



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MEXICO**  
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN GEOGRAFÍA

**ÍNDICES GEOMORFICOS Y TECTÓNICA ACTIVA DE LA CUENCA DEL RÍO  
MARQUELIA, GUERRERO, MÉXICO.**

**TESIS:**  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
MAESTRO EN GEOGRAFÍA

**PRESENTA:**  
DAVID ROMERO HERNÁNDEZ

**DIRECTORA DE TESIS:**  
DRA. MA. TERESA RAMÍREZ-HERRERA  
FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS

CIUDAD UNIVERSITARIA, CIUDAD DE MÉXICO, NOVIEMBRE 2019



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



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

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

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

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

## AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), al programa de Posgrado en Geografía, y a la Dirección General de Estudios de Posgrado (DGEP) por la oportunidad y facilidades brindadas en el desarrollo de los estudios para esta investigación.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por haberme aceptado como becario con el número 632601 para ser beneficiario de este apoyo durante la duración del programa de maestría en Geografía.

A Proyectos – PAPIITIN109117/CONACyT – SEP 284365 por el apoyo económico y de logística durante la realización de esta tesis, cuyos objetivos se enmarcan en los de estos proyectos bajo la responsabilidad técnica de la Dra. Ma. Teresa Ramírez-Herrera.

A la Dra. Ma. Teresa por todo el tiempo dedicado a esta investigación, por sus palabras certeras, concretas y directas, por la gran vocación que tiene como docente y sobre todo por siempre compartir su conocimiento y experiencia.

Al Dr. José Juan Zamorano Orozco, quien tiene siempre la dedicación de revisar meticulosamente el trabajo de cualquier estudiante y siempre aportar mucho, gracias por sus comentarios que enriquecieron esta investigación.

Al Dr. Jan Cerny por su apoyo en campo y gabinete, y cuyos comentarios en todo momento fueron de gran valor para el contenido de este trabajo.

Al Dr. Krzysztof Gaidzik, quien a pesar de la distancia se tomó el tiempo de hacer aportaciones importantes en esta investigación, así mismo por su dedicación en el uso y aplicación de índices geomórficos y cuyas investigaciones fueron una gran influencia para esta tesis.

Al Mtro. Pedro Montes Cruz por todos sus comentarios a esta investigación y por sus consejos para mi desarrollo académico y profesional.

En general a toda la planta docente del Programa de Maestría en Geografía por toda su dedicación y aportación de conocimiento que se aprovecharon de la mejor manera para este proyecto de investigación.

A mi madre y hermanos que siempre me apoyaron y que en algún momento labraron el camino para que yo tenga mejores condiciones, ahora se ven los frutos de todo este esfuerzo.

A Lidia, Valeria y Vanessa por todo lo que son para mi.

## CONTENIDO

<b>1.</b>	<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1.</b>	<b>Preguntas de investigación.....</b>	<b>4</b>
<b>1.2.</b>	<b>Hipótesis.....</b>	<b>4</b>
<b>1.3.</b>	<b>Objetivos.....</b>	<b>4</b>
1.3.1.	General.....	4
1.3.2.	Específicos.....	4
<b>1.4.</b>	<b>Zona de estudio.....</b>	<b>6</b>
1.4.1.	Geología.....	7
1.4.2.	Clima.....	8
1.4.3.	Hidrología.....	9
1.4.4.	Sismicidad.....	9
1.4.5.	Tectónica.....	11
<b>2.</b>	<b>MARCO TEORICO.....</b>	<b>13</b>
<b>2.1.</b>	<b>Geomorfología tectónica.....</b>	<b>13</b>
2.1.1.	Procesos tectónicos como agentes endógenos generadores de cambios en el relieve.....	13
2.1.2.	Agentes exógenos y su actividad en el modelado del relieve - terrazas fluviales.....	14
<b>2.2.</b>	<b>Índices geomórficos.....</b>	<b>15</b>
<b>2.3.</b>	<b>Placas tectónicas y Sismicidad.....</b>	<b>16</b>
2.3.1.	Placas tectónicas y subducción.....	17
2.3.2.	Placas tectónicas en México.....	18
<b>2.4.</b>	<b>Zona de Subducción Mexicana (ZSM).....</b>	<b>19</b>
2.4.1.	Sismo / terremoto.....	20
2.4.2.	Sismicidad en México.....	20
<b>2.5.</b>	<b>Tectónica.....</b>	<b>22</b>
2.5.1.	Deformación cosísmica.....	22
2.5.2.	Deformación intersísmica.....	22
<b>3.</b>	<b>METODOLOGÍA.....</b>	<b>25</b>
<b>3.1.</b>	<b>Geomorfología del valle del Río Marquelia.....</b>	<b>27</b>
3.1.1.	Análisis de la Red Hídrica.....	27
3.1.1.1.	Delimitación de cuenca hidrológica.....	28
3.1.1.2.	Delimitación del DEM con la cuenca obtenida.....	30
<b>3.2.</b>	<b>Índices geomórficos.....</b>	<b>32</b>
3.2.1.	Cantidad de mínima erosión ( <i>minimum bulk erosion</i> ).....	32

