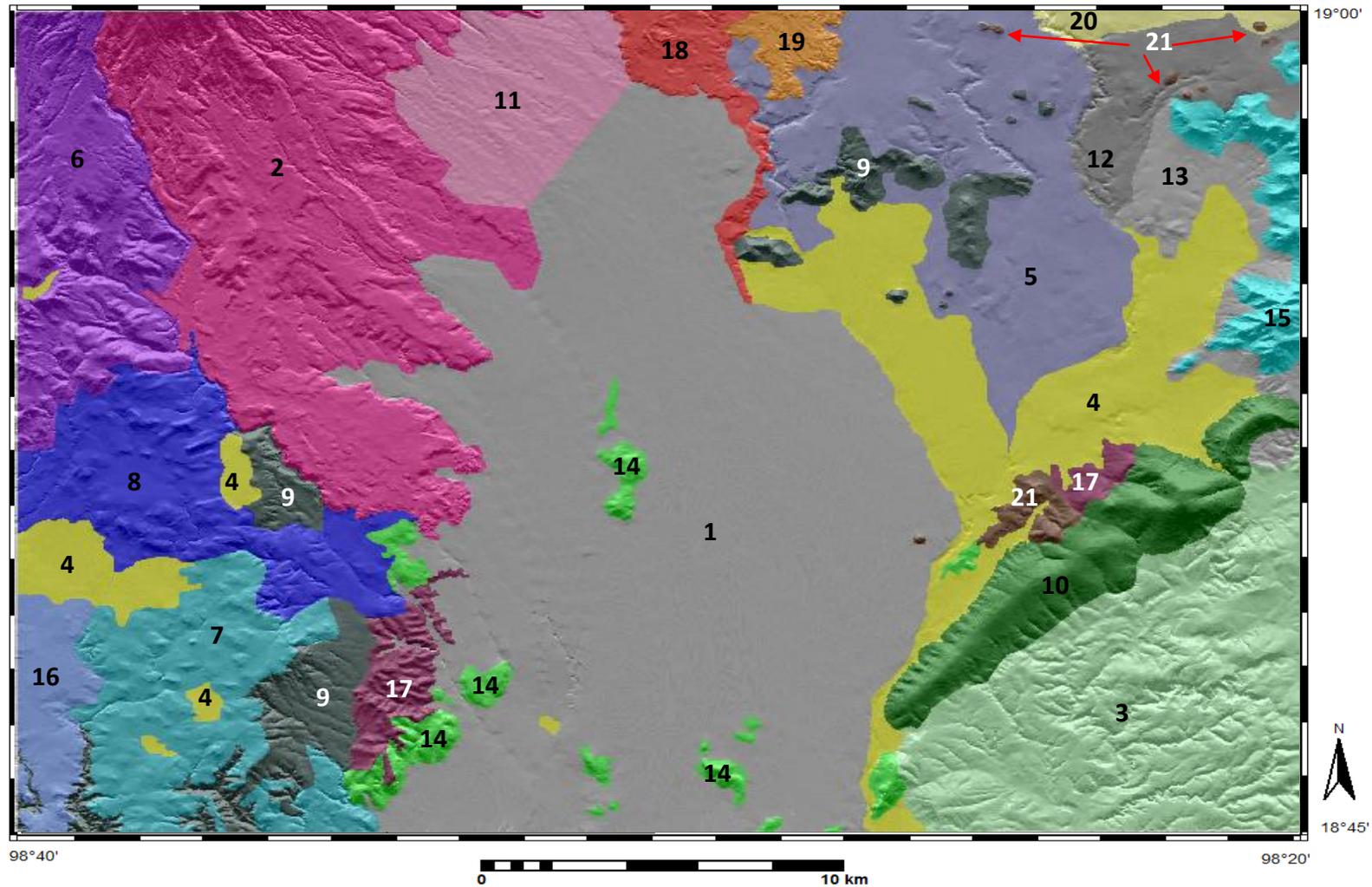
**5 Depósito de avalancha del Iztaccíhuatl** se ubica entre 1800 y 2200 msnm, cubre un área de 73.1 km<sup>2</sup>, que representa el 7.5 % del total. Esta unidad es un depósito de avalancha de escombros (DAE) del volcán Los Pies del complejo volcánico Iztaccíhuatl que colapsó tras un evento tipo Bezymianny o Santa Elena, durante el Pleistoceno tardío (García-Tenorio, 2008).

