



UNIVERSIDAD NACIONAL

AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS

---

# ANÁLISIS GEOMORFOLÓGICO DEL SISTEMA LAGUNAR CHACAHUA-LA PASTORÍA, OAXACA

---

TESIS QUE PARA OBTENER  
EL GRADO DE LICENCIADA  
EN GEOGRAFÍA

PRESENTA:

Leslie Diana López Jurado

DIRECTOR DE TESIS:

Mtro. Sergio Salinas Sánchez



Ciudad Universitaria, Ciudad de México 2022





Universidad Nacional  
Autónoma de México



**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.

## AGRADECIMIENTOS

Primeramente, a la Universidad Nacional Autónoma de México por haberme proporcionado la formación profesional en sus aulas, por los valores deportivos que tuve oportunidad de representar y sobre todo por todas las personas que conocí desde que ingresé a su campus.

A mi director de tesis por haber amparado este proyecto de tesis, le agradezco por ayudarme y brindarme sus conocimientos para sacar adelante esta tesis.

Al sínodo que se tomó el tiempo para leer mi trabajo, revisarlo y brindarme sus comentarios y observaciones.

Un agradecimiento especial al Dr. José Lugo que gracias a sus clases me compartió el amor por el relieve.

A mi mamá que ha sido mi más grande apoyo, en todo lo que se me ha ocurrido hacer, por darme ánimos cuando ya las fuerzas me faltaban y por aguantarme. A mi papá por haberme enseñado a no dejar de intentarlo y por darme todo lo necesario para continuar mis estudios.

A mis hermanos que han cuidado de mí, me han acompañado y me han hecho sentir su calidez.

A mis compañeros de la carrera Flavio, Valenz, Eli y Lucero, a mis amigos de la prepa que siempre están, a Andy y Ale por ser las personas más valiosas que he conocido, a mis compañeras de gimnasia Jessi, Dani, Bren y a mi coach Enrique que me enseñaron a creer en mí.

A Gustavo por apoyarme en el último tramo de esta travesía llamada tesis, por darme su cariño y compañía y hacerme muy feliz.



*Y nuestra estación es templada, y en nuestro clima florecen los pensamientos.*

El hombre ilustrado  
Ray Bradbury (1951)



## ÍNDICE

RESUMEN.....	8
CAPÍTULO I.....	9
INTRODUCCIÓN.....	9
1.1 Antecedentes.....	9
1.2 Planteamiento del problema.....	10
1.3 Justificación.....	11
1.4 Objetivo.....	11
1.4.1 <i>Objetivo general</i> .....	12
1.4.2 <i>Objetivos particulares</i> .....	12
1.5 Hipótesis.....	12
CAPÍTULO II.....	13
MARCO TEÓRICO.....	13
2.1 Geomorfología.....	13
2.1.1 Conceptos y Teorías.....	14
Teorías de Origen del Relieve.....	14
Teoría General de Sistemas en Geomorfología.....	18
2.2 Geomorfometría.....	22
2.3 Análisis Geomorfológico.....	24
2.3.1 <i>Análisis Morfográfico</i> .....	25
2.3.2 <i>Análisis Morfométrico</i> .....	25
Mapas Morfométricos.....	26
2.3.3 <i>Análisis Morfo genético</i> .....	26
2.3.4 <i>Análisis Morfo dinámico</i> .....	28
2.3.5 <i>Análisis Morfo estructural</i> .....	28
2.4 Cartografía Geomorfológica.....	29
2.4.1 <i>Características y tipos de mapas geomorfológicos</i> .....	31
Escala.....	32
Métodos de mapeo.....	33
Manejo de datos.....	34
Correlación.....	34
CAPÍTULO III.....	35
MARCO GEOGRÁFICO.....	35
3.1 Localización y contexto social.....	35
<i>Costa Chica de Oaxaca: Contexto histórico</i> .....	35

3.1.1 .....	35
3.1.2 Aspectos Socioeconómicos.....	37
Vías de comunicación .....	37
Actividades económicas.....	38
3.2 Entorno físico.....	39
3.2.1 Fisiografía.....	39
3.2.2 Clima.....	41
3.2.3 Hidrografía.....	42
Hidrología subterránea.....	44
3.2.4 Suelo.....	45
Regosoles.....	46
Phaeozem.....	46
Cambisoles.....	47
Leptosoles.....	47
Luvisoles .....	47
Solonchak.....	47
Fluvisoles .....	48
Arenosoles.....	48
3.2.5 Vegetación y uso de suelo .....	48
CAPÍTULO IV.....	50
MARCO GEOLÓGICO.....	50
4.1 Tectónica.....	50
4.2 Historia Geológica.....	52
4.3 Estratigrafía.....	54
4.3.1 Rocas metamórficas.....	55
<i>Terreno Xolapa</i> .....	55
Migmatita, gneises pelíticos y gneises anfibolíticos.....	57
Anfibolita .....	57
Ortogneises .....	57
Mármol.....	58
Protomilonita .....	58
4.3.3 Rocas Intrusivas.....	58
Intrusivo Rio Grande .....	58
Intrusivo Rio Verde.....	59

Intrusivo Jamiltepec.....	59
4.3.4 Depósitos recientes.....	59
4.4 Geología Estructural.....	60
CAPÍTULO V.....	63
ANÁLISIS GEOMORFOLÓGICO.....	63
5.1 Dominios geomorfológicos.....	65
5.1.1 Montaña baja.....	66
5.1.2 Premontaña.....	68
5.1.3 Relieve de transición (Fluvio-Gravitacional).....	68
5.1.4 Lomeríos costeros.....	69
5.1.5 Dominio Aluvial.....	69
5.1.6 Dominio Palustre-Lacustre.....	69
5.1.7 Dominio Litoral.....	70
5.2 Geomorfología.....	70
5.2.1 Relieve exógeno.....	70
Litoral.....	72
Fluvial.....	74
Gravitacional.....	81
Lacustre/Palustre.....	83
Antrópico.....	86
5.2.2 Endógeno.....	86
Tectónico.....	87
5.2.3 Relieve endógeno modelado.....	87
Granítico.....	88
5.2.3 Metamórfico.....	91
5.3 Morfoestructura.....	91
CAPÍTULO VI CONCLUSIONES Y SUGERENCIAS.....	97
Referencias.....	99
Anexo A.....	107
Anexo B.....	108



## RESUMEN

El sistema lagunar Chacahua – La Pastoría se localiza en la costa del estado de Oaxaca, la cual presenta un gran mosaico de ambientes geomorfológicos. El área de estudio forma parte del Parque Nacional Lagunas de Chacahua un área natural protegida. Existen diversos estudios enfocados en la diversidad biológica del Parque, sin embargo, la descripción geomorfológica es limitada. El objetivo principal de la investigación es definir las unidades geomorfológicas, mediante el análisis cartográfico que permita distinguir su morfología, litológica y procesos geomorfológicos, así como determinar el papel de la estructura en su configuración.

Se utilizó como método principal el Análisis Geomorfológico para establecer una clasificación del relieve adecuada que obedezca a sus características morfológicas, estructurales y dinámicas. Con el análisis geomorfológico se pretende explicar de forma clara, la morfogénesis de las unidades y la dinámica que presentan actualmente. De igual manera se generó información morfométrica para diferenciar las unidades reconocidas.

Se reportan 55 unidades y rasgos geomorfológicos, de los cuales 42 son de origen exógeno y 13 de origen endógeno y endógeno modelado. La morfogénesis que domina en la cuenca es la fluvial; misma que con su acción en el modelado de rocas graníticas y metamórficas permite que las formas de origen endógeno modeladas ocupen una amplia superficie en el área de estudio. La cuenca está controlada por estructuras disyuntivas, como lo son las fracturas y fallas, mismas que permiten el impulso de un sistema fluvial profuso. El desarrollo de un patrón ortogonal en el sistema de fracturas con orientaciones NE 60-65° y 70-75° como NW 40-55°, es resultado de la evolución tectónica regional que permitió la exhumación de batolitos costeros en Oaxaca y Guerrero, bajo un ambiente tectónico transtensional.

La historia de ocupación y uso del territorio, junto con el inventario de las formas de relieve permitió reconocer cambios en el relieve producto de la intervención humana dentro de la cuenca, ya que existe evidencia de un deterioro considerable del sistema geomorfológico; esto a pesar de tratarse de un área natural protegida.

# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

---

### 1.1 Antecedentes

La Geomorfología muestra su interés en la descripción y análisis de los diferentes relieves que conforman la superficie terrestre. Utiliza el método científico para el desarrollo de sus investigaciones y sustenta sus observaciones por medio de la prueba de hipótesis formuladas con previa información teórica. El marco de análisis que utiliza la Geomorfología es la Teoría General de Sistemas, la cual reúne las características propicias para analizar los sistemas geomorfológicos. De acuerdo con Scheidegger (1992), el análisis geomorfológico tiene como propósito, relacionar las formas del relieve con sus procesos, esto bajo un enfoque que permite establecer sus relaciones, para de esta manera, lograr explicar el relieve como un ente dinámico en función de variables definidas.

En la presente investigación se realizó el Análisis Geomorfológico del Sistema Lagunar Chacahua-La Pastoría, con el motivo de crear una clasificación geomorfológica adecuada que obedezca a sus características morfológicas, estructurales y dinámicas. El sistema lagunar se localiza en las costas del estado de Oaxaca, las cuales presentan un gran mosaico de ambientes geomorfológicos.

Los estudios precedentes abarcan desde análisis hidrodinámicos (Contreras-Cruz 1996) de la laguna de Chacahua; un modelo múltiple de circulación aplicado al sistema lagunar, con varios escenarios del estado de las barras, para evaluar la dinámica de circulación (Sanay-González 1997). También se han realizado estudios sedimentológicos, uno de los primeros es el de Zavala-Cruz y Rodríguez-Espinosa (1983); el cual se enfoca en establecer condiciones morfo-sedimentológicas del sistema lagunar. Otro estudio con un enfoque ambiental, presentado por Ríos y colaboradores (2005), el cual trata de un muestreo sedimentológico, para determinar la contaminación y las condiciones fisicoquímicas de los sedimentos. El estudio más reciente fue realizado por Mendoza- Amézquita y colaboradores (2015), donde caracterizaron el contenido de elementos traza y materia orgánica en ambas lagunas. Por otra parte, los estudios realizados sobre

la diversidad ecológica del parque fueron presentados por Pérez-Ortega (2008) y Buenrostro-Silva y colaboradores (2012), sobre la diversidad de peces y de mamíferos.

Los estudios que tienen caracterizaciones geomorfológicas son los siguientes: Madrigal-Uribe (1986) presenta una evaluación de las características del uso y potencial del suelo; Pérez-Delgado (2002) define las unidades geomorfológicas dentro del parque nacional, mediante el uso de fotografías aéreas.

Esta investigación se inicia con el desarrollo del marco conceptual y metodológico que define los aspectos semánticos, así como los pasos a seguir para la elaboración de la investigación. Resalta la importancia de la Cartografía Geomorfológica como el método ideal de análisis del relieve. Posteriormente se realiza un reconocimiento del entorno geográfico y geológico de la cuenca, con énfasis en los factores determinantes para su clasificación. También se genera información morfométrica para diferenciar las unidades reconocidas. La descripción del mapa obtenido forma parte de los resultados del trabajo. Continúa un apartado de discusión en donde se describen las hipótesis relativas con la estructura y dinámica fluvial de la zona. Para finalizar con las conclusiones y alcances del estudio.

## 1.2 Planteamiento del problema

El Complejo Lagunar Chacahua - La Pastoría se describe como una red compuesta por dos lagunas principales intercomunicadas por un angosto canal y otras cuatro de menor tamaño que se limitan por el Océano Pacífico. Las lagunas de Chacahua y la Pastoría tienen comunicación con el mar por medio de boca barras; denominadas como Boca Barra de Chacahua y Boca Barra de Cerro Hermoso.

El área de estudio forma parte del Parque Nacional Lagunas de Chacahua, por lo que existen estudios acerca de la diversidad biológica del Parque, mientras que la descripción geomorfológica es limitada. La descripción de Madrigal-Uribe (1986) clasifica las formas del relieve de acuerdo con las condiciones morfotectónicas y morfoclimáticas, en cambio la propuesta por Pérez-Delgado (2002) define unidades fisiográficas. Estas caracterizaciones generalizan muchas de las unidades geomorfológicas, las cuales no corresponden al origen y dinámica del relieve que presenta el área de estudio.

Para comprender mejor la diversidad biológica y los procesos físicos es mandatorio tener un inventario de las formas del relieve y reconocer los procesos, que en la actualidad modifican el entorno, esto bajo el contexto hidrológico más elemental del relieve, que es la cuenca. De esta manera, la elaboración de planes de manejo y conservación de las especies, como del entorno, tendrá más elementos de análisis que permitirán diseñar una mejor estrategia para su uso y mantenimiento.

### 1.3 Justificación

La presente investigación ofrece dos aportes, el primero es una clasificación sistemática y representativa del relieve, con un análisis morfográfico y morfoestructural; el segundo, es el reconocimiento de las formas del relieve con los procesos que actúan en ellas y su potencial evolución tanto de modelado como de construcción.

La importancia de la investigación geomorfológica radica en sugerir las características ambientales propicias para realizar diferentes actividades económicas, permite enfocar el análisis de áreas vulnerables ante condiciones de peligro o incluso intervenir en la planeación de proyectos de infraestructura. Al tratarse de un Área Natural Protegida, la intervención antrópica dentro de la cuenca debe ser sumamente cuidadosa y podemos sugerir que el conocimiento de la morfodinámica de los componentes del relieve, proporciona información para el manejo y el uso adecuado de los recursos. Así como, en tratar de hacer énfasis en su protección y resguardo.

### 1.4 Objetivo

El objetivo principal de esta investigación es definir las unidades geomorfológicas, mediante el análisis cartográfico que permita distinguir su morfología, litológica y procesos geomorfológicos que las originan y modelan. Su análisis parte de la cuenca hidrográfica, ya que se trata de un sistema compuesto por diversos factores. Con el análisis geomorfológico se tiene la intención de explicar, de forma clara, la morfogénesis de las unidades y la dinámica que presentan actualmente.

### *1.4.1 Objetivo general*

Determinar las características morfológicas, estructurales y evolutivas del Sistema Lagunar Chacahua-La Pastoría.

### *1.4.2 Objetivos particulares*

- Elaborar el mapa geomorfológico del sistema lagunar Chacahua-La Pastoría.
- Determinar las características estructurales del sistema lagunar bajo un contexto geológico-geomorfológico regional.
- Realizar un análisis morfométrico que muestre la interacción de las variables dependientes del relieve en función de sus aspectos más elementales.
- Proponer una evolución del relieve de acuerdo con las variables y procesos analizados, con ella definir estrategias de uso, ordenamiento y conservación del medio geográfico.

## 1.5 Hipótesis

En la cuenca de Chacahua - La Pastoría se pueden reconocer diferentes unidades mayores del relieve, que se encuentran definidas y relacionadas por sus características morfológicas, morfométricas, la composición litológica, la estructura geológica y los procesos modeladores, en donde estos parámetros brindan un carácter jerárquico entre las mismas por medio del cual se explica su funcionamiento.

El sistema lagunar de Chacahua-La Pastoría es el resultado del sistema de fallas regionales, mismas que constituyen uno de los factores determinantes en el desarrollo del relieve. La dinámica de la zona costera subyacente juega un papel importante, de tal forma que los procesos geomorfológicos costeros condicionan la actividad de los procesos terrestres, dándole al sistema lagunar una característica de zona de transición.

En esta región, uno de los principales controles morfológicos en general son las estructuras geológicas. En particular, los sistemas de fracturas cercanos con tendencia de dirección NW-SE y en algunos casos muestran un movimiento lateral siniestro, como es el caso de la Falla Cacalotepec, Hidalgo, San Isidro, Los Limones, Mixtepec hasta la zona de Chacalapa.

# CAPÍTULO II

## MARCO TEÓRICO

---

### 2.1 Geomorfología

La geomorfología forma parte del área de las Ciencias de la Tierra, conjunto de disciplinas que tratan aspectos físicos y químicos del planeta. La Geografía Física y la Geología son las disciplinas con mayor historia. Todas las ramas de las Ciencias de la Tierra tienen sus propios objetos de estudio, aunque pueden traslaparse, todas tienen como principio entender la composición, las características y los procesos del planeta (Conte *et al.*, 1997).

La Geografía trata de un conjunto de principios básicos de las ciencias naturales y su interacción con el hombre. El principal propósito de la Geografía Física, de acuerdo con Gregory (2000) es entender los procesos y su organización en la superficie terrestre. Utiliza modelos matemáticos, estadísticos y de percepción remota para desarrollar la investigación que servirá a la administración y el diseño ambiental, en beneficio de relaciones colaborativas (Gregory, 2000).

El concepto de la Geomorfología es esencialmente el tratado de las formas del relieve. A lo largo de la historia de las Ciencias de la Tierra, esta ciencia ha adquirido más enfoques. Estudia las formas del relieve como los elementos de la superficie terrestre que se definen por su constitución y características geométricas (Lugo, 2011), mientras que los elementos del relieve pueden ser categorizados por atributos físicos, como su forma, elevación, pendiente, orientación, estratificación, exposición de la roca y tipo de suelo, sin soslayar que cada uno de ellos varían de acuerdo con su escala (Gregory y Lewin, 2014). Las formas del relieve no son elementos aislados, ciertas variables actúan en ellas y en su formación, las cuales son analizadas por la Geomorfología. Por lo tanto, el relieve terrestre se puede definir como el conjunto de todas aquellas morfologías que de acuerdo con Ritter (1978), son el resultado de las interacciones entre las fuerzas de impulso (procesos exógenos) y las fuerzas de resistencia (procesos endógenos).

Anteriormente se tenía una marcada tendencia hacia la idea evolutiva del relieve –debida al análisis del ciclo geográfico de Davis– la cual involucraba su descripción e interpretación de manera empírica. Conforme la Ciencia experimentó una revolución cuantitativa, la

Geomorfología entró en un periodo de actualización de procedimientos, donde el estudio geomorfológico fue enriquecido por métodos y técnicas de otras disciplinas sin perder esencialmente su propósito.

El análisis geomorfológico comienza con la descripción, busca evidencias que permitan conocer su morfogénesis y explicar los procesos actuales que se desarrollan en el paisaje, esto por medio del estudio sistematizado. Actualmente podemos reconocer la tendencia de los estudios geomorfológicos enfocados en el análisis de la relación existente entre los procesos y las formas.

De acuerdo con Lugo (1988) los objetivos fundamentales de la Geomorfología son:

1. Conocer la superficie terrestre, en su totalidad o en proporción de los tamaños más diversos.
2. Clasificar el relieve en formas definidas por los procesos que les dieron origen (tectónico, volcánico, erosivo y acumulativo).
3. Determinar la edad, absoluta o relativa, de las formas del relieve.
4. Estudiar el desarrollo histórico del relieve.
5. Identificar los procesos actuales que modelan la superficie terrestre.

Las etapas del trabajo geomorfológico se correlacionan entre sí, de manera particular, con técnicas generales de análisis del relieve y tiene como base el método científico. Además, la concepción del relieve como un sistema a partir de la introducción del paradigma de la Teoría General de Sistemas en Geomorfología, ha permitido desarrollar la sistematización del análisis y su aplicación. La generación de modelos de análisis, así como la medición de parámetros, son dos características importantes que este enfoque le ha brindado al estudio del relieve.

## 2.1.1 Conceptos y Teorías

### *Teorías de Origen del Relieve*

En este apartado revisaremos brevemente las teorías más importantes y conocidas que se han desarrollado dentro de la Geomorfología. La corriente de pensamiento del siglo XVIII era el Uniformismo. Con la influencia de esta tendencia del pensamiento, se perfilaron distintas hipótesis del desarrollo del relieve, la primera fue realizada por William Morris Davis (1850-1934). Su modelo ganó aceptación una vez propuesto; en él se muestra una marcada influencia evolucionista, tomada de las obras de Darwin publicada en 1869 y de las respectivas publicadas por Lyell en 1830-1833. La intención de Davis fue desarrollar un modelo teórico y deductivo, que

no solo describiera, sino que explicara las formas del relieve (Thorn, 1988). Trata de tres principales variables: la estructura, el proceso y el tiempo; en el primero se centra sobre la noción de estructura geológica regional, el proceso es un término bajo el cual reconoce la existencia del intemperismo y el mecanismo de transporte, por su parte el tiempo es un concepto no expresado en años sino en un sentido relativo. Estas tres variables desarrollan estados evolutivos con características distintivas, de acuerdo con las cuales se define su estado.

El ciclo comienza a partir de un relieve inicialmente plano, en él existe un levantamiento tectónico rápido con erosión despreciable, en donde al momento de concluir estos movimientos el ciclo se pone en marcha, durante una calma orogénica (Fig. 1). De acuerdo con Coque (1977) y otros autores (Thorn, 1988; Summerfield, 1997; Goudie, 2004; Huggett, 2007 y Gutiérrez-Elorza, 2008), las formas características que indica Davis son valles estrechos, redes hidrográficas en vías de organización, relieve abrupto y de altos desniveles las cuales describen la etapa de juventud (Fig. 1). El siguiente estado es denominado como madurez, donde existe una noción de equilibrio de acuerdo con Coque (1977) y Thorn (1988). De modo que la cantidad de materiales producida por el intemperismo de las rocas es en todas partes sensiblemente igual a la evacuada por los agentes de transporte. Finalmente, la etapa de vejez o senectud en la que sucede una progresiva acentuación de los rasgos de madurez. La erosión, continuamente reduce su intensidad y retoca las formas del relieve sin perturbar los equilibrios conseguidos. Los valles se ensanchan, las pendientes son disminuidas al máximo, hasta alcanzar una superficie de erosión uniforme denominada penillanura (Coque, 1977).

Las principales críticas al Ciclo Geográfico de Davis comienzan a aparecer una vez que trata de aplicar las etapas de desarrollo en otros ambientes geomorfológicos. La falta de consideración de otros factores y el intenso énfasis en la variable del tiempo son otros de los aspectos más discutidos. Posteriormente a este problema comenzaron a aparecer los distintos ciclos excepcionales, propuestos más que nada por sus discípulos.

Casi en respuesta al desarrollo del Ciclo Geográfico, un geólogo de origen alemán llamado Walther Penck (1888-1923), elaboró un modelo denominado Análisis Morfológico con influencia de su padre, el destacado geomorfólogo Albertch Penck quien se encargaría de editar y publicar su trabajo en 1924 (Huggett, 2007). Los intereses de Penck estaban enfocados en la tectónica y los movimientos de la corteza terrestre; su principal herramienta de análisis fue la estratigrafía



(Thorn, 1988), con la cual realizó estudios en los depósitos correlativos de las depresiones adyacentes a los bloques levantados de los Andes y de los Alpes (Gutiérrez-Elorza, 2008).

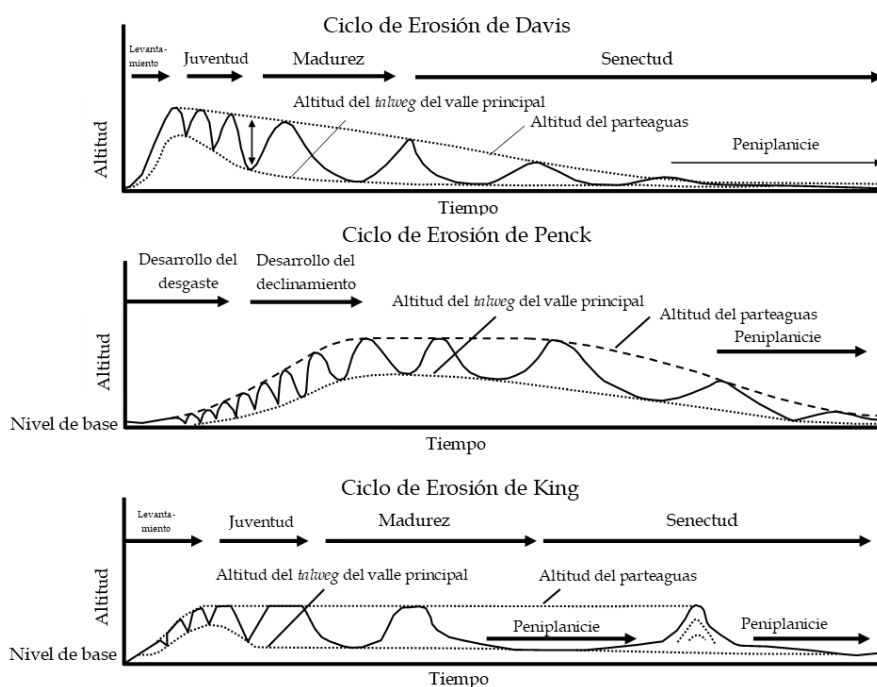


Figura 1. Esquema comparativo de los ciclos de erosión del relieve de Davis, Penck y King (Tomado de Thorn, 1988).

De acuerdo con Gerrard (1988), Penck creía que la superficie de la Tierra reflejaba la relación de intensidad de los procesos internos y externos. Esta es una característica indudable de su trabajo ya que hace un marcado énfasis en las diferentes resistencias de la roca a los procesos exógenos y difiere de la perspectiva evolutiva del ciclo de Davis. Él ve una cantidad de posibles secuencias controladas por la interacción entre el levantamiento y las tasas de denudación (Thorn, 1988).

El modelo de Penck se sintetiza de la siguiente manera: Reconoce tres mayores formas de ladera que se desarrollan con diferentes combinaciones de tasas de levantamiento y denudación. Primero, las pendientes convexas, resultado del desgaste, en el cual el levantamiento excede a las tasas de denudación. Segundo, las pendientes rectas, resultado del desarrollo estacionario (estado-estable) donde el levantamiento y la denudación se emparejan (Fig. 1). Tercero, las pendientes cóncavas, resultado de una disminución de las tasas de denudación. En su modelo resalta que las pendientes pueden, ya sea retroceder al gradiente original o aplanarse más, de acuerdo con las circunstancias (Huggett, 2007). Las tres laderas están dispuestas bajo un marco estacional continuo que comienza con una superficie primaria que se levanta y erosiona, de modo

que se desarrollan otras superficies, encajadas unas en otras, que dan lugar a un escalonamiento del piedemonte (Gutiérrez - Elorza, 2008).

El modelo de Penck reconoce las propiedades de la forma, las cuales se pueden considerar como sus variables de análisis; entre ellas están el grado de reducción (tasas de denudación), movilidad (erosión y transporte), grosor del regolito, exposición de la roca, carácter de la roca, clima y ángulo de la pendiente (Thorn, 1988). Penck hace excepciones que adecuan su modelo, ya que señala, no es compatible con toda la variedad climática y menciona que las formas del relieve no son exclusivas de un clima específico. Aunque se trata de un análisis bastante completo, no tuvo una repercusión similar a la de Davis debido a que fue publicado hasta 1924, después de su muerte, su estilo de escritura era complicado y la traducción de 1953 publicada por Davis, tergiversa muchas de sus ideas (Gerrard, 1988; Thorn, 1988; Huggett, 2007; Gutiérrez-Elorza, 2008).

Otro modelo importante fue el del geólogo Lester Charles King (1907-1989), quien trabajó en Sudáfrica y al igual que los autores anteriores, su área de estudio influyó sus observaciones (Fig. 1). La principal influencia fue el trabajar ampliamente con el geomorfológico C.A Cotton de la escuela davisiana, el cual transmitió las mismas ideas a King (Thorn, 1988; Gutiérrez-Elorza, 2008). Recoge ideas de los patrones de Davis y Penck, además de otros investigadores sudafricanos como T. J. D Fair y A. L. du Toit (Thorn, 1988), quienes aportaron ideas en cuanto a la tectónica y su importancia en el análisis del relieve y en el análisis de laderas.

El modelo de King considera al espacio como un ingrediente fundamental; el autor intenta desarrollar una estructura teórica en la cual las diferencias del paisaje son asignadas en variaciones de las entradas espaciales (Thorn, 1988). Su modelo es cíclico, comienza con un levantamiento rápido seguido de un largo periodo de calma tectónica, durante el cual se generan extensos pedimentos, que en su desarrollo final acaban en penillanura (Gutiérrez-Elorza 2008). En esta dilatada superficie aplanada, destacan relieves residuales, mesas en regiones tabulares y *bonrhardts* en relieves graníticos. Para su modelo el sistema morfoclimático es el árido. Si posteriormente tiene lugar un nuevo levantamiento, da comienzo un nuevo ciclo en el que la penillanura precedente sigue su desarrollo a la par que se reduce (Twidale, 1992 citado en Gutiérrez-Elorza, 2008).

Los modelos presentados son reconocidos netamente como dependientes del tiempo y aunque ninguno de ellos se utiliza en la actualidad fueron la base del análisis geomorfológico, ya que muestran una direccionalidad espacial y temporal además de señalar el dinamismo del relieve.

Algunos investigadores consideran el enfoque de modelos cualitativos como parte fundamental de la interpretación geomorfológica, pero lo cierto es que el único paradigma utilizado en la actualidad es el desarrollado por un geólogo americano contemporáneo a Davis (Orme, 2002), el cual propuso un análisis del relieve de forma independiente del tiempo. Su nombre es Grove Karl Gilbert (1843-1918). Para Gilbert las hipótesis debían ser rigurosamente probadas, además de que no limitaba su trabajo a la elaboración de una sola hipótesis sino múltiples hipótesis (Thorn, 1988). Los modelos independientes del tiempo tienen que asociarse con el concepto de “equilibrio dinámico” atribuido a Gilbert. Es fundado bajo el enfoque de que las formas del relieve contemporáneas se desarrollan con base en un balance de los procesos del presente, donde las condiciones existentes del relieve deben ser interpretadas en términos de las relaciones existentes entre las fuerzas disponibles y las variables resistencias de la superficie (Thorn, 1988). La característica más importante de la siguiente formulación de trabajos fue la adopción de conceptos como equilibrio o equilibrio dinámico.

La incorporación de la Teoría General de Sistemas marca la tendencia del Análisis Geomorfológico en función a los múltiples factores que componen el sistema geomorfológico. Lo que muchos autores determinan como la Geomorfología Moderna.

### ***Teoría General de Sistemas en Geomorfología***

La adopción de la Teoría General de Sistemas (1968) fue resultado de las múltiples deficiencias del enfoque histórico del análisis del relieve, el cual es representado por los modelos de Davis y otros. Se puede rastrear el enfoque desde el trabajo de Grove K. Gilbert (1877). Aunque se reconocen como pioneros, los trabajos realizados por Strahler (1950), Culling (1957) y Hack (1960), entre otros (en Chorley, 1962). La predilección de desarrollar sistemas geomorfológicos se conoce como el inicio de la cuantificación en la década de los sesenta (Thorn, 1988).

La Teoría General de Sistemas desarrollada por Von Bertalanffy en los años 1950 y hasta 1962 resultó un marco de referencia para analizar el relieve con beneficios y utilidades. Chorley (1962)

se reconoce como el introductor de la teoría en el medio geomorfológico. Los propósitos del análisis de este enfoque son enlistados por Gregory y Lewin (2014):

- ◆ Muestra una dependencia de forma universal hacia un ajuste de forma y proceso
- ◆ Dirige la investigación hacia el carácter multivariado de los fenómenos geomórficos
- ◆ Admite una visión liberal de los cambios morfológicos con el tiempo
- ◆ Fomenta un enfoque dinámico que complementa el histórico
- ◆ Centra el conjunto del paisaje en su totalidad en lugar de las partes
- ◆ Fomenta las investigaciones en áreas con pobre evidencia erosiva
- ◆ Dirige la atención a la heterogeneidad de la organización espacial

El enfoque de la Teoría General de Sistemas (TGS) ve los procesos y las formas del relieve como un ensamble de componentes que se interrelacionan e interactúan, a partir de flujos de energía y masa que funcionan como una unidad. Enfatiza la naturaleza multivariada de la Geomorfología y la relación entre los procesos y el paisaje (Trenhaile, 2004).

De esta manera un sistema, se puede definir como un conjunto de objetos o características que tienen relación, siendo estas funcionales entre sí, mismas que se caracterizan por el tipo de relación que describen con el ambiente o con otros sistemas (Von Bertalanffy, 1986 en Chorley, 1962). Los sistemas se clasifican por sus límites y la relación e intercambio de energía que guardan con el ambiente o con otro sistema. Los sistemas cerrados poseen límites cerrados y definidos, a través de los cuales no ocurre transferencia de materia, pero sí de energía. Los sistemas abiertos son aquellos que permiten la transferencia de materia y energía libremente a través de sus límites (Summerfield, 1997). Existen además los sistemas aislados que no tienen intercambio de energía ni de materia.

Los sistemas abiertos son los sistemas más comunes en la naturaleza, estos necesitan de un suplemento continuo de energía para su mantenimiento y preservación (Reiner y Spiegelman, 1945 en Chorley, 1962). Estos sistemas pueden alcanzar un estado estable en el cual la importación y exportación de energía y materia se igualan mediante un ajuste de la forma o geometría del propio sistema (Chorley, 1962). Los sistemas cerrados tienden a la máxima entropía, es decir, llegan al grado en el cual la energía es incapaz de realizar algún trabajo. En cambio, los sistemas abiertos mantienen bajos niveles de entropía y son capaces de desarrollar grandes órdenes de heterogeneidad, diferenciación jerárquica y organización (Von Bertalanffy, 1952 en Chorley,

1962). Otra característica importante de los sistemas abiertos es que son capaces de comportarse con equifinalidad, es decir, condiciones iniciales pueden conducir a resultados finales similares.

De acuerdo con Huggett (2007) los sistemas geomorfológicos pueden ser entendidos como el resultado básico del antagonismo entre procesos endógenos dirigidos por las fuerzas geológicas y los procesos exógenos dirigidos por las fuerzas climáticas. En cuanto a los componentes del sistema geomorfológico, Ahnert (1998) menciona que son las formas del relieve, los materiales y los procesos los que dan lugar a tres tipos diferentes de sistemas.

Los sistemas estáticos, compuestos por las formas del relieve, los materiales y la relación entre la forma y material. Para Summerfield (1997) estos sistemas son definidos como sistemas morfológicos y representan las relaciones estáticas entre las propiedades morfológicas de los elementos del relieve. Por su parte Huggett (2007), menciona que los sistemas de formas del relieve muestran solo la descripción física sin interrelacionarse con el proceso.