3.2.2.	<b>Relación de volumen – área <math>R_{VA}</math>.</b>	33
3.2.3.	<b>Índice de gradiente – longitud SL. (<i>stream length-gradient index</i>).</b>	34
3.2.4.	<b>Franja de perfiles longitudinales (Swath).</b>	37
<b>3.3.</b>	<b>Terrazas.</b>	38
<b>3.4.</b>	<b>Fallas.</b>	39
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS.</b>	41
<b>4.1.</b>	<b>Análisis de la Red Hídrica.</b>	41
<b>4.2.</b>	<b>Aplicación de Índices geomórficos en tectónica activa.</b>	45
4.2.1.	Cálculo de la Cantidad Mínima de Erosión.	45
4.2.2.	Cálculo de la Relación Volumen – Área.	46
4.2.3.	Índice de Gradiente - Longitud (SL).	47
4.2.4.	Franja de perfiles longitudinales (Swath).	48
<b>4.3.</b>	<b>Terrazas.</b>	49
<b>4.4.</b>	<b>Fallas.</b>	51
<b>4.5.</b>	<b>Trabajo de Campo</b>	52
4.5.1.	Terrazas.	53
<b>5.</b>	<b>DISCUSIÓN.</b>	62
<b>5.1.</b>	<b>Geomorfología de la Cuenca del Río Marquelia</b>	62
<b>5.2.</b>	<b>Análisis de la Red Hídrica.</b>	62
<b>5.3.</b>	<b>Índices geomórficos.</b>	63
5.3.1.	Cantidad de mínima erosión (minimum bulk erosion).	63
5.3.2.	Relación de volumen – área $R_{VA}$ .	64
5.3.3.	Índice de gradiente – longitud SL. ( <i>stream length-gradient index</i> ).	64
5.3.4.	Índice normalizado de la pendiente del cauce $K_{sn}$ , ( <i>normalized channel steepness index</i> ).	65
5.3.5.	Perfil longitudinal del cauce principal. ( <i>longitudinal stream profiles</i> ).	65
<b>5.4.</b>	<b>Terrazas.</b>	66
<b>5.5.</b>	<b>Fallas.</b>	68
<b>6.</b>	<b>CONCLUSIÓN.</b>	71
1.	Referencias Bibliográficas.	72
2.	Referencias Cartográficas.	76
3.	Referencias tecnológicas. Software.	77

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localización de la zona de estudio. Fuente elaboración propia con datos de INEGI (2010b). .....	6
Figura 2. Geología de la zona de estudio. Fuente: INEGI, 2010c. ....	7
Figura 3. Climas de la zona de estudio. CONABIO et al. (2007) y García, (1998). ....	8
Figura 4. Cuencas hidrográficas. (INEGI 2010d, CONABIO et al., 2007). ....	9
Figura 5. Localización de los sismos más importantes en México (Kostoglodov and Pacheco, 1999). ....	10
Figura 6 Tipos de límites entre las placas tectónicas. Fuente: Modificado de Vigil (1999). ....	17
Figura 7. Diagrama de la distribución de las placas tctónicas en el mundo. USGS (2019). ....	18
Figura 8. Deformación cosismica y deformación intersísmica. Arriba la deformación cosismica mas la deformación intersísmica y su resultado observado en donde la estrucutura geologica es importante. Abajo la deformación intersismica y las dos eapas de comportamiento, la primera es la relajación postsismica en combinación con el flujo viscoso del manto, y en segundo lugar la flexibilidad a la carga de sedimentos erosionados. Fuente: Modificado de (Burbank and Anderson, 2001). ....	24
Figura 9. Metodología. Análisis de contrastes del relieve, cambios por tectónica diferencial, variaciones en las tasas de erosión e incisión por la actividad fluvial. ....	25
Figura 10. Identificación del punto más bajo de acuerdo con la red de drenaje obtenida con los procesos de Flow direction y Flow Accumulation. ....	30
Figura 11. Delimitación del DEM al perímetro de la cuenca del Río Marquelia para la elaboración de los índices geomórficos. ....	31
Figura 12. Esquema para el cálculo del Índice de gradiente – Longitud. Modificado de Hack (1973) .....	35
Figura 13. Elementos para calcular el índice SL. A. punto de mayor altura del segmento. B. Punto de menor altura del segmento. C. Punto sobre línea divisoria. D. Punto medio del segmento. La diferencia de alturas ( $\Delta H$ ) se obtiene por A-B, La diferencia de longitud $\Delta L$ es de 1 km y la longitud L es la distancia medida desde el punto C hasta el punto D sobre el cauce del escurrimiento. ....	36
Figura 14. Cálculo del Índice SL. Datos obtenidos de los segmentos y organizados en una hoja de cálculo. ....	37
Figura 15. Se generó una retícula de 15 x 54 km con celdas de 1 km por lado a lo largo y ancho del cauce del Río Marquelia para obtener a partir de estas celdas los valores de la altura Máxima, Mínima y Promedio con los que se generó el perfil longitudinal. ....	38
Figura 16. Red Hídrica y Orden de la red de la cuenca del Río Marquelia. Se muestra el orden de los ríos de la red de acuerdo con la clasificación de Strahler (1952). ....	41
Figura 17. En azul el límite de cuenca del Río Marquelia obtenida, y en negro el de la subcuenca de INEGI, 2010b. ....	42
Figura 18. Izquierda. Zonas identificada a partir de las pendientes obtenidas. Derecha. Perfiles longitudinales del valle del Río Marquelia, en Zona I se llegan a obtener valores de 200 m de altura relativa respecto a la base del cauce, así mismo en la Zona II estas alturas llegan a los 100 m mientras que en la Zona III son de alturas bajas con algunos picos de hasta 70 m, en esta última zona se observa un valle amplio que se va reduciendo hacia las zonas II y I respectivamente. ....	44