**6 Derrames El Fraile** ubicados entre 4100 y 2400 msnm, cubren un área de 46.7 km<sup>2</sup>, representa el 4.8 % del total. Espinasa-Pereña (2007) considera que esta unidad sobreyace a los *Derrames Popocatepetl* y que son más antiguos que 14 500 a. P. pero posteriores que 23 000 a. P. cuando se originó el *depósito de avalancha del Popocatepetl*. Los bordes y frente de estos derrames presentan valores de pendiente de 30 a más de 60°.

**7 Depósito antiguo de avalancha medio** se ubica entre 2150 y 1800 msnm, cubre un área de 42.1 km<sup>2</sup>, representa el 4.3 % del total. Esta UM se localiza en el extremo centro-sur de este depósito antiguo del Popocatepetl. Subyace a los *derrames del Popocatepetl*. Dentro de esta unidad se observan numerosos hummocks (Mooser, et al. 1996). Presenta valores de pendiente variables de 0° a 20°.

**8 Depósito antiguo de avalancha superior** cubre un área de 41.4 km<sup>2</sup>, el 4.2 % del área total, se ubica entre 2400 y 2100 msnm. Esta UM es la parte norte de la avalancha antigua que subyace a los derrames del Popocatepetl (Espinasa-Pereña, 2007).

**9 Lavas antiguas** cubren un área de 34.6 km<sup>2</sup>, representan el 3.5 % del total. Componen el relieve sobre el cual descansan los materiales más recientes del vulcanismo del Popocatepetl. Mooser, et al. (1996) asignan una edad terciaria a estas lavas que afloran en la parte media y sur del *depósito de avalancha del Popocatepetl*, ubicadas entre 2050 y 1800 msnm, y en las



**1** Planicie inclinada de piedemonte. **2** Derrames Popocatepetl. **3** Lomeríos plegados antiguos. **4** Depósito aluvial. **5** Depósito de avalancha del Iztaccíhuatl. **6** Derrames El Fraile. **7** Depósito antiguo de avalancha medio. **8** Depósito antiguo de avalancha superior. **9** Lavas antiguas. **10** Sierra baja plegada. **11** Piedemonte volcánico superior. **12** Tobas cuaternario. **13** Tobas antiguas. **14** Loma plegada antigua. **15** Sierra baja volcánica. **16** Depósito antiguo de avalancha inferior. **17** Conglomerados antiguos. **18** Colada 1. **19** Colada 2. **20** Depósito aluvial antiguo. **21** Loma volcánica Cuaternaria.

Figura 22. Mapa de unidades morfológicas de Atlixco

elevaciones menores al norte de la ciudad de Atlixco entre 2100 y 1800 m. Presentan pendientes que van de 6° a 60° y más.

**10 Sierra baja plegada** se ubica entre 2400 y 1800 msnm, cubre un área de 31.7 km<sup>2</sup>, el 3.2 % del total. Presenta pendientes de 0° a 12° en su cima y de 12° a 60° y más en sus laderas.

**11 Piedemonte volcánico superior** se ubica entre 2900 y 2100 msnm, cubre un área de 29.8 km<sup>2</sup>, el 3.0 % del total, compuesta por capas de pómez y ceniza que sepultan antiguos derrames de lava del Popocatepetl (Espinasa-Pereña, 2007), donde se registran pendientes de 2-6° y 6-12°.

**12 Tobas Cuaternario** cubren un área de 20.4 km<sup>2</sup>, el 2.1 % del total, se ubican entre 2200 y 2000 msnm. Forman parte de las laderas de la Sierra de San Bernardino, localizada en la parte NE de la región de estudio. Presenta una pendiente predominante de 2-6° y con menor presencia de 6-12° y 12-20°.