De acuerdo con la clasificación propuesta por Ahnert (1998), los sistemas de procesos consisten en asociaciones de procesos y sus características. Son denominados sistemas de cascada por Summerfield (1997) y Huggett (2007), aquellos enfocados en las vías interconectadas de los movimientos de masa y los flujos de energía. Finalmente, se encuentran dentro de esta clasificación, los sistemas de "proceso-respuesta", los cuales describen la relación entre los componentes estáticos y los procesos (Ahnert, 1998). Resultan de la interrelación entre los dos sistemas, morfológicos y los de cascada y que de acuerdo con Huggett (2007), en esta relación cualquiera de los dos sistemas pueden perturbarse mutuamente.

El concepto de equilibrio dinámico dentro del enfoque sistémico es una característica intrínseca de los sistemas geomorfológicos. Es un concepto que le da al sistema una independencia del tiempo y permite definir diferentes estados en función de la relación entre formas y procesos. En tal condición es necesario tener un suministro constante de energía, donde el equilibrio dinámico es la condición en la cual, las formas del relieve mantienen la misma cantidad de material que está siendo adicionada por el levantamiento tectónico y removido por un conjunto constante de procesos geomorfológicos (Huggett, 2007) (Fig. 2). Se han propuesto ocho tipos de equilibrio en Geomorfología (Chorley y Kennedy 1971; en Chorley 1972). Uno de estos es el equilibrio dinámico que consiste en un conjunto de fluctuaciones en torno a un estado medio que cambia en una dirección determinada; otro es el equilibrio dinámico metaestable, el cual combina las tendencias

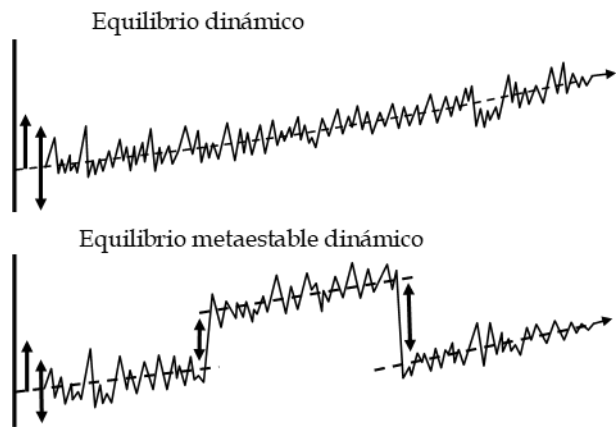


Figura 2. Principales tipos de equilibrios geomorfológicos presentes en la naturaleza (Tomad de Huggett, 2007)

dinámicas y metaestables con fluctuaciones alrededor de una tendencia en la que se atraviesan umbrales, son fundamentales para entender el estado de los sistemas geomorfológicos (Fig. 2).

De acuerdo con Schumm (1979) un sistema en equilibrio puede ser definido por parámetros reales, seguido a esto debe haber valores que representen los límites de la condición de

balance, los cuales son denominados umbrales (Ritter *et al.*, 1995). Un umbral es la condición crítica en la cual una forma del relieve cambia abruptamente. El cambio puede ser resultado de una variable externa, que excede la estabilidad de la forma del relieve en un umbral extrínseco, o el cambio en un umbral intrínseco puede ser el resultado de un cambio progresivo de forma (Goudie, 2004).

La Geomorfología de los Procesos se esmera en entender sus características, la medición de estas permite una mejor interpretación, dando lugar a vías de determinar la magnitud y frecuencia con la que se presentan los eventos geomorfológicos. La relación frecuencia-magnitud está ligada con la escala de análisis que se utilice en el Análisis Geomorfológico. Goudie (2004) menciona que este concepto, resulta de la comparación de la actividad de diferentes procesos geomorfológicos en una escala de tiempo dada, algunos procesos parecen operar continuamente mientras que otros operan solo en condiciones específicas o eventos.

Infortunadamente la medición de estos conceptos no queda clara, debido a la dependencia de las escalas espacio temporales, misma que varía de acuerdo con el análisis realizado. Por esta razón, la representación de estos conceptos es más útil estadísticamente, ya que en el tratamiento estadístico en un lapso temporal y bajo la medición de una gran cantidad de eventos permite determinar intervalos de recurrencia o el tiempo de relajación.

El concepto del intervalo de recurrencia determina la frecuencia de un evento de magnitud específica expresada como la relación entre la longitud de tiempo y la magnitud de ellos, mientras

que el tiempo de relajación es el tiempo durante el cual se puede discernir los efectos de un evento (Schumm, 1979).

## 2.2 Geomorfometría

El análisis cuantitativo de la superficie terrestre es el objeto de estudio de la Geomorfometría. De acuerdo con Pike *et al.* (2009), es un enfoque mediante el cual se obtienen parámetros de la superficie terrestre que permite reconocer funciones entre las formas y los procesos.

Se ha dividido en dos áreas, la primera corresponde a la Geomorfometría General, la cual trata del análisis de la superficie terrestre como una superficie continua, descrita por atributos en una muestra de puntos o áreas arbitrarias (Goudie, 2005). Realiza un análisis a gran escala de los datos del relieve y principalmente tiene fines cronológicos relativos. Por otro lado, la Geomorfometría Específica se ocupa de la medición de las características de formas del relieve particulares. Definida por Evans (1972) como la medición y el análisis de características superficiales específicas, definidas por uno o más procesos y separadas de las partes adyacentes de la superficie terrestre.

Lo anterior no hubiera sido posible sin el desarrollo de la información topográfica a finales del siglo XVIII y principios del XIX. Un ejemplo del uso de esta información lo tenemos en las monografías regionales de von Sonklar (1873; en Pike *et al.*, 2009) y otros, que fueron más allá de la descripción y consideraron la elevación, el volumen, la forma planimétrica, el relieve relativo y la densidad de drenaje en sus investigaciones.

Las técnicas se siguieron desarrollando, como fue el caso de las técnicas de análisis fotográfico, el incremento de su calidad durante la década de 1920, imprimieron una excelente oportunidad para los geomorfólogos de la época de estudiar una mayor extensión del relieve (Pavlopoulos *et al.*, 2009). Más adelante el análisis estadístico comenzó con el trabajo de Strahler (1950; en Pike *et al.*, 2009) que dedicó su investigación a la medición de pendientes, su tratamiento estadístico y la correlación con el desarrollo del relieve. De acuerdo con Pike y colaboradores (2009), fue Chapman en 1952 quien añadió la tercera dimensión al análisis al tratar las superficies planas como “polos del plano”. La adopción de distribuciones de frecuencia y pruebas estadísticas

representó un progreso considerable y fue ampliamente promovido por Richard J. Chorley (1927-2002).

La complejidad del paisaje llevó a los geomorfólogos a intentar establecer un método científico objetivo para la representación gráfica de relieves complejos. Además de las diferencias altitudinales de un relieve, las variaciones de inclinación fueron el segundo aspecto cuantitativo a evaluar. Las rupturas de la pendiente que delimitan las formas o facetas elementales de la superficie terrestre forman el fundamento de la Cartografía Geomorfométrica.

Entre los factores que permitieron un avance notable en la Geomorfometría, están la innovación tecnológica ocurrida durante la Segunda Guerra Mundial. Los avances en informática durante los primeros años de 1950. La creación de *software* con aplicaciones dirigidas al análisis del relieve y los primeros datos de entrada en ellos fueron elevaciones de puntos y perfiles topográficos realizados manualmente.

Con estos desarrollos tecnológicos se fueron acuñando otros conceptos. El concepto del Modelo Digital de Elevación (MDE), descrito por primera vez por Miller y Laflam en 1958 (en Pike *et al.*, 2009), que se generalizó hasta la década de 1960. Con ellos iniciaron las investigaciones cuantitativas automatizadas, crearon los primeros MDE (manuales) y *software* que calcularan una extensa serie de parámetros (Pike *et al.*, 2009). En 1972 Carson y Kirkby sentaron las bases para un enfoque matemático de modelización en la Geomorfometría.

Durante los años setenta los programas informáticos adecuados para el análisis estadístico de datos, se volvieron disponibles. Su mayor utilidad radicaba en la clasificación de los parámetros descriptivos, las técnicas de correlación múltiple y el factor de análisis de componentes principales. El análisis *clúster* automatizó la identificación de tipos de topografía y delimitó regiones a partir de parámetros superficiales (Pike *et al.*, 2009). Al inicio de los años noventa y con la revolución de las computadoras personales, los algoritmos implementados en muchos paquetes computacionales se basaron en el procesamiento de información *raster*, -nubes de puntos- que permitieron el uso y procesamiento de variables morfométricas.

La Geomorfometría actual sigue en evolución junto con el análisis geoestadístico. La maduración de los Sistemas de Información Geográfica y la tecnología de percepción remota ha permitido que la Geomorfometría resurja como una técnica que posee una poderosa caja de herramientas



analíticas (Burrough y Mc Donnell, 1998). Con el rápido crecimiento de las fuentes de MDE como la Misión Topográfica de Radar de Transbordador (SRTM) y el láser LiDAR, los parámetros de la superficie terrestre se expanden cada vez más. La Geomorfometría se ha vuelto esencial para el modelado y mapeo de los paisajes naturales en escala tanto regional como local.

Algunas de sus aplicaciones son de índole ambiental, como pueden ser la predicción de la distribución de las propiedades del suelo, modelos de procesos de depósito y transporte, mejora el mapeo de distribución y estado de la vegetación; también son de ayuda para la delimitación de regiones ecológicas. En la ingeniería civil y aplicaciones militares, se emplean frecuentemente para la planificación de infraestructuras como puentes, autopistas, aeropuertos, etc. Así como para situar turbinas de energía eólica, o sitios ideales para canales y presas. Otra de las aplicaciones ha sido en el área de entretenimiento como son los modelos digitales utilizados para la industria de los videojuegos y animación cinematográfica.

## 2.3 Análisis Geomorfológico

El Análisis Geomorfológico proviene de una metodología de investigación, reconocida por Goudie (2005) como el método científico deductivo, el cual se integró en la disciplina geomorfológica durante la revolución cuantitativa en los años cincuenta. Esencialmente y de acuerdo con varios autores (Espinosa-Rodríguez y Arroyo López, 2011; Lugo 2011) el Análisis Geomorfológico se ocupa de diseñar métodos para el entendimiento de la geometría, reconocimiento de los materiales y los procesos que les dan origen. Son una variedad de métodos y técnicas, que han cambiado a través del tiempo y que se modifican en función de los objetivos de investigación, además de que responden a la escala del análisis.

Se compone de una serie de etapas que incluyen principalmente: el trabajo de gabinete en el cual se realizan las tareas de recopilación de información, elaboración de cartografía primaria que permite reconocer las formas del relieve para poder elaborar cuestionamientos que lleven a la conformación de las hipótesis de trabajo, con las cuales se pueda trabajar y analizar el sistema (Knight *et al.*, 2011). La siguiente etapa consiste en el trabajo de campo, punto crucial de la investigación, ya que de él se derivan las afirmaciones o refutaciones de las hipótesis. Funciona también como parte de la recolecta de información, muestreo y levantamiento de datos que

posteriormente son analizados en el laboratorio, esta última actividad es la tercera etapa del análisis geomorfológico.

Existen fundamentalmente cinco partes asociadas a una metodología geomorfológica, se trata de los Análisis Morfográfico, Morfométrico, Morfogenético, Morfoestructural y Morfodinámico. De acuerdo con Lugo (1988), éstas son partes fundamentales del análisis geomorfológico que pueden explicar las formas del relieve.

### *2.3.1 Análisis Morfográfico*

Comienza con el trazo de las principales formas del relieve, en mapas topográficos o en fotografías aéreas, imágenes de satélite o modelos digitales de elevación. Se trata de señalar los elementos geométricos como son puntos, líneas, áreas, superficies y volúmenes.

- ◆ Los puntos expresan formas del relieve de pequeñas dimensiones, que no son fáciles de representar debido a la escala; como las cimas de montañas, domos, la desembocadura de valles, etc.
- ◆ Las líneas representan divisorias de agua (parteaguas), talwegs, líneas de costa, base de montañas, escarpes de falla, etc.
- ◆ Las superficies subaéreas o submarinas con frecuencia se pueden describir en forma de polígonos con cualquier tipo de figura geométrica.
- ◆ Los volúmenes como modelos geométricos se aplican a elevaciones como conos, pirámides prismas y cilindros.

Otros elementos geométricos pueden ser presentados por la configuración de la red de drenaje, la cual puede ser dendrítica, angular, rectangular etc. Este paso debe ser llevado a cabo en cualquier estudio del relieve, ya que proporciona un acercamiento inicial con las formas del relieve.

### *2.3.2 Análisis Morfométrico*

Consiste en la cuantificación de ciertos elementos del relieve, lo que ha resultado en el desarrollo de los métodos matemáticos para el estudio de los elementos del relieve y de los procesos actuales (Lugo, 1988). Se trata de la utilización de distintas formas cartográficas y diagramáticas, de la información estadística acerca de la superficie terrestre, proporcionada por los mapas topográficos, fotografías aéreas, imágenes satelitales o por mediciones directas en el terreno. La mayoría de estas técnicas cartográficas tratan de pendientes y altitudes. Esta información puede ser clasificada, interpretada y presentada según distintos patrones (Monkhouse y Wilkinson, 1952).

Algunos de los elementos principales que son posibles de cuantificar son las longitudes, superficies, volúmenes, alturas absolutas y relativas, pendientes, orientaciones, densidades, frecuencias y otros elementos numéricos.

De acuerdo con Lugo (1988), los métodos morfométricos calculan estos parámetros y los relacionan. Estos métodos permiten la elaboración de mapas específicos que contribuyen al conocimiento más objetivo y preciso de las formas del relieve y su configuración.

### ***Mapas Morfométricos***

Constituyen mapas elaborados por medio de la cuantificación de parámetros y atributos de las formas del relieve. Lugo (1988), menciona que su aparición y popularización comenzó a partir de una clasificación numérica de la red fluvial establecida por Horton en 1945. Posteriormente surgieron métodos morfométricos complementarios al estudio de las cuencas y se extendió su aplicación a otros ambientes geomorfológicos. Estos métodos buscan su correlación con otros elementos tales como los movimientos verticales, las rupturas de pendiente, etc.

Una advertencia importante que hace Monkhouse y Wilkinson (1952) es que los métodos morfométricos no son productos finales, ya que requieren una debida interpretación, y aunque pueden dar resultados exactos, precisos y objetivos, no tienen una dirección de interpretación categórica. A continuación, se presentan los mapas más tradicionales y útiles del análisis morfométrico (Tabla 1).

Con estos métodos es importante considerar que pueden ser de mucha ayuda sí se aplican de forma razonada, se trata de métodos de apoyo para la resolución de problemas, y su debida resolución solo es posible mediante una correcta interpretación (Lugo, 1988).

#### ***2.3.3 Análisis Morfogenético***

El objetivo fundamental de los estudios geomorfológicos ha sido la elaboración de mapas morfogenéticos (Lugo, 1988). Parte del principio de que cualquier porción de la superficie terrestre se puede cartografiar al diferenciar formas del relieve en función de su origen. Incluye otro tipo de información, elementos que reflejan únicamente morfología, edad de las formas, tipos de rocas, así como movimientos tectónicos recientes.

Tabla 1. Métodos cartográficos usados en el Análisis Geomorfológico (elaborado con base en Lugo, 1988).

Parámetros morfométricos	Información representada
<b>Pendientes del terreno</b>	Consiste en transformar las distancias entre curvas de nivel en valores de inclinación. Se pueden expresar estos valores en grados o en porcentajes.
<b>Orientación de laderas</b>	Indica de manera indirecta la situación de una ladera en cuanto a su insolación y, por lo tanto, si una ladera se encuentra húmeda o seca con mayor frecuencia.
<b>Profundidad de disección</b>	La profundidad de erosión se considera en un perfil y equivale a una altura vertical medida entre el talweg y la divisoria o parteaguas correspondiente. Visto desde un plano se trata de una distancia transversal al talweg y el valor se obtiene fácilmente por la diferencia de cotas entre las curvas de nivel.
<b>Densidad de disección del relieve.</b>	Es el equivalente a la densidad de corrientes fluviales en un área, analiza los talweg como líneas originadas por la acción fluvial.
<b>Disección general del relieve</b>	Es la combinación de la información de los mapas de densidad y profundidad de disección, muestra un panorama general de la acción fluvial.
<b>Energía o amplitud del relieve</b>	Refiere la diferencia máxima de alturas en un área definida. La energía del relieve expresa, la intensidad relativa de la acción endógena en relación con la exógena.
<b>Ordenes de corrientes</b>	Señala la cantidad de corrientes de un mismo orden presentes, también se puede elaborar el mapa de frecuencia de corrientes el cual indica la cantidad de corrientes de un mismo orden específico que quedan dentro de las áreas establecidas.
<b>Pendiente de valles</b>	Se lleva a cabo por medio del análisis de los perfiles longitudinales de los valles. En cada perfil que sigue el talweg y registran los cambios bruscos de gradiente.
<b>Análisis de lineamientos</b>	Los lineamientos son aquellos elementos del relieve dispuestos en una dirección dominante y condicionada, en teoría, por la actividad endógena. Los lineamientos indican posibles límites estructurales o tectónicos. Se pueden reconocer en las fotografías aéreas, cartas topográficas e imágenes de satélite o más recientemente en los modelos digitales de elevación de alta resolución.

No existe un acuerdo internacional para la elaboración de los mapas morfogenéticos. Pero en la mayoría de las escuelas se estila distinguir el origen de las formas en tres rubros generales que son Endógeno, Exógeno y Endógeno Modelado (Lugo y Córdova, 1992; Castillo, 2006; Quesada y Barrantes, 2017; Morales, 2018). Dentro de cada origen general o primario existen múltiples orígenes secundarios y dentro de cada uno de ellos, solo dos tipos de orígenes terciarios; por ejemplo, para las formas exógenas, independientemente de su origen secundario se encuentran dos orígenes terciarios que son acumulativo y erosivas.

El mapa morfogenético es una combinación de información geológica y topográfica, de la cual resulta, una primera interpretación del relieve y un mapa preliminar para el posterior análisis. De acuerdo con Lugo (1988), el objetivo de los mapas morfogenéticos es presentar una información general sobre el relieve de la zona de estudio. Las escalas ideales para este tipo de análisis son 1:50 000 la más grande y 1:250 000 la más pequeña.

### *2.3.4 Análisis Morfodinámico*

Se trata de la representación de los procesos geomorfológicos más recientes. En muchos casos la información de los procesos actuales puede sobreponerse en la carta morfogenética; un medio para lograr esto es diferenciar las formas del relieve activas o inactivas (Lugo, 1988). Resulta conveniente que estas cartas se elaboren en forma independiente. A partir de una carta topográfica, se pueden inferir, los procesos exógenos dominantes de una región. En escalas pequeñas se consigue representar los procesos a partir de la regionalización, o los que dominan en un amplio territorio, mientras que en escalas más grandes como 1:50 000 se pueden cartografiar con mayor detalle.

La geomorfología moderna ha pasado a cuantificar los procesos exógenos, de tal manera que se pueden cartografiar muchos de ellos de acuerdo con sus velocidades promedio, esto resultado de observaciones precisas y continuas durante un considerable número de años. La cartografía morfodinámica refleja los cambios que se producen actualmente y a partir del análisis geomorfológico se pretende pronosticar su transformación a corto plazo. La morfodinámica incluye también a los procesos endógenos: movimientos verticales y horizontales de la corteza terrestre, fallas activas, volcanes, y domos activos.

### *2.3.5 Análisis Morfoestructural*

Guerasimov (1946; en Lugo 1988), utilizó el término morfoestructural para referirse a formas del relieve originadas esencialmente por procesos endógenos en interacción con los exógenos, a los que corresponde una determinada estructura geológica. Originalmente el objetivo de los estudios geomorfológicos estructurales era relacionar la estructura geológica con las formas del relieve. Posteriormente, este tipo de estudios abarcó problemas más complicados, como el reconocimiento de estructuras ocultas y movimientos tectónicos.

Debido a que los cuatro análisis se encuentran relacionados, su elaboración se facilita conforme avanza en el proceso de investigación. Espinosa-Rodríguez y Arroyo López, (2011), recopilan los diferentes tipos o enfoques de análisis geomorfológicos. Los enfoques varían en el uso de métodos y técnicas no obstante conservan el mismo objeto de estudio que es la explicación del relieve (Tabla 2).

Tabla 2. Enfoques de Análisis Geomorfológico (tomado de Espinosa-Rodríguez y Arroyo López, 2011).

METODO	CARACTERISTICAS GENERALES
<b>Morfológico</b>	El estudio de las formas, dimensiones y límites de los elementos del relieve. Establece relaciones entre los diferentes elementos y formas del relieve de un área determinada; el carácter de sus asociaciones y su forma de disposición espacial; el estudio de los lineamientos y de las regularidades de su distribución; análisis de redes de drenaje. Estudia el grado de desmembramiento y de inclinación de la superficie terrestre. Incluye el análisis de la morfografía y morfometría
<b>Morfoestructural</b>	Determina las relaciones entre el relieve y la estructura geológica. Analiza los sistemas disyuntivos. Estudia las relaciones entre los elementos del relieve y los tipos de rocas; la litología en la formación del relieve. Establece relaciones entre las estructuras geológica y el relieve. Clasifica morfoestructuras
<b>Morfodinámico</b>	Estudio de la actividad de los procesos exógenos actuales Identifica y cuantifica la acción de los procesos exógenos. Estudio de la dinámica de los procesos endógenos. Evalúa los procesos antrópicos. Pronostica el desarrollo del relieve. Analiza geosistemas perturbados
<b>Morfolitogenético</b>	Analiza la composición de los depósitos correlativos: mineralogía, litología y composición física, así como, la determinación de espesores. Estudio geoquímico de los depósitos. Estudio de fósiles, polen y esporas contenidos en los depósitos para conocer su edad y génesis. Análisis de facies. Estudia relaciones entre las formas, tipos genéticos de depósitos y las formas del relieve. Analiza los cambios de los depósitos superficiales. Análisis de las causas de las variaciones de litología, espesor y génesis de depósitos. Estudia cambios en las formas acumulativas
<b>Paleogeomorfológico</b>	Reconstrucción de etapas del desarrollo del relieve y el análisis de la relación entre los depósitos correlativos y el cambiante medio geográfico. Analiza los procesos formadores del relieve del pasado y su correlación con los procesos actuales. Estudia el relieve antiguo. Establece tendencias de desarrollo del relieve y de los depósitos correlativos

## 2.4 Cartografía Geomorfológica

El Análisis Geomorfológico puede ser abordado como un método de análisis espacial. De acuerdo con Chorley (1972) este término incluye el ensamblaje de técnicas y modelos analíticos en los que se mantiene una asociación clara entre los datos cuantitativos y las coordenadas espaciales que los localizan. El Análisis Geomorfológico busca clasificar las formas del relieve, siendo uno de los procedimientos fundamentales en cualquier disciplina científica (Mather, 1972).

El objetivo principal es proporcionar un inventario completo de los datos observados en la realidad y que hacen referencia al relieve. Es un documento fundamental para la investigación básica y aplicada. El estudio más formal del relieve es reciente, floreció de forma importante en diferentes países y escuelas, especialmente durante los años sesenta y hasta los ochenta (Smith *et al.*, 2011). El primer mapa geomorfológico se le atribuye a Passarge (1914 en Verstappen-Theodoor, 2011). Anteriormente existieron mapas morfológicos que representaban diferentes cadenas montañosas, mesetas, llanuras y otros rasgos del relieve.

Peña-Monne (1997) reconoce tres etapas principales del desarrollo de la cartografía geomorfológica, la primera contiene mapas antiguos morfológicos, que se consideran como mapas fisiográficos, la característica de estos mapas es que se enfocaban en un fenómeno en particular y dejaban varios espacios en blanco del área estudiada (Smith *et al.*, 2011). La Cartografía Geomorfológica, es ampliamente usada como herramienta de investigación, principalmente en Europa durante las décadas de 1950 y 1960. El principal problema que surgió junto con el desarrollo de la cartografía geomorfológica fue la variedad y heterogeneidad de simbologías y leyendas de los diferentes países. Verstappen (2011) afirma que las leyendas de los mapas geomorfológicos analíticos tienden a ser muy complejas como resultado de la diversidad de datos que deben incluirse como son las características morfométricas, morfográficas, morfogenéticas y morfocronológicas del terreno; además de las morfoestructurales, la litología y la representación de los depósitos superficiales.

Esta dificultad representa el principal objetivo a resolver en la segunda etapa de la cartografía geomorfológica el cual se reconoce desde los años sesenta y setenta que lleva, por una parte, al desarrollo de la normativa conjunta de la Unión Geográfica Internacional (UGI), y otra, a la elaboración de nuevos métodos de trabajo cartográfico principalmente por parte de Francia y Holanda, los cuales eran los más populares.

En 1960, en el XIX Congreso Internacional de Geografía, se creó la subcomisión del Mapa Geomorfológico (*Geomorphological Mapping*) dentro de la Comisión de Geomorfología Aplicada de la Unión Geográfica Internacional (*United Geographic International*). A pesar de los esfuerzos de la UGI, las leyendas establecidas han tenido escasa aceptación general por lo que siguen existiendo tres tipos de leyendas: la internacional, las particulares de algunos países y las resultantes de la mezcla de ambas (Peña-Monne, 1997). La disponibilidad y utilización de los datos aeroespaciales se convirtió gradualmente en la práctica general en todo el mundo, se reconoció su aplicación a la prospección geomorfológica y se desarrollaron los métodos para su integración en los procedimientos de investigación (Verstappen, 2011).

A partir de 1986, la atención del trabajo geomorfológico se centró en la cartografía geomorfológica aplicada. Para esta tercera etapa la importancia de la prospección geomorfológica y la cartografía dirigida a una variedad de propósitos prácticos fue comprendida gradualmente, no solo entre los geomorfólogos sino también por muchos científicos de diferentes disciplinas dedicadas al manejo,

inventario y estudio de los recursos naturales. Los primeros trabajos reconocidos de prospecciones geomorfológicas aplicadas se deben a autores como Pecsí (1964), Tricart (1955, 1969), Verstappen (1970, 1983, 1991) y Brunsten (1993), (en Verstappen, 2011).

En los últimos 60 años, la cartografía ha contribuido significativamente a la comprensión de la evolución del paisaje en el pasado geológico reciente y ha adoptado técnicas de otros campos para el estudio de las formas del relieve. Una consecuencia importante ha sido el desarrollo de los programas de cartografía geomorfológica que han disminuido el interés por la técnica de mapeo. Los desarrollos en software han estimulado un trabajo adicional que permite el almacenamiento, análisis y salida de conjuntos de datos complejos (Paron y Claessens, 2011).

En este contexto, la cartografía geomorfológica se caracteriza por el acceso a la información con las nuevas técnicas de teledetección y las imágenes de satélite. Este acceso a la información ha desembocado en el desarrollo de los Sistemas de Información Geográfica adaptados a los requerimientos de la disciplina y a las técnicas de modelado que han abierto nuevas oportunidades para el levantamiento geomorfológico y la cartografía (Verstappen, 2011).

#### *2.4.1 Características y tipos de mapas geomorfológicos*

Los mapas geomorfológicos proporcionan una descripción objetiva y completa de las formas del relieve, que se identifican con nombres específicos y representan con su forma correcta o, cuando no lo permite la escala del mapa, mediante símbolos apropiados. Deben incluir información sobre las propiedades espaciales (dimensión, pendiente, curvatura) de las formas del relieve (morfometría), su origen y evolución en relación con agentes y procesos genéticos (morfogénesis), considera también los efectos de la litología, el control estructural, edad relativa o absoluta (morfocronología), su estado de actividad y las tasas de cambio de los procesos genéticos (morfodinámicos) (Dramis *et al.*, 2011).

Dramis y Bisci (1998 en Dramis *et al.*, 2011) distinguen entre los mapas geomorfológicos básicos y los mapas geomorfológicos derivados o derivativos.

- ♦ Los mapas geomorfológicos básicos (mapas analíticos y sintéticos para Verstappen (1977 en Dramis *et al.*, 2011) se producen mediante simple transferencia gráfica de datos recopilados directamente del trabajo de campo sobre el terreno o la interpretación de fotografías aéreas. Pueden hacerse a partir de dos perspectivas diferentes: evolución del



paisaje a lo largo de los tiempos geológicos (morfoevolución), o bien de acuerdo con el estado de actividad de los procesos geomorfológicos que afectan un área determinada (morfodinámicos).

- ◆ Los mapas geomorfológicos derivados (o pragmáticos para Verstappen (1977 en Dramis *et al.*, 2011) se obtienen a través de la selección, generalización y reutilización de datos reportados en mapas básicos con el propósito de zonificar la distribución espacial y temporal de los procesos geomorfológicos significativos o más recientes como deslizamientos, inundaciones, etc. (Dramis *et al.*, 2011).

Otras características también pueden servir para clasificar a los mapas, las reúne Peña-Monne (1997) (Tabla 3). Ollier (1977) reconocen cuatro principios de acuerdo con los cuales se manifiestan las características de la cartografía geomorfológica. A continuación, se describen.

## *Escala*

Elegir la escala de análisis dependerá fundamentalmente de los objetivos de la investigación (Ollier, 1977). Las escalas abarcan una amplia gama, Baker (1986 en Ollier, 1977), presenta una relación entre el tamaño de las formas del relieve y su persistencia temporal (Tabla 4).

Con base en esta variedad de escalas se pueden clasificar los mapas geomorfológicos; cada escala representa diferentes aspectos de la superficie terrestre (Tabla 4). Baker (1986 en Ollier 1977) considera tres categorías principales:

1. Macroescala: Sobre las cuales ocurren las fases principales de la erosión y depósito, controlada por la deformación regional, la formación de montañas y los movimientos de la corteza terrestre.
2. Mesoescala: Trata cambios importantes en formas del relieve y paisajes de antigüedad considerable, que implican una interacción compleja entre controles tectónicos y climáticos en los procesos geomorfológicos.
3. Microescala: Sobre la cual se asume que las variables principales del tectonismo y del clima son constantes se encuentran en esta categoría el proceso de formación de dunas de arena, movimiento de glaciares, procesos fluviales que reflejan los eventos a corto plazo del flujo local etc.

Tabla 3. Características de los tipos de mapas (elaborado con base en Peña-Monne, 1997).

TIPOS DE MAPAS GEOMORFOLÓGICOS	CARACTERÍSTICAS
<b>1. Por el contenido</b>	
Generales	Mapas de síntesis, incluyen todo el conjunto de elementos posibles.
Parciales	Abarcan una selección de las características del relieve o diferentes partes del relieve o formas específicas.
<b>2. Según el grado de aplicación</b>	
Básicos (generales o parciales)	Para la investigación puramente geomorfológica.
Aplicados (generales o parciales)	Están elaborados para resolver a una problemática definida.
Especiales	Se componen de información seleccionada y simplificada, sirven para disciplinas no geomorfológicas.
Derivados	Surgen de la reelaboración de un mapa básico.
<b>3. Por su carácter temático</b>	
Morfoestructurales	Especialmente de pequeña escala en los que se tiene la estructura de importancia.
Morfométricas	Mapas de pendientes, mapas de densidad de formas, mapas de altitud media y relativa, muestran exclusivamente esta característica.
Morfográficas	Desarrollo de unidades geomorfológicas, tipos de terreno, paisajes, regiones etc.
Morfogenéticas	Procesos actuales, evaluación de riesgos naturales y en dinámica morfogenética.
Morfocronológicas	Mapas de evolución morfológica, orden relativo u absoluto de las edades de las superficies.
Morfodinámicas	Mapas de procesos funcionales aplicados; p.e: mapas de riesgos.
<b>4. Regionales</b>	
De regiones geomorfológicas	Se componen de unidades regionales del relieve resultantes de la combinación de elementos sobre un espacio territorial. Definidos por la morfoestructura, morfografía, génesis del relieve elaborados en escala de media a pequeñas (Kugler <i>et al.</i> , 1978 en Peña-Monne, 1997)
<b>5. Por el grado de elaboración y finalidad de su realización</b>	
Preliminares	Construidos con información complementaria de otras fuentes.
Definitivos	Corresponden a la cartografía preliminar tras ser verificada por el trabajo de campo y de laboratorio.
<b>6. Por su información</b>	
Analíticos	Con base en la morfogénesis y morfografía
Sintéticos	Incluyen parámetros como análisis de terreno, cartografía ambiental, etc.
Pragmáticos	Producidos para su aplicación concreta.

## Métodos de mapeo

La mayoría de las investigaciones que clasifican el terreno, incluyen dos aspectos:

- ◆ Trabajo detallado sobre el terreno
- ◆ Trabajo de extensión para el mapeo de áreas amplias

En la primera se utiliza una gama de técnicas de recopilar la información del terreno. Mientras que la extrapolación y la cartografía se refiere a los métodos de fotografía aérea, imágenes de satélite, modelado de relieve, etc. El propósito principal de estas dos áreas es la recolección de la información precisa del terreno y los métodos de fotografías aéreas o imágenes de satélite (Ollier, 1977).

Tabla 4. Orden espacial / temporal de la magnitud de las formas del relieve (tomado de Dramis et al., 2011).