Figura 19. Índice de Mínima Erosión. Superficie hipotética (A) es el modelo de pre – erosión en el que se obtienen valores de hasta 1,293 m <sup>3</sup> erosionados. Cuenca del Río Marquelia (B). Se observa que la acción fluvial ha trabajado más en la zona norte (A) de la cuenca, con este indicador se puede identificar una zona norte de máxima erosión y una zona sur de acumulación de sedimentos, puesto que el resultado es de hasta -177 m <sup>3</sup> de erosión. Derivado de este índice es posible identificar tres zonas en función de la distribución de los valores del modelo de pre – erosión. ....	45
Figura 20. Distribución de la erosión mínima en tres grandes zonas dentro de la cuenca del Río Marquelia. ....	46
Figura 21. Gráfica del índice Gradiente – Longitud (SL). Perfil topográfico del Río Marquelia con la sobreposición del índice SL, ambos se relacionan con el tipo de roca representado en las bandas de colores en la parte inferior. ....	48
Figura 22. Franja de perfiles longitudinales. Valores: Máximos en azul. Mínimo en verde y Promedio en negro. Se observa tres cambios significativos de la elevación del río. Litología al borde inferior de la gráfica. ....	49
Figura 23. Digitalización de terrazas utilizando Google Earth (Google, 2018), se identificaron un total de 103 polígonos. ....	49
Figura 24. Terrazas identificadas y su distribución por zonas para el análisis y vista en campo. ....	50
Figura 25. Derivado del análisis de la trayectoria de los cauces se identificaron 4 zonas en las que se infiere la presencia de fallas. ....	51
Figura 26. Sitio de falla Inferida. Punto GPS 185: Zona de cambio de altura del río, así como inicio del cambio de trayectoria. Puntos GPS 182 y 183 identificación de afloramientos de roca. ....	52
Figura 27. Knickpoint. A) Ancho del Río antes del cambio de altura identificado. B) Ancho del río posterior al salto observado. ....	53
Figura 28. Terrazas localizadas en las zonas de visita. Q1 terrazas con mayor altura relativa y menor cercanía al cauce, Q2 terrazas con menor altura relativa. Q3 Terrazas de menor altura relativa y junto al cauce del Río. ....	54
Figura 29. Zona I. Identificación de terrazas, en esta zona todas corresponden al tipo Strath. ....	55
Figura 30. Zona Centro. Clasificación de terrazas Aluviales y Strath. ....	57
Figura 31. Terrazas de tipo Strath con altura relativa de 5.09 m, sin presencia de suelo o sedimentos y con depósito de arena. ....	58
Figura 32. Zona III. Identificación de terrazas y clasificación por tipo. ....	59
Figura 33. Izquierda. Roca rodada o depositada en el sitio con altura aproximada de 2 m, en esta sección del río el relieve predominante es de rocas de este tipo. Derecha. Ladera derecha del río constituida por roca desnuda. ....	59
Figura 34. Zona Sur. Clasificación de terrazas Aluviales y Strath. ....	60

## **Resumen.**

*Por su ubicación geográfica México se localiza en la placa tectónica de Norte América y una pequeña zona al sureste corresponde a la Placa del Caribe, al sur de ambas se localiza la Placa de Cocos, en este límite conformado por estas y la acción de subducción de la última en mención se hace evidente por una gran cantidad de sismos, así como fuerzas de tensión y empuje que influyen o modifican el relieve en los estados del sur del país. El presente estudio tiene como objetivo identificar los resultados de dichas fuerzas modeladoras en la cuenca del Río Marquelia, Guerrero, México, con base a indicadores geomórficos y al análisis de la red hídrica identificando patrones de comportamiento que indiquen la presencia de fallas, así mismo se utilizó la interpretación de imágenes satelitales de libre acceso para la identificación de terrazas fluviales. Los resultados obtenidos muestran alteraciones en el relieve como terrazas de tipo Strath, valles que reflejan el encajamiento del cauce a consecuencia del levantamiento tectónico y patrones en el cauce del río que sugieren la presencia de fallas. Los indicadores utilizados también arrojan evidencia de los cambios en la trayectoria vertical del cauce del Río Marquelia, la cantidad de erosión que ha sufrido la cuenca a partir de una superficie hipotética y las anomalías que reflejan los cambios de la corriente, indicando la influencia de desplazamientos asociados a la tectónica activa.*



## **1. INTRODUCCIÓN.**

La actividad tectónica en México es un fenómeno de gran interés para la investigación y sus aplicaciones para el bienestar y desde diversos puntos de vista como el levantamiento de la corteza, la profundidad de las placas tectónicas, la manera como converge una debajo de la otra, la metamorfosis que sufren las rocas por la tensión, fricción, combinación con la salinidad del océano y la actividad sismotectónica, en fin, son muchas las aristas que pueden ser estudiadas al respecto.

Así como hay áreas de estudio alrededor de esta temática, también existen muchos métodos para identificar movimientos o desplazamientos de las placas tectónicas, realizar mediciones de estos movimientos, observar los cambios derivados de este fenómeno como los que se ven reflejados en el relieve que se modela como repuesta.

Esta investigación se basa en la aplicación de algunos índices geomórficos que muestran la forma y topografía del relieve, la trayectoria del cauce de un río, así como sus cambios en la incisión que generan en la roca, la pérdida de material derivado de la erosión y el nivel de inclinación que tiene el cauce del río derivado de los levantamientos de la corteza terrestre o cambio del nivel del mar.

Para llegar a los resultados esperados se han planteado tres objetivos de estudio con los que se identificarán los contrastes del relieve representados en los levantamientos de roca, así como la inferencia de fallas provocadas por la actividad tectónica; también con el análisis de la cuenca hidrográfica identificando las terrazas fluviales como registros del cauce antiguo del río modificado por el levantamiento.

El trabajo de investigación se estructura en cinco capítulos, una introducción en la que se describen las metodologías de investigación, el trabajo de campo, resultados y conclusión. En el primer capítulo se describen las preguntas de investigación, la hipótesis que se pretende comprobar y los objetivos tanto general como particulares de este estudio, que pretende identificar y caracterizar la actividad tectónica en una cuenca hidrológica en el estado de

Guerrero, México, específicamente la cuenca del río Marquelia, esta zona se localiza al sureste de Guerrero, muy cercana al estado de Oaxaca, en el antearco de la Zona de Subducción Mexicana (ZSM).

El marco teórico bajo el que se trabajó esta investigación se expresa en este segundo capítulo, planteando el contexto teórico-conceptual que orienta las áreas de investigación para este trabajo, como la geomorfología tectónica, sismicidad y la tectónica, así mismo, se describe la ZSM, su formación y dinámica para entender la modelación del territorio.

Los métodos utilizados para la realización de los indicadores geomórficos derivados de la recopilación de información, la utilización de un Sistema de Información Geográfica y el análisis visual son diseñados y descritos en este capítulo tres, así mismo, se identificaron accidentes en el relieve como terrazas fluviales. También con base en la red hídrica se infiere la presencia de fallas que son analizadas para la comprensión del sustrato observado en campo.