**13 Tobas antiguas** ubicadas entre 2000 y 1800 msnm, cubren un área de 16.6 km<sup>2</sup>, el 1.7 % del total. El término genérico de *tobas antiguas* es para indicar la edad terciaria de esta unidad (Mooser, et al. 1996). Este relieve forma los flancos de la Sierra de Santo Domingo, localizada al E de la zona de estudio, presenta pendientes de 2 a 20°.

**14 Loma plegada antigua** cubre un área de 15.3 km<sup>2</sup>, el 1.5 % del total. Esta unidad comprende varias elevaciones aisladas que se levantan del valle de Atlixco, están formadas por rocas calizas del cretácico, en sus laderas, donde se observa la disección de las corrientes fluviales, se registran pendientes de 6 a 60°.

**15 Sierra baja volcánica** se ubica entre 2450 y 2000 msnm, cubre 15.2 km<sup>2</sup>, el 1.5 % del área estudiada, presenta pendientes de 6° a 60° y más. Esta unidad engloba las sierras de San Bernardino y Santo Domingo, el vulcanismo del Cenozoico, pero independiente del Popocatepetl.

**16 Depósito antiguo de avalancha inferior** cubre 13.3 km<sup>2</sup>, el 1.3 % del total, ubicado entre 2100 y 1800 msnm. Esta unidad forma parte del sur del depósito, tiene una textura fina, observada en el DEM, con pendientes que van de 0-6°.

**17 Conglomerados antiguos** cubren 12 km<sup>2</sup>, es el 1.2 % del área de estudio. Este relieve de detritos cementados tiene su origen en el Terciario (Mooser, et al. 1996). Esta unidad engloba dos áreas, una se localiza en el límite W del valle de Atlixco en su parte media, entre 2200 y 2000 msnm. Otra área se localiza en la parte norte de la ladera W de la Sierra de Tentzo, entre 2000 y 1800 msnm. La pendiente va de 6 a 45°.



Figura 23. Bloque de más de 1 m del depósito de avalancha de escombros del volcán Los Pies del complejo volcánico Iztaccíhuatl. Imagen tomada en la carretera Atlixco-Tianguismanalco.

**18 Colada 1** ubicada entre 2300 y 1900 msnm, cubre 12 km<sup>2</sup>, representa el 1.2 % del área de estudio, pertenece a una boca adventicia localizada a 2800 msnm, en el flanco sureste del Popocatépetl, fuera del área de estudio, que Espinasa-Pereña (2007) reconoce como derrame Atlimeyaya. Se calcularon pendientes de 2-12° y mayores a 60° en sus bordes y frente.

**19 Colada 2** se ubica entre 2300 y 2100 msnm, cubre 5.7 km<sup>2</sup>, el 0.58 % del total. Esta unidad es parte del derrame Nealtican (Espinasa-Pereña, 2007), de 20 km de longitud que parte de una boca adventicia localizada en la ladera oriente del volcán Popocatépetl (figura 24).



Figura 24. Frente de la unidad morfológica **colada 2**. Visto desde las cercanías de Tianguismanalco, el Popocatépetl al fondo.

**20 Depósito aluvial antiguo** cubre un área de 4.9 km<sup>2</sup>, el 0.5 % del área de estudio, se ubica entre 2200 y 2100 msnm. Mooser, et al. (1996), consideran el término antiguo de esta unidad, para referirse a depósitos aluviales sólo

anteriores a los modernos depósitos del vulcanismo joven. Esta UM presenta valores de pendiente de 0 a 12°.

**21 Loma volcánica Cuaternaria** cubre un área de 4.3 km<sup>2</sup>, el 0.4 % del total. Las lavas de esta unidad son recientes, se localizan al W de la Sierra de Tentzo. Al norte de la ciudad de Atlixco, en el valle de Puebla, se localizan algunos conos volcánicos que se consideran en esta categoría. Presentan pendientes que van de 6° a 45° (figura 25).



Figura 25. Al fondo se observa un cono volcánico cuaternario que se eleva del valle de Puebla. Imagen tomada desde las cercanías de Tianguismanalco.