Orden	Km <sup>2</sup>	Características de la superficie terrestre correspondientes	Persistencia aproximada (años)
1	10 <sup>7</sup>	Continentes, cuencas oceánicas	10 <sup>8</sup> - 10 <sup>9</sup>
2	10 <sup>6</sup>	Escudos	10 <sup>8</sup>
3	10 <sup>4</sup>	Unidades tectónicas de mediana escala (cuencas sedimentarias, macizos de montaña, domos)	10 <sup>7</sup> -10 <sup>8</sup>
4	10 <sup>2</sup>	Unidades tectónicas pequeñas ( bloques de falla, volcanes, subcuencas sedimentarias)	10 <sup>7</sup>
5	10 <sup>2</sup> -10	Unidades de erosión / deposición a gran escala (deltas, valles principales, piedemontes)	10 <sup>6</sup>
6	10 - 10 <sup>-2</sup>	Unidades de erosión / deposición medianas (llanuras de inundación, aluviones, morrenas, valles más pequeños)	10 <sup>5</sup> -10 <sup>6</sup>
7	10 <sup>-2</sup>	Pequeñas unidades de erosión / deposición (crestas, terrazas, dunas de arena)	10 <sup>4</sup> -10 <sup>5</sup>
8	10 <sup>-4</sup>	Unidades de proceso geomorfológicos más grandes (laderas, secciones de canales de corriente)	10 <sup>3</sup>
9	10 <sup>-6</sup>	Unidades de proceso geomórficas de escala media (pools y rifles, barrancas de ríos, pozos de solución)	10 <sup>2</sup>
10	10 <sup>-8</sup>	Unidades de proceso geomórficas microscópicas (ondulaciones fluviales y eólicas, estriaciones glaciales)	

## Manejo de datos

Este punto se refiere a la forma de presentación de los datos conseguidos la cual permitirá su difusión. Los almacenes digitales de datos actualmente representan una forma más apropiada y disponible de la información. Integrar métodos de manejo de datos estadísticos es también muy importante pues permitirá hacer comparaciones con otras áreas que permitan hacer conclusiones elaboradas y de mayor valor.

## Correlación

Si bien lo anterior es prácticamente desarrollado en la comodidad de un escritorio, Ollier (1977) menciona “la única manera segura de evaluar un sitio para alguna actividad es ir allí”. De acuerdo con este autor la clasificación del terreno se utiliza para predecir sus propiedades a partir de los sitios no visitados.

Mediante la correlación es posible entender que las características de un área de estudio tienen influencia entre sí y con las áreas aledañas. La importancia de verificar esto en campo permitirá además integrar otros detalles, correlacionar áreas adyacentes con los datos obtenidos de la investigación, esto debe realizarse con moderación, ya que la generalización puede eliminar datos importantes que sirvan para las conclusiones.

# CAPÍTULO III

## MARCO GEOGRÁFICO

---

### 3.1 Localización y contexto social

El sistema lagunar Chacahua - La Pastoría está ubicado en el estado de Oaxaca en el municipio de Villa de Tututepec de Melchor Ocampo; entre las coordenadas 15° 58' y 16° 00' de latitud Norte y los meridianos 97°32' y 97°37' Oeste; limita al norte con las estribaciones de la Sierra Madre del Sur, hacia el sur con el Océano Pacífico, al este con la cuenca del Río Grande y al oeste con la Cuenca del Río Verde (Fig. 3).

La provincia Sierra Madre del Sur es la cordillera meridional del país, se extiende desde el estado de Michoacán y finaliza en Chiapas, en la región del Istmo de Tehuantepec. El área de estudio pertenece a la subprovincia Costas del Sur; en su parte occidental presenta un relieve más suave compuesto de llanuras, lagunas intermitentes separadas por lomeríos que finalizan en Puerto Ángel. Por el oriente, presenta un relieve de pre-montaña y elevaciones medias y bajas que descienden hasta el mar, donde la línea de costa tiene promontorios rocosos intercalados con franjas de playa.

#### 3.1.1 *Costa Chica de Oaxaca: Contexto histórico*

Desde el siglo XIX empiezan a surgir los términos de Costa Grande y Costa Chica: el primero se refiere al litoral entre Zihuatanejo y Acapulco, el segundo a su continuación hasta la frontera entre los estados de Guerrero y Oaxaca e incluso hasta el istmo de Tehuantepec (Widmer, 1990). La región está formada por los distritos de Jamiltepec, Juquila y Pochutla, y al menos 50 municipios que alcanza una extensión territorial de 10,700 km<sup>2</sup> (Dalton, 2004). La cuenca de Chacahua-La Pastoría pertenece al distrito de Juquila que, a su vez pertenece al municipio de Villa de Tututepec de Melchor Ocampo.

La Costa Chica de Oaxaca se conforma por una historia compleja, que han definido las características de su población, actividades económicas y relaciones sociales. De forma general se pueden identificar seis periodos históricos que han marcado el desarrollo de la región: época

prehispánica (desde el origen de la agricultura hasta la llegada de los españoles), Colonia (1521 – 1810), Independencia y Reforma (1819 – 1880), Porfiriato (1881 – 1910), Revolución (1910 – 1925) y Época contemporánea (1926 – 2010) (Rodríguez-Canto (2010)).

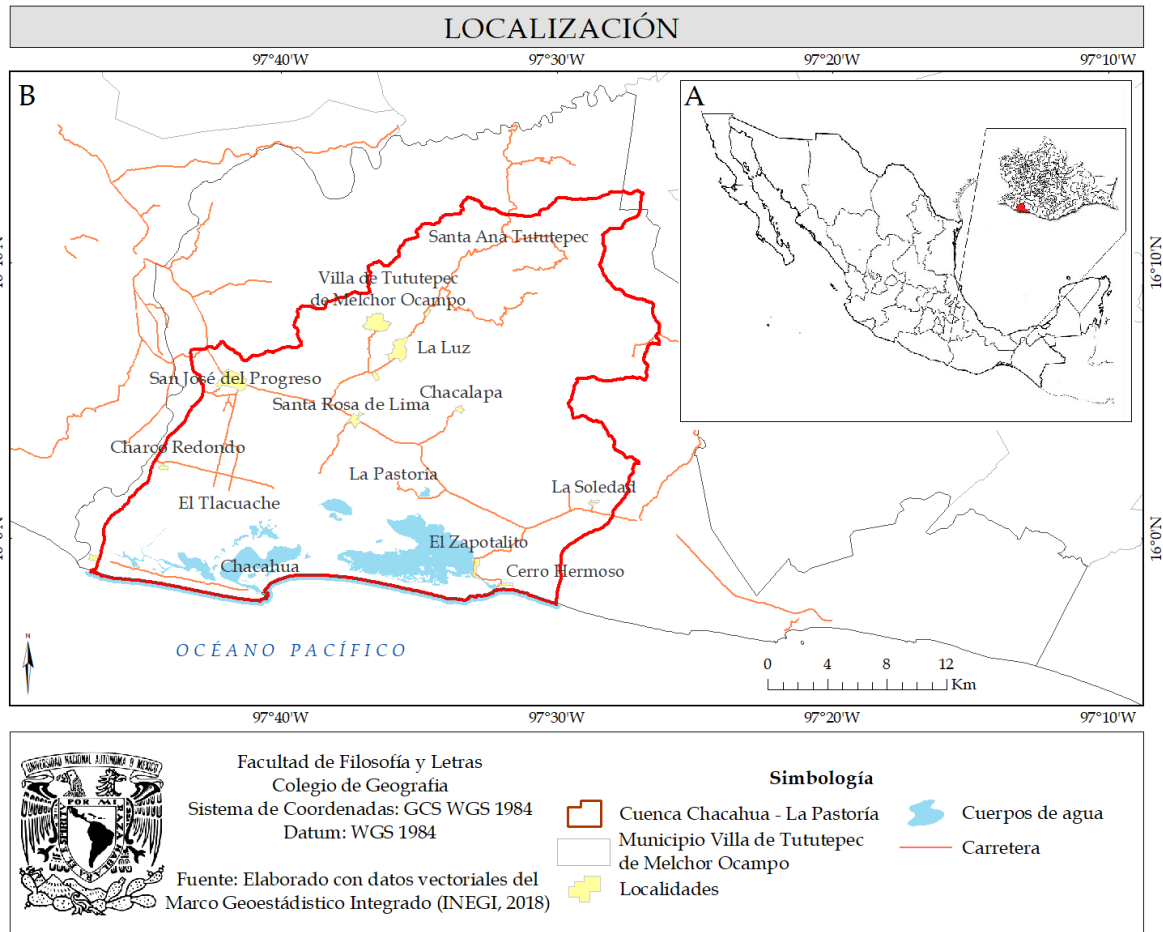


Figura 3. A) Localización del municipio dentro de la república mexicana y del estado de Oaxaca. B) Mapa del municipio Villa de Tututepec de Melchor Ocampo (Elaboración propia).

La Costa Chica presenta varios restos arqueológicos encontrados en el Parque Nacional Lagunas de Chacahua que indican un periodo formativo tardío hace 500 AEC a 100 EC. Los primeros asentamientos fijos en la costa parecen haberse establecido en torno a lagunas y esteros. Se trata de poblaciones pesqueras, cazadoras y agricultoras que comenzaron a desarrollar la escultura, la arquitectura y la cerámica (Madrigal- Uribe, 1986).

La expansión mexicana tuvo lugar en el año 1450, donde la Mixteca Alta quedó bajo el dominio de los aztecas lo que provocó una situación precaria en Tututepec. De acuerdo con Ordoñez (2000), a la llegada de los españoles la situación en el sur de Oaxaca fue conflictiva por efecto territorial

entre los pueblos-estados presentes. Los españoles quebrantaron el poder de los aztecas y convirtieron a todos los oaxaqueños en súbditos de la Corona Española. Se crearon con esto las *Repúblicas de Indios* que vinieron a marcar durante los tres siglos siguientes (Ordóñez, 2000). La introducción de ganado durante la conquista constituyó una forma nueva de uso de suelos, además que, desde la perspectiva ecológica, propiciaron la alteración de los ecosistemas regionales. En esta época se originan muchos de los factores que hoy inciden de manera “desastrosa” en el medio rural de la sierra y la costa oaxaqueñas: ampliación continua de los pastizales, reducción de áreas boscosas y selváticas para fines agrícolas y ganaderos; ocupación de las mejores tierras para monocultivos y paulatino desplazamiento de las comunidades frente al avance de las posesiones privadas (Nahmad *et al.*, 1994).

En 1540 la actividad portuaria despegó en el puerto de Huatulco y Acapulco. Esta actividad permitió el auge de la grana cochinilla y el algodón que se cultivaban en la costa (Widmer, 1990). En el año de 1859, con la proclamación de las Leyes de Reforma para expropiar las propiedades corporativas de la Iglesia Católica, las comunidades indígenas perdieron grandes extensiones territoriales que fueron vendidas como baldías a latifundistas criollos y extranjeros (Nahmad *et al.*, 1994).

Un hecho importante fue la introducción del café en la segunda mitad del siglo XIX, particularmente en el distrito de Juquila (1878) y es durante el auge de este producto que se abrieron tierras nuevas para su producción, lo cual significó el despojo a los nativos. La región costera se ve compuesta actualmente por enclaves agrícolas comerciales de propiedad privada, donde los monocultivos son predominantes, así como los cítricos y frutales, además los potreros e instalaciones especializadas para la producción lechera forman parte de su paisaje, especialmente en la planicie, lomeríos y piedemontes del municipio de Villa de Tututepec.

### 3.1.2 Aspectos Socioeconómicos

#### *Vías de comunicación*

Las vías de comunicación terrestre del municipio de Villa de Tututepec de Melchor Ocampo se reportan con una baja cobertura de pavimentación en caminos que conectan a diferentes localidades, como es el caso del camino que va de La Luz-Tututepec hacia el municipio de Tataltepec de Valdés. De acuerdo con el Ayuntamiento Municipal en su Plan de Desarrollo Rural

(2014) se cuentan con diversos caminos de terracería para comunicar a las diferentes localidades, los cuales suelen presentar encharcamientos durante la temporada de lluvias, que igualmente dificulta la comunicación.

Actualmente el desarrollo turístico de la zona ha sido el detonante principal para la construcción de vías de comunicación terrestres más expeditas y el mejoramiento de la red carretera ya establecida.

El acceso a la cuenca de estudio se realiza por medio de vía terrestre desde la Ciudad de México, inicia por la carretera 150D con dirección a Puebla hasta llegar al entronque Cuacnolapan-Tehuacán, se toma la carretera 135D hasta la capital de Oaxaca, para seguir por la carretera 131 Oaxaca-Puerto Escondido, hasta la desviación Oaxaca La Luz-San Juan Lachao hasta la localidad de Santa Catarina Juquila, donde se encuentra la desviación hacia el poblado de La Luz. Sobre este camino se encuentran las localidades del norte de la cuenca como son Santa Ana Tututepec y San Pedro Tututepec, hasta encontrarse con la carretera 200 que conecta las poblaciones que rodean el Parque Nacional, como son San José del Progreso, Santa Rosa Lima y más al oeste con Charco Redondo.

Para acceder a las poblaciones dentro del parque se debe arribar a Zapotalito por medio de un camino pavimentado desde la carretera 200, y de ahí se puede alcanzar a la localidad de Cerro Hermoso y por medio de lancha a la localidad de Chacahua o bien vía terrestre por un camino de terracería que rodea las lagunas.

### ***Actividades económicas***

La situación de la región está definida por un dominio de las actividades económicas del sector primario. Rodríguez-Canto (2010) menciona que las rutas de comunicación terrestre y aéreas favorecieron la afluencia de pobladores a la región, que se manifestaron en la transformación de la estructura productiva en los siguientes aspectos: patrón de uso de suelo, desarrollo tecnológico, la integración productiva, organización de la producción, participación gubernamental y los mecanismos de financiamiento y comercialización.

La agricultura reconocida como de autoconsumo, ha evolucionado. Actualmente se han establecido e incrementado el cultivo de productos agrícolas destinados exclusivamente al

mercado: limón, plátano, papaya, jamaica, ajonjolí y cacahuete en la planicie costera. El limón es enviado a los mercados de México y Guadalajara; el café es destinado a la exportación.

La ganadería es una actividad que se extiende en la región sobre las planicies y en los lomeríos, la que presenta el principal acaparamiento de los terrenos comunales y ejidales. Junto con la actividad forestal, son las acciones principales que han logrado un deterioro de los límites del Parque Nacional Lagunas de Chacahua, el cual a pesar de las restricciones presenta también este tipo de actividades. La otra actividad importante de la región costera es la pesca, la cual se desarrolla tanto en las lagunas, como en mar abierto.

En cuanto a las actividades industriales, su presencia es insignificante en comparación con las actividades primarias. Los establecimientos de este tipo se orientan principalmente a la transformación primaria de insumos agrícolas, especialmente frutas y café, existiendo pequeñas plantas (Nahmad *et al.*, 1994). Otra actividad poco relevante es la minería, en donde existen yacimientos metálicos y no metálicos importantes que no son explotados.

Las actividades terciarias se concentran en el turismo en la zona costera, aunque debe mencionarse que esta actividad se concentra en los principales complejos turísticos. El corredor turístico Huatulco-Chacahua crea una demanda de productos en la planicie costera que conlleva transformaciones en las zonas turísticas (Rodríguez-Canto, 2010).

## 3.2 Entorno físico

### 3.2.1 Fisiografía

El sistema lagunar Chacahua-La Pastoría se encuentra dentro de la provincia fisiográfica Sierra Madre del Sur, la cual se describe como un sistema montañoso que se extiende al sur de México; abarca desde el estado de Michoacán hasta el Istmo de Tehuantepec, con una longitud aproximada de 1,100 km, y una altitud dominante de 2,000 m con alturas máximas de 3,200 msnm (Lugo-Hubp, 1990). La Sierra Madre del Sur se caracteriza por ser compleja en su estructura y su relieve, incluye un frente montañoso marginal al océano Pacífico desde las costas de Jalisco, en Cabo Corrientes hasta Chiapas.



En la parte noroeste de la provincia, altos escarpes frente al océano sugieren fallamiento y levantamiento reciente. La Sierra Madre del Sur está frente a la Trinchera Mesoamericana, estructura tectónica que le imprime una marcada afectación por fallas y que en su ajuste genera movimiento por lo que la sismicidad es frecuente (Ordoñez, 2000). Fisiográficamente la sierra incluye tres zonas: montañas con abruptas pendientes, áreas de transición o piedemontes y, en la parte baja, valles y lomeríos.

La subprovincia en la que se localiza la cuenca de estudio, se denomina Costas del Sur, y la define la porción al sur de la Sierra Madre del Sur, dividida en dos áreas definidas por sus características fisiográficas; en el lado occidental se presenta un relieve homogéneo, en la cual se distinguen



llanuras, lagunas y lomeríos que finalizan en Puerto Ángel (Fig. 4). Por el otro lado, en su parte oriental, se compone de un relieve semi montañoso, de elevaciones medias a bajas que descienden hasta la línea de costa con promontorios rocosos en los que se intercalan playas arenosas (Ortiz-Pérez *et al.*, 2004).

Figura 4. Mapa de subprovincias fisiográficas presentes en la Cuenca de Chacahua - La Pastoría.

De acuerdo con Nahmad y colaboradores (1994), la región costera se compone de cuatro áreas fisiográficas o morfográficas bien definidas: planicie, lomerío, piedemonte y serranía. La cordillera costera del sur es la subprovincia localizada al norte del área de estudio que se compone por las estribaciones finales y transicionales de la Sierra Madre del Sur.

### 3.2.2 Clima

El clima de la región Pacífico Sur se encuentra dentro de la denominada zona tropical (Vidal-Zepeda, 2005). La precipitación muestra una marcada inestabilidad durante el verano cuando la zona intertropical de convergencia invade la región, que provoca precipitaciones convectivas en los estados de Guerrero y Oaxaca. Durante la época cálida el viento sopla del mar al continente debido a la presencia de centros de baja presión que se forman sobre la altiplanicie (Vidal-Zepeda, 2005). La precipitación es sustancialmente mayor en la serranía. El contraste entre el área situada en el litoral y la base de la sierra es notorio, debido a que el primero recibe menos de 1,000 mm anuales, mientras que en la sierra es del orden de 1,200 mm (Vidal-Zepeda, 2005). Además, los ciclones tropicales son frecuentes a finales del verano y principios del otoño, mismos que introducen una gran cantidad de humedad.

La temporada lluviosa inicia en mayo al oriente de la región y avanza hacia el occidente, hasta establecerse por completo. Los máximos de precipitación se reciben en julio y agosto, en la mitad oriental de la región, mientras que en la occidental el máximo se presenta en septiembre por la influencia de los ciclones del Pacífico. La temporada seca es normalmente de noviembre a abril y en general, el régimen pluviométrico, es de verano con un porcentaje bajo de lluvia invernal (Vidal-Zepeda, 2005).

Predominan en la región los climas subhúmedos Aw, con excepción de una pequeña área de clima semicálidos A(C) (Fig. 5). En las partes más altas de las montañas se encuentran climas templados C, incluso en las partes más altas presentan climas fríos y muy fríos, restringidos a altitudes mayores a 3,800 msnm. Por su grado de humedad la mayoría de los climas son subhúmedos.

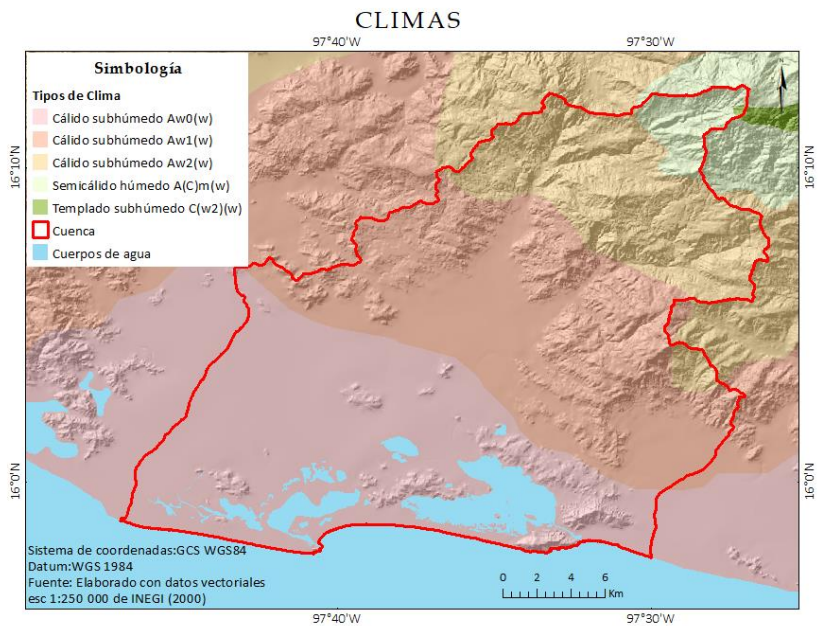


Figura 5. Mapa de tipos de climas presentes en la Cuenca Chacahua-Pastoría.

Con base en los datos proporcionados por la estación meteorológica de Río Grande (SMN, 2018), localizada en el municipio de Juquila, se elaboró la gráfica que describe el comportamiento de la precipitación y temperatura en la región.

Para el periodo analizado la temperatura varía desde los 25.5 °C hasta los 28.3 °C, alcanza su máximo en el mes de mayo y la mínima en febrero (Fig. 6). La estacionalidad entre la temporada cálida y fría es muy marcada, lo cual se relaciona con las precipitaciones y su comportamiento, la temporada de lluvias comienza en junio con su máximo en septiembre, mientras que los meses restantes las precipitaciones son escasas lo que marca la estación seca (Fig. 6). Las precipitaciones también se ven perturbadas por la temporada de ciclones, los cuales se presentan en los meses de septiembre a octubre.

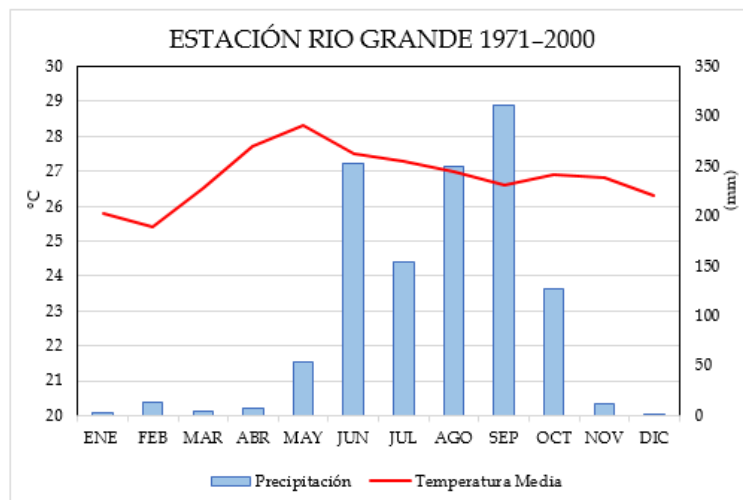


Figura 6. Normales climatológicas de la estación Río Grande para el periodo de 1971 - 2000. Elaboración propia con datos del SMN consultado el 2 de abril 2018.

### 3.2.3 Hidrografía

La cuenca de Chacahua-Pastoría pertenece a la Región Hidrológica (RH) no. 21, denominada Costa de Oaxaca (Puerto Ángel), colinda con la RH núm. 20, Costa Chica-Río Verde. En la primera se encuentra la cuenca denominada Río Colotepec y otros (RH 21Cd), esta a su vez contiene la

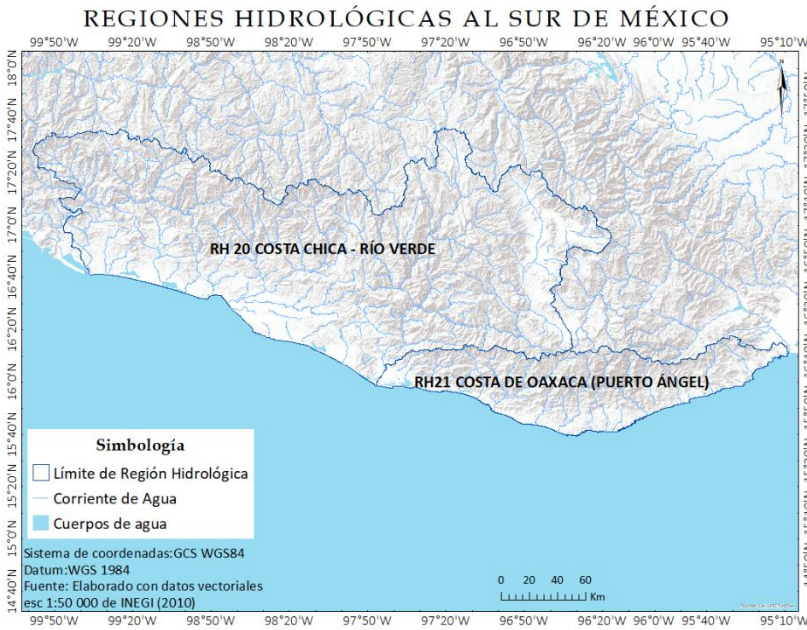


Figura 7. Regiones Hidrológicas que drenan los ríos principales de la Cuenca Chacahua-La Pastoría y sus proximidades (INEGI, 2000).

subcuenca del río San Francisco y el río Chacalapa, estos dos forman los principales escurrimientos fluviales que tienen desembocadura en el sistema lagunar Chacahua-La Pastoría (Fig. 7).

A pesar de la cercanía con la cuenca del río Verde es importante mencionar que este afluente no descarga directamente sus aguas en el sistema lagunar, ya que

desemboca en el océano Pacífico y sólo en avenidas extraordinarias puede tener influencia en áreas inundables al noroeste de la cuenca en estudio (Zavala-Cruz, 1985; Madrigal-Uribe 1986; Sanay-González, 1997; Pérez-Delgado, 2002). Las obras hidráulicas en la parte media del mismo sistema han disminuido los escurrimientos y de igual manera se ha visto reducida su influencia en el sistema lagunar por lo cual las características de mayor importancia para el área de estudio son las de la subcuenca que contiene a los ríos San Francisco y Chacalapa (Fig. 8).

De acuerdo con el clima presente, la cuenca se clasifica como una cuenca húmeda, con una distribución de las

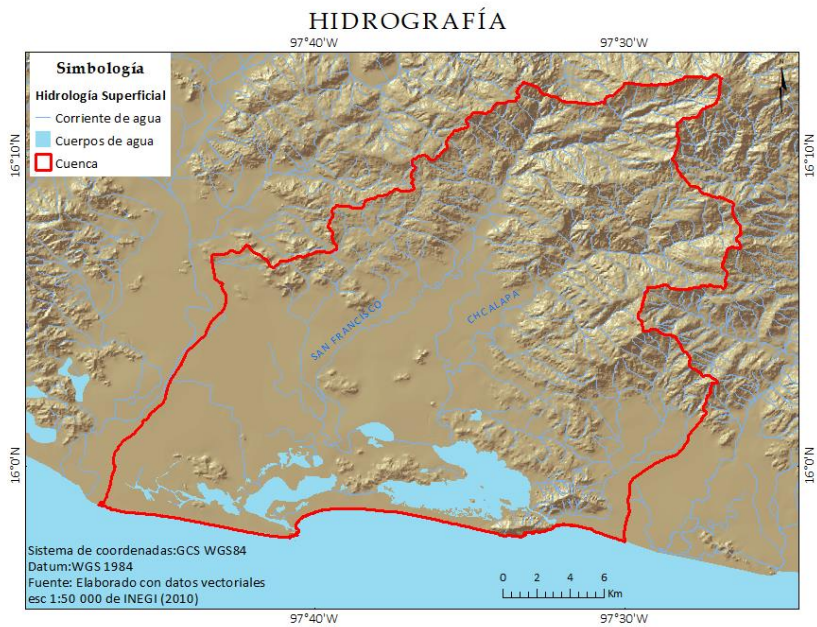


Figura 8. Mapa hidrológico superficial de la Cuenca Chacahua-La Pastoría y sus proximidades (INEGI, 2010).

precipitaciones dinámica. Las lluvias se caracterizan por ser de tipo orográficas. Con base en los datos proporcionados por la red hidrográfica de INEGI 1:50 000 versión 2.0, se obtuvieron los datos básicos de su morfometría.

El área de la cuenca es de 632.51 km<sup>2</sup> que la coloca como una cuenca de tamaño intermedio a grande (Campos, 1992). Tiene una forma oval alargada y presenta una dirección preferente de NE-SW, sus principales afluentes tienen origen en la parte montañosa de las laderas finales de la Sierra Madre del Sur (Ortiz *et al.*, 2004), estos escurrimientos son captados por los cauces principales que conforman los ríos San Francisco y Chacalapa (Fig. 8).

El patrón de drenaje es rectangular, los escurrimientos que provienen de las laderas son perpendiculares al cauce principal, que evidencia una influencia estructural en el ordenamiento del drenaje. El río San Francisco se origina en la parte más alta de la cuenca, al noreste de la localidad de Santa Ana Tututepec, alcanza una altitud máxima de 1,613 msnm, drena un área de 235.53 km<sup>2</sup>, su cauce tiene una dirección NE-SW, coincidiendo con el rumbo de la cuenca. La longitud estimada que recorre desde su nacimiento hasta su desembocadura, al norte del sistema lagunar, es de 61.6 km (Sanay-González 1997), este río desemboca directamente en la laguna de Chacahua.

El río Chacalapa inicia al noroeste de la localidad de Santiago Jocotepec, su cauce principal sigue un rumbo NE-SW, pero de forma más oblicua que la del río San Francisco. La altitud máxima que presenta es de 869 msnm, con una media de 444, su longitud es menor a la del San Francisco con 39.6 km. El área que drena es de 175 km<sup>2</sup>, su cuenca tiene una forma ovalada, este afluente es intermitente gran parte del año.

### ***Hidrología subterránea***

De acuerdo con la propuesta de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2011) el área de estudio contiene al acuífero de Chacahua (clave 2019) y tiene las siguientes características: la totalidad de la cuenca hidrográfica está modificada por los sistemas fluviales de San Francisco y Chacalapa, tiene una superficie de 1,129 km<sup>2</sup>. Es un acuífero de tipo libre, heterogéneo y anisótropo, tanto en sentido vertical como horizontal. Esto lo refuerza su geología, en la porción superior, presenta sedimentos aluviales de granulometría variada, constituidos principalmente

por arenas poco consolidadas que permiten la infiltración del agua; además son buenos receptores y almacenadores de los escurrimientos superficiales (CONAGUA, 2011).

Las secuencias de baja permeabilidad que se encuentran a mayor profundidad se deben a un complejo metamórfico, llamado Xolapa y al granito Jamiltepec que delimitan la parte inferior del acuífero. La recarga del acuífero proviene de las zonas montañosas, así como de toda la infiltración de la zona en la planicie costera. La descarga del acuífero ocurre por evaporación y extracción destinada a usos agrícolas y domésticos (CONAGUA, 2011).

La profundidad a nivel estático, presenta valores que varían desde cero hasta los dos metros, esto coincide con el ascenso topográfico, la profundidad mayor se encuentra en la región de Río Grande (CONAGUA, 2011). La configuración de elevación del nivel estático varía de forma decreciente desde la parte superior donde se encuentran las elevaciones montañosas hacia la línea de costa y se estima entre 17 msnm a 5 msnm, la dirección del flujo subterráneo es de norte hacia el sur.

La temperatura del agua varía entre 28.9°C y 32°C, mientras que el pH varía entre 6.5 y 7.9; tales condiciones son de aguas subterráneas dulces de buena calidad, con un bajo riesgo de alcalinización del suelo por su uso en actividades agrícolas. En el área que abarca el acuífero de Chacahua, existen 109 aprovechamientos de los cuales, 92 son pozos y 17 norias. Del total, 106 están activos y 3 inactivos, se utilizan principalmente para el uso agrícola, doméstico y servicios urbanos (CONAGUA, 2011). La presencia del acuífero libre y de baja profundidad permite darles estabilidad a las lagunas costeras presentes en el área de estudio.

### 3.2.4 Suelo

Las características de los suelos del área de estudio tienen una relación intrínseca con los factores formadores que se presentan en el área, primero el material parental que condiciona la profundidad de los suelos y el desarrollo del perfil, con materiales metamórficos y de origen ígneo que también ofrecen una mayor estabilidad respecto a la meteorización, esto da lugar a suelos someros. El clima subhúmedo junto con la litología favorece el desarrollo de suelos con una mayor incidencia de intemperismo químico; la precipitación es importante en los perfiles, la mayoría de

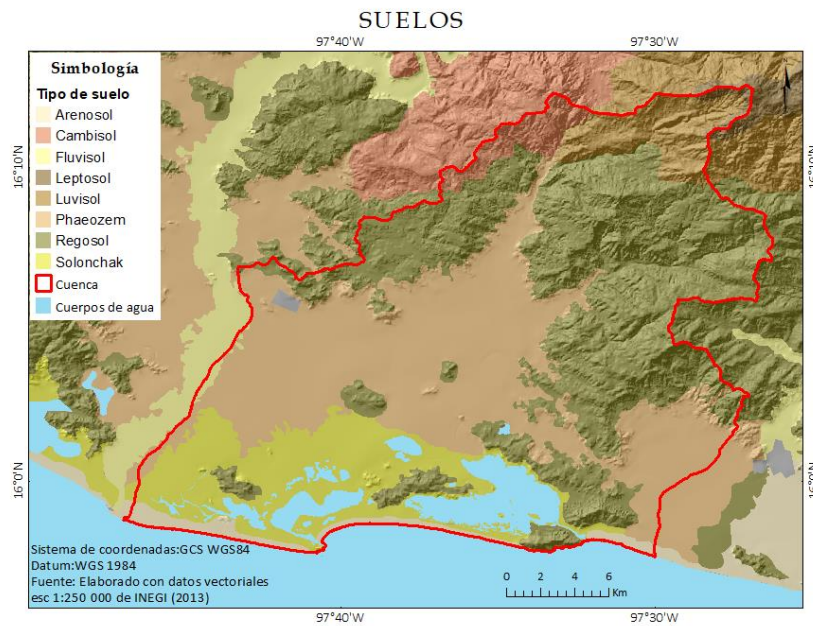


Figura 9. Mapa edafológico de la Cuenca Chacahua-La Pastoría y sus proximidades (INEGI, 2013).

estos suelos se caracterizan por una buena infiltración, pero también tienen entre sus características un bajo rendimiento agrícola.

El otro factor formador importante es la geometría del relieve, en las regiones montañosas y piedemontes predominan suelos de bajo desarrollo tales como los regosoles (Fig. 9), la parte más subhorizontal tiene un desarrollo de suelos producto

de procesos de acumulación y una menor lixiviación, por lo que dominan los cambisoles.

Los suelos de acumulación salina se presentan cerca de la desembocadura de la cuenca, en las lagunas costeras, debido a que estas zonas representan áreas de acumulación y de transición entre el sistema fluvial-lacustre y el sistema marino. Las características generales de los tipos de suelos presentes en el área de estudio, de acuerdo con la clasificación de la *World Reference Base* (2014) son las siguientes:

### ***Regosoles***

Se distribuyen principalmente en las partes montañosas, cubren los lomeríos pertenecientes a la Sierra Madre del Sur. No presentan un buen desarrollo, son de poca profundidad y se asemejan mucho al material parental del que se originan, tienen baja capacidad de retención de humedad, lo cual no los hace muy productivos, se destinan muchas veces al pastoreo extensivo.