Con la generación de los índices geomórficos, la identificación de terrazas fluviales y la inferencia de fallas, se obtienen resultados descritos en este cuarto capítulo, que nos describen la geomorfología de la zona de estudio, el comportamiento de la incisión del río y la cantidad de erosión hipotética que ha sufrido la cuenca como resultado del proceso de levantamiento tectónico.

Con el análisis de gabinete se realizó el trabajo de campo en donde se midieron y clasificaron las terrazas, se obtuvo un perfil general de su ubicación y la posible altura original del río, para llevar a cabo una correlación de las mismas se tomaron registros fotográficos y muestras de sedimentos para análisis por OSL y lograr obtener la fecha de algunas terrazas, así como la observación de los rasgos que indiquen la actividad tectónica en los sitios de falla inferidos por la interpretación de imágenes satelitales, esta información también es descrita en este capítulo.

Con base en la evidencia encontrada en campo y en gabinete, y con el sustento teórico metodológico desarrollado en la investigación, se discuten en el capítulo cinco, los resultados

para la comprobación de la hipótesis planteada a raíz de las preguntas de la investigación, y de esta manera concluir.

### **1.1. Preguntas de investigación.**

¿Cuál es la relación que existe entre las variaciones en la expresión del relieve con la relativa deformación derivada de la tectónica?

¿Las tasas de erosión y la configuración del relieve derivada de la incisión fluvial son indicadores que pueden reflejar la actividad tectónica específica de una cuenca hidrológica?

¿Las terrazas fluviales y fallas geológicas demuestran la dinámica modeladora del relieve de la subcuenca del Río Marquelia, y a su vez permiten identificar el levantamiento del terreno derivado de la actividad tectónica?

### **1.2. Hipótesis.**

Se identifica el modelado y los contrastes del relieve como resultado de la actividad tectónica diferencial, así como la erosión y la incisión fluvial provocada por esta actividad en la cuenca hidrográfica del Río Marquelia en el estado de Guerrero, México.

### **1.3. Objetivos.**

#### **1.3.1. General.**

Determinar los contrastes del relieve, los cambios provocados por la Actividad tectónica a largo plazo (Holoceno) y la respuesta en las tasas de erosión, así como la incisión en la cuenca del Río Marquelia en el estado de Guerrero.

#### **1.3.2. Específicos.**

Los contrastes del relieve provocados por la tectónica diferencial son causantes del modelado del relieve, por lo que es necesario su análisis con índices geomórficos para la comprensión de su dinámica.

- 1) Las zonas de mayor esfuerzo tectónico son identificadas por medio del análisis de las variaciones en la expresión del relieve, enfocando una cuenca fluvial y su respuesta a la actividad tectónica.
- 2) En concreto determinar, las posibles variaciones de la erosión y la configuración derivada de la incisión fluvial como lo son las terrazas fluviales.
- 3) Identificar existencia probable de fallas derivadas de la actividad tectónica regional en la zona de estudio.

#### 1.4. Zona de estudio.

La Subcuenca del Río Marquelia se encuentra al sur este del estado de Guerrero (Figura 1), se identifica como “Subcuenca RH20Da Río Marquelia” (INEGI, 2010a), las coordenadas geográficas que delimitan los puntos extremos de la subcuenca son: Latitud Mínima: 16° 31’, Longitud Mínima: -98° 55’, Latitud Máxima: 17° 04’, Longitud Máxima: -98° 35’.

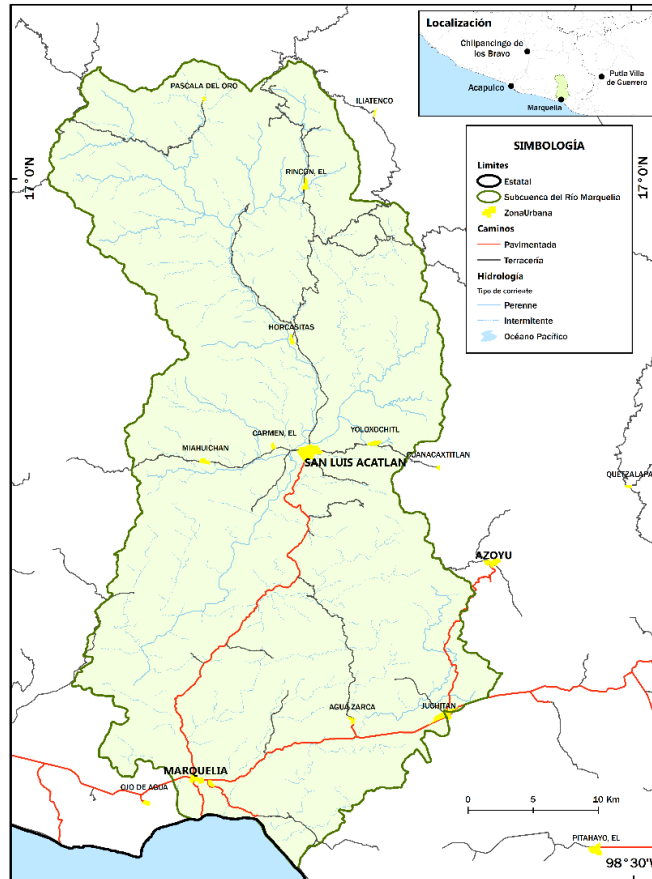


Figura 1. Localización de la zona de estudio. Fuente elaboración propia con datos de INEGI (2010b).

La subcuenca forma parte del conjunto de cuencas hidrográficas que se localizan en el antearco de la Zona de Subducción Mexicana (ZSM) dentro del estado de Guerrero, México (Gaidzik et al., 2016).

Se consideran los estudios a nivel mundial que describen la influencia de la actividad tectónica en el relieve, en este caso en concreto en la ZSM, con la finalidad de identificar los cambios

relativos en la elevación tectónica del antearco en el estado de Guerrero. Esta investigación también pretende que la metodología utilizada sea un elemento para considerar en los estudios referentes a geomorfología tectónica en la Zona de Subducción Mexicana (Ramírez-Herrera et al., 2018).