**Tabla8**  
**Síntesis de regiones morfológicas de Atlixco.**

<i>Regiones morfológicas</i>	<i>Unidades morfológicas</i>	<i>Origen</i>	<i>Edad</i>	<i>Área Km<sup>2</sup></i>	<i>%</i>	<i>Pendiente</i>
<b>1 Ladera sureste del volcán Popocatepetl</b>	2 Derrames Popocatepetl	Volcánico	Pleistoceno Tardío	123.3	12.7	2 a >60°
	4 Depósito aluvial	Acumulativo	Holoceno	14.8	1.6	0 a 2°
	6 Derrames El Fraile	Volcánico	Pleistoceno Tardío	46.7	4.8	2 a >60°
	7 Depósito antiguo de avalancha medio	Volcánico	Pleistoceno Tardío	42.1	4.3	0 a 20°
	8 Depósito antiguo de avalancha superior	Volcánico	Pleistoceno Tardío	41.4	4.2	0 a 20°
	9 Lavas antiguas	Volcánico	Mioceno	19.5	1.9	2 a >60°
	14 Loma plegada antigua	Tectónico	Cretácico	5.2	0.5	2 a >60°
	11 Piedemonte volcánico superior	Volcánico	Holoceno	29.8	3.0	2 a 12°
	16 Depósito antiguo de avalancha inferior	Volcánico	Pleistoceno Tardío	13.3	1.3	0 a 6°
	17 Conglomerados antiguos	Volcánico	Mioceno	8	0.8	6 a 45°
<b>2 Valle de Atlixco</b>	18 Colada 1	Volcánico	Pleistoceno Tardío	12	1.2	2 a >60°
	19 Colada 2	Volcánico	Pleistoceno Tardío	5.7	0.5	2 a 60°
	1 Planicie inclinada de piedemonte	Volcánico	Holoceno	256.9	26.5	0 a 6°
	4 Depósito aluvial	Acumulativo	Holoceno	67.5	6.9	0 a 2°
	5 Depósito de avalancha del Iztaccíhuatl	Volcánico	Pleistoceno Tardío	39.4	4.0	0 a 20°
	12 Tobas Cuaternario	Volcánico	Pleistoceno	5.8	0.5	2 a 20°
<b>3 Sierra de Tentzo</b>	13 Tobas antiguas	Volcánico	Mioceno	14.2	1.4	2 a 20°
	14 Loma plegada antigua	Tectónico	Cretácico	7.3	0.7	6 a 60°
	3 Lomeríos plegados antiguos	Tectónico	Cretácico	86.5	8.9	0 a >60°
	10 Sierra baja plegada	Tectónico	Cretácico	31.7	3.2	0 a >60°
	13 Tobas antiguas	Volcánico	Mioceno	2.4	0.2	2 a 20°
	14 Loma plegada antigua	Tectónico	Cretácico	2.8	0.2	6 a 60°
<b>4 Sierras menores</b>	17 Conglomerados antiguos	Volcánico	Mioceno	4	0.4	6 a 45°
	21 Loma volcánica cuaternaria	Volcánico	Pleistoceno	3.8	0.3	6 a 45°
<b>5 Valle de Puebla</b>	9 Lavas antiguas	Volcánico	Mioceno	14.5	1.4	6 a >60°
	15 Sierra baja volcánica	Volcánico	Pleistoceno	15.2	1.5	6 a >60°
	5 Depósito de avalancha del Iztaccíhuatl	Volcánico	Pleistoceno Tardío	33.7	3.4	0 a 20°
	9 Lavas antiguas	Volcánico	Mioceno	0.6	0.06	6 a >60°
	12 Tobas Cuaternario	Volcánico	Pleistoceno	14.6	1.5	2 a 20°
	20 Depósito aluvial antiguo	Acumulativo	Pleistoceno Tardío	4.9	0.5	0 a 12°
	21 Loma volcánica cuaternaria	Volcánico	Pleistoceno	0.5	0.04	6 a 45°

## **5 Conclusiones.**

El uso del sistema de información geográfica ILWIS 3.4 fue una valiosa herramienta para elaborar cartografía morfométrica, los mapas de densidad de la disección, profundidad de la disección y energía del relieve creados con este sistema, se analizaron junto con los datos ya existentes de geología, clima, uso de suelo y vegetación y se identificaron 21 unidades morfológicas dentro de cinco regiones.