### ***Phaeozem***

Se distribuyen en relieves suaves como llanuras o mesetas, cubren una pequeña parte dentro de la cuenca, perteneciente a la llanura de río Grande. Son suelos ricos en materia orgánica de buen

desarrollo, color pardo oscuro, presentan un horizonte mólico, están intensamente lixiviados. Son suelos porosos, fértiles y excelentes tierras de cultivo.

### ***Cambisoles***

Se distribuyen en las zonas de piedemonte del área. Son suelos con formación, al menos, de un horizonte subsuperficial cámbico, evidente por cambios en la estructura, el color, y el contenido de arcilla o de carbonatos. En su perfil muestran evidencias de procesos de iluviación de arcillas o bien materia orgánica. La infiltración del agua es buena y mantienen la humedad. Se considera que son susceptibles a la erosión sino existen prácticas adecuadas para su mantenimiento.

### ***Leptosoles***

Son suelos muy delgados sin desarrollo de horizontes en su perfil, se caracterizan por estar formados de roca homogénea, su perfil muestra pedregosidad, comúnmente se distribuyen en áreas montañosas. Los terrenos donde se desarrollan suelen ser de elevada altitud y con fuertes pendientes, así como en áreas muy intemperizadas. Se localizan sobre las elevaciones de la cuenca conformados de materiales pertenecientes a rocas ígneas intrusivas del batolito de Río Verde.

### ***Luvisoles***

Este grupo de suelos tiene como característica principal la presencia de un horizonte subsuperficial, con arcillas de alta reactividad y dependiendo del material una alta saturación de bases. Es muy común la alternancia de estaciones secas y húmedas que permiten la translocación de los materiales y la migración de las arcillas a horizontes inferiores. Se presentan en las partes medias de la cuenca

### ***Solonchak***

Se distribuyen en los alrededores de las lagunas costeras, principalmente en la de Chacahua. Son suelos desarrollados en zonas de acumulación, donde además la evaporación es significativamente alta como en los climas áridos o en zonas costeras, el nivel freático es somero y se presentan húmedos en alguna temporada. Los suelos Solonchak se ven definidos por la presencia de acumulación de sales solubles, presentan un horizonte sálico que los determina y pueden presentar propiedades gleyicas.



## *Fluvisoles*

Se encuentran en las márgenes del río Verde y cerca de las corrientes de San Francisco y Chacalapa. Son suelos propios de materiales acarreados por corrientes fluviales, ambientes lacustres o en ambientes litorales. Su textura es gruesa con bajo desarrollo del perfil y típicamente se presentan estratificados. Aunque no presentan un desarrollo de horizontes y tienen baja retención de humedad, presentan facilidades para el enraizamiento de las plantas.

## *Arenosoles*

Este grupo de suelos es constituido por materiales sin consolidar, considerados como suelos residuales por la WRB (2014), depositados en topografías planas o ligeramente inclinadas. Presentes en áreas relativamente pequeñas, no presentan desarrollo de horizontes. Dentro de la cuenca se ubican en la línea costera formando las playas del sistema lagunar.

### 3.2.5 Vegetación y uso de suelo

La vegetación presente en el área de estudio es predominantemente selvática, diferentes autores han clasificado los tipos de vegetación del área, a continuación, se presentan los más relevantes.

En la parte alta de la cuenca se distribuye la selva mediana subcaducifolia, selva mediana subperennifolia y en la parte alta se encuentra una mínima porción del bosque mesófilo de montaña (Fig. 10). En la parte media de la cuenca predominan diferentes tipos de cultivo, que se distribuyen en las márgenes de los ríos principalmente el San



Figura 10. Mapa de uso de suelo y comunidades vegetales de la Cuenca Chacahua-La Pastoría y sus proximidades (INEGI, 2012).

Francisco y más al poniente en el río Verde.

La agricultura de riego o de temporal son las predominantes y junto a estas se distribuye también de forma amplia el pastizal. Dentro del polígono del Parque Nacional Lagunas de Chacahua la vegetación se encuentra en un estado de conservación relativamente bueno de acuerdo con lo reportado por Pérez-Delgado (2002). Los tipos de vegetación aquí presentes son las selvas medianas subcaducifolia y subperennifolia distribuidas al occidente del parque y sobre los promontorios rocosos alrededor de las lagunas. De forma periférica a las lagunas se encuentra el manglar.

En la línea costera sobre las playas se identifica la vegetación de dunas costeras, además, sobre esta porción también se encuentran diferentes tipos de agricultura principalmente de temporal. Al oriente del parque una muy pequeña porción es cubierta por el tular cercana a la población de Río Grande (Fig. 10).

# CAPÍTULO IV

## MARCO GEOLÓGICO

### 4.1 Tectónica

Las provincias morfotectónicas que configuran al territorio nacional son consecuencia de la interacción de tres placas tectónicas mayores que han actuado simultáneamente desde el Cretácico Superior hasta el Cuaternario. La placa continental de Norteamérica con desplazamientos hacia el occidente y al suroccidente, la oceánica del Pacífico en subducción con rumbo general al noreste y la del Caribe, con movimiento inicial al noreste y posteriormente al oriente (Aguayo–Camargo, 1987). El ambiente tectónico del suroccidente de México se establece por la presencia de la placa



Figura 11. Configuración tectónica del SW de México (Tomado de Valencia-Moreno y Ortega-Rivera 2011).

de Rivera, la placa de Cocos y la placa del Caribe que interactúan con la Placa de Norteamérica (Fig. 11).

De acuerdo con diferentes autores, la subducción en la margen occidental de América del Norte, establecida en el Triásico Medio-Tardío, se debió como consecuencia de la extensión continental

asociada al rompimiento de Pangea (Valencia–Moreno y Ortega-Rivera, 2011). Durante todo el Mesozoico y gran parte del Cenozoico el régimen de interacción entre las antiguas placas de Farallón y más al norte la placa de Kula, se mantuvo hasta que el piso oceánico fue consumido.

La fragmentación y reducción progresiva de la placa de Farallón dio como resultado la formación de tres placas menores Juan de Fuca, Rivera y Cocos (Valencia-Moreno y Ortega-Rivera, 2011).

Para explicar el origen de la placa del Caribe se han postulado varias teorías, las cuales se pueden agrupar en dos grandes hipótesis, el primer grupo proponen un carácter alóctono con origen en el Pacífico, seguido de un proceso de transporte tectónico largo, primero con dirección NE y luego hacia el E (Burke *et al.*, 1984 y Cerca-Martínez, 2004). El otro grupo propone un origen autóctono en donde su formación ocurre durante la separación de las placas de América del Norte y América del Sur, en el Jurásico Tardío-Cretácico Temprano (Meschede *et al.*, 1997 y 1998).

Actualmente, el área más dinámica se asocia con la placa de Rivera que subduce bajo la de Norteamérica con una tasa de convergencia de 2.5 cm/año, mientras que la tasa aumenta a 7.5 cm/año en la zona de subducción entre la placa de Cocos y Norteamérica (Pardo y Suárez, 1993). El límite de la placa del Caribe con la placa de Norteamérica lo ocupa el sistema de fallas Motagua-Polochic. Se trata de un desplazamiento relativo izquierdo de la placa de Norteamérica con respecto a la placa del Caribe, el punto donde convergen las placas del Caribe, Cocos y Norteamérica está representado por una amplia zona de deformación por extensión que tiene como centro al Golfo de Tehuantepec (Morán-Zenteno *et al.*, 2000).

El límite de la placa de Norteamérica se reconoce como la Trinchera Mesoamericana, rasgo estructural que representa la zona de subducción. A pesar de que la subducción se ha presentado desde el Mesozoico, el margen actual no muestra ninguna de las características de un margen maduro como en otros márgenes. La distancia entre la Trinchera Mesoamericana y el arco magmático del Eoceno-Oligoceno es menor que en otros sistemas de arco, es insinuado por la ausencia de rocas de alta presión/baja temperatura a lo largo de la margen continental, la falta de un prisma de acreción y la angosta amplitud de la plataforma continental (Ducea *et al.*, 2004; Silva-Romo y Mendoza-Rosales, 2009).

El desplazamiento del bloque de Chortis hacia el Este explica la exhumación progresiva de rocas profundas, que permitieron el emplazamiento de los batolitos costeros en Oaxaca y Guerrero bajo un ambiente tectónico transtensional, la erosión por subducción de la litosfera del manto superior a lo largo del margen continental se indica como un ajuste presente durante el Oligoceno; de acuerdo con Morán-Zenteno y colaboradores (2000), fue un evento tectónico que afectó los patrones magmáticos y de deformación del sur de México.

## 4.2 Historia Geológica

Determinar la historia geológica de gran parte del suroccidente de México es complicado, debido a la complejidad que compone los terrenos presentes. La línea histórica que aquí se expone está basada en los estudios de diferentes características de la región y abarcan los terrenos tectono-estratigráficos, hasta los depósitos más recientes.

La parte norte del territorio mexicano se encuentra relacionada con el cratón norteamericano, la parte sur, sin embargo, se encuentra conformada por un conjunto de terrenos, definidos por Coney y Campa (1984) como terrenos sospechosos o exóticos, que fueron adosados al territorio que actualmente conforma a la república mexicana.

Dickinson y Lawton (2001) en sus reconstrucciones paleotectónicas indican que la mayor parte de México está compuesta por elementos de la corteza que se acumularon en Norteamérica después del Carbonífero. Durante el Pérmico-Triásico, previamente a la separación de Pangea, un arco magmático estuvo activo en la región occidente pacífica de México. El Complejo Xolapa de origen alóctono (Campa y Coney, 1983; Sedlock *et al.*, 1993; Dickinson y Lawton, 2001), se integró hacia finales del Cretácico. Estudios realizados con dataciones de Rb-Sr en rocas pertenecientes a la falla de Chacalapa, apoyan su origen y dan una fecha del Cretácico Temprano (Ortega-Gutiérrez *et al.*, 1986).

Talavera y colaboradores (2013) indican que las rocas metasedimentarias de Xolapa no provienen de los complejos Acatlán ni Oaxaqueño, concluyen que el complejo Xolapa evolucionó en una cuenca con rocas pérmicas flanqueadas al norte por los terrenos del sur de México, y al sur se encontraba el bloque de Chortis.

Para Herrmann y colaboradores (1994), el evento más importante de metamorfismo y migmatización en el complejo Xolapa se generó como consecuencia de los cambios en las condiciones de la subducción entre las placas Farallón y Norteamérica. Para Ferrari y colaboradores (2014) tal evento estuvo relacionado con la apertura de un *slab window* en el estado de Guerrero a causa del movimiento de Chortis hacia el E y el cambio en la geometría de la Trinchera Mesoamericana.

Otros autores (Riller *et al.*, 1992; Herrmann *et al.*, 1994; Meschede *et al.*, 1997 y Morán Zenteno *et al.*, 1999) proponen que el metamorfismo ocurrió en algún momento entre el Cretácico Inferior y el Eoceno. Ducea y colaboradores (2004) suponen que los eventos de magmatismo se presentaron en dos pulsos volumétricamente significativos, el primero en el Cretácico Inferior y el otro durante el Eoceno-Oligoceno.

En el Cretácico Tardío la orogenia Laramide afectó a la Sierra Madre del Sur tratándose de un evento de deformación progresiva por acortamiento, con dirección de transporte predominante hacia el E-NE, que provocó el plegamiento y cabalgamiento de las secuencias marinas del Mesozoico (Morán-Zenteno *et al.*, 2005). El magmatismo de arco estuvo activo en un primer episodio durante el Jurásico Superior hasta el Cretácico Inferior, posteriormente en otro episodio más breve en el Eoceno-Oligoceno, cesó abruptamente en Xolapa hace 25 Ma (Ducea *et al.*, 2004). Este plutonismo es sugerido como una representación de continuación del arco que formó a la Sierra Madre Occidental, sugerido por Ferrari *et al.*, (1999).

El primer pulso de magmatismo presente dentro del Complejo Xolapa tiene un estilo de arco Cordillerano desarrollado durante gran parte del Cenozoico (Valencia *et al.*, 2009). El segundo pulso es asociado con las estructuras batolíticas de Río Grande, Jamiltepec y Río Verde. Este último cuerpo intrusivo fue emplazado en un ambiente de arco magmático, la posible contaminación cortical puede ser proveniente del Complejo Oaxaqueño y su rápida exhumación se atribuye al *detachment* y desplazamiento del bloque de Chortis (Hernández-Bernal, 1995).

El carácter exhumado de Xolapa, sugiere que comenzó en el Paleógeno Temprano y también estuvo fuertemente ligado al despegue y migración del Bloque de Chortis (Talavera-Mendoza *et al.*, 2013). Esta hipótesis sugiere que el desplazamiento de Chortis ocurrió durante el Eoceno-Mioceno, con base en las observaciones de zonas de cizalla posteriores a la deformación y metamorfismo del Complejo Xolapa.

El plutonismo en el terreno Xolapa se extinguió repentinamente hace 30 millones de años y el evento posterior propuesto por Morán-Zenteno y colaboradores (1996). La ubicación del bloque de Chortis hace  $\pm$  40 millones de años estiman, estuvo cerca de Zihuatanejo, el movimiento al SE de Chortis fue responsable de la eliminación temprana de fragmentos continentales (Schaaf, *et al.*, 1995). La secuencia se corona por depósitos más recientes emplazados desde el Pleistoceno, los cuales han sido relacionados con la dinámica de los ríos San Francisco y Chacalapa, las lagunas

costeras y los sedimentos de origen costero son relacionados con diversos ajustes en el nivel medio del mar (Tabla 5).

Tabla 5. Historia geológica de los principales eventos tectónicos de la región suroccidental de Oaxaca.

ERA	PERIODO	EPOCA	EVENTOS
CENOZOICO	Cuaternario	Holoceno	Depósitos más recientes aluviales, lacustres y litorales
	0.0117 Ma - Actualidad	Pleistoceno	
		Plioceno	
	Neógeno	Mioceno	Desplazamiento de Chortis
	23.03 - 2.58 Ma		Exposición del batolito Erosión por subducción
	Paleógeno	Oligoceno	Finaliza el plutonismo en Xolapa
		Eoceno	Intrusión del batolito de Río Verde Inicia la actividad de la falla de Chacalapa
Desplazamiento de Chortis			
66.0 - 23.03 Ma	Paleoceno	Exhumación del Complejo Xolapa	
MESOZOICO	Cretácico	Superior	Orogenia Laramide
		Inferior	Se integra el Complejo Xolapa al territorio mexicano Metamorfismo de las rocas del C. Xolapa Continua activo el magmatismo de arco
	Jurásico	Superior	Activo magmatismo de arco
		Medio	
	201.3 - 145 Ma	Inferior	
	Triásico		
251 - 201.3 Ma			
PALEOZOICO	Pérmico		Arco magmático previo a la separación de Pangea
	298.9 - 251 Ma		
	Carbonífero		Acreción de los Terrenos del Sur de México
358.9 - 298.9 Ma			

### 4.3 Estratigrafía

La mayoría de los trabajos geológicos del sur de México se concentran en la región de Acapulco-Zihuatanejo y son pocos los estudios más específicos. La descripción geológica más completa del área de estudio es realizada por Hernández-Bernal (1995), se enfoca en la descripción del Batolito de Río Verde. En este trabajo se rescatan los rasgos más característicos y las interpretaciones acerca de los materiales que componen a la cuenca de Chacahua-La Pastoría.

La secuencia estratigráfica del área de estudio está constituida por pocas unidades litológicas, las rocas metamórficas son el basamento principal, junto con cuerpos intrusivos de composición granítica. Sobre estas unidades se reconocen depósitos sedimentarios compuestos por aluviones, lacustres y marinos (Fig. 12). Las rocas más antiguas que afloran en la cuenca pertenecen al Terreno Xolapa. Dentro del área de estudio forman parte de los promontorios elevados de la costa como son los Cerros Hermoso, Zapotalito, El Corral y Noyua.

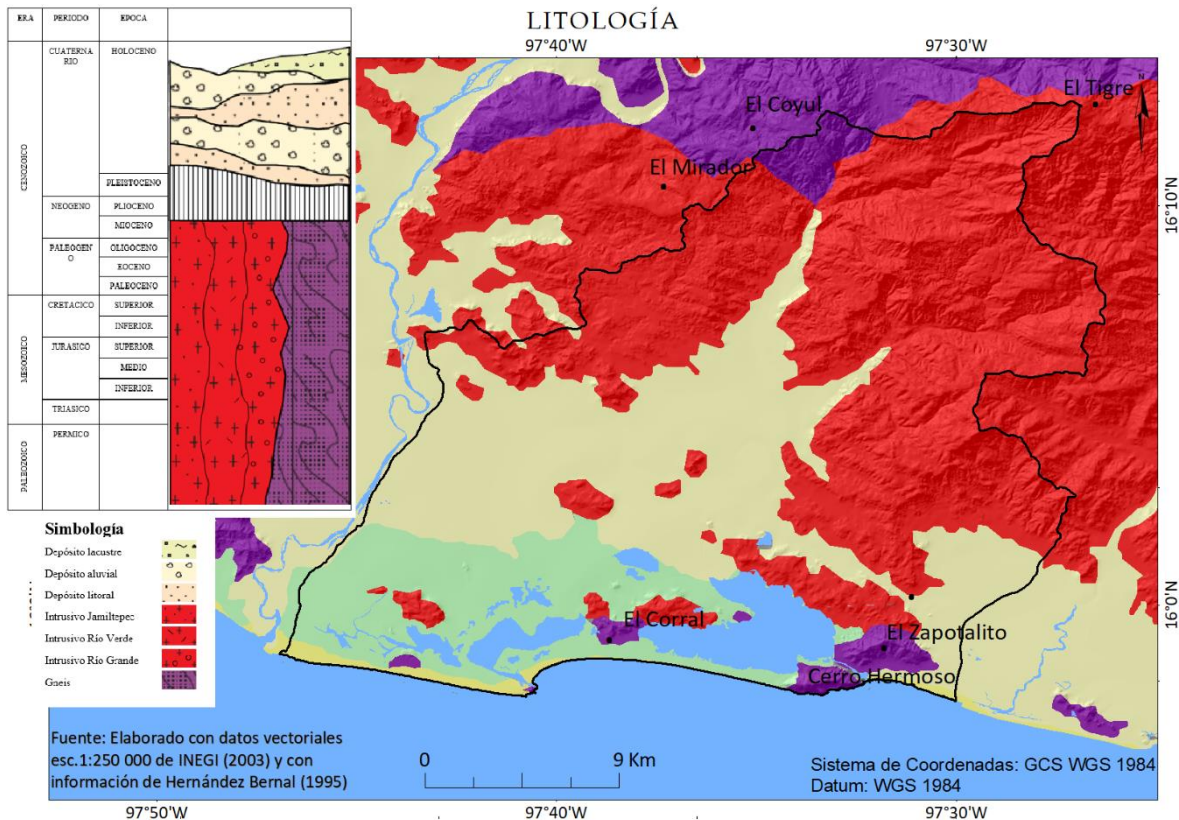


Figura 12. Mapa de litología con la columna estratigráfica idealizada, elaboración propia a partir de los datos de la carta Geológico-Minera de Puerto Escondido y Zaachila (SGM, 2002).

### 4.3.1 Rocas metamórficas

#### *Terreno Xolapa*

Cinturón plutónico a lo largo de la costa pacífica de los estados de Guerrero y Oaxaca (De Cserna, 1965; Ortega-Gutiérrez, 1981) tiene como límites al Terreno Guerrero en el NW, los terrenos



Oaxaca y Mixteco al Norte, mientras que al NE limita con el Terreno Juárez y al SW con la Trincheras de Acapulco (Campa y Coney, 1983). (Fig. 13)

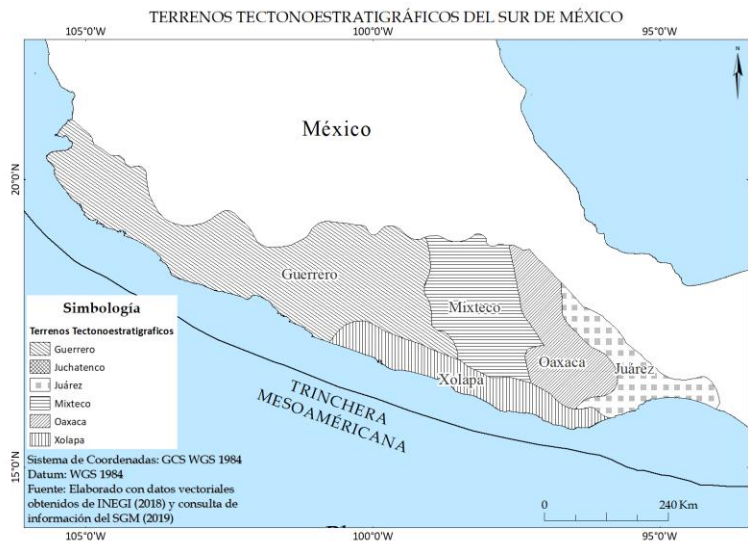


Figura 13. Mapa de los Terrenos tectonoestratigráficos el sur de México con base en Campa y Coney (1983).

Se compone de rocas metamórficas de ortogneises y rocas metasedimentarias derivadas de protolitos de edad desconocida, que fueron parcialmente migmatizadas e intrusionadas durante el Mesozoico y Cenozoico. La secuencia metasedimentaria descrita por De Cserna (1965) en la Barranca de Xolapa es denominada como Complejo Xolapa, incluye las siguientes unidades descritas por Alaniz-Álvarez (1997):

- 1) Granito de dos micas en facies pegmatíticas.
- 2) Cinco unidades metamórficas compuestas por anfibolitas, gneiss de biotita, metagrauvaca, esquisto pelítico y un ortogneis granítico.
- 3) Dos unidades de rocas ígneas en forma de diques félsicos y de diabasa y andesita.

Como lo menciona Hernández-Bernal (1995) las características descritas en la localidad tipo no coinciden con las rocas presentes en el área de estudio. En las regiones de Puerto Escondido, Juchitengo, Puerto Ángel y Huatulco las rocas predominantes son migmatitas ortogneis, paragneis anfibolítico y pelítico, además de algunas unidades de mármol.

De acuerdo con la cartografía realizada por Hernández-Bernal (1995) las rocas metamórficas del complejo Xolapa se distribuyen alrededor de la cuenca de Chacahua-La Pastoría. Las rocas corresponden a la sección de Puerto Escondido-San Gabriel Mixtepec; al oriente de la región son muy similares a las que se presentan dentro de la cuenca.

En la localidad Paso de la Reina, abundan las anfibolitas, paragneises y algunos esquistos. En la región meridional, la secuencia de paragneises y horizontes esquistosos está acompañada de cuerpos pegmatíticos ricos en biotita, muscovita, granate y turmalita, que se encuentran deformados con los mismos rasgos estructurales que las rocas metamórficas.

### ***Migmatita, gneises pelíticos y gneises anfibolíticos***

Los gneises pelíticos y anfibolíticos, así como las anfibolitas de esta sección se encuentran afectadas por un evento de migmatización. Esta es la unidad que caracteriza al complejo Xolapa.

Se describen rasgos macroscópicos indicativos cómo la alternancia de bandas leucocráticas y melanocráticas de forma casi paralela y de pocos centímetros de espesor a manera de lentes elongados. Esto se ha interpretado como un proceso de movilización y segregación de tipo anatexíticas, por lo que las clasifican como restitas con horizontes ricos en hornblenda y biotitas. Al sur de esta sección se observa mayor intensidad del evento de migmatización cerca de Puerto Escondido.

En la localidad de San Gabriel Mixtepec los paragneises están formados principalmente de cuarzo y feldespato con estructura bandeada definida por la variación en el contenido de biotita y hornblenda. El cuarzo es tanto equigranular como de forma elongada paralela a la alineación de las micas (Hernández-Bernal, 1995).

### ***Anfibolita***

Estos cuerpos se presentan como grandes lentes de dimensión variable de metros a decenas de metros de longitud, los constituyen agregados de hornblenda y clinopiroxenos, plagioclasa y biotita en menor cantidad. Están intercalados dentro de la secuencia de migmatitas y paragneises. Pueden presentar epidotización y llegan a estar afectados por migmatización.

### ***Ortogneises***

Contienen cuarzo, plagioclasas, feldespato y anfíboles. Estos últimos se encuentran frecuentemente como sustitución parcial o total de clinopiroxenos (augita), se muestran con una apariencia de cuerpos ígneos de composición tonalítica, su distribución es restringida. Estas rocas de acuerdo con Hernández-Bernal (1995), corresponden a cuerpos intrusivos aparentemente emplazados dentro de las secuencias paragneísicas y anfibolíticas.

## ***Mármol***

Consiste de cuerpos calcáreos metamorfoseados que aún conservan rasgos de la estratificación original, son de menor extensión y se encuentran aislados e intercalados en los paragneises, están presentes en las cercanías de Puerto Escondido.

## ***Protomilonita***

Las rocas más afectadas por eventos de cizalla intensa son las paragneises y anfibolitas, ésta deformación se manifiesta por medio de textura de clastos de cuarzo y feldespatos alargados y rotados, reportan indicadores cinemáticos con mecanismos de falla inversa hacia el NE. Hernández-Bernal (1995), sugiere que los protolitos eran secuencias heterogéneas de rocas cuarzo feldespáticas, tanto magmáticas como sedimentarias y algunos cuerpos de calizas, los cuales dieron lugar a paragneises anfibolíticos y en menor cantidad pelíticos, anfibolitas, ortogneises y mármoles. La presencia de migmatitas y las zonas miloníticas atestiguan eventos de alta temperatura y plasticidad de las rocas localizadas en los niveles estructurales superiores.

### **4.3.3 Rocas Intrusivas**

Se trata de un cuerpo intrusivo expuesto en el estado de Oaxaca entre Pinotepa Nacional y Puerto Escondido. El batolito Río Verde ha sido subdividido en tres unidades de intrusivos mayores, Río Grande, Jamiltepec y Río Verde (Ortega-Gutiérrez *et al.*, 2014). En el área de estudio estos cuerpos componen las elevaciones del sector Norte y las cercanas a las lagunas. Estas rocas forman un cuerpo masivo junto con el intrusivo Jamiltepec, localizado al norte del área. Su continuidad se encuentra interrumpida por afloramientos de rocas metamórficas y depósitos aluviales.

## ***Intrusivo Rio Grande***

Su composición varía desde granito-granodiorita-tonalita en el sector más septentrional, siendo la granodiorita la más abundante. Es equigranular de grano fino (<0.1cm) a medio (0.1 - 0.5 cm), presenta biotita como mineral accesorio y en menor proporción hornblenda, además de pequeños porcentajes de apatito, zircón y escasa esfena. Los enclaves no son abundantes y están constituidos por biotita. En algunas porciones la orientación de las micas es marcada y define una foliación que aumenta al acercarse con el contacto oriental con la secuencia gnéisica de la roca encajonante, sin embargo, no se observa el contacto bien definido y la foliación no es intensa (Hernández-Bernal, 1995).

## *Intrusivo Rio Verde*

Situado entre los intrusivos de Rio Grande y Jamiltepec, tiene una composición de granito–granodiorita–tonalita de biotita y hornblenda con porcentajes a veces mayores de biotita que de hornblenda y viceversa. Contiene minerales accesorios de apatito, zircón y esfena siendo está muy presente al oeste del Rio Verde. Los enclaves de biotita son menos abundantes, no presentan orientación preferencial y son de forma irregular.

Dentro de la región Hernández-Bernal (1995), determina un contacto entre las rocas metamórficas y las rocas intrusivas ubicado en la localidad de San Pedro Tututepec. Esta fase presenta una incipiente foliación de los minerales micáceos, con un intenso fracturamiento y rellenos secundarios.

## *Intrusivo Jamiltepec*

Presenta una composición de tonalita–granodiorita–granito. La fase de tonalita contiene hornblenda y esfena, junto con biotita, zircón y apatito como minerales accesorios. Es de granulometría gruesa (0.5 – 1.0 cm) los enclaves dioríticos son escasos en la porción tonalítica, mientras que en la porción granítica son más abundantes. La foliación es mucho más intensa en el límite occidental con las rocas gnéisicas. Es el cuerpo más meteorizado, posiblemente por su composición y granulometría. Estos granitoides se encuentran fracturados e intrusionados por una serie de diques aplíticos.

### 4.3.4 Depósitos recientes

De acuerdo con la carta geológico-minera de Zaachila, clave E14-12, escala 1:250,000 los depósitos más recientes son de tipo aluvial y litoral, sin embargo, en una descripción más detallada podemos identificar depósitos de tres diferentes orígenes: aluvial, lacustre y litoral. Se trata de sedimentos clásticos que se distribuyen de la siguiente manera:

**Depósitos aluviales:** Forman parte de la carga acarreada por los ríos que constituyen la margen oriental del río Verde y las llanuras de inundación de los ríos San Francisco y Chacalapa. Madrigal–Uribe (1986) reporta tamaños que van de cantos rodados, gravas, arenas, limos y arcillas distribuidas de forma gradual.

**Depósitos lacustres y palustre:** Constituyen el sustrato del fondo de las lagunas de Chacahua-La Pastoría y el resto de pequeños cuerpos de agua que componen al sistema lagunar, incluye esta clasificación los sedimentos ricos en materia orgánica (parecidos a la turba), típicos de ambientes de pantano y/o marismas. Su variación granulométrica es distinta respecto a la dinámica lagunar y a la interacción con los ríos y el mar.

**Depósitos de litoral:** Estos depósitos se encuentran formados principalmente por arenas dispuestas en cordones de playa, barras y barreras móviles producto de la acción del oleaje y mareas. Se encuentran en toda la línea de costa, forman los diques naturales de las lagunas o bahías. Constituyen un relieve subhorizontal y ligeramente ondulado, sin variación altitudinal importante.

## 4.4 Geología Estructural

El Terreno Xolapa presenta un estilo morfoestructural constituido por megaestructuras de cizalla de mecanismo dúctil-frágil (Corona, 1996 citado en SGM, 2002). Las rocas del Complejo, tienen diferentes episodios de deformación que se manifiestan con la presencia de foliación penetrativa con rumbos E-W y echados preferentemente al sur, pliegues intrafoliales, isoclinales, disarmónicos, zonas anastomosadas, *budinage*, bandeamiento, lineación y otros indicadores cinemáticos que definen su dirección de movimiento (SGM, 2002).

La estructura de mayor importancia en la región es la falla de Chacalapa, la cual se reconoce al norte del poblado de Puerto Ángel, como una clara franja de rocas miloníticas orientada E-W. Divide rocas en facies de anfibolita del Complejo Xolapa al sur, de rocas en facies de granulita del Complejo Oaxaqueño al norte (Tolson, 2005). De acuerdo con Hernández-Bernal (1995), tiene cinco etapas de deformación, las cuales presentan diferente régimen estructural. Las etapas son denominadas como D1: manifestaciones de metamorfismo, D2: migmatización, D3: desarrollo de zonas de cizalla, D4: deformación contemporánea al emplazamiento de los granitoides y D5: fracturamiento y emplazamiento de diques en la secuencia metamórfica y plutónica.

En la primera etapa de deformación (D1) reportan rasgos de metamorfismo con facies de anfibolita que afectan la secuencia de rocas volcanosedimentarias y plutónicas. La foliación

presente muestra un rumbo general NW-SE y echados moderados al W. La tercera etapa (D3), es evidenciada, por rocas de textura protomilonítica. Afectan a los paragneises y anfibolitas, las cuales desarrollan indicadores cinemáticos que atestiguan mecanismos de falla inversa. Las zonas de cizalla tienen rumbo WNW-ESE y buzanan al W.

En la zona sur en el poblado de Cerro Hermoso, existe otra zona de cizalla que afectó un cuerpo pegmatítico y a rocas gnéisicas (Hernández-Bernal, 1995). La presencia de estas franjas miloníticas son acorde a la Falla de Chacalapa (Fig. 14). La deformación producto del emplazamiento del magma (D4) en las rocas metamórficas se presenta al occidente del área de estudio.

Las estructuras más jóvenes son las fracturas y los diques aplíticos que cortan tanto a las rocas metamórficas como a los plutones (D5). Son abundantes en Rio Grande y Rio Verde, sus rumbos forman una red NW-SE y NE-SW, semiperpendicular entre ellos y casi verticales (Hernández-Bernal, 1995).

En la localidad de Santa Ana Tututepec, ocurre el límite entre los intrusivos de Rio Grande y Rio Verde, con un cambio transicional de la roca granítica a la metamórfica. Es un contacto difuso, definido por el aumento gradual de xenolitos de rocas esquistosas y gnéisicas del complejo metamórfico (Hernández-Bernal, 1995).

Los rasgos anteriores indican, un régimen de mayor temperatura y menor deformación o mayor compatibilidad química con las rocas metamórficas durante su emplazamiento. Mientras que las regiones oriental y occidental del batolito, los cuerpos magmáticos son emplazados dentro de la roca preexistente de forma que producen una foliación en el contacto oblicuo respecto a la foliación de las rocas metamórficas, que indica un régimen más frágil.

La falla de Chacalapa, proviene del sector oriental de la cuenca, representa una franja de rocas miloníticas con orientación E-W (Fig. 14). Su extensión cubre cerca de 50 km y registra movimiento desde el Oligoceno hasta el presente (Tolson, 2005). La zona de cizalla es continua desde el occidente de Chacalapa hasta el oriente de Santa María Xadani, en donde adquiere un trenzado o anastomosado, se bifurca alrededor de los complejos Oaxaqueño y Xolopa (Tolson, 2015). También existen una serie de fallas con desplazamiento oblicuo lateral-normal.