#### 1.4.1. Geología.

La cuenca del Río Marquelia presenta una composición geológica de tres periodos que, de acuerdo con la carta geológica del Instituto de Estadística y Geografía (INEGI) se identifican el Jurásico, Terciario y Cuaternario (Figura 2). Del primer sistema se identifican rocas de tipo gneis y esquisto localizadas en su mayoría en la zona sur y dos áreas al norte de ésta (INEGI, 2010c).

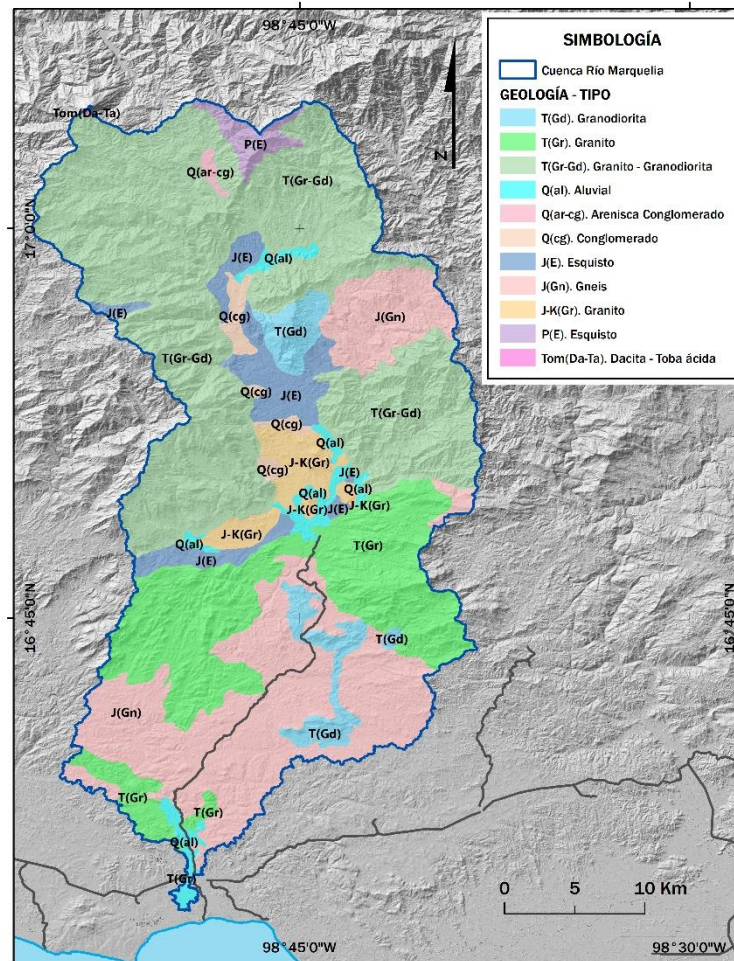


Figura 2. Geología de la zona de estudio. Fuente: INEGI, 2010c.

Las rocas del Terciario son las presentan mayor cobertura en el norte de la cuenca, en el centro rocas de tipo granito – granodiorita y granito respectivamente. Las rocas del Cuaternario se encuentran distribuidas en pequeñas proporciones a lo largo del cauce del Río Marquelia, así como en la zona sur llegando hasta la desembocadura del río, y se trata de arenisca – conglomerado, conglomerado y detritos aluviales.

#### 1.4.2. Clima.

La cuenca se localiza en una zona que en su mayoría predomina el clima subhúmedo que, de acuerdo con García E. (1998), se subdivide en Cálido subhúmedo con lluvias en verano (Aw) sin embargo y debido a las características orográficas en la vertiente del Pacífico, este clima se subdivide de acuerdo con el índice de Lang clasificándolo con humedad intermedia (Aw1) y humedad alta (Aw2). La temperatura media anual es mayor a 22°C, al norte de la cuenca se identifica un cambio de clima a semicálido subhúmedo (A)c(w2), donde la temperatura media anual es mayor a 18°C (García, 1998) (Figura 3).

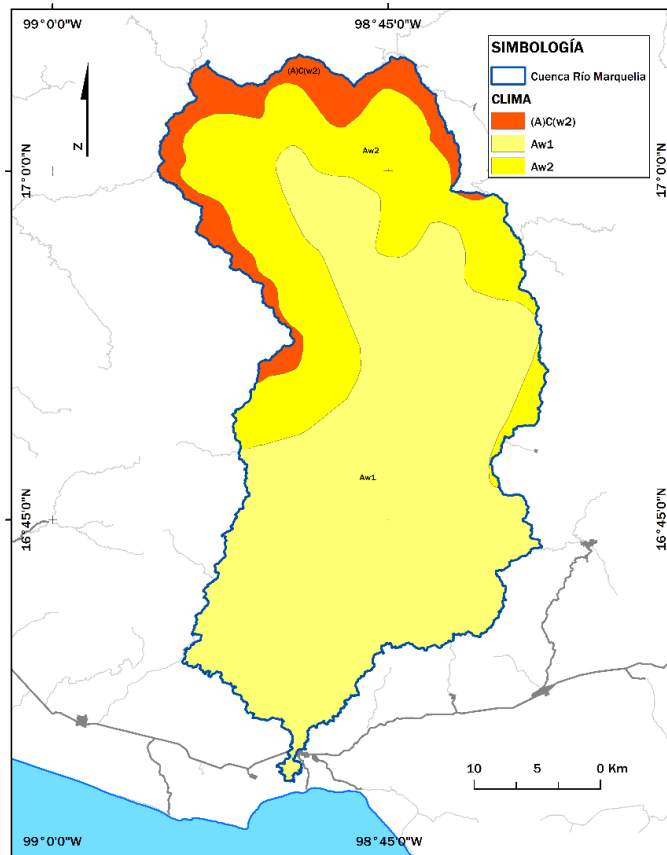


Figura 3. Climas de la zona de estudio. CONABIO et al. (2007) y García, (1998).