La ladera volcánica, la Sierra de Tentzo y las sierras menores, son las formas más activas, las mayores pendientes se registran en ellas, es donde la densidad fluvial y profundidad de la disección alcanza los valores más altos de la región.

Los valles de Atlixco y Puebla son las zonas más estables, presentan los valores más bajos de pendiente, erosión potencial y densidad fluvial.

El valle de Atlixco es la zona más baja, ha sido un almacén para los flujos de ceniza de numerosos eventos volcánicos y para el material acarreado por las corrientes fluviales. Es la zona más estable de la región, los bajos valores de pendiente la hacen un lugar con mínimos valores de erosión potencial. Registra los valores más bajos de profundidad de la disección dentro del rango de 0-10 m en su parte central, y un valor medio de 50-100 m como máximo, en el sur de esta forma.

El valle de Puebla sólo alcanza valores medios de profundidad de la disección dentro del rango de 100-150 m.

En contraste, la ladera volcánica, donde los valores de pendiente son altos, la erosión ha actuado sobre derrames de lava y depósitos de ceniza y pómez de diferente edad, la densidad de corrientes fluviales calculada para esta zona corresponde a los valores más altos. La parte más baja de esta ladera, compuesta de depósitos de avalancha de escombros, presenta valores bajos de pendiente, erosión potencial y densidad de corrientes fluviales, pero con los más altos valores de profundidad de la disección que llega hasta los 300 m.

El SE de la región de este estudio, presenta valores de pendiente altos y valores de erosión potencial de *moderada a fuerte y fuerte*. En esta región los valores de densidad de corrientes fluviales es de entre 4-5 km/km<sup>2</sup> en la zona de lomeríos, y sobre el anticlinal de la Sierra de Tentzo es variable entre 2-3 y 3-4 km/km<sup>2</sup>. La profundidad de los barrancos en esta sierra se calculó dentro del rango de 100-150 m, y en la zona de lomeríos predomina el rango de profundidad de la disección que va de 150-200 m.

Este estudio servirá de base para futuras investigaciones más detalladas de los procesos que se desarrollan en la región y que están estrechamente relacionados con la presente actividad volcánica, y para la elaboración de mapas de riesgo volcánico y de remoción en masa.

## **6 Bibliografía.**

**Aceves-Quesada, J. F. 1997.** *Geología y Geomorfología del Volcán Nevado de Toluca*. Tesis de Maestría, México: UNAM-Facultad de Ciencias, 116p.

**Bollschweiler, M., Sttofel, M., Vázquez-Selem L., y Palacios David. 2009.** Tree rings Reconstruction of Past Lahar Activity at Popocatépetl Volcano, The Olocene Oneline First, December, 1-10 pp.

**Bonilla, F. et al. 1995.** “Evaluación de la Contaminación por Metales Pesados en suelos, Plantas y Agua por Efecto de Riego con Aguas Negras en la Región de Huaquechula y Atlixco, Puebla”. *Memorias del Simposio Universitario de Edafología*, México: UNAM, 159 p.

**Cerca-Martínez, L. M. 2004.** *Deformación y magmatismo Cretácico Tardío-Terciario Temprano en la zona de la Plataforma Guerrero Morelos*. Tesis de Doctorado, México: UNAM, 175 p.

**Demant, A., y Robin, C. 1975.** “Las fases del Vulcanismo en México; una Síntesis de la Evolución Geodinámica desde el Cretácico”. *Revista del Instituto de Geología*. 66-79 pp.

**Demant, A. 1978.** “Características del Eje Neovolcánico Transmexicano y sus problemas de interpretación”; *Revista del Instituto de Geología*. 2(2): 172-187 pp.