## ESTRUCTURAS GEOLÓGICAS REGIONALES

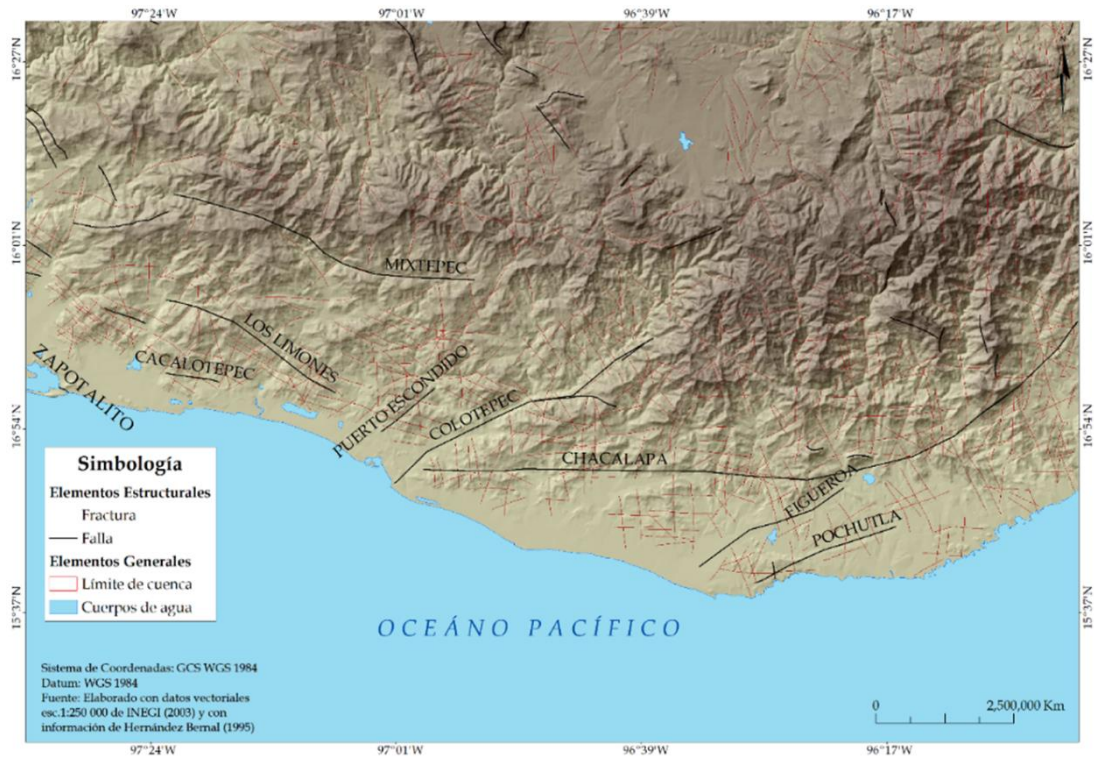


Figura 14. Mapa geológico-estructural del sector suroccidental de Oaxaca (SGM, 2002).

Los sistemas de falla cercanos, como Pochutla y Figueroa son muy semejantes al sistema de falla de Chacalapa, así como las fallas Mixtepec y Limones localizadas aproximadamente a 46 km al este de la cuenca (Fig. 14). Las fallas más cercanas al sistema de lagunas Chacahua–La Pastoría son: Cacalotepec, Hidalgo, Zapotalito y San Isidro, interpretadas en la carta geológico-minera como discontinuidades de movimientos laterales siniestrales. Estos rasgos estructurales muestran una intensa actividad tectónica.

Tolson (2005), propone que el origen de este límite tectónico corresponde a una falla de exhumación, similar a las fallas asociadas con los núcleos metamórficos de la Cordillera Americana. Esta propuesta se incorporó a los modelos tectónicos que involucran la presencia del bloque de Chortis frente a las costas de Guerrero y su posterior desplazamiento hasta su posición actual (Tolson, 2005).

# CAPÍTULO V

## ANÁLISIS GEOMORFOLÓGICO

---

La metodología del análisis geomorfológico se inicia con el reconocimiento de los dominios del relieve a partir de su dinámica genética, homogeneidad, posición y distribución dentro de la cuenca de Chacahua - La Pastoría.

La delimitación de la cuenca fue obtenida por medio de la red hidrológica escala 1:50 000 de INEGI (2010). Los insumos para la generación de la cartografía se obtuvieron de las cartas topográficas 1:50 000 E14D84 - D14B14 San José del Progreso, E14D85 Río Grande o Piedra Parada y D14B15 El Zapotalito. Estos insumos fueron procesadas por medio de un Sistema de Información Geográfica para obtener el mapa de falso relieve sombreado (MST) con una resolución de 20 metros, con el modelo digital de elevación (MDE) se elaboraron los procesos y representación para obtener los mapas morfométricos de hipsometría, pendiente del terreno, energía del relieve y curvatura (Anexo A).

Con el uso de imágenes de satélite de Google Earth y la ayuda del MST se identificaron los morfolineamientos más representativos, esto con base en el reconocimiento de los cambios más significativos en el relieve y la identificación de tendencias en el mismo. Todos ellos se trazaron sobre el MDE dentro del SIG y con las imágenes de satélite de Google Earth; de esta manera se identificaron las zonas con mayor disección del relieve, que posteriormente fueron interpretados como límites de bloques, mismos que con la elaboración de secciones geomorfológicas y gráfica de orientaciones de los fracturamiento facilitó el análisis.

Antes de este procesamiento se realizó el reconocimiento de los dominios geomorfológicos, para ello se procedió al reconocimiento de los grandes tipos geomorfológicos; de igual manera fueron utilizados los MDE y las imágenes satelitales para delimitar los elementos geomorfológicos.

Como resultado de la interpretación de la información morfométrica se delinearon 7 relieves con dominios particulares. Posteriormente se identificaron los morfolineamientos más representativos y que marcan un cambio significativo en el relieve.



En el mapa hipsométrico muestra un relieve de hasta 1625 msnm, prácticamente más de la mitad de la cuenca está ocupada por alturas que no rebasan los 50 msnm, le sigue un nivel por debajo de los 500 msnm, a manera de franja perimetral que contiene elevaciones aisladas y el inicio del macizo montañoso. La cuenca muestra la mayor diferencia de altitud al NE con una elevación de cerca de 1000 m en menos de 6 km de distancia horizontal. En contraste la zona de menor altura ocupa un poco más de 24 km, sin desniveles mayores a los 30 m, aunque si con una ligera ondulación oblicua a la línea de costa.

El mapa de pendientes, al elaborarse en función del Modelo Digital de Elevación, confirma las zonas escarpadas al N, NE y E de la cuenca. Los valores de pendiente muestran bajos valores, el rango determinado por el MDE resolución 50 m, obtuvo una inclinación máxima de 45°. La zona que en el mapa hipsométrico no muestra desniveles importantes es ocupada por inclinaciones de máximo 6°. Un aspecto importante son las inclinaciones de más de 30° que se encuentran directamente por encima de la línea de costa en los lomeríos costeros del Cerro Hermoso y El Zapotalito (Fig. 12), donde la máxima inclinación domina en la vertiente que mira al S. Respecto a la zona montañosa los valores de 25 a 45° se hacen presente en las vertientes de barrancos de más de 100 m de profundidad y en paredes posiblemente desarrolladas por el patrón de fracturamiento local, así como por la interacción con la falla Chacalapa (Fig. 14).

La curvatura del relieve se obtiene a partir de la segunda derivada del valor de superficie calculado con base en cada una de las celdas del MDE. Permite reconocer la geometría negativa (cóncava), positiva (convexa) y subhorizontal (rectilínea), siendo los valores de -0.1 a 0.1 los que determinan un relieve subhorizontal. El mapa presenta valores positivos y negativos de gran incertidumbre en la periferia de la zona plana, pero hizo evidente un arreglo casi ortogonal en la zona montañosa, lo que permitió delinear, junto con la pendiente y energía del relieve el mapa de dominios geomorfológicos.

El mapa de energía del relieve muestra zonas con un mayor diferencial altitudinal en la zona NE, en el extremo contrario, solo los lomeríos costeros más elevados y por ende exhumados, tienen un valor de 50 a 100 m con la excepción de los Cerros Hermoso y El Zapotalito con valores de más de 300 m.

## 5.1 Dominios geomorfológicos

Los dominios geomorfológicos son regiones en donde algún proceso o variable pondera por encima de otros. Los dominios geomorfológicos son utilizados para el reconocimiento de distintas dinámicas en un área extensa, para determinar grandes morfoestructuras o como punto de partida para la fragmentación del relieve a una escala de análisis más detallada, como lo son las unidades geomorfológicas (Norini *et al.*, 2004; Zaragoza 2006; Herrera 2019).

El resultado para la cuenca de Chacahua – La Pastoría, fueron 7 dominios geomorfológicos (Fig. 15). En un orden decreciente respecto a la altura, se tiene al dominio de Montaña Baja (1), seguido de la Premontaña (2), un relieve de transición hacia la parte subhorizontal, denominado como relieve Fluvio-Gravitacional (3), después los Lomeríos costeros (4), para terminar con las llanuras de dominio Fluvial o constituida por sedimentos Aluviales (5), Palustre-Lacustre (6, que incluye a las Lagunas) y el medio Litoral (7) (Fig. 15).

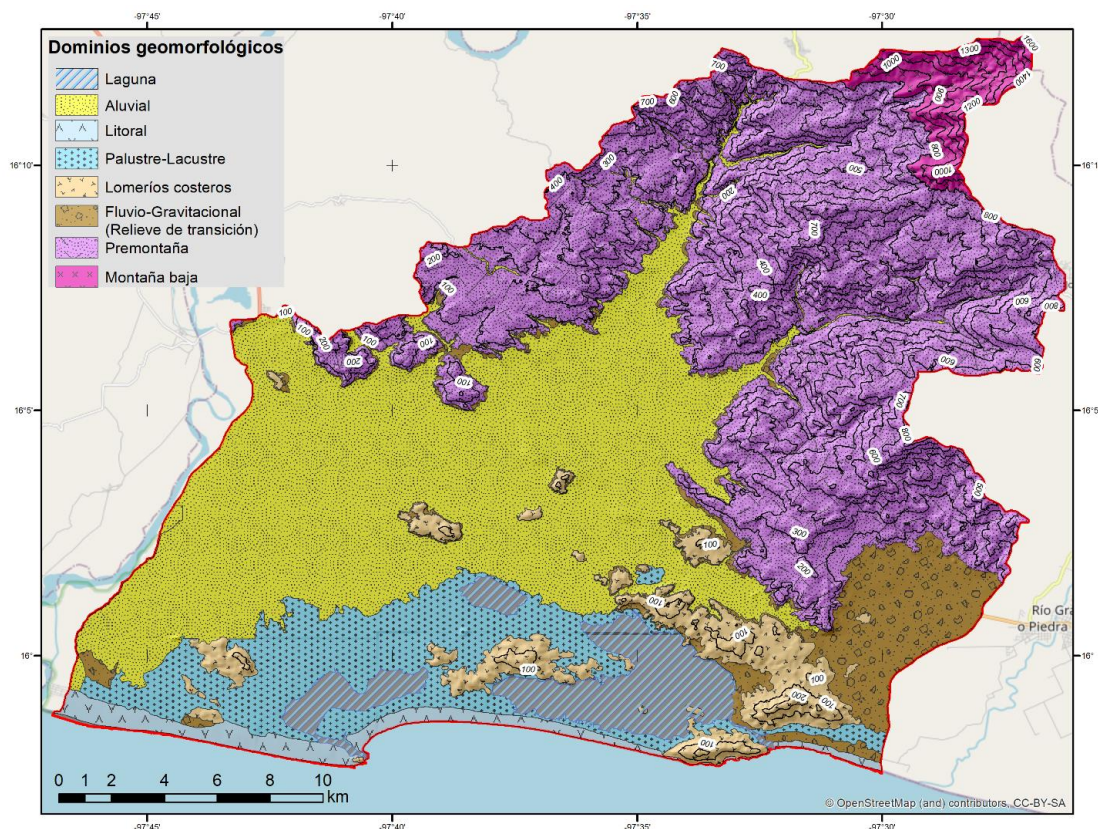


Fig. 15. Mapa de dominios geomorfológicos (a partir del ambiente y posición del relieve).

Cada dominio presenta particularidades de altura, pendiente, energía y curvatura del relieve, pero los valores no delimitan categóricamente a cada uno. Es decir, aunque las llanuras Aluviales y Lacustres-Palustres se localizan por debajo de los 30 msnm, con inclinaciones que no rebasan los 2°, baja energía del relieve y con valores de -0.1 a 0.1 de curvatura, su límite superior en ocasiones sobrepasa estos valores. Por lo que, para la delimitación también se consideró la naturaleza geológica de la cuenca y la geometría del relieve.

El dominio que más superficie expone en la cuenca de Chacahua – La Pastoría es el de Premontaña con cerca de 244 km<sup>2</sup>, al encontrarnos en el margen activo de la Trinchera Mesoamericana el frente montañoso de la Cordillera Costera del Sur de Oaxaca tiene un pie de aproximadamente 16 km de ancho antes de elevarse por encima de los 800 msnm. La historia geológica y el medio físico, vuelve vulnerable a este relieve al presentar una escasa cobertura edáfica, alta meteorización mecánica (termoclastismo e hidroclastismo), con específicas áreas de eficiente desarrollo de cortezas de intemperismo (particularmente en relieves cóncavos). Junto con la zona de Montaña baja (16.3 km<sup>2</sup>), compuesto también por intrusivos, constituyen el 41 % de la cuenca (Fig. 16).

Con 119.8 km<sup>2</sup> se encuentra el relieve de dominio Aluvial, siendo junto con la Premontaña los dominios más extensos en la cuenca con 70% de la zona de estudio. Le siguen en extensión el relieve producto de la dinámica Lacustre junto con el de inundación intermitente o Palustre, ambos ocupan el 13%. Por último, el relieve de transición entre la zona de Premontaña y la compleja llanura Aluvial tiene una extensión de 39.5 km<sup>2</sup>, que junto con los Lomeríos costeros con 35.7 km<sup>2</sup>, dando casi un 12% de la cuenca. Aunque en longitud es el dominio con la mayor distancia (más de 35 km), el dominio litoral solo ocupa el 2.2 % del área de estudio.

### 5.1.1 Montaña baja

De acuerdo con un nivel jerárquico, adquirido por la altura en la que se encuentra, las elevaciones naturales con una diferencia de altura mayor a los 300 m (Lugo, 2011), son consideradas como Montaña (Fig. 15). En el caso del relieve de la cuenca de Chacahua – La Pastoría se denominaron Montaña baja debido a su poca altura (800-1500 msnm), al compararla con las elevaciones mayores de la Sierra Madre del Sur, específicamente en la zona perteneciente a la Cordillera Costera del

Sur, con alturas de hasta 2800 msnm (entre San Lorenzo Texmelúcan y San Pedro Totomachápam).

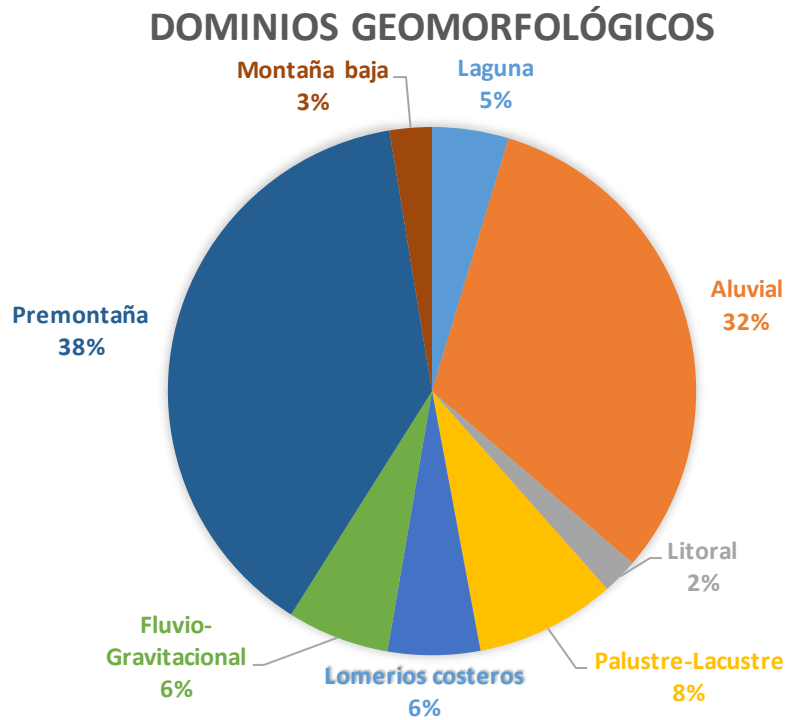


Fig. 16. Gráfica que muestra la proporción de superficie expuesta para cada dominio geomorfológico.

Este dominio presenta el clima más frío de la cuenca con tipos Templado y Semicálido húmedo, los suelos presentes son leptosol y luvisol, situación que favorece la ocurrencia del bosque mesófilo. La litología muestra un complejo metamórfico de gneiss pelíticos y anfibolíticos, situación que propicia la geometría típica de laderas escarpadas cortadas verticalmente por valles profundos separados por divisorias agudas (Lugo, 2011). Un aspecto que reveló la curvatura del relieve es la disposición ortogonal de las geometrías cóncavas y convexas, situación que manifiesta un patrón de fracturas y/o morfolineamiento ortogonal. Este aspecto, junto con el trabajo de Hernández y colaboradores (2009), permite definir a este dominio como una región de montañas bloque, definidas como megabloques corticales levantados y desplazados relativamente entre ellos (Lugo, 2011).

## 5.1.2 Premontaña

La Premontaña es un relieve dispuesto en los márgenes de sistemas orogénicos en los que, por movimiento corticales, comparten un arreglo parecido al que se dispone en las montañas (Lugo, 2011), pero de menor altura. Aunque en ocasiones este relieve se refiere como piedemonte, la configuración irregular, surcada por barrancos de hasta 500 m de desnivel, vuelve difícil asociar este relieve con una superficie marginal que desciende gradualmente con pendiente dominantes de 6°, como lo indica Lugo (2011).

La Premontaña en la cuenca de Chacahua - La Pastoría, tiene un valor medio de inclinación de 15-16° con máximos de 30°. Se encuentra entre las subprovincias Cordilleras Costeras del Sur y Costas del Sur, dentro de la Sierra Madre del Sur. El clima es más cálido con un régimen subhúmedo. En suma, el clima y la inclinación imprimen relevancia en la erosión ya que el suelo reportado es regosol con una zona al N de cambisol; en cuanto a la vegetación la Premontaña contiene tanto bosque de pino-encino como selva mediana subcaducifolia y subperennifolia. La geología muestra un cambio entre el gneiss al N con los intrusivos reportados previamente. El grano fino a medio de los granitos-tonalita de biotita con hornblenda, se vuelve un factor primordial para la disgregación del material y la fuente principal de las arenas cristalinas que se encuentran en los dominios geomorfológicos inferiores (Aluvial y Litoral).

## 5.1.3 Relieve de transición (Fluvio-Gravitacional)

Con solo el 6.3% de área dentro de la cuenca de Chacahua - La Pastoría, el relieve de dominio Fluvio-Gravitacional es aquel en donde los materiales se estacionan temporalmente provenientes de la zona de Montaña baja y Premontaña rumbo a la llanura aluvial y planicies lacustres. Es un relieve que localmente no rebasa los 35° de inclinación y formado por material transportado en masa o por escorrentía concentrada.

Es un relieve acumulativo por excelencia, en donde la dinámica tectónica, así como de la alta competencia del material intrusivo ladera arriba, permite la ocurrencia de procesos fluviales o gravitacionales; siendo de esta manera, una delgada rampa de material coluvial y de escombros al pie de la Premontaña. Se encuentra por completo dentro de la provincia Costas del Sur, con un clima cálido subhúmedo en donde la selva mediana subcaducifolia se encuentra con la agricultura de temporal.

### 5.1.4 Lomeríos costeros

Relieve producto de la disección de un piedemonte o planicie ligeramente inclinada (Lugo, 2011). Debido a la proximidad con la línea de costa, estas elevaciones menores tienen una alta influencia de procesos de levantamiento cortical debido a la liberación de energía sísmica por subducción, así como un modelado costero que incluye configuraciones típicas del relieve granítico con la formación de cortezas de intemperismo granular y arenoso. Lo anterior explica la ocurrencia de este relieve de forma aislada como en forma de cresta alagada y alineada de acuerdo con el sistema de fracturas dominante, con dirección WNW-ESE (Fig. 15). Aquí el suelo es del tipo regosol, la vegetación es predominantemente selvática del tipo mediana subcaducifolia, junto con pastizales. La geología de los principales lomeríos es del tipo gneiss para las elevaciones más próximas a la línea de costa (Fig. 12) y migmatitas entre el metamórfico al S y los intrusivos al N.

### 5.1.5 Dominio Aluvial

Relieve de gran extensión con poca diferencia altitudinal y baja inclinación asociada con los principales ríos que descienden de la Cordillera Costera del Sur. Aunque en el contexto regional, el relieve de Dominio Aluvial puede ser considerada como una delgada franja, esta región puede clasificarse como una llanura aluvial denudativa estructural de plataforma, término que pone en evidencia procesos de levantamiento neotectónico (Lugo, 2011). Este relieve se encuentra dentro del clima cálido subhúmedo, ocupado por completo por agricultura de riego anual, de temporal y pastizales. Está constituido por los depósitos sedimentarios de las escorrentías San Francisco, Chacalapa y Río Verde.

### 5.1.6 Dominio Palustre-Lacustre

Es un relieve constituido por formas acumulativas del relieve lacustre seco e inundado con influencia marina. Incluye la superficie de las Lagunas de Chacahua, Pastoría y marismas cercanas; domina una asociación de manglar y tular, junto con agricultura de temporal y pastizales. Esta vegetación manifiesta el flujo de la marea y oleaje de tormenta que llega a inundar tierra adentro (Lugo, 2011). Esta dinámica determina la ocurrencia de suelos del tipo Solonchak, así como depósitos palustres (de pantano) de fondo, ricos en materia orgánica (con tintes de similitud a la turba).

### 5.1.7 Dominio Litoral

Zona de transición entre el mar y tierra firme, sus límites los determina la marea, aunque en ocasiones puede tener una anchura que excede a la pleamar (Lugo, 2011). Aunque la anchura promedio no rebasa el kilómetro, para el caso de la zona de estudio, se tiene un medio litoral de 1.02 km al oriente, pero se adelgaza considerablemente en la zona de los Lomeríos costeros al occidente (Fig. 15). Aquí la vegetación es sabanoide y del tipo que se presenta en las dunas costeras (pastizales salobres), el tipo edáfico responde al material parental (depósitos arenosos en forma de cordones y barras costeras) arenosoles.

## 5.2 Geomorfología

Se clasificaron las formas del relieve, con relación a su origen, edad y dinámica, esto con el fin de explicar cada forma del relieve de acuerdo con un orden genético y temporalmente jerárquico. Se reconocieron formas de los tres orígenes primarios: Endógeno, Endógeno modelado y Exógeno. La génesis secundaria contiene ambientes fluviales, gravitacional, lacustre/palustre, antrópico, litológicos (granito/metamórficos) y tectónicos. El ambiente con mayor cantidad de unidades reconocidas fue el Fluvial, seguido del relieve litológico de granito/metamórficos. En la siguiente tabla se muestran las formas reconocidas y plasmadas en el mapa geomorfológico (Anexo B) (Tabla 6).

### 5.2.1 Relieve exógeno

Se describen las formas resultado del modelado por agentes externos, para el caso de la zona de estudio, los ambientes exógenos reconocidos fueron: Litoral, Fluvial, Lacustre/Palustre, Gravitacional y Antrópico. Todos ellos con una dicotomía genética de formas resultado de la acumulación y/o de la erosión.

Tabla 6. Unidades geomorfológicas de la cuenca de Chacahua – La Pastoría.

<b>RELIEVE EXÓGENO</b>			
<b>LITORAL</b>		<b>FLUVIAL</b>	
<u>ACUMULATIVO</u>	<u>EROSIVO</u>	<u>ACUMULATIVO</u>	<u>EROSIVO</u>
Línea de berma	Acantilado	Abanico aluvial	Corriente
Ripples		Abanicos coalescentes	Canal inactivo
Cusps		Banco de material	Canal intermitente
Barra proximal		Barra de acreción	Barranco
Médano		Llanura de inundación activa	Cañón
Playa arenosa		Llanura de inundación inactiva	Canal de desborde
Playa rocosa		Planicie aluvial	Escarpe erosivo
		Fondo de valle con terrazas	Vertiente
		Fondo de valle	Vertiente modelada
		Rampas proluviales	Valle confinado
			Valle semiconfinado
<b>LACUSTRE/PALUSTRE</b>		<b>GRAVITACIONAL</b>	
<u>ACUMULATIVO</u>	<u>EROSIVO</u>	<u>ACUMULATIVO</u>	<u>EROSIVO</u>
Estuario	Canal de estuario	Rampa coluvial	Cicatriz de desprendimiento
Islote			Circo erosivo
Planicie lacustre seca			Superficie de desprendimiento
Ribera lacustre			Superficie de desprendimiento modelada
Terraza lacustre			
Planicie lacustre intermareal			
<b>ANTRÓPICO</b>			
<u>ACUMULATIVO</u>	<u>EROSIVO</u>		
Barra de contención	Línea central		
<b>RELIEVE ENDÓGENO MODELADO</b>		<b>RELIEVE ENDÓGENO</b>	
<b>GRANÍTICO/METAMÓRFICO</b>		<b>TECTÓNICO</b>	
<u>EPIROGÉNICO</u>	<u>EXHUMADO</u>	Línea de falla	
Cúpulas en bloque de fondo de graben	Campo de cúpulas	Espejo de falla	
Cúpulas en bloque de pilar de graben	Crestón granítico		
Peniplano	Cerro testigo		
Plataforma gnéisica	Domo degradado		
	Mesa		
	Ladera en gradería		



## *Litoral*

La zona litoral se define como el área de influencia que concentra la interacción entre el sistema terrestre y el marino, es considerado el ambiente más dinámico y joven dentro de la cuenca. El nivel medio del mar es un punto de referencia, pero debido a que existe una combinación de rasgos terrestres con los marinos, la anchura de esta zona puede alcanzar hasta los 15 km (Lugo, 2011). La mayoría de las formas en las costas del mundo han evolucionado durante el Cuaternario, específicamente en los últimos 5 mil años (Gutiérrez-Elorza, 2008). En la cuenca de Chacahua-Pastoría este ambiente cubre una extensión de 32.97 km, con un ancho que varía entre 40 y más de 140 metros.

### *Acumulativo*

Las formas del medio litoral de origen acumulativo reconocidas van desde rasgos como la línea de berma, ripples y cusp, como unidades geomorfológicas, que son barra proximal, médanos, playas arenosas y rocosas, así como acantilados.

La **línea o cresta de berma** es el borde más próximo al mar, se forma por marea y oleaje de tormenta y está constituida por arena gruesa y hasta guijarros (Lugo, 2011). Es el límite superior de la playa alta (*backshore*), se encuentra en una zona dominada por la erosión costera del oleaje y la dinámica eólica. Próxima a la berma se presentan los **ripples**, los cuales son acumulaciones eólicas pequeñas (de hasta 30 cm) y constituyen la respuesta inicial de las superficies arenosas de la playa al transporte del viento (Gutiérrez-Elorza, 2008). Ya dentro de la zona intermareal (Fig. 17) se reconoce un rasgo muy dinámico, denominado como **cusps o festones de playa** son formas debidas a un oleaje paralelo a la línea de costa y las diferencias en el tamaño del material sedimentario, esto deja los sedimentos más gruesos en la parte superior de la media luna y el sedimento más fino en el centro (Bierman y Montgomery, 2014). Es un relieve de salientes de forma triangular en la playa, en dirección al mar (Lugo, 2011).

Las unidades geomorfológicas contienen a la **barra proximal**, es un promontorio arenoso conectado al continente producto de la acción del oleaje y las corrientes marinas y que aísla un cuerpo de agua (Lugo, 2011). En el caso de la zona de estudio la barra litoral proximal, resguarda al estuario, cubre una superficie de 12.84 km<sup>2</sup>. Al sur se comunica con el mar por medio de dos bocas barras, una perteneciente a la laguna de Chacahua y otra a La Pastoría. La orientación preferencial de la línea de costa es WNW-ESE, y se intercalan geometrías convexas, rectas y

cóncavas, siendo dominantes las primeras. Al oriente de la barra litoral se presenta un campo de **médanos**, los cuales son originados por la acción eólica y favorecidos por la topografía plana que permite una amplia acumulación de sedimentos arenosos. Los médanos son dunas litorales resultado de un conjunto de procesos eólicos que interactúan con el material seco disponible (arenas de los minerales del gneiss y granito), fluviales (sedimentos del dominio aluvial) y costeros (playas) que suministran de arena (Gutiérrez-Elorza, 2008) por encima de la playa alta.



*Fig. 17. Imagen de satélite (Google Earth) en donde se conjugan formas del medio litoral, se observa la Playa arenosa y el límite inferior de la Playa rocosa (línea negra intermitente) por debajo del acantilado. Se muestra un arreglo de fracturas casi ortogonal (líneas amarillas intermitentes), respecto a la línea de costa. También se muestra una franja intermareal. La flecha amarilla señala una barra de contención. Sitio localizado al E del Cerro Hermoso.*

Las **playas** son una acumulación de depósitos detríticos no consolidados de tamaños variados que van desde la arena fina hasta la grava o bloques, se forma principalmente por el tamizado natural que produce la acción de las olas en el litoral (Gutiérrez y Gutiérrez, 2016). Las playas son de tipo **arenosas** y **rocosas**, se intercalan dependiendo de la cercanía con las elevaciones que se presentan en esta franja litoral (Fig. 17 y 18). Las playas presentan los rasgos característicos de estos ambientes, la berma está constantemente presente en las playas arenosas, así como la franja intermareal y la evidencias de cusps.



Fig. 18. Playa al E del Cerro Hermoso, se muestra la línea de berma (amarillo), así como el límite superior de la franja intermareal (línea roja) y la mancha de agua que vuelve evidente el festonado de playa (tomado de Google Earth, 2021)

### *Erosivo*

La dinámica de remoción en la zona litoral influye todas las formas de este ambiente, la forma erosiva por excelencia aquí es el acantilado. Un **acantilado** es una pared de alta pendiente expuesta a la socavación que ejerce el oleaje y formado por la abrasión costera (Lugo, 2011). Los acantilados dentro de la cuenca, se encuentran en la ladera sureste de la elevación denominada como Cerro Hermoso (Fig. 18) al sur de la laguna de La Pastoría, presenta una pendiente de 25 a 45° y una diferencia de altitud de 170 metros. Los acantilados suelen ser más comunes en elevaciones rocosas de alta resistencia. Estas formas del relieve también se asocian con movimientos gravitacionales de bloques, es decir, fallamientos y planos de debilidad en las rocas (Fig. 17).

### *Fluvial*

El ambiente fluvial es uno de los principales procesos modeladores del relieve y en la cuenca de Chacahua y Pastoría no es la excepción. De acuerdo con el mapa geomorfológico, las formas resultado del transporte por escurrimiento superficial, no solo son las que ocupan una mayor superficie, también son las que tiene una mayor diversidad (Anexo B).

### *Acumulativo*

El relieve fluvial de tipo acumulativo se compone por abanicos aluviales, abanicos coalescentes, bancos de material, barras de acreción, llanura de inundación activa e inactiva, planicie aluvial, terrazas y fondos de valle con depósitos.

Los **abanicos aluviales** son formas localizadas al pie de complejos montañosos, usualmente tiene una forma de un tercio de cono recostado con una inclinación dispuesta de forma radial a partir de un apice o punto de desborde en la parte alta (Goudie, 2004). Su formación esta en función de un abrupto cambio de la amplitud y pendiente del cauce, son la manifestación de una reducción del poder de la corriente en un sitio de mayor anchura del canal junto con la reducción de velocidad por efecto de una disminución de la inclinación, lo que permite liberar su carga en forma de mantos radiales. En la zona de estudio se encuentran en la sección suroccidental donde terminan las mesas graníticas, cubre parte de las terrazas fluviales del río San Francisco, su extensión es de 1100 metros de largo y 636 metros de amplitud, tiene una forma irregular y alargada, con una orientación preferencial NW-SE. Otro abanico se localiza en la parte oriental de la cuenca, presenta una longitud máxima de 4.54 metros y con cerca de 7 metros de amplitud, su dirección principal es NNE-SSW y se encuentra ampliamente diseccionado por corrientes fluviales. Estos ejemplos son abanicos que todavía presentan aspectos de su morfología original. Pero entre la zona de transición y la planicie aluvial se encuentra una unidad geomorfológica que se presume esta formada por múltiples abanicos, pero ya no tienen rasgos primarios de su forma y se encuentran interdigitizados entre sí, a manera de rampa, esto es lo que denominamos como **abanicos coalescentes**. Tienen extensiones que van de 50 metros hasta un máximo de 2 km y se diferencian de la planicie y los abanicos individuales por presentar cambios sutiles en su altura, su morfología es ondulada y ligeramente subhorizontal. Los abanicos coalescentes que se encuentran asociados al frente montañoso en dirección al río San Francisco se encuentran en pares desde el centro norte de la cuenca, justo desde donde inicia la planicie aluvial (Fig. 19). En dirección hacia el suroeste se distinguen cuatro niveles de estas formas y se pueden relacionar con un posible sepultamiento por depósitos de aluvión de crecidas extraordinarias. Sobre esta parte las terrazas se vuelven más extensas con más de 2 km de longitud.



Fig. 19. Vista 3D del contacto entre la Premontaña y el dominio Aluvial. Se muestra la compleja y extensa planicie aluvial, en este sector del río San Francisco, en la parte centro norte de la cuenca de Chacahua-Pastoría. La línea intermitente roja, muestra el límite inferior de la rampa de abanicos coalescentes que se encuentra por debajo de la zona de transición Fluvio-Gravitacional.

Una de las unidades geomorfológicas más dinámicas asociadas con la escorrentía activa son los bancos de material. Debido a la escala y lo cambiante de estas formas muchos de los bancos de material terminan evolucionando a barras de acreción. Los **bancos de material** (albardón, cuando esta adosado a la ribera; o banco de cauce, cuando esta en el centro del cauce), son formas positivas del relieve asociadas directamente con el cauce de un río, formadas por depósitos de carga de la corriente (Lugo, 2011). Son parte fundamental de la evolución de sinuosidad o meándrica de los ríos. Las **barras de acreción** o barra de meandro, son depósitos de sedimentos gruesos que se depositan en los recodos (meandros) del cauce, se forman por la migración lateral del cauce (Lugo, 2011). En la zona de estudio, se desarrollan barras de acreción, de diversos tipos predominan las barras laterales en el río San Francisco, mientras que en el río Chacalapa esta morfología cambia a barras centrales (Anexo B).