### 1.4.3. Hidrología.

La zona de estudio se localiza dentro de la Región Hidrológica “Costa Chica de Guerrero”, esta se compone de 21 subcuencas entre las que destacan las de los ríos: Verde, Papagayo, Quetzala, La Arena, Marquelia, Copala y de la Laguna Chautengo (INEGI, 2010b; CONABIO 2007) (Figura 4). La zona de estudio corresponde a la del Río Marquelia, que es una de las 21 subcuencas de la Región mencionada.



Figura 4. Cuencas hidrográficas. (INEGI 2010d, CONABIO et al., 2007).

### 1.4.4. Sismicidad.

La sismicidad en México es un fenómeno de gran relevancia, esta es la frecuencia e intensidad de sismos que se dan lugar o se producen tanto en la corteza terrestre como en el manto superior y se dimensiona según la cantidad de eventos que se registran en un año (Lugo, 2015).

En México existen 3 regiones que de acuerdo con el Servicio Geológico Mexicano (SGM), Zona Asísmica, Penisísmica y Sísmica, ésta última es la de interés para esta investigación debido a la estrecha relación que se tiene con la tectónica activa:

**Zona sísmica**, al sur y sureste del país abarcando los estados de México, Colima Michoacán, Guerrero, Morelos, Oaxaca, Chiapas, Jalisco, Puebla y Ciudad de México. (SGM, 2017).

El Servicio Sismológico Nacional, UNAM – México, (SSN, 2019) cuentan con un registro de eventos sísmicos desde el año 1900, cabe mencionar que la medición de este fenómeno de manera instrumental ha venido incrementando desde las primeras décadas del siglo XX, por lo que los registros son pocos en esas décadas y posteriormente se va incrementando la instrumentación y por ende el registro de sismos.

En total para el país el SSN reporta un total de 166, 291 eventos (SSN, Acceso a página web el 27/05/2019), de estos los de magnitud 7.0 y mayores suman 84 eventos, y los de mayor magnitud son del 09/10/1995 con M. 8; 19/sep/1985 con M. 8.1 y dos eventos de M 8.2 el del año 1932 el 22 de junio y el más reciente del 7 de septiembre de 2017.

En la (Figura 5) se observan los sismos de mayor importancia en el país, donde se observa que la zona de estudio está relacionada con la actividad sísmica registrada en los años 1989, 1995 y 2012.

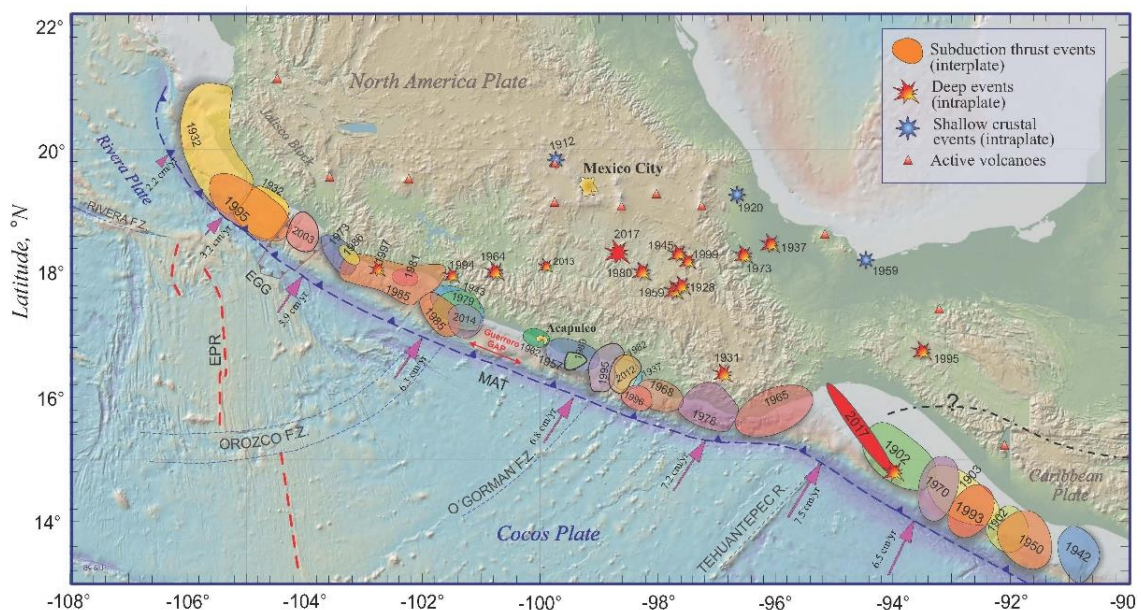


Figura 5. Localización de los sismos más importantes en México (Kostoglodov and Pacheco, 1999).

#### 1.4.5. Tectónica.

La corteza terrestre se compone de diversos fragmentos conocidos como Placas Tectónicas, estas se desplazan en diversas direcciones, su movimiento es debido a la actividad de la Tierra que conserva una gran cantidad de calor en su interior, este es liberado por convección de tal manera que el material caliente asciende a la superficie y el frío desciende al interior provocando la circulación de grandes masas de material lo que da origen a las Celdas Convectivas y estas a su vez a las Placas tectónicas (Kostoglodov and Pacheco, 1999).

Las Placas Tectónicas presentan gran actividad derivado del movimiento convectivo en el interior de la Tierra, estos movimientos provocan que existan choques, desplazamientos y distanciamiento entre las mismas.

En las zonas de choque se genera un desplazamiento entre placas, a esto se le conoce como movimiento transcurrente, otras se caracterizan porque en el contacto una cabalga sobre la otra generando zonas de subducción debido a la compresión entre estas, y finalmente existe un distanciamiento que es una zona en donde divergen los grandes bloques que provoca la formación de las dorsales oceánicas, debido a la diferente densidad de estas las placas se dividen en continentales y oceánicas, las primeras menos densas que las segundas (Kostoglodov and Pacheco, 1999).

México se encuentra localizado en dos placas continentales, la mayor parte de su territorio se ubica en la de Norteamérica y una pequeña porción al sureste corresponde a la del Caribe, en cuanto a las oceánicas para nuestro país la principal es la del Pacífico, la de Cocos y la de Rivera, estas dos últimas son las que subducen bajo la placa de Norteamérica (Kostoglodov et al., 2001; Kostoglodov and Pacheco, 1999; Strahler, 1994).