**Demant, A. 1982.** “Interpretación geodinámica del Vulcanismo del Eje Neovolcánico Transmexicano”. *Revista del Instituto de Geología*. 5(2): 217-222 pp.

**Espinasa-Pereña, R. 2007.** *Evolución Morfoestratigráfica del Volcán Popocatépetl*. Tesis de Doctorado, México: UNAM-Facultad de Ciencias, 138 p.

**Flores-Lorenzo, P., y Alcántara-Ayala, I. 2002.** “Cartografía Morfogenética e Identificación de Procesos de Ladera en Teziutlán, Puebla”, *Investigaciones Geográficas*, diciembre, número 49, México: UNAM, 7-26 p.

**Franco-Ramos, O. 2005.** *Geomorfología del Volcán Popocatepetl*. Tesis de Licenciatura, México: UNAM-Facultad de Filosofía y Letras, 150 p.

**Franco-Ramos, O. 2009.** *Procesos Morfodinámicos en la Vertiente Norte del Volcán Popocatepetl*. Tesis de Maestría, México: UNAM-Facultad de Filosofía y Letras, 144 p.

**Fries, C. Jr. 1965.** *Geología de la Hoja Cuernavaca, Estados de Morelos, México, Guerrero y Puebla*. México: UNAM-Instituto de Geología, Serie 1: 100,000.

**García-Miranda, E. 1973.** *Modificaciones al Sistema de Clasificación de Köppen*. México: UNAM-Instituto de Geografía, 246 p.

**García-Tenorio, F. 2008.** *Avalancha de Escombros del Pleistoceno Tardío del Cono Los Pies, Complejo Volcánico Iztaccíhuatl*. Tesis de Maestría, México: IPN-Escuela Superior de Ingeniería y Administración, 147 p.

**Gómez-Arizmendi, A. 1998.** *Análisis Geomorfológico del Volcán Popocatepetl Escala 1: 20 000*. Tesis de Licenciatura, México: UNAM-Facultad de Filosofía y Letras, 171 p.

**Guerra-Pena, F. 1980.** *Fotogeología*. México: UNAM, 337 p.

**Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2000a.** *Carta topográfica, Atlixco, E14 B52*. Escala 1: 50 000, México: INEGI, 1 mapa.

**Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2000b.** *Síntesis Geográfica del Estado de Puebla*. México: INEGI, 124 p.

**Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 1983a.** *Carta geológica, Atlixco, E14 B52*. Escala 1: 50 000, México: INEGI, 1 mapa.

**Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 1983b.** *Carta de uso de suelo y vegetación, Atlixco, E14 B52*. Escala 1: 50 000, México: INEGI, 1 mapa.

**Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 1983c.** *Carta edafológica, Atlixco, E14 B52*. Escala 1: 50 000, México: INEGI, 1 mapa.

**Lugo-Hubp, J. I. 1988.** *Elementos de Geomorfología Aplicada (Métodos Cartográficos)*. México: UNAM-Instituto de Geografía, 128 p.

**Lugo-Hubp, J. I. 2011.** *Diccionario Geomorfológico*. México: UNAM-Instituto de Geografía, 479 p.

**Macías-Vázquez, J. L. 2005.** “Geología e Historia Eruptiva de algunos Volcanes Activos de México”, *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, Volumen Conmemorativo del Centenario, Temas Selectos de la Geología Mexicana, Tomo LVII, núm. 3, México: SGM, 379-424 pp.

**Martín del Pozzo, A. L., y Mendiola, F. 2001.** *Las Cenizas Volcánicas, en Las Cenizas Volcánicas y sus Efectos para la Aeronavegación e Infraestructura Aeroportuaria*. México: UNAM-Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), 42-48 pp.

**Méndez-García, T. et al. 2000.** “Impacto del riego con aguas contaminadas, evaluado a través de la presencia de metales pesados en suelos”. *TERRA Latinoamericana*, México: Universidad Autónoma de Chapingo, 18 (4), 277-288 pp.

**Mitre-Salazar, L. M. 2011.** “Actualización de la actividad sísmica en la zona de cizallamiento Tenochtitlán: 1989-2008”. Simposio Dr. Zoltan de Cerna: Sesenta años geologizando en México. *Libro de resúmenes*, México: UNAM-Instituto de Geología, 104-108 pp.