Las corrientes fluviales están delimitadas a ambos lados por la llanura de inundación, la cual tiene un escaso espesor que apenas rebasa el metro, esta forma se presenta activa o inactiva de acuerdo con el límite de inundación alcanzado durante la temporada de lluvias. La **llanura de inundación activa** o canal aluvial (*aluvial channel*) es la zona de influencia de depósito más próxima a donde

corre el río, esta ocupada por los últimos depósitos de aluvión en la crecida más reciente (Gutiérrez y Gutiérrez, 2016). La **llanura de inundación inactiva** es el área próxima al canal aluvial, que reclama el agua en época de lluvias estacionales, siendo de esta manera un área de influencia de aluvionamiento de temporal. Como parte de la zona de inundación extraordinaria se encuentra la extensa **planicie aluvial**, este término se aplica a superficies horizontales, subhorizontales, onduladas, cóncavas y escalonadas a manera de terrazas o conjunto de terrazas formadas por distintos episodios de inundación (Lugo, 2011). La planicie se distribuye en la parte sur de la cuenca, presenta una topografía subhorizontal, con pendientes menores a los 2°. Exhibe elevaciones menores aisladas y parcialmente sepultadas por depósitos aluviales que actuaron en el pasado.

Junto a la planicie se encontraron un par de formas que ocurren en formas negativas del relieve pero que fueron mapeadas a partir del reconocimiento de los depósitos de fondo. Las formas de **fondo de valle** normal y en forma de **terrazas**, son relieves negativos ocupados por depósitos de carga de fondo de naturaleza fluvial y que presentan un arreglo sin patrón preferente (normal) o escalonado en sus extremos por la formación de delgadas terrazas aluviales (producto de distintos episodios de aluvionamiento) (Gutiérrez-Elorza, 2008; Lugo, 2011). Se encuentran en valles que fueron clasificados con base en su morfología y su relación con el patrón morfológico del canal. Los valles con menor desarrollo, son los canales que se localizan al sur de la cuenca, sobre elevaciones menores a los 200 metros y que se formaron por efecto erosivo, presumiblemente durante la temporada de lluvias. Sus lechos tienen diversas formas, estos son las unidades geomorfológicas de mayor dinámica y en ellos se presentan barras de acreción y depósitos fluviales, los fondos de valles con terrazas son más estables en su dinámica y la morfología de sus corrientes suelen presentar un incipiente trezado.

Finalmente alrededor de las lagunas en la interfase del ambiente estuario-fluvial se presentan rampas proluviales compuestas por sedimentos mixtos de origen fluvial y lacustre, su extensión es muy variada la más grande cubre una superficie de 1.486 km<sup>2</sup> y la menor de 167.87 m<sup>2</sup> la pendiente varía de cero a 2.5 grados. La **rampa proluvial** es un manto acumulativo en la parte inferior de una zona de transición gravitacional y fluvial, es material mal clasificado con una menor señal de madurez por efecto del transporte (Lugo, 2011).

### *Erosivo*

Las formas del relieve producto de la erosión por efecto de la escorrentía concentrada o a manera de mantos encontradas en la zona de estudio son: corrientes fluviales, canal inactivo e intermitente, barrancos, cañones, canal de desborde, escarpe modelado por la dinámica fluvial, vertientes francas, modeladas, valles confinados, así como semiconfinados.

Las **corrientes** se clasificaron de acuerdo con la metodología establecida por Horton en 1945 y modificada por Strahler (1964). El máximo orden alcanzado por el cauce principal dentro de la cuenca fue el de quinto orden, mientras que la distribución de concentración de cauces muestra más de 300 cauces de primer orden y solo más de 80 del tercer orden (Fig. 20).

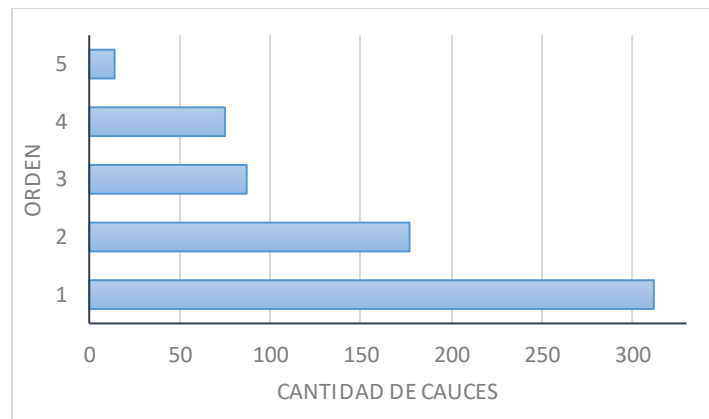


Fig. 20. Histograma de ocurrencia de ríos de acuerdo con su orden.

Los cauces de primer orden son aquellos que descienden sin ningún cauce tributario, es decir, aquél que inicia la red de drenaje, los cauces de tercer y cuarto orden tienen una cantidad similar por lo que al menos nutren a dos cuencas con características físicas y geológicas similares. De los ríos San Francisco y Chacalapa, es el primero el que contiene el río de orden mayor. La sinuosidad de la corriente principal muestra un comportamiento diferente en cada parte de la cuenca. El patrón morfológico del canal principal es predominantemente trezado, con una sinuosidad moderada en general. Esta sinuosidad se relaciona con la carga que transporta, compuesta principalmente por materiales en suspensión. La pendiente es baja en gran parte de su cuenca, menor a dos grados y la topografía subhorizontal.

En la zona de producción de la cuenca, las pendientes son más pronunciadas desde los 4 a 22°, aquí los cauces se caracterizan por tener baja sinuosidad y solo tiene un canal. Por lo tanto, su morfología es rectilínea, con algunas inflexiones que se localizan en los cambios de altitud

considerables, así como en los escarpes más pronunciados. La carga es mayormente compuesta por bloques y gravas.

A unos 13 kilómetros río abajo se observa una inflexión en el canal y existen depósitos de materiales de menor tamaño, incluso se desarrollan barras de acreción, típicamente compuestas por material más fino, arenas. En este punto, la corriente se vuelve más dinámica en su morfología comienza a presentar patrones trenzados (Fig. 21 y 22).



Figura 21. Esquema ilustrativo de la morfología del canal principal.

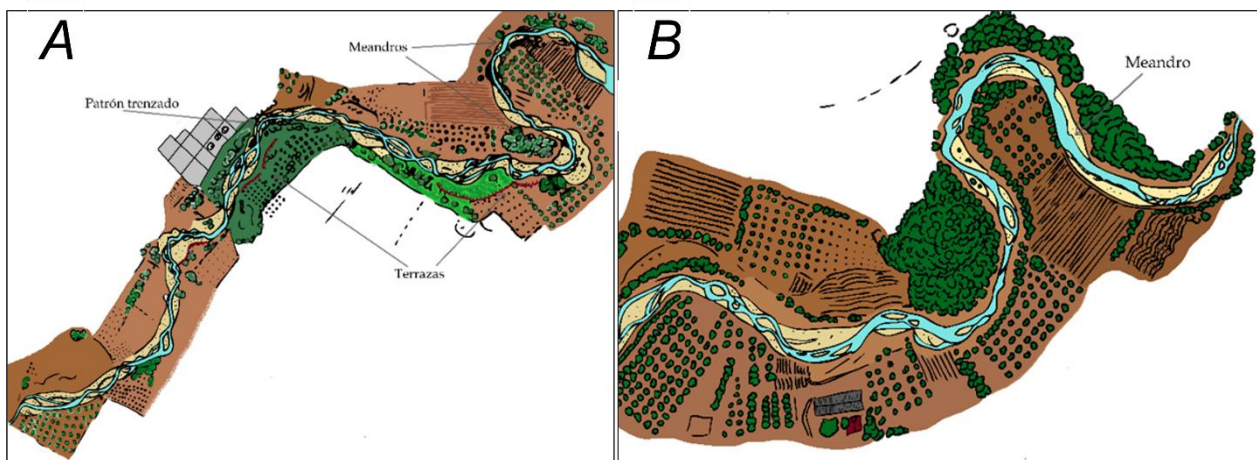


Figura 22. Patrón de drenaje trenzado en el canal principal (Elaboración propia).

En la parte distal de la corriente principal (río San Francisco) se observa la presencia de **canales inactivos e intermitentes**, los cuales se distribuyen en la planicie aluvial predominantemente en su parte central (Fig. 23). Los primeros son aquellos que debido a su distanciamiento con la



corriente principal es poco probable que corra agua por él, en el caso de los intermitentes, su abastacimiento de agua depende de la temporada de lluvias.

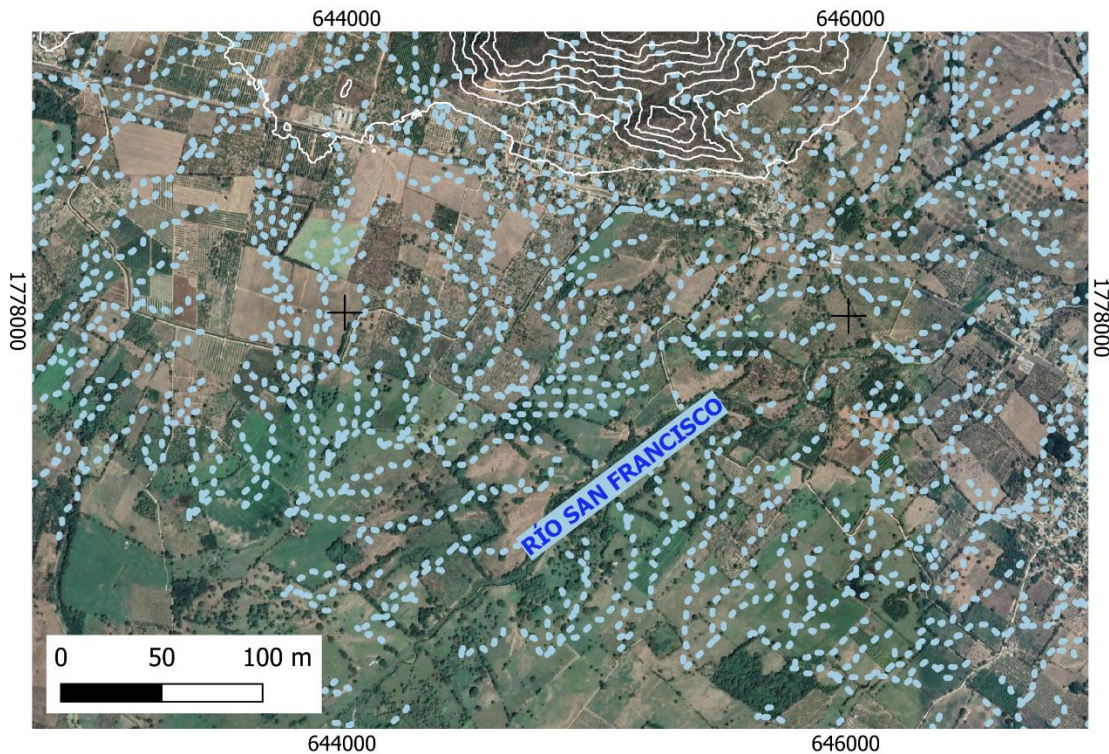


Fig. 23. Muestra de la cantidad de corrientes con un canal inactivo en la planicie aluvial asociada con el río San Francisco.

Una de las formas erosivas por excelencia dentro del ambiente fluvial, son los **barrancos** y cañones, los primeros son una forma lineal negativa del relieve, estrecha, con laderas abruptas que con frecuencia se ramifica hacia la cabecera y tienen una característica forma de V (Lugo, 2011). Sus vertientes son de alta pendiente y se localizan al noroeste del área de estudio, en la porción donde afloran las rocas metamórficas (Anexo B). Tienen diferencia de altitud de hasta 350 metros. Los **cañones** son valles profundos y estrechos con vertientes casi verticales y en ocasiones escalonadas (Lugo, 2011), se diferencian de los barrancos por tener un fondo plano en vez de agudo. En el relieve cartografiado, los cañones están delimitados en su cabecera por circos erosivos, presentan un fondo concavo a plano, sus vertientes son igualmente de pendiente pronunciada, la diferencia de altitud alcanza los 300 metros.

Otras formas erosivas reconocidas fueron las vertientes y los escarpes modelados por la acción fluvial. En ambos casos el tipo de relieve es similar, pero las vertientes modeladas muestran evidencias claras de canales que han comenzado a modificar su geometría. Las **vertientes** son un

conjunto de laderas que flaquean a una escorrentía (Lugo, 2011). Presentan pendientes menores a 35°. Para el caso de las **vertientes modeladas**, se caracterizan por presentar pendientes más fuertes, de entre los 45 a 60°, se reconocieron principalmente en las zonas de mayor altitud, sobre la cabecera de la cuenca. En la mayoría de los casos presentan remoción de la cobertura vegetal en forma de corredores de escombros, lo que indica su carácter de modelado reciente, también presentan marcas de desprendimiento.

Por último los valles confinados y semiconfinados, son formas negativas y estrechas del relieve por efecto de depósitos coluviales. Estos valles pertenecen a corrientes de tipo rectilínea o de baja sinuosidad, en ocasiones tienen una forma del lecho curvada y relativamente regular. Dentro de sus propiedades morfométricas, presentan una profundidad mayor a 20 metros. De estos se determinaron como confinados aquellos de profundidad mayor a 150 metros y semi confinados los que presentan una profundidad menor a 150 metros. La presencia de depósitos de fondo es menor. La mayoría de estos valles se encuentran en las partes altas y montañosas de la cuenca, dentro del sustrato gránitico y metamórfico.

## ***Gravitacional***

Aquí se encuentran las formas del relieve producto de la dinámica de remoción en masa, donde la cantidad de agua no funje como catalizador del movimiento, ya que es la gravedad la principal fuerza (Alcántara, 2000). Las unidades geomorfológicas reconocidas fueron la rampa coluvial, cicatriz de desprendimiento, circo erosivo, superficie de desprendimiento y superficie de desprendimiento modelada.

### *Acumulativo*

Los fenómenos gravitacionales se asocian con fenómenos de meteorización diferencial, acusada por una menor competencia de distintos cuerpos rocosos o por el desarrollo intrínseco de planos de debilidad en el sustrato. Junto con el desarrollo de fracturamiento en la roca, la pendiente, la intensidad de los agentes meteóricos, tipo de intemperismo, fenómenos meteorológicos entre otros factores favorecen el desarrollo de desequilibrio y posterior remoción. Las **rampas coluviales** son superficies inclinadas, en general con cerca de 15°, dispuestas en la base de las laderas a manera de piedemonte, compuesta por coluvión, es decir depósitos desplazados ladera

abajo por la acción de la gravedad (Lugo, 2011). Estas formas se encuentran en el límite del dominio de lomeríos y son estructuras con una menor inclinación ( $<10^\circ$ ), de amplitud promedio que ronda entre los 200 y 500 metros, en su mayoría se encuentran disectados por corrientes fluviales. Las rampas se componen del material granítico removido de partes más altas y depositado por fenómenos gravitacionales a manera de caída y desprendimiento.

### *Erosivo*

Dentro del rubro de formas gravitacionales del tipo erosivo se encuentran las cicatrices y superficies de desprendimiento, algunas de estas modeladas. La **cicatriz de desprendimiento** o de ruptura, es la línea superior de discontinuidad de la ladera desprendida. En cambio la **superficie de desprendimiento** o ruptura es la zona que fungió como plano de deslizamiento. La inclinación de estas superficies va desde los  $25^\circ$  hasta los  $45^\circ$  (Fig. 24).



Fig. 24. Digrama en bloque tridimensional de los Cerros Hermoso y El Zapotalito, en este último se reconoció la cicatriz (CDp= de desprendimiento) y un escarpe que sirvió como superficie de despredimiento (SDp). También se muestra la zona de la Planicie lacustre intermareal (PLIm), representada por la barra proximal en donde se encuentra una fina zona de médanos (Med). Por último en el Cerro Hermoso, se reconoce un alineamiento definido por su aguda cima como línea de falla (LdF) que en parte expone su espejo de falla (EFI) y al oriente este espejo ya ha sido modelado por la acción costera por lo que deja un acantilado (Ac).

También se encontraron antiguas superficies que están muy disectadas por ríos, por lo que fueron clasificadas como modeladas (Fig. 24). En estas su pendiente varía entre los  $15^\circ$  y  $25^\circ$ . Su desarrollo genera estructuras alineadas marcadas por las cicatriz de desprendimiento y en algunos casos es posible observar el área de acumulación. Se encontraron al NE, en donde el relieve es más abrupto.

Aquí el intemperismo por termoclastía y la hidroclastía avanzan sobre los planos de debilidad lo que vuelve propensa a las laderas a generar un desprendimiento.

## *Lacustre/Palustre*

El medio lacustre es aquel que incluye cuencas litorales-fluviales rodeadas de porciones de tierra firme; en cambio el palustre se refiere a zonas físico-geográficas en las que se forman pantanos (Lugo, 2011), se caracteriza por una composición y estructura determinada de depósitos finos ricos en materia orgánica. Las formas reconocidas que pertenecen a estos ambientes fueron estuario, islotes, planicie lacustre seca o inactiva, ribera y terraza lacustre, planicie lacustre intermareal y canal de estuario.

### *Acumulativo*

Las formas de naturaleza acumulativa del ambiente lacustre/palustre se localizan al sur de la cuenca. El estuario es un ecosistema caracterizado por su vegetación y la diversidad de especies, alberga una gran plusvalía económica y de conservación, además funge como zona de amortiguamiento de la erosión marina y eólica. El **estuario** es un área lacustre y pantanosa en donde el agua salada del mar se mezcla con el agua dulce proveniente de las corrientes fluviales (Goudie, 2004). Morfológicamente se presentan seis cuerpos de agua, dos de ellos de mayor volumen que son La Pastoría y Chacahua, los cuales son considerados los más dinámicos, hidrológicamente.

Se utilizaron dos índices para la descripción de su forma, el primero es el alargamiento y relaciona la longitud máxima y el ancho medio (L/W). A pesar de que los valores no son dimensionales, Castillo-Jurado (1992) menciona que se puede tomar los valores superiores a dos para los cuerpos subrectangulares y los cercanos a uno como circulares. Otro índice refiere la longitud de la línea de costa en relación con un círculo de la misma área (DL), este índice aumenta conforme la forma del cuerpo de agua es más irregular.

La laguna de Chacahua se clasifica como un estuario subrectangular alargado; la orientación del eje mayor de la laguna es de NE - SW (Fig. 25), esta favorece que los vientos presentes en el área de estudio incidan directamente en su dinámica de oleaje superficial, lo anterior ya fue señalado

por Sanay-González (1997). El cuerpo de agua de mayor superficie es La Pastoría (Fig. 25), el eje mayor tiene una orientación E-W y se clasifica como una laguna subrectangular dendrítica.

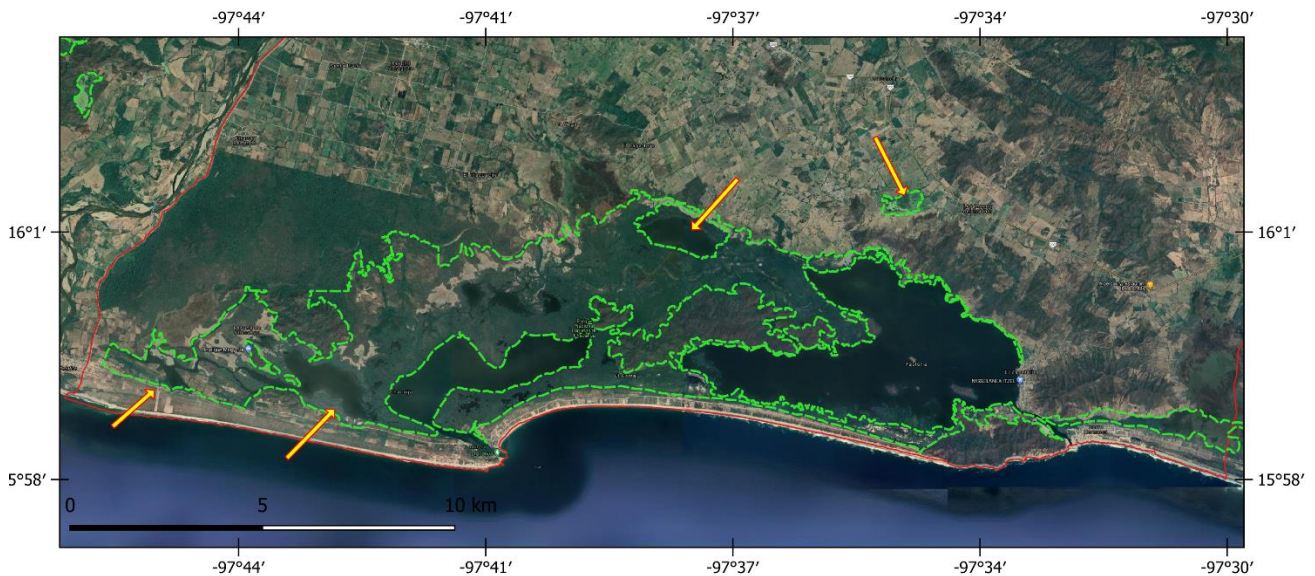


Fig. 25. Mapa que muestra la extensión del medio lacustre/palustre, con la señalización de extensiones de la planicie lacustre activa. Las flechas al norte muestran cuerpos de agua que se ocupan de forma esporádica, mientras que las flechas al suroeste señalan la extensión del estuario separado del medio marino por la barra proximal. La Pastoría es el cuerpo de mayor extensión, localizado al E.

El estuario de la cuenca de Chacahua – La Pastoría es un sistema delimitado por una barra proximal de acreción costera (*bar-built estuarie*) en donde, la sedimentación marina a lo largo de la zona de ribera (*cross shore*) repliega el delta fluvial, esto favorece la restricción de intercambio de agua salada en el estuario con excepciones durante las mareas altas (Goudie, 2004). La extensión y morfometría del estuario permite clasificarlo como un estuario de marea dominante, en donde la boca de acceso de agua marina adquiere una morfología de embudo con barras elongadas y paralelas a la dirección dominante de las corrientes someras (Goudie, 2004).

Dentro del estuario son comunes los pequeños **islotos** que son acumulaciones de sedimentos muy finos y materia orgánica que se presentan en las orillas y dentro de las lagunas. Presentan diferentes orientaciones y en ocasiones se encuentran vegetados. La formación de los islotos son el resultado de diferentes distancias que recorre el viento, que actúa con la superficie del mar necesario para generar olas (*fetch*), el tiempo de exposición a los vientos dominantes, las variaciones en la sedimentación subsuperficial, topografía irregular y/o heredada por el sistema de drenaje que se desarrolla por el vaivén de pleamar y bajamar en el estuario, desarrollo de vegetación que mantenga el sustrato y variaciones en la subsidencia del fondo del estuario

(Goudie, 2004). En la cuenca se observa una mayor densidad en el estuario de la Pastoría, directamente al sur, posiblemente resultado del avance de médanos y aislamiento de corrientes someras.

La **ribera lacustre** es el margen exterior que delimita los cuerpos lagunares, está cubierto de densa vegetación y funciona como borde de contención. Alrededor de los cuerpos lagunares se han adoptado zonas de depósito con una topografía subhorizontal. Se catalogan como **planicies lacustres**, aquellas superficies de poca inclinación, siendo activas aquellas que el flujo el agua sigue en movimiento y funciona como zona de amortiguamiento durante la temporada de lluvias. Las planicies lacustres inactivas no presentan vegetación y se encuentran azolvadas de sedimentos, además de que se encuentran en un nivel altitudinal ligeramente mayor, al grado de que simula la forma de una terraza en dirección al continente. Por estas razones la planicie de la cuenca de Chacahua - La Pastoría tiene semejanzas con una planicie denudatoria estructural con modelado fluvial.

Las **terrazas lacustres** pertenecen a las formas acumulativas son desniveles que muestran antiguos niveles de inundación del cuerpo lagunar, si bien los niveles han cambiado por diversos factores, estos elementos muestran una diferencia altitudinal con el nivel actual de la laguna. Debido al contexto regional, es posible que las terrazas tengan un origen de levantamiento, pero el presente trabajo no puede asegurarlo. Se distribuyen al exterior del cuerpo lagunar, de forma irregular y ocupan un área aproximada de 23.9 km<sup>2</sup> con pendientes muy bajas y relieve plano cubierto de vegetación, su composición es de sedimentos lacustres terrígenos y orgánicos.

#### *Erosivo*

Los **canales de estuario** son una depresión lineal que comunican las lagunas del sistema. Son impulsados por el desfogue del agua en las lagunas en época de crecidas tanto fluviales como mareales. Se pueden considerar como la continuación de las corrientes fluviales hasta su desembocadura en el océano. El más amplio es el que conecta a las dos lagunas de mayor superficie, mide 2.5 km de largo con 15 metros de ancho y una profundidad promedio de 4 metros (Sanay-Gonzalez, 1997).

## *Antrópico*

Este tipo de relieve se refiere al cambio de las formas del terreno por efecto de la población y/o sociedad. Al igual que en los ambientes anteriores, el hombre como agente erosivo puede movilizar una gran cantidad de masa en la superficie terrestre. Aunque existen varios cambios en el entorno por efecto humano, las barras de contención y línea central se consideran los mayores cambios en la cuenca.

### *Acumulativo*

Las intervenciones dentro de la cuenca son múltiples, en este caso, la alternativa para mantener la boca barra de Chacahua en constante circulación fue la colocación de **barreras de contención** con dirección NNW-SSE (Fig. 17 y 18). Estas estructuras tienen por objetivo cambiar la dirección del oleaje, para que de esta manera cambie el rumbo de la sedimentación, por lo que esta se deposita en lugares donde probablemente no existía un aporte considerable.

Posterior a la colocación de las barreras de contención, la boca barra de Chacahua no ha completado su ciclo natural y se mantiene permanentemente abierta; a diferencia del caso de La Pastoría, en la cual se pretendía hacer lo mismo. Sin embargo, la estructura se colocó en dirección N-S, generando un depósito de arena que aumentó rápidamente y azolvó por completo la boca barra. Estas modificaciones han perpetuado por más de una década y modifican severamente los ciclos naturales de los cuerpos lagunares.

### *Erosivo*

En el caso de las formas del relieve antrópico erosiva se clasificaron los canales y **líneas centrales** que transportan, de forma esporádica, recursos hídricos para las actividades agroindustriales, así como el agua potable para las partes más difíciles de acceder y algunas de desagüe. En estos casos, el lecho de los canales se encuentra recubierto comúnmente de concreto. La mayoría desembocan en las lagunas, directamente o a través de alguno de los cuerpos menores.

## 5.2.2 Endógeno

Aquí se encuentran las formas resultado de la energía interna del planeta, siendo la tectónica y el volcanismo los principales orígenes secundarios (Lugo, 2011). Para el caso de la cuenca de

Chacahua- La Pastoría, prácticamente todas las formas del relieve tienen una influencia tectónica, esto debido a que nos encontramos directamente enfrente de la Trincheras Mesoamericana, donde la actividad sísmica y el levantamiento de la corteza por efecto del rebote elástico es constante (Ramírez-Herrera et al., 2004). Pero este tipo de levantamiento cortical no condiciona la fisonomía de las formas encontradas, pero si determina el potencial energético de los agentes exógenos. Por esta razón las únicas formas reconocidas como de origen endógeno fueron algunos relictos de espejo de falla y su respectiva línea de falla.

### ***Tectónico***

Las formas de origen tectónico son aquellas en donde es posible reconocer aspectos de levantamiento o hundimiento producto de estructuras discontinuas con movimiento relativo. En la cuenca de Chacahua - La Pastoría, los agentes exógenos dominan respecto a los tectónicos, por lo que los escarpes reconocidos tienen un modelado aparente, pero de acuerdo con el mapa de morfolineamientos y la información estructural, fue posible reconocer algunos de estos elementos geomorfológicos.

El escarpe de falla identificada se encuentra en el cerro testigo de Cerro Hermoso, en su ladera orientada hacia el sur, con una pendiente de 48° de inclinación, el desnivel es de 242 metros y se encuentra modelado por los procesos costeros (Fig. 24). Se trata de una falla de componente normal. La pared vertical que se desarrolla hasta el nivel del mar se identificó como el espejo de falla, no existen corrientes superficiales permanentes, solo se presentan los escurrimientos en temporada de lluvias, mismos que generan corrientes que desembocan directamente en el mar y acarrear materiales a la parte baja del escarpe. Su extensión máxima es de 1.5 km y su geometría es recta a cóncava se compone de rocas metamórficas principalmente gneis con alta resistencia al intemperismo.

### **5.2.3 Relieve endógeno modelado**

Este origen morfológico se aplica a las formas endógenas modificadas por la acción erosiva, hasta el punto de perder su forma primaria (Lugo, 2011). Aquí se encuentran las formas estructurales (plegamiento o relieve jurásico), relieve de areniscas y otros relieves litológicos, siendo el relieve granítico y metamórfico los orígenes endógenos modelados por excelencia. En la cuenca de



Chacahua - La Pastoría, cerca de la mitad de la superficie se encuentra ocupada por relieve granítico y metamórfico.

## *Granítico*

Debido a que las rocas plutónicas tienen un enfriamiento dentro de la corteza, solo es posible reconocer formas de relieve exhumadas, lo que implica la retira de una columna de roca indeterminada y/o un basculamiento del basamento granítico. En el caso de la cuenca de Chacahua - La Pastoría se ha propuesto que este cuerpo batolítico es la base de una incipiente corteza de arcos islas acrecionados. Las formas de relieve presentes tienen dos componentes genéticas importantes, una epirogénica de levantamiento por efecto sísmico y otro producto de la exhumación. El resultado permitió reconocer cúpulas en bloques (mesobloques) de fondo y pilar de graben, peniplanos, campos de cúpulas, crestones graníticos, domos degradados, cerros testigos, mesas y laderas en gradería.

En su mayoría el relieve endógeno modelado conformado por rocas graníticas pertenecen al batolito de Río Verde, en esta clasificación se utilizaron las formas graníticas más dominantes. En el sector oriental las formas con mayor extensión fueron los **campos de cúpulas**. Son relieves montañosos de cima convexa e irregular ligeramente suavizadas (Fig. 26). Debido al patrón de drenaje subdendríptico - paralelo dispuesto de forma perpendicular, se presume ampliamente fracturado. Situación que ha sido estudiada a distintas escalas bajo un contexto estructuro-geodinámico por Hernández Santana y colaboradores (1994 y 2009). Dentro de estas investigaciones se reconocieron mesobloques limitados por estructuras con un arreglo morfológico ortogonal.

Entre estos mesobloques podemos distinguir dos sistemas en graben, con posición semejante a un par de pilares (horst) y un fondo. El primero de estos sistemas se localiza sobre la cabecera de la cuenca donde inicia el río San Francisco, presenta un desnivel altitudinal de 170 metros respecto al bloque inferior, tiene una orientación NE-SW que coincide con los lineamientos que lo delimitan (Fig. 27). El pilar de este pseudograbén se encuentra abultado y tiene forma alargada y estrecha, la pendiente en su superficie cumbral es baja, mientras que en su flanco sur muestra un

escarpe muy modelado de gran pendiente asociado al río San Francisco. El bloque sur presenta una diferencia altitudinal de al menos 150 metros con respecto al otro pilar del graben.



Fig. 26. Vista de la premontaña del sector oriental, desde la planicie, justo en la zona entre los ríos San Francisco y Chacalapa. Se muestra el perfil de cúpulas convexas suavizadas (línea morada intermitente) y el inicio del relieve granítico (Tomada de Google Earth, 2021).

El siguiente sistema con un arreglo similar se encuentra hacia la zona sureste donde aún dominan las elevaciones graníticas. La amplitud del bloque en graben es de 1.7 km de ancho y 4.3 km de largo sigue una orientación NE - SW igualmente delimitado por lineamientos. La forma de los tres bloques es más regular y de geometría rectangular, su elevación difiere entre 100 y 130 metros y es mayor con el bloque sur (Fig. 27). La superficie del graben muestra peniplanicies y los bloques de tipo horst son de altitudes similares entre 700 y 750 metros con una geometría convexa.

Las morfologías ubicadas en las zonas más altas de la cuenca se clasificaron como **crestones** debido a su pronunciada forma que resalta sobre los campos de cúpulas graníticas, tienen una distribución que se concentra en el sector nororiental. Su geometría es convexa y de contorno semi circular. Son rasgos particulares que se presentan con frecuencia en este tipo de ambientes litológicos, debido a la resistencia de la roca y su fracturamiento permite que la erosión avance por los planos de mayor debilidad dándole forma de domo (Pedraza, 1996).

Sobre la parte media de la cuenca las altitudes disminuyen gradualmente, esto permite que en la zona occidental se presenten los domos en pedrizas o **domos degradados**, morfología producto de un proceso de exhumación ocurrido en un flanco o techo de un complejo dómico (Pedraza, 1996). Su geometría es semicircular de bordes irregulares, expone material granítico fragmentado,

su orientación es NW-SE, alcanzan una altitud máxima de 280 msnm, mientras que sus dimensiones varían entre 2.5 km de largo y 1.87 km de ancho. Se encuentra parcialmente sepultado por los depósitos proximales de la planicie aluvial. En sus laderas se presentan vertientes con procesos gravitacionales debido a la pendiente de hasta 37°. Estas vertientes muestran modelado por corrientes intermitentes.