Este movimiento convectivo al sur del país es conocido como la Zona de Subducción Mesoamericana (ZSM) y tiene relevancia para este estudio debido a que derivado de la actividad sísmica registrada el relieve es modificado y en respuesta se pueden identificar y

registrar diferentes hallazgos como las terrazas fluviales y los cambios bruscos en la trayectoria vertical de un río.

## **2. MARCO TEORICO**

### **2.1. Geomorfología tectónica**

La geomorfología tectónica se encarga de estudiar los tipos de deformación de la corteza terrestre como lo son el movimiento de las placas tectónicas, el deslizamiento de fallas, la deformación por plegamiento (dúctil) y los procesos isostáticos (Burbank and Anderson, 2001) razón por la que se analizan los agentes endógenos que afectan al relieve en la zona de estudio.

La deformación del relieve es identificada con base a índices geomórficos que permiten analizar la trayectoria del Río Marquelia, así como los cambios en este con base en el análisis de la red hídrica de la cuenca y el cálculo hipotético de la cantidad de material erosionado en la cuenca del río en mención.

#### **2.1.1. Procesos tectónicos como agentes endógenos generadores de cambios en el relieve**

La corteza terrestre se deforma de manera irregular y constante a consecuencia de las fuerzas que se generan al interior de la tierra, estas fuerzas se derivan de la actividad tectónica. La zona de estudio está influenciada por la actividad de las placas de Norteamérica y Cocos, lo que produce deformaciones en la corteza identificadas como cadenas montañosas (Keller and Pinter, 2000), para este estudio y la zona de interés la Sierra Madre del sur es el resultado de las fuerzas de las placas mencionadas.

Las formaciones montañosas son generadas por procesos de tipo orogénicos debido al plegamiento y/o ascenso de los materiales que se identifican en las zonas cercanas a los bordes de las placas o zonas de subducción (Lugo, 2015), el resultado son montañas de plegamiento, así mismo se originan otros fenómenos como fracturamiento o ruptura de las zonas de contacto de los grandes bloques de la corteza y a lo largo de estos se identifican fallas, así mismo, en otras zonas se generan depresiones debido a la rigidez de los materiales (Strahler, 1994).

Estos accidentes geográficos identificados como fallas son clasificadas en dos tipos, activas e inactivas, la manera de determinar esta diferencia es de acuerdo al registro de movimiento de

las fallas, si es menor a 10 mil años es considerada activa, y en los casos que no se haya registrado un movimiento en un periodo mayor a 10 mil años se considera inactiva (Keller and Pinter, 2000).

Este periodo es considerado a partir del Holoceno, ya que se estima que es durante esta época cuando se generan las causas, así mismo, los efectos pueden ser examinados casi de manera directa y los marcadores geomórficos como las terrazas pueden ser encontrados con muy poca erosión (Burbank and Anderson, 2001).

#### 2.1.2. Agentes exógenos y su actividad en el modelado del relieve - terrazas fluviales

La energía al interior de la Tierra genera movimientos en las placas tectónicas, provocando las deformaciones topográficas en la superficie de la corteza terrestre, este es el proceso endógeno que modela el relieve por levantamiento tectónico (Burbank and Anderson, 2001), así mismo el relieve es modificado, alterado o modelado por otros agentes conocidos como exógenos (Intemperismo, erosión y acumulación) (Strahler, 1994). Los agentes que influyen a la formación de accidentes geográficos son en gran medida la erosión y acumulación, debido a que por medio de la primera se transportan los materiales y por la segunda son depositados en otro lugar.

Lo anterior combinado con agentes internos como lo es la actividad tectónica que provoca la elevación del nivel del cauce de los ríos o la generación de fallas y que también encausan el río en otra dirección dejan marcas en el relieve debido al abandono del lecho, y que son identificadas como terrazas fluviales (Burbank and Anderson, 2001), estas permiten documentar las compensaciones de la trayectoria vertical del río, así mismo sirven para predecir la geometría de las terrazas más antiguas que han sido alteradas por la erosión, finalmente el conocimiento de terrazas jóvenes sirve para identificar cambios suaves en el perfil longitudinal de un río (Burbank and Anderson, 2001; Molnar, 1994; Rockwell et al., 1984).

Existen dos tipos de terrazas fluviales, las que se consideran por depositación (o relleno o de construcción) también identificadas como acumulativas y las erosivas, éstas últimas también

son conocidas como “strath” (Burbank and Anderson, 2001; Pazzaglia et al., 1998; Pazzaglia and Brandon, 2001), en esta investigación se utilizará este último concepto para identificar las terrazas de erosión o “strath”. Estas terrazas son las que principalmente indican el levantamiento de roca provocado por la actividad tectónica (Pazzaglia et al., 1998).

Las terrazas de depositación son superficies planas y alargadas identificadas regularmente en ambos márgenes de un río, aunque en ocasiones se presentan solo de alguna de estas laderas a las que se les identifica como asimétricas, éstas se componen de aluviones, abandonados debido a la incisión del río que deja esta superficie abandonada (Burbank and Anderson, 2001; Pazzaglia et al., 1998; Pazzaglia and Brandon, 2001; Strahler, 1994).

Las terrazas strath son pequeñas superficies identificadas principalmente dentro o muy cercanas a las zonas montañosas de una cuenca (Burbank and Anderson, 2001), originadas por la erosión del río en la roca y dependiendo del tipo de roca presenta variaciones en dicha erosión, debido a estas características, algunos autores mencionan que su tamaño no es muy grande (100 m aproximadamente) (Burbank and Anderson, 2001; Pazzaglia et al., 1998; Pazzaglia and Brandon, 2001; Strahler, 1994).

Así mismo, su estudio es importante debido a que la energía endógena se manifiesta con levantamientos de la corteza terrestre reflejados en el cambio de elevación de las rocas que de manera activa modifican la topografía provocando los rasgos propios de las terrazas de tipo Strath (Picotti et al., 2009).