**Mooser, F. 1957.** “Los ciclos del vulcanismo que formaron la cuenca de México”. 20th Int. Geol. Congr., México, Sec.1, 337-348 pp.

**Mooser, F. et al. 1996.** *Nuevo Mapa Geológico de las Cuencas de México, Toluca y Puebla. Estratigrafía Tectónica y Aspectos Geotérmicos*. México: Comisión Federal de Electricidad, 27 p.

**Muñoz-Salinas, E. 2007.** *Los lahares del Popocatepetl: obtención y tratamiento de la información para la prevención de riesgos*. Tesis de Doctorado, Madrid: Universidad Complutense de Madrid, 230 p.

**Navarro-Frometa, A. E. et al. 2006.** *Estudio comparativo de las descargas de aguas residuales de las ciudades de Izúcar de Matamoros y Atlixco, Puebla*. México: Universidad Tecnológica de Izúcar de Matamoros, 10 p.

**Nelson, Stephen A. 1990.** "Volcanic Hazards in México, a Summary", *Revista del Instituto de Geología*, vol. 9, núm. 1, México: UNAM, 71-81 pp.

**Palacio-Prieto, J. L. 1983.** "Metodología Para el Desarrollo de Trabajos Geomorfológicos a Escala 1:50000". *Primer Congreso Interno del Instituto de Geografía de la Universidad Nacional Autónoma de México*, México: UNAM, 52-72 pp.

**Predraza-Gilsanz, J. 1996.** *Geomorfología: Principios, Métodos y Aplicaciones*, España: Rueda, 414 p.

**Ramírez, T. y Lugo, J. 2000.** "Efectos del sismo (7.0=Mw) del 15 de junio de 1999 en Puebla y estados vecinos". *Investigaciones Geográficas*, Boletín del Instituto de Geografía, núm. 43, México: UNAM, 32-41 pp.

**Robin, C. y Boudal, C. 1987.** "A gigantic Bezymianny-Type event at the beginning of modern Volcan Popocatepetl". *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 31, 115-130 pp.

**Siebe, C. et al. 1995.** "Quaternary Explosive Volcanism and Pyroclastic Deposits in East Central México: Implications for Future Hazards". *Geological Society of America, field Trip Committee*, New Orleans Annual Meeting, USA, 96 p.

**Siebe, C., y Macías, J. L. 2004.** "Volcanic Hazards in the Mexico City metropolitan area from eruptions at Popocatepetl, Nevado de Toluca, and Jocotitlán stratovolcanoes and monogenetic scoria cones in the Sierra Chichinautzin Volcanic Field". *Geological Society of America, Penrose Conference Field Trip Guide 2004*, USA, 77 p.

**Silva-Gómez, S. E. et al. 2002.** “Contaminación Ambiental en la Región de Atlixco: 1, Agua”; TERRA Latinoamericana, México: Universidad Autónoma de Chapingo, 20 (3), 243-251 pp.

**Strahler, Arthur N. 2000.** *Geografía Física* (3ª. ed.). España, 551 p.

**Tamaríz-F, V. 1996.** *Contaminación de Suelos Agrícolas por Metales Pesados en el Municipio de Atlixco, Puebla*. Tesis de Maestría, México: UNAM-Facultad de Ciencias, 112 p.

**Tanarro-García, L. M. et al. 2004.** “Control de la deglaciación del volcán Popocatepetl (México) por fotogrametría como aplicación a la prevención de lahares”. Boletín de la Real Sociedad Española de Historia Natural (Sec. Geol.), 99 (1-4), 105-117 pp.

**Tapia-Varela, G. y López-Blanco, J. 2001.** “Mapeo Geomorfológico Analítico de la Porción Central de la Cuenca de México: Unidades Morfogenéticas a escala 1: 100, 000”, *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, v. 19, núm. 1, Sociedad Geológica Mexicana e Instituto de Geología, México: UNAM, 50-65 pp.