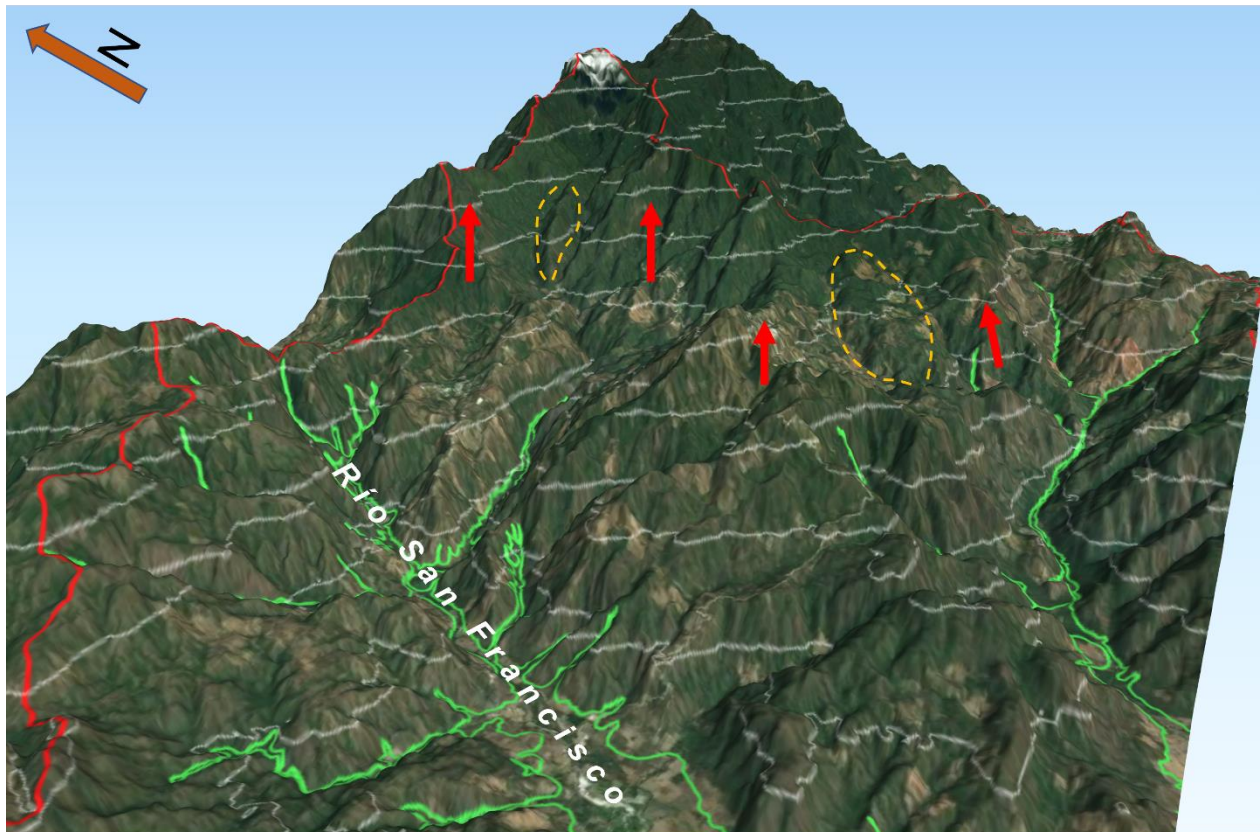


Fig. 27. Diagrama tridimensional en donde se señala las formas de cúpulas en bloques en el fondo del graben (línea intermitente naranja) y las cúpulas en el pilar de los mesobloques (flechas rojas), al E del río San Francisco (la equidistancia de curvas de nivel es de 200 m).

Dentro del relieve exhumado se encuentran las **mesas** graníticas, las cuales son lomeríos de cima convexa amplia desarticulados del macizo montañoso y localizadas principalmente en el dominio de premontaña. Se encuentran en la parte media de la cuenca, son cuerpos tabulares delimitados por lineamientos morfoestructurales con orientación NW-SE y NE-SW, responden al sistema ortogonal de fracturamiento, tienen una altitud que varía entre los 350 y 400 msnm. Otro grupo de mesas se ubican al noreste de la cuenca presenta altitudes de hasta 800 msnm, sus laderas se encuentran afectadas por procesos gravitacionales y sobre su superficie se desarrollan **peniplanicies**, las cuales son áreas relativamente planas que se asocian directamente a la

geometría tabular de las mesas. Estas superficie o terrenos se encuentran parcialmente niveladas (Lugo, 2011). Hacia el noroccidente de la cuenca, muy cercano al área donde se desarrollan los cuerpos metamórficos se encuentra una **ladera en gradería** la cual es una superficie de inclinación que se encuentra seccionada por escalones, se asocia a la erosión diferencial y al desprendimiento en diferentes tiempos de bloques de roca favorecidos por el fracturamiento de la roca. Por último, los **cerros testigo** son el resultado de la continua erosión de las mesas que conduce a la desaparición de la capa dura superior, convirtiéndose en un relicto de las mesas o antecerro (Gutiérrez-Elorza, 2008). Estas morfologías han sido parcialmente sepultadas por los materiales que componen a la planicie aluvial; sus altitudes varían de 50 a 250 msnm y su distribución cubre hasta el ambiente litoral. Las estructuras más cercanas al litoral son las de mayor altitud, particularmente en el Cerro Hermoso se observa un aparente espejo de falla orientado hacia el sur (Fig.24), presenta una pendiente que varía desde 27 hasta 50° de inclinación y una diferencia de altitud de hasta 250 metros.

### 5.2.3 Metamórfico

El relieve metamórfico presente en la cuenca se ubica al extremo noroccidental, su forma es tabular denominado como **plataforma gneísica fuertemente modelada**. Su altitud máxima es de 882 metros, y su superficie es convexa, se encuentran fuertemente disectadas por corrientes fluviales que han generado barrancos profundos. En las laderas frontales se observan cicatrices de desprendimiento en las cabeceras de las laderas con pendientes predominantes de entre 35 a 45°. Los lineamientos morfoestructurales que delimitan a esta estructura forman un sistema ortogonal que va de NW- SE y NE-SW. Mientras que limitando con las rocas graníticas del Batolito de río Verde se expone una falla de carácter lateral derecha.

## 5.3 Morfoestructura

De acuerdo con un enfoque jerárquico-espacial, la morfoestructura es una expresión regional o local de la expresión geológica en el relieve (Guerasimonov 1946 y 1956, en Hernández *et al.*, 1994). Las categorías del relieve se encuentran estrechamente relacionadas, histórica y genéticamente

con la dinámica de los movimientos neotectónicos -parte de la tectónica que se enfoca en los movimientos recientes, principalmente durante el Neógeno-Cuaternario- (Lugo, 2011; Hernández *et al.*, 1994). Por esta razón, la identificación, caracterización y análisis espacial de pedazos de la corteza superior puede ayudar a entender la dinámica del relieve actual. Así los límites morfoestructurales, teóricamente reflejan antiguos sistemas de fallas, estructuras reactivadas y desplazamientos verticales como horizontales, todos ellos debido a la actividad diastrófica (Hérrnandez-Santana *et al.*, 1991; Herrera, 2019). La metodología seguida se menciona en el apartado del 2.3.5 y se ha descrito en Lugo (1998), Hernández y colaboradores (1994 y 2009) y Herrera (2019).

La zona de estudio, debido a su escala, fue estudiada bajo un marco estructural, en donde las unidades obtenidas fueron de mesobloques y bloques geomorfológicos (Tricart, 1965), a partir del reconocimiento de morfolineamientos, fallas reconocidas y evaluación del mapa geomorfológico (Anexo B). El resultado fue el reconocimiento de 1514 morfolineamientos, los cuales integran fallas, fracturas y franjas de debilidad cortical (Fig. 28).

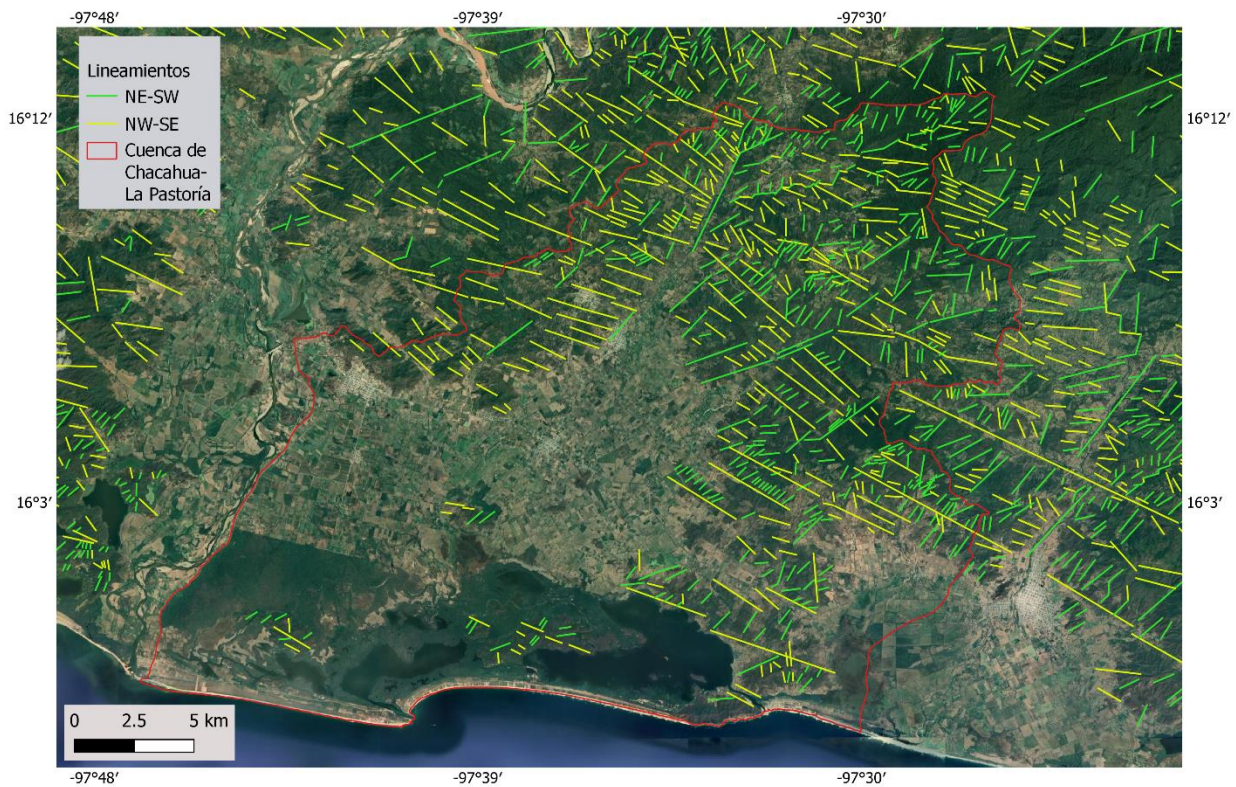


Fig. 28. Mapa de morfolineamientos reconocidos a partir de los modelos digitales de elevación, mapa de pendientes, falso sombreado de relieve y la imagen de satélite.

De estos lineamientos, 667 se encuentran dentro de la cuenca de estudio. Tanto en el mapa (Fig. 28) como en la rosa de dirección dominante, se observa un arreglo ortogonal, en donde las orientaciones de NE 60-65° y 70-75° como NW 40-55° son las preferentes (Fig. 29).

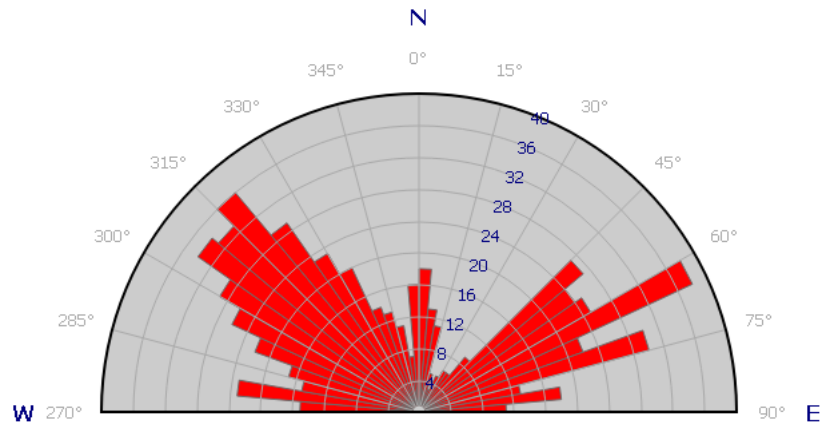


Fig. 29. Gráfica de orientaciones y ocurrencia de morfolineamientos presentes en la cuenca de Chacahua – La Pastoría.

De acuerdo con Hernández y colaboradores (2004), en su trabajo de morfoestructuras del estado de Oaxaca escala 1:1,400,000, la cuenca de Chacahua – La Pastoría presenta morfoestructuras de montaña media, de bloques masivas en la parte alta (Fig. 30). Montañas bajas en bloques isométricos escalonados y trezados por transcurrancia con deformación transpresiva, localizados en los límites de la zona de montaña. Bloques en la premontaña escalonadas y paralelas, también trezadas en transcurrancias y deformación por transpresión. En las elevaciones menores reconocieron lomeríos masivos e isométricos escalonados y paralelos, como aislados en cuencas transgresivas. Para finalizar con una planicie en cuenca transgresiva, ligeramente basculada que ocupa depresiones en graben, así como formando sistemas escalonados y arqueados (Hernández *et al.*, 2009). De acuerdo con los criterios de Hernández y otros (2009), las montañas medias no rebasan los 1300 msnm, las bajas inician a los 800 msnm, los bloques en la zona de premontaña comienza a los 600 msnm y los lomeríos tienen una elevación máxima de 650 msnm. Debido al nivel de análisis las categorías del relieve son de mediana extensión, por lo que tendrían un nivel jerárquico III o de mesobloque.

En el presente trabajo, se fragmentaron 192 bloques (Fig. 31), de acuerdo con la jerarquía precedente las alturas entre bloques muestran importantes variaciones (Fig. 32). Los bloques dentro del dominio de Premontaña, alcanzan alturas máximas de 400 m, se observa un posible fallamiento lateral con componente normal dispuesto de forma oblicua con la línea de costa y que

utiliza el río San Francisco como sitio de emplazamiento. En el mapa de altura máxima de los bloques se observa un pronunciado desnivel altitudinal del sector oriental de la cuenca, con una distancia de la línea de costa hacia la zona de Premontaña de 12 km tan solo para alcanzar más de 550 msnm, mientras que en el sector occidental requiere recorrer una distancia de 28 km para alcanzar la misma altura (Fig. 31). También es evidente que los lomeríos costeros se disponen paralelos a la línea de costa y se forman de manera escalonada.

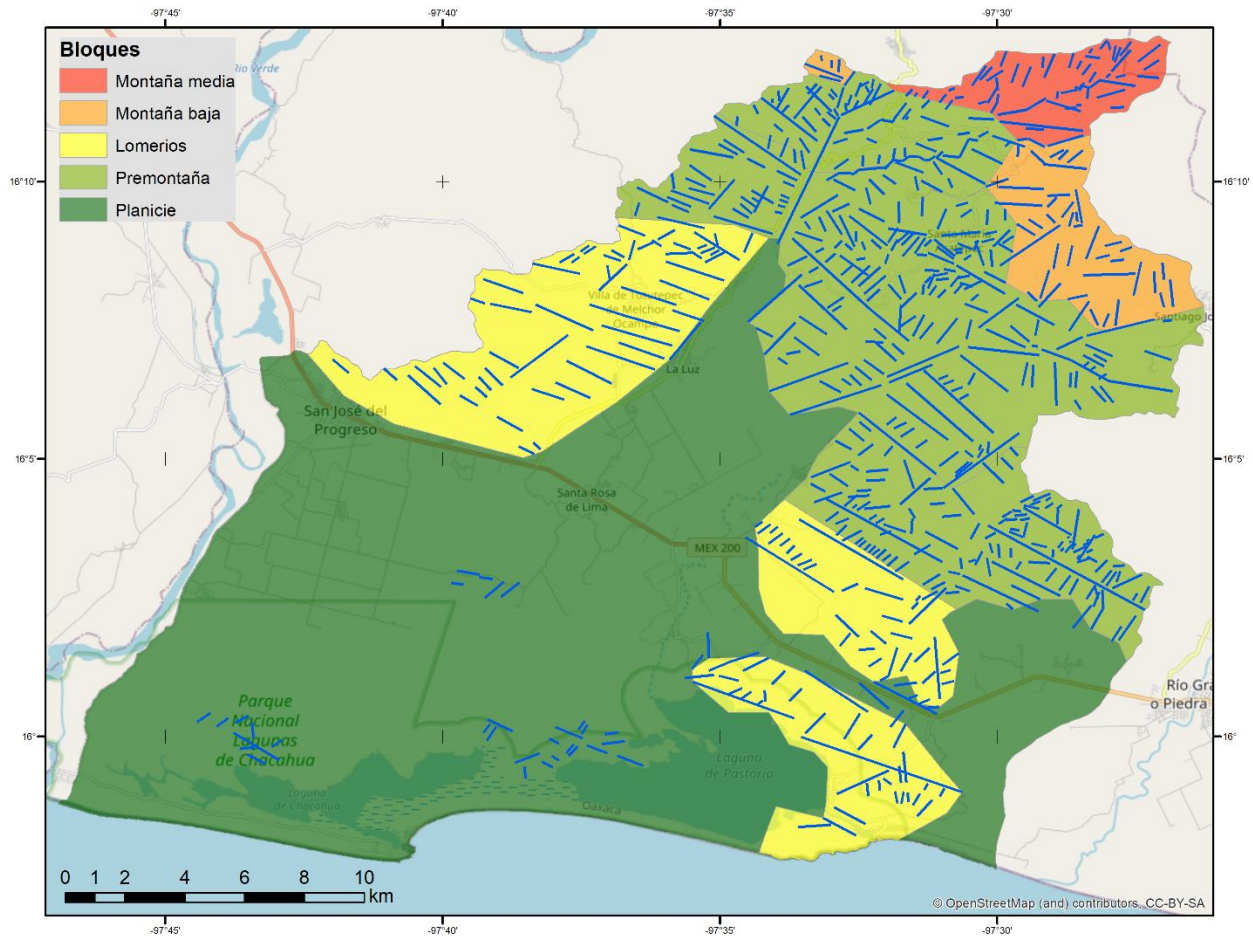


Fig. 30. Categorías del relieve a partir de la delimitación de morfoestructuras del estado de Oaxaca, elaborado por Hernández-Santana y otros (2009).

El arreglo ortogonal de los bloques, ligeramente oblicuos a la línea de costa, pone en evidencia un sistema de fallas que dispone al basamento granítico y metamórfico de forma escalonada. La diferencia altitudinal que presentan los bloques tiene valores de hasta 710 m, con una media de 220 m de altura relativa (Fig. 31). Es posible que la cuenca de Chacahua – La Pastoria, este sujeta a esfuerzos compresivos por efecto de la subducción y que, al liberar la energía acumulada, se

activen fallamientos normales con dirección a la costa. En cambio, tierra adentro la deformación propicia el desarrollo de fallas normales con dirección NE (Fig. 33).

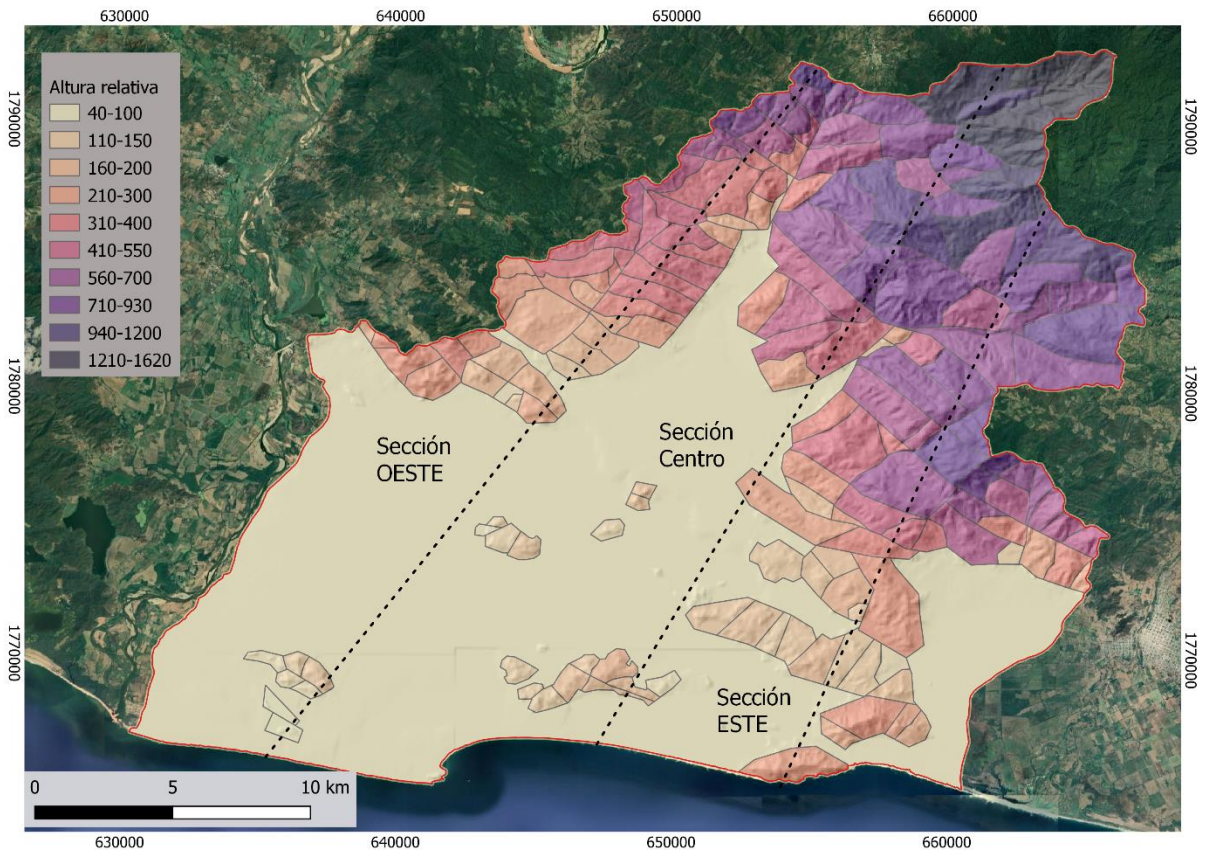


Fig. 31. Bloques corticales de la cuenca de Chacahua – La Pastoría.

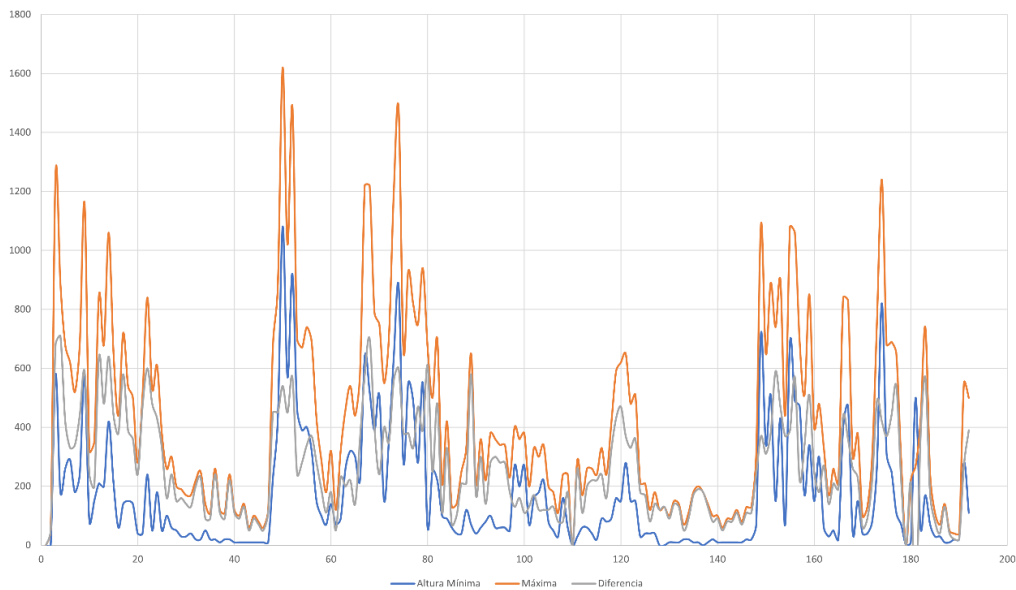


Fig. 32. Histograma de altura mínima y máxima de los 192 bloques delimitados.



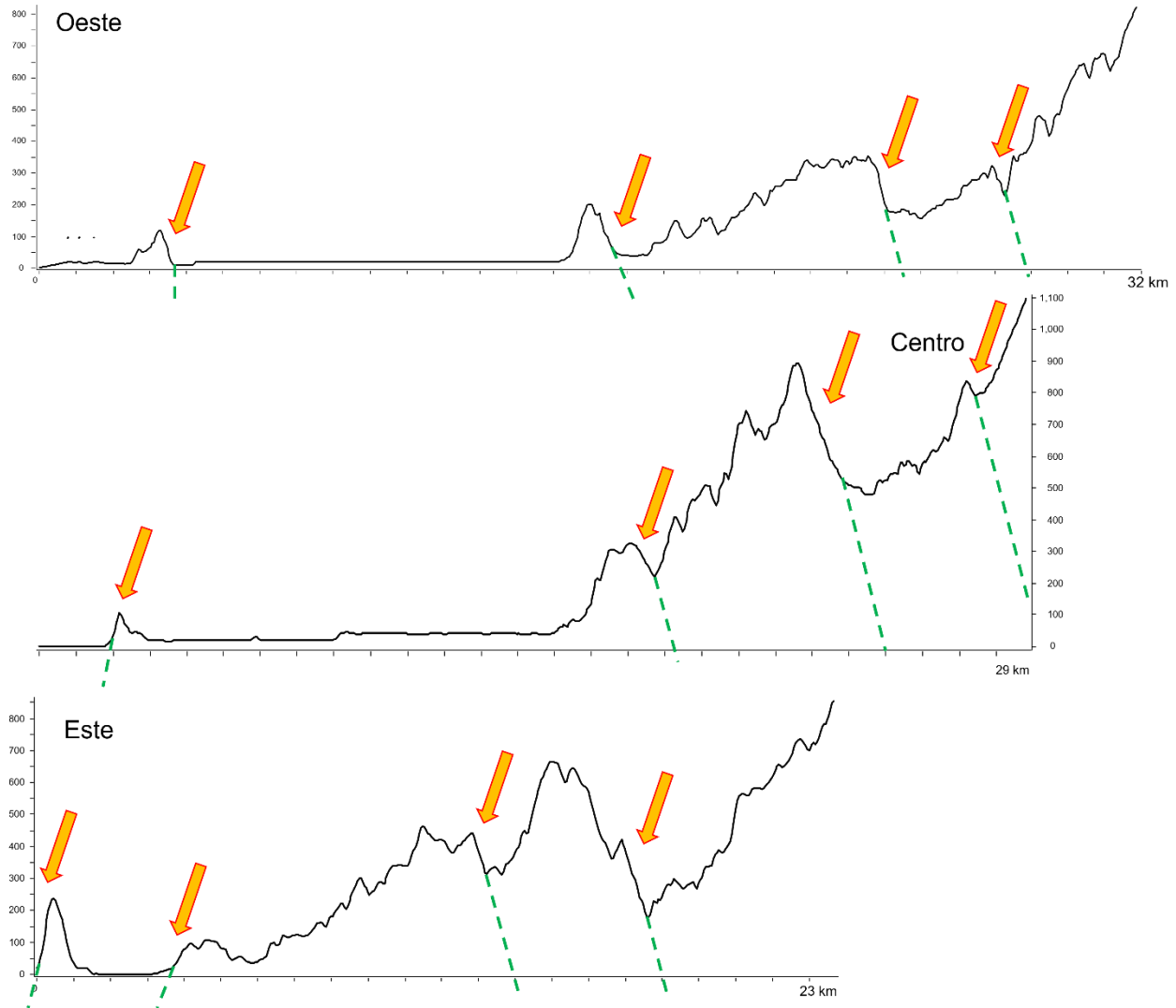


Fig. 33. Secciones topográficas en donde se muestra la disposición de las principales estructuras disyuntivas dentro de la cuenca de Chacahua – La Pastoría. Las flechas amarillas apuntan a lineamientos que posiblemente tengan un movimiento normal en direcciones encontradas en dirección a la línea de costa, las líneas intermitentes verdes pueden ser la continuación del plan o de falla normal. La posición de las secciones se muestra en la fig. 31.

Los resultados del análisis estructural pueden apuntar a que la cuenca de Chacahua – La Pastoría está sujeta a levantamientos episódicos que deforman la planicie aluvial y reduce la amplitud de esta por efecto de un posible movimiento lateral derecho que acorta la distancia de la Premontaña con la línea de costa (Fig. 33).

## **CAPÍTULO VI CONCLUSIONES Y SUGERENCIAS**

---

Podemos concluir que el relieve dentro de la cuenca de Chacahua - La Pastoría se encuentra compuesto por 55 unidades y rasgos geomorfológicos, de los cuales 42 son de origen exógeno y 13 de origen endógeno modeladas y endógenas. La cuenca es controlada por las estructuras disyuntivas, como lo son las fracturas y fallas mismas que permiten el desarrollo de un sistema fluvial profuso. Las unidades se encuentran dispuestas con un patrón ortogonal dominante NW - SE. El río San Francisco es el principal agente modelador de la parte alta de la cuenca.

El relieve de la cuenca de Chacahua - La Pastoría comenzó a formarse después de la exposición del Batolito de Río Verde en la margen continental del SW de México durante el Mioceno en el desplazamiento del bloque de Chortis, aparentemente en la actualidad la subducción continúa modificando la dinámica de exhumación y acortamiento de la planicie aluvial.

Al reconocer los substratos geológicos y la intensa meteorización es posible indicar que el desarrollo de las actividades agropecuarias puede propiciar la compactación de la corteza de intemperismo y contaminar los mantos freáticos. Por lo tanto, debe ser considerado un estudio de capacidad de carga para esta actividad económica. El establecimiento de futuras localidades, así como prospectos de crecimiento urbano puede beneficiarse de la presente investigación al considerar zonas vulnerables a procesos de remoción en masas, inundaciones y flujos de escombros, situación relevante al considerar los desniveles altitudinales dentro de cada bloque estructural.

La disposición de los cuerpos lagunares está totalmente influenciada por el patrón de levantamiento y compresión del frente de subducción. Su deterioro muestra señales de azolve en la boca barra cerca de Cerro Hermoso. Se sugiere que sean impulsadas las acciones de mantenimiento y continuo monitoreo de los cuerpos de agua, así como un programa permanente de conservación en el estuario.

Debe remarcar que las acciones no deben ser aplicadas únicamente al Parque Nacional Lagunas de Chacahua, sino que las condiciones de la parte alta en el afluente principal del Río San Francisco, indispensable para el mantenimiento de la dinámica hidráulica y conservación de todo el sistema lagunar

La hipótesis propuesta en conjunto con los objetivos de la investigación muestra la interrelación directa de la dinámica disyuntiva en la cuenca con la configuración de las formas del relieve. Las unidades geomorfológicas plasmadas en el mapa geomorfológico, así como su morfogénesis y evolución disponen que la cuenca de Chacahua- La Pastoría es dominada por las estructuras geológicas y el comportamiento tectónico de la zona de estudio; sin embargo, los procesos modeladores, principalmente de índole exógeno fluvial condicionan las características del entorno y principalmente los flujos de sedimentos provenientes de la parte alta de la cuenca. De esta manera el análisis geomorfológico diagnostica un dominio del sistema transicional en la cuenca.

La mayor limitación de la investigación se encuentra en el trabajo de campo, el cual enriquecería las descripciones con datos tomados en las unidades. No se descarta que el presente trabajo sea tomado como referencia para posteriores investigaciones que corroboren la veracidad de las descripciones. A pesar de eso, las herramientas tecnológicas permitieron el desarrollo de esta investigación, así también la recopilación analógica de la teoría que se congregan durante el análisis geomorfológico y permiten explicar el relieve de la cuenca.

# Referencias

Aguayo-Camargo, J. E., (1987). Origen y evolución de los rasgos morfotectónicos postcretácicos de México: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana. Tomo 48, 15-39.

Alaniz Álvarez, S. A., y Ortega Gutiérrez, F. (1997). Geología y petrología de la Barranca de Xolapa, estado de Guerrero: Boletín de Mineralogía, 13, 3- 28.

Alcántara Ayala, I., (2000). Landslides: ¿deslizamientos o movimientos del terreno? Definición, clasificaciones y terminología: Investigaciones geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM, 41, 7-25.

Ahnert, F. (1998). Introduction to Geomorphology. Gran Bretaña: Arnold. 360 pp.

Ayuntamiento Villa de Tututepec de Melchor Ocampo, (2014). Plan de Desarrollo Municipal Villa de Tututepec de Melchor Ocampo. Administración 2015 - 2016, Oaxaca.

Bierman, P.R., Montgomery, D.R., (2014). Key concepts in geomorphology. USA: Freeman and Company publishers.

Buenrostro-Silva, A., Antonio-Gutiérrez, M., y García-Grajales, J., (2012). Mamíferos del Parque Nacional Lagunas de Chacahua y la Tuza de Monroy, Oaxaca, México: Acta Zoológica mexicana, 56-72.

Burke, K. C., Cooper, J. F., Dewey, P., Mann, P., y Pindell, J. L., (1984). Caribbean tectonics and relative plate motions, en Bonini, W. E., Hargraves, R. B., y Shagam, R., (eds) The Caribbean - South American Plate Boundary and Regional Tectonics: Geological Society of America Memoir 162, 31 - 63.

Burrough, P.A. y McDonnell, R.A., (1998). Principles of Geographical Information Systems: Oxford University Press, Oxford.

Campa, M. F., y Coney, P. J., (1983). Tectono-stratigraphic terranes and mineral resource distributions in Mexico: Canadian Journal of Earth Sciences, 20, 1040-1051.

Campos, A. (1992). Proceso del Ciclo Hidrológico: Universidad Autónoma de San Luis Potosí. San Luis Potosí, 22-23.

Castillo-Jurado, M. (1992). Morfometría de lagos una aplicación a los lagos del Pirineo. Barcelona: Universidad de Barcelona. Tesis de doctorado.

Castillo Rodríguez, M.E., (2006). Delimitación de unidades biofísicas en el volcán La Malinche con base en el análisis de unidades morfogenéticas. México: UNAM. Tesis de maestría en Geografía.

Cerca, M., (2004). Deformación y magmatismo Cretácico tardío - Terciario temprano en la zona de la Plataforma Guerrero Morelos. Juriquilla, Querétaro: UNAM.

Chorley, R. J., (1962). Geomorphology and general systems theory. Geological Survey Professional Paper 500 B, B1-B10.