## **2.2. Índices geomórficos**

Los indicadores geomórficos han sido creados y utilizados para la descripción y análisis del relieve dentro de una cuenca hidrográfica, midiendo procesos erosivos, de transporte y sedimentación (Brocklehurst and Whipple, 2002; Giaconia et al., 2012) así como para identificar los procesos derivados de la actividad tectónica (Frankel and Pazzaglia, 2005; Galve et al., 2014; Hack, 1973; Ramírez-Herrera, 1998; Ramírez-Herrera et al., 2018).

Cada uno de los indicadores utilizados tienen una función específica que mide tanto la erosión como la dinámica de la cuenca, el comportamiento del río y los rasgos geográficos generados por la actividad tectónica (Frankel and Pazzaglia, 2005; Gaidzik and Ramírez-Herrera, 2017; Galve et al., 2014; Hack, 1973; Ramírez-Herrera et al., 2018).

Se considera que para poder estimar la cantidad de erosión de una cuenca desde su formación hasta la fecha es necesario crear una superficie hipotética que permite calcular el volumen del material erosionado, esta superficie también es conocida como de pre – erosión, el indicador que permite hacer este cálculo es el de Cantidad Mínima de Erosión (Brocklehurst and Whipple, 2002; Gaidzik and Ramírez-Herrera, 2017; Giaconia et al., 2012).

El índice de relación de volumen – área es propuesto y utilizado para la obtención de la cantidad de sedimentos perdidos o erosionados como consecuencia de la actividad tectónica, climática y su interacción con la litología de la cuenca (Frankel and Pazzaglia, 2005; Gaidzik et al., 2016; Pérez-Peña et al., 2009).

El gradiente longitudinal es utilizado para identificar el comportamiento topográfico de un río, permite hacer comparaciones entre segmentos de este, así como con diferentes ríos (Hack, 1973), su cálculo considera la longitud y perfil topográfico, así como la división de éste en segmentos para estimar diversas longitudes por cada segmento (Gaidzik et al., 2016; Hack, 1973; Keller and Pinter, 2000; Ramírez-Herrera et al., 2018). Así mismo las anomalías del cauce son identificadas con este índice logrando señalar la influencia de los deslizamientos de tierra asociados a la tectónica activa o a las características litológicas (Galve et al., 2014).

El relieve es modelado y se puede observar en rasgos específicos, como la concavidad de los canales, mismos que tienen una relación directa con la incisión del río (Kirby and Whipple, 2001), para identificar estos cambios se utiliza el índice del Perfil Longitudinal del cauce principal, lo que también permite conocer las relaciones entre el relieve, la elevación y la tasa de denudación (Kirby and Whipple, 2001; Ramírez-Herrera et al., 2018).

### **2.3. Placas tectónicas y Sismicidad**



### 2.3.1. Placas tectónicas y subducción.

Las placas tectónicas son grandes bloques de roca sólida que subducen o convergen entre sí (Figura 6), estos grandes bloques conforman la capa superficial de la Tierra también llamada Litósfera (Bolt, 1978; Kious and Tilling, 1994), se distribuyen sobre la astenosfera divididos por dos tipos de límites, los primeros de convergencia identificados como zonas de subducción y los segundos de divergencia como lo son las dorsales oceánicas (Lugo, 2015; Ramírez-Herrera and Castillo-Aja, 2016; Vigil, 1999).

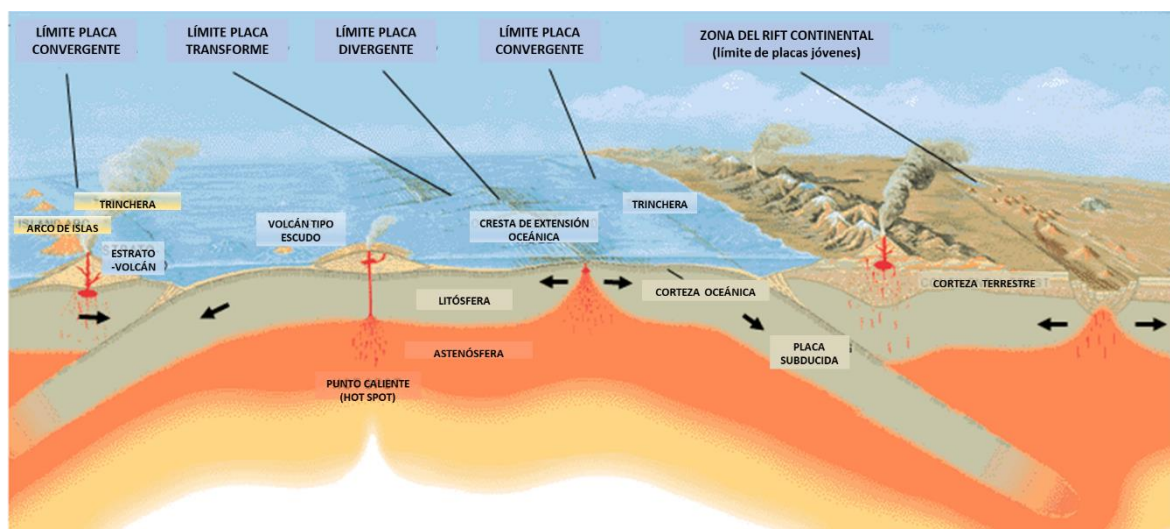


Figura 6 Tipos de límites entre las placas tectónicas. Fuente: Modificado de Vigil (1999).

Para la presente investigación, nos interesan los límites de tipo convergentes, ya que estos presentan fenómenos como la rugosidad y/o el levantamiento en las placas continentales derivado del hundimiento de las placas oceánicas por debajo de estas, a lo que se le conoce también como acoplamiento sísmico (Kanamori, 1983). En México las placas de Norteamérica y Cocos presentan esta dinámica y es la principal causa de la actividad tectónica al sur del país.

### 2.3.2. Placas tectónicas en México.

En México se identifica una gran zona de acoplamiento sísmico, es decir una zona en donde existe subducción entre placas, se localiza al sur de la placa tectónica continental de Norte América, que tiene contacto