- Contreras-Cruz, C. (1996). Hidrodinámica de la laguna de Chacahua. México: UAM. Tesis de licenciatura.
- Coney, P. J., y Campa, M. F. (1984). Terrenos sospechosos de aloctonia y acreción del occidente y sur del continente Norteamericano: Boletín del Departamento de Geología Universidad de Sonora, 1, 1-24.
- Conte, D., Thompson, D., y Moses, L. (1997). Earth Science. An integrated perspective. Estados Unidos de América: McGrawHill.
- Coque, R. (1977). Geomorfología. Madrid: Alianza.
- Dalton, M. (2004). Breve historia de Oaxaca. México: Fondo de Cultura Económica.
- De Cserna, Z., (1965). Reconocimiento Geológico en la Sierra Madre del Sur entre Chilpancingo y Acapulco, Estado de Guerrero: Boletín del Instituto de Geología, 62, 30-32.
- Dickinson, W. R., Lawton, T. F., (2001). Carboniferous to Cretaceous assembly and fragmentation of Mexico. Geological Society of America Bulletin, 113, 1142-1160.
- Dramis, F., Guida, D., y Castari, A. (2011). Nature and Aims of Geomorphological Mapping. En: Smith, M. J., Paron, P. y Griffiths, J. S., Geomorphological mapping Methods and Applications. Gran Bretaña: Elsevier. 39 - 73.
- Ducea, M. N., Gehrels, G. E., Shoemaker, S., Ruiz, J., y Valencia, V. (2004). Geologic evolution of the Xolapa Complex, southern Mexico: Evidence from U-Pb zircon geochronology. Geological Society of America, 1016-1025.
- Espinosa - Rodríguez, L. y Arroyo - López, K., (2011). Geomorfología en México. Una visión histórica, metodológica y aplicada. Editorial Académica Española.
- Evans, I. S. (1972). General geomorphometry, derivatives of altitude and descriptive statistics, en Chorley, R. J., Spatial Analysis in Geomorphology. Londres: Methuen & Co. Ltd., 17-90.
- Ferrari, L., López Martínez, M., Aguirre Díaz, G., y Carrasco Núñez, G. (1999). Space-time patterns of Cenozoic arc volcanism in central Mexico: from the Sierra Madre Occidental to the Mexican Volcanic Belt. *Geology*, 27, 303 - 306.
- Ferrari, L., Bergomi, M., Martini, M., Tunesi, A., Orozco Esquivel, T., y López Martínez, M. (2014). Late Cretaceous-Oligocene magmatic record in southern Mexico: The case for a temporal slab window along the evolving Caribbean-North America-Farallon triple boundary. *Tectonics*, (33), 1738 - 1765.
- Gerrard, J. (1988). Rocks and Landforms. Londres: Unwin Hyman.
- Google Earth 2021. Foto barra de contención Cerro Hermoso. Consultado en AF1QipNUx1atuTtX6g4lj9sbH2s33arq7bhOnqjbuSOk=h1440 (1280x720) (googleusercontent.com), recuperado Oct 2021.

Google Earth, 2021. Foto perfil de cúpulas. Consultada de: AF1QipPF6MwstQcj-Fb3cdd7sehoJXYtrjg-emFTeayi=h1440 (1920×1440) (googleusercontent.com) Recuperada oct. 2021.

Goudie, A. (2004). *Encyclopedia of Geomorphology*. Londres: Routledge.

Goudie, A. (2005). *Geomorphological Techniques*. Nueva York: Routledge.

Gregory, K. J. (2000). *The changing nature of physical geography*. Londres: Arnold.

Gregory, K. J. y Lewin, J. (2014). *The basics of geomorphology*. Londres: SAGE.

Gutiérrez-Elorza, M. (2008). *Geomorfología*. Madrid: Pearson Educación.

Gutiérrez, F. y Gutiérrez, M., (2016). *Landforms of the Earth An Illustrated Guide*. Switzerland, Springer.

Hernández-Bernal, M. (1995). *Geoquímica y origen del Batolito de Río Verde, Oax. terreno Xolapa*. México: Universidad Nacional Autónoma de México.

Hernández-Santana, J.R., Díaz, D., Magaz, G., González, O., Portela, P., Arteaga, B. (1991). *Criterios geomorfológicos de Cuba oriental. En Morfotectónica de Cuba Oriental*. La Habana: Académica.

Hernández, J.R., Ortiz Pérez, M.A., Magaz García, A.R., Díaz Díaz, J.L., Zamorano, J.J., (1994). *Estilos geotectónicos bidimensionales y tridimensionales interbloques: Una nueva categoría neotectónica para la determinación de morfoestructuras montañosas. Investigaciones geográficas Boletín, 28, 9-32.*

Hernández Santana, J.R., Ortiz Pérez, M.A., Mah Eng, M.F., 2009. *Análisis morfoestructural del Estado de Oaxaca, México: Un enfoque de clasificación tipológica del relieve. Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, 68, 7-24.*

Herrmann, U. R., Nelson, B. K., y Ratschbacher, L. (1994). *The origin of a terrane: U/Pb zircon geochronology and tectonic evolution of the Xolapa complex (southern Mexico). Tectonics, 13, 455-474.*

Herrera Lira, H.O., (2019). *Morfotectónica en la porción sur de la Sierra de Juárez, Oaxaca: México, UNAM, Tesis de licenciatura en Geografía.*

Huggett, R.J. (2007). *Fundamentals of geomorphology*. Nueva York: Routledge.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2001) *Conjunto de datos vectoriales fisiográficos. Continuo Nacional. Subprovincias fisiográficas 1:1 000 000, Aguascalientes: INEGI, Serie I.*

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2007) *Red Hidrográfica digital de México. Continuo Nacional. 1:250 000, Aguascalientes: INEGI, Serie I.*

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2008) *Conjunto de datos vectoriales de Unidades Climáticas, 1:1 000 000, Aguascalientes: INEGI.*

- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2010). Red Hidrográfica escala 1:50 000 edición 2.0. [Datos vectoriales] Aguascalientes: INEGI.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2012) Conjunto de datos vectoriales de la carta de uso del suelo y vegetación. Conjunto Nacional, 1:250 000, Aguascalientes: INEGI, serie V.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2013). Conjunto de datos de Perfiles de suelos, 1:250 000, Aguascalientes: INEGI, Serie II.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2016). Encuesta Intercensal. Panorama sociodemográfico de Oaxaca 2015. México: INEGI.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2014). Información Topográfica E14D85 Río Grande o Piedra Parada, 1:50 000, Aguascalientes: INEGI, serie III.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2018). Información Topográfica E14D84-D14B14 San José del Progreso, 1:50 000, Aguascalientes: INEGI, serie III.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2018). Información Topográfica D14B15 El Zapotalito, 1:50 000, Aguascalientes: INEGI, serie III.
- Knight, J., Mitchell, W.A., Rose, J. (2011). Geomorphological field mapping: Developments in Earth Surface Processes, 15, 151-187.
- Lugo Hubp, J. (1988). Elementos de Geomorfología Aplicada (Métodos cartográficos). México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Lugo Hubp, J. (1990). El Relieve de la República Mexicana. Instituto de Geología, 82-111.
- Lugo Hubp, J. (2011). Diccionario geomorfológico. México: UNAM.
- Lugo Hubp, J., Córdova, C., (1992). Regionalización geomorfológica de la República Mexicana. Investigaciones Geográficas, 25, 25-63.
- Madrigal-Uribe, D. (1986). Habitat y uso del suelo como indicadores de la problemática del Parque Nacional Lagunas de Chacahua, Oax. México: UNAM. Tesis de licenciatura en Geografía.
- Mather, P. M. (1972). Areal classification in geomorphology en Chorley, R. J. (ed.), Spatial Analysis in Geomorphology, New York: Harper & Row, 305-322.
- Mendoza-Amézquita, E., Seim, J., Contreras-Romero, L. y Martínez-Rodríguez, V. (2015). Distribución de elementos traza y materia orgánica en los sedimentos del sistema lagunar Chacahua-Pastoria, Oaxaca. Revista Latinoamericana del Ambiente y las Ciencias, 20-29.
- Meschede, M., Frisch, W., Herrmann, U. R. y Ratschbacher, L. (1997). Stress transmission across an active plate boundary: an example from southern Mexico: Tectonophysics, 266, 81-100.
- Meschede, M. y Frisch, W. (1998). A plate-tectonic model for the Mesozoic and Early Cenozoic history of the Caribbean plate: Tectonophysics, 296, 269-291.

Monkhouse, F. y Wilkinson, H. (1952). *Maps and diagrams their compilation and construction*. Londres: Methuen publishing LTD.

Morales Méndez, D. (2018). *Evaluación del método multicriterio para la zonificación de deslizamientos: Huehuetla, Puebla y Metztlán, Hidalgo*. México: UNAM. Tesis de Licenciatura en Geografía.

Morán-Zenteno, D., Martiny, B., Tolson, G., Solís-Pichardo, G., Alba-Aldave, L., Hernández - Bernal, M., Schaaf, P. (2000). Geocronología y características geoquímicas de las rocas magmáticas terciarias de la Sierra Madre del Sur: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 27-58.

Morán-Zenteno, D., Cerca, M. y Duncan Keppie, J. (2005). La evolución tectónica y magmática cenozoica del suroeste de México: avances y problemas de interpretación: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 3, 319-341.

Morán-Zenteno, D., Tolson, G., Martínez-Serrano, R. G., Martiny, B., Schaaf, P., Silva-Romo, G., Solís-Pichardo, G. N. (1999). Tertiary arc-magmatism of the Sierra Madre del Sur, Mexico, and its transition to the volcanic activity of the Trans-Mexican Volcanic Belt: *Journal of South American Earth Sciences*, 12, 513-535.

Morán-Zenteno, D., Corona-Chávez, P., y Tolson, G. (1996). Uplift and subduction erosion in southwestern Mexico since the Oligocene: pluton geobarometry constraints: *Earth and Planetary Science Letters*, 51-65.

Nahmad, S., González, A., y Vásquez, M. (1994). *Medio ambiente y tecnologías indígenas en el sur de Oaxaca*. México: Centro de ecología y desarrollo A.C.

Norini, G., Gropelli, G., Capra, L., De Beni, E., (2004). Morphological analysis of Nevado de Toluca volcano (Mexico): new insights into the structure and evolution of an andesitic to dacitic stratovolcano: *Geomorphology*, 62, 47-61.

Ollier, C. D. (1977). *Terrain Classification: Methods, Application and Principles* en Hails, J. R. *Applied Geomorphology: A Perspective of the Contribution of Geomorphology to Interdisciplinary Studies and Environmental Management*, Elsevier, 277-316.

Ordóñez, M. (2000). El territorio del estado de Oaxaca: una revisión histórica. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía*, 42, 67-86.

Orme, A.R., (2002). Shifting paradigms in geomorphology: the fate of research ideas in an educational context: *Geomorphology*, 47, 325-342.

Ortega Gutiérrez, F. (1981). Metamorphic belts of southern Mexico and their tectonic significance: *Geofísica Internacional*, 20, 177 - 202.

Ortega Gutiérrez, F. y Corona Esquivel, R. (1986). La falla de Chacalapa: Sutura típica entre los terrenos Zapoteco y Chatino (resumen). *Reunión Anual 1986 de la Unión Geofísica Mexicana GEOS (núm. Extraordinario)*.



- Ortega-Gutiérrez, F. y Morán-Zenteno, D. (2014). A review of batholiths and other plutonic intrusions of Mexico: *Gondwana Research*, 26, 834-868.
- Ortiz Pérez, M. A., Hernández Santana, J. R., y Figueroa Mah-Eng, J. M. (2004). Reconocimiento fisiográfico y geomorfológico, en García-Mendoza, A. J., Ordoñez, M. D., y Briones-Salas, M. Biodiversidad de Oaxaca, México: Redacta S.A de C.V, 43-54.
- Pardo, M. y Suárez, G., (1993). Steep subduction geometry of the Rivera plate beneath the Jalisco block in western Mexico. *Geophysical research letters*, 20, 2391-2394.
- Paron, P. y Claessens, L. (2011). Makers and User of Geomorphological Maps en Smith, M. J., Paron, P. y Griffiths, J. S. (eds.), *Geomorphological mapping Methods and Applications* Gran Bretaña: Elsevier, 75-106.
- Pavlopoulos, K., Evelpidou, N., y Vassilopoulos, A. (2009). *Mapping Geomorphological Environments*, Berlin: Springer.
- Pedraza Gilsanz, J.d. (1996) *Geomorfología. Principios, métodos y aplicaciones*. España: Editorial Rueda.
- Peña-Monné, J. L. (1997). *Cartografía Geomorfológica. Básica y aplicada*. España: GEOFORMA.
- Pérez-Delgado, P. E. (2002). Los recursos naturales: riqueza, amenazas y conservación en Alfaro, M. y Sánchez, G. (eds.), *Chachaua: reflejos de un parque*. México: Plaza y Valdés.
- Pérez-Ortega, A. (2008). *Diversidad de la comunidad de peces de la laguna de Chacahua, Oax., México*. UNAM: México. Tesis de licenciatura en Biología.
- Pike, R., Evans, I., y Hengl, T. (2009). *Geomorphometry: A brief Guide*. En: Hengl, T. y Reuter, H. (eds.), *Geomorphometry: Concepts, Software, Applications*. *Developments in Soil Science*. Hungría: Elsevier, 1-28.
- Quesada Román, A. y Barrantes Castillo, G. (2017). Modelo morfométrico para determinar áreas susceptibles a procesos de ladera: *Investigaciones Geográficas*, 94, 1-12.
- Ramírez-Herrera, M.T., Kostoglodov, V., Urrutia-Fucugauchi, J., (2004). Holocene-emerged notches and tectonic uplift along the Jalisco coast, Southwest Mexico: *Geomorphology*, 58, 291-304.
- Ríos, F., Sandoval, G. y Frías, A. (2005). Recognition of Environmentally Vulnerable Depositional Facies in the Chacahua Lagoon, Oaxaca, México: *Pesquisas em Geociências*, 32, 17-28.
- Riller, U., Ratschbacher, L., y Frisch, W. (1992). The Tierra Colorada deformation zone: left lateral transtension along the northern boundary of the Xolapa Complex, southern Mexico: *Earth Sciences*, 5, 237-249.
- Ritter, D., Craig, R., y Miller, J. (1995). *Process Geomorphology*. Waveland Press Inc.
- Rodríguez-Canto, A. (2010). *La costa de Oaxaca: ayer y hoy*. México: Universidad de Chapingo.

- Sanay-González, R. (1997). Simulación de la circulación en el sistema lagunar Chacahua-Pastoría, Oax., México: UNAM, Tesis de maestría.
- Schaaf, P., Morán-Zenteno, D., Hernández-Bernal, M., Solís-Pichardo, G., Tolson, G., & Köhler, H. (1995). Paleogene continental margin truncation in southwestern Mexico: Geochronological evidence: *Tectonics*, 14, 1339-1350.
- Scheidegger, A. E. (1992). Limitations of the system approach in geomorphology: *Geomorphology*, 5, 213-217.
- Sedlock, R. L., Ortega Gutiérrez, F. y Speed, R. C. (1993). Tectonostratigraphic terranes and tectonic evolution of Mexico, Geological Society of America, Special Paper, 278, 153 p.
- Servicio Geológico Mexicano. (2002). Carta geológico-minera Puerto Escondido D14-3 Oaxaca. 1:250 000, Pachuca: SGM.
- Servicio Meteorológico Nacional. (2018). Estaciones Meteorológicas Automáticas EMAS. Servicio Meteorológico Nacional. Recuperado el día 2 de abril de 2018 de <https://smn.conagua.gob.mx/es/observando-el-tiempo/estaciones-meteorologicas-automaticas-ema-s>
- Schumm, S. A. (1979). Geomorphic thresholds: the concept and its applications. *Transactions of the Institute of British Geographers*, 4, 485-515.
- Silva-Romo, G., y Mendoza-Rosales, C. C. (2009). Evaluación geológica de los modelos para el truncamiento cenozoico del sur de México: Erosión por subducción y detachment del bloque Chortís: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 165-176.
- Smith, M., Paron, P., y Griffiths, J. (2011). *Geomorphological Mapping, methods and applications*. Gran Bretaña: Elsevier.
- Strahler, A. N., y Strahler, A. H. (1989). *Geografía Física*. Barcelona: OMEGA.
- Summerfield, M. (1997). *Global Geomorphology*. Singapore: Adison Wesley Longman.
- Talavera-Mendoza, O., Ruiz, J., Corona-Chavez, P., Gehrels, G. E., Sarmiento-Villagrana, A., García-Díaz, J. L., y Salgado-Souto, S. A. (2013). Origin and provenance of basement metasedimentary rock from the Xolapa Complex: New constraints on the Chortis-southern Mexico connection: *Earth and Planetary Science Letters*, 188-199.
- Thorn, C.E. (1988). *An introduction theoretical geomorphology*. Boston: UNWIN.
- Tolson, G. (2005). La falla de Chacalapa en el sur de Oaxaca: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, LVII, 111-122.
- Trenhaile, A. S. (2004). *Geomorphology: a canadian perspective*. Oxford: Don Mills Ontario.
- Tricart, J. (1965) *Principios y métodos de la geomorfología*. París: Mason.

Valencia-Moreno, M., y Ortega-Rivera, A. (2011). Cretácico Tardío-Eoceno Medio en el noroeste de México - Evolución del arco magmático continental y su contexto geodinámico (Orogenia Laramide): Calmus Thierry Panorama de la Geología de Sonora, 1-26.

Verstappen-Theodoor, H. (2011). Old and New Trends in Geomorphological and Landform Mapping en Smith, M, Paron, P. y Griffiths, J., Geomorphological mapping, Gran Bretaña: Elsevier, 13-28.

Vidal-Zepeda, R. (2005). Las regiones climáticas de México. México: Instituto de Geografía.

Von Bertalanffy, L. (1986). Teoría General de los Sistemas. México: Fondo de Cultura Económica.

Widmer, R. (1990). Conquista y despertar de las costas de la mar del Sur (1521-1684). México: CONACULTA.

World Reference Base. (2015). Base referencial mundial del recurso suelo 2014, Actualización 2015. Sistema internacional de clasificación de suelos para la nomenclatura de suelos y la creación de leyendas de mapas de suelos. Roma: FAO.

Zaragoza Zúñiga, N., (2006) Procesos de ladera en la región de Cuetzalan: Un enfoque geomorfológico. México, UNAM. Tesis de Licenciatura en Geografía.

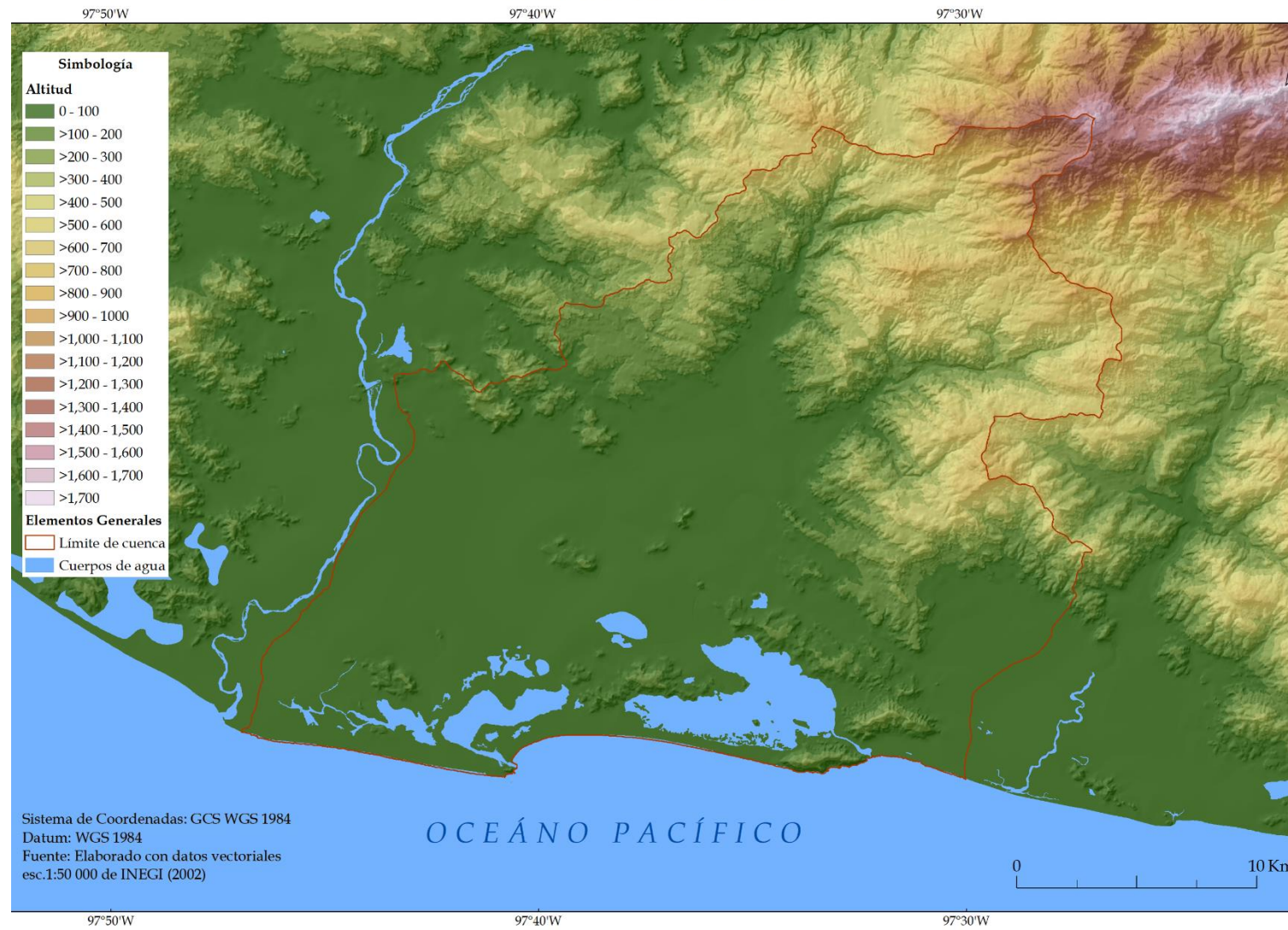
Zavala-Cruz, J., y Rodríguez-Espinosa, P. (1983). Estudio sedimentológico preliminar del sistema lagunar Chacahua-Pastoría, Oaxaca, México. (resumen) en IX Congreso Nacional de Geografía: Guadalajara, Sociedad Mexicana de Geografía y Estadística, 68- 86.

Zavala-Cruz, J. (1985). Geomorfología fluvial del curso bajo del río Verde, Oaxaca. México: UNAM. Tesis de Licenciatura en Geografía.

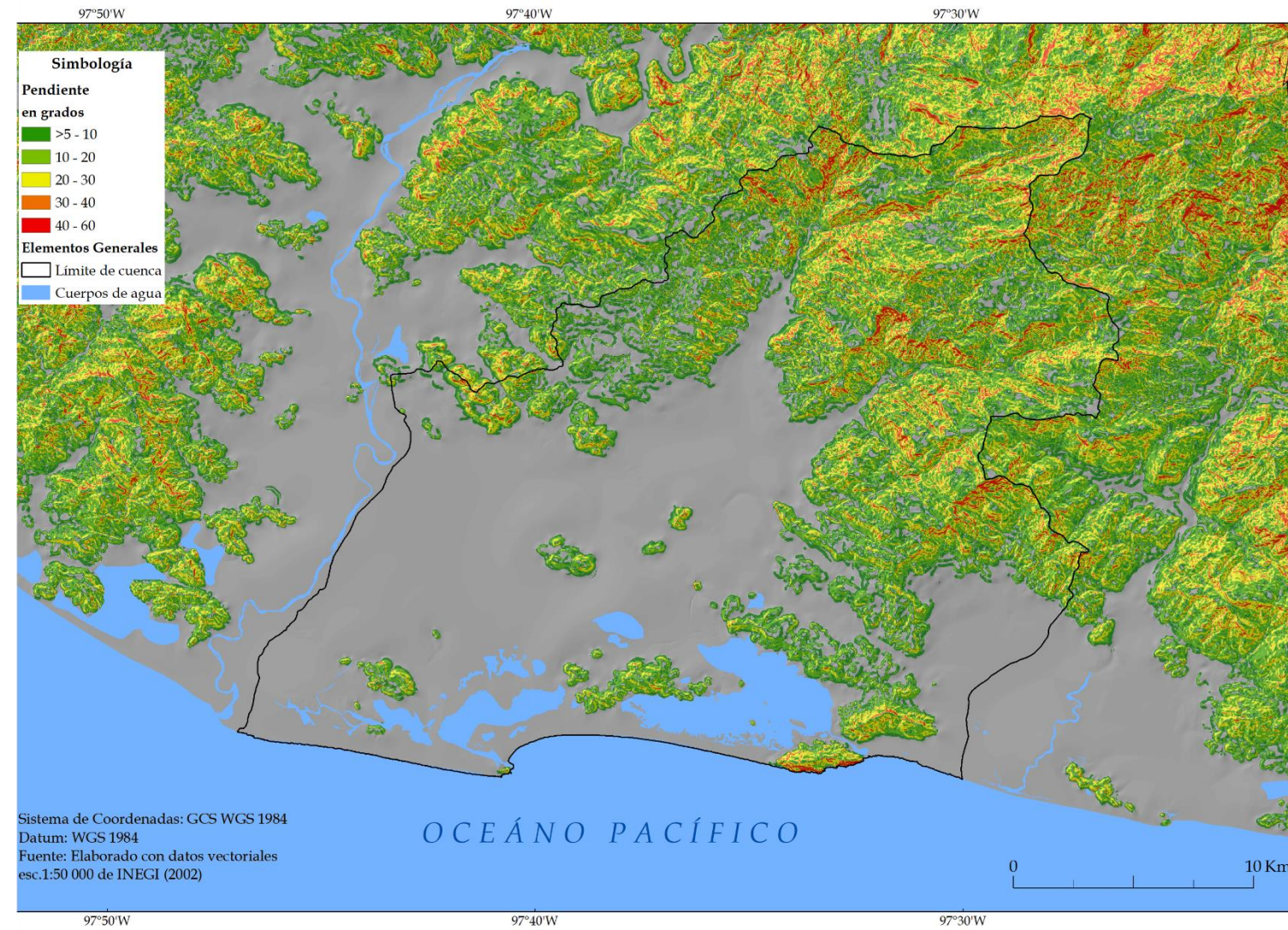
# Anexo A

Mapas morfométricos de hipsometría, pendiente del terreno, energía del relieve y curvatura.

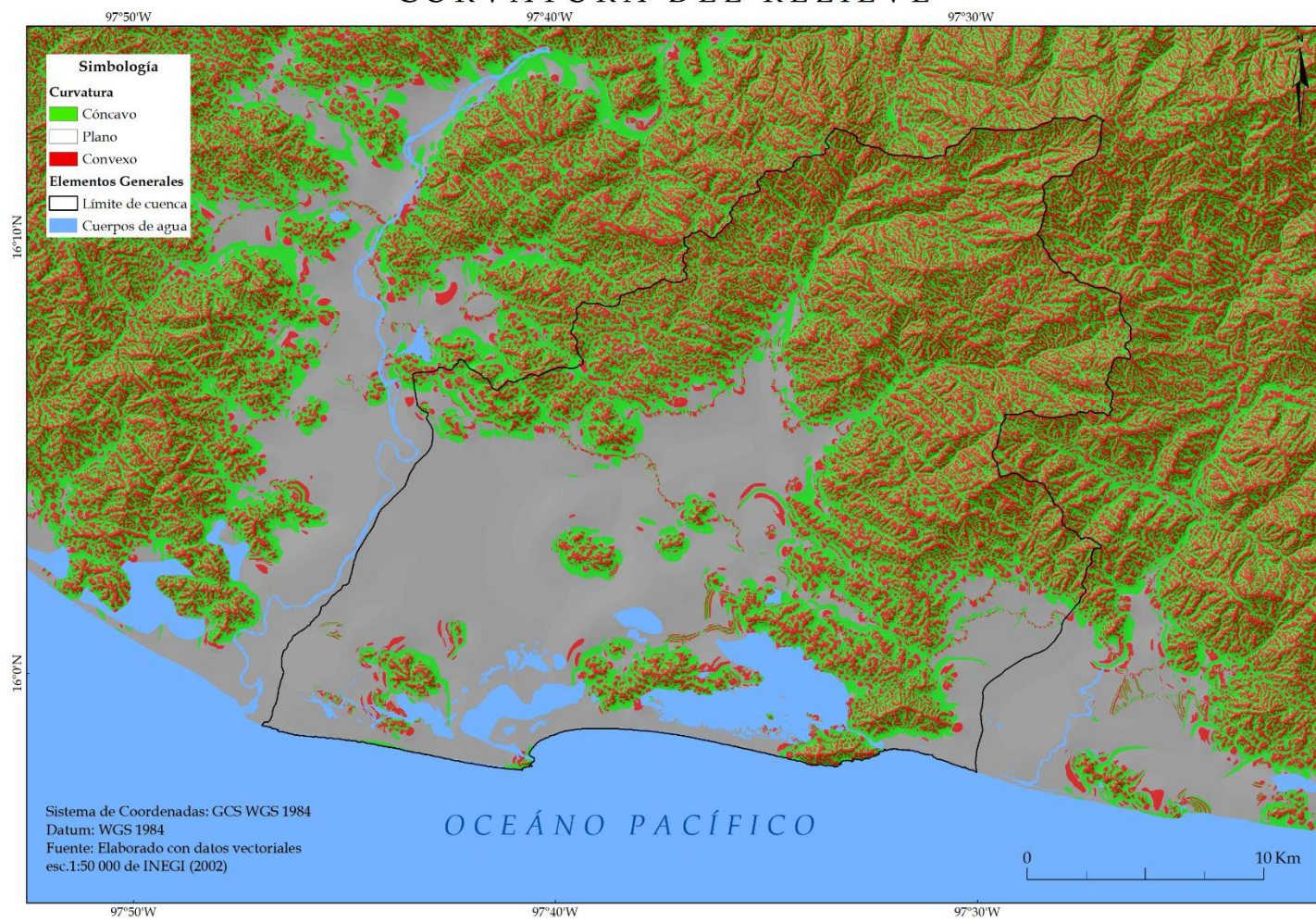
## HIPSOMETRÍA



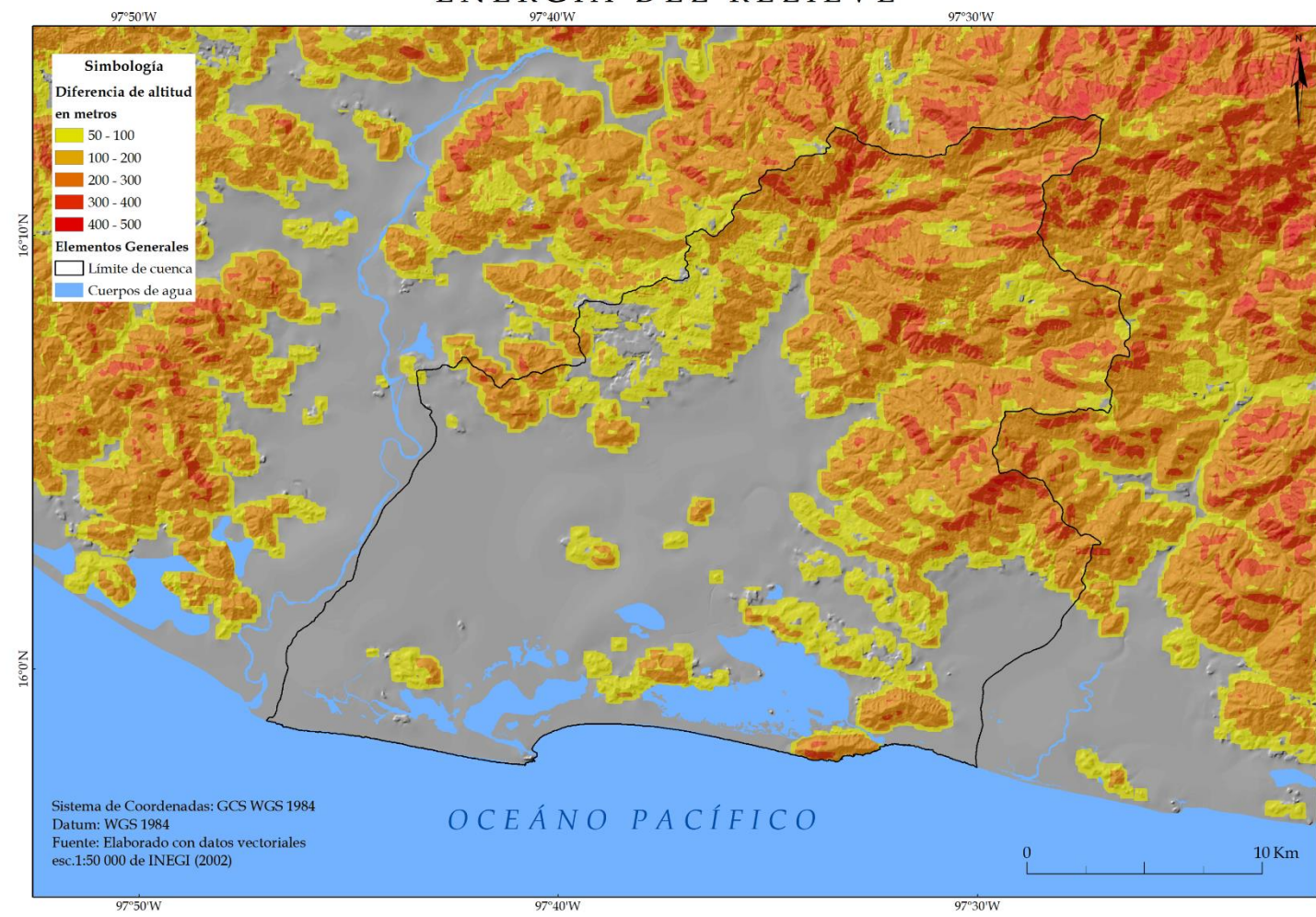
## PENDIENTES



## CURVATURA DEL RELIEVE



## ENERGÍA DEL RELIEVE



# CUENCA DEL SISTEMA LAGUNAR CHACAHUA-LA PASTORÍA, OAXACA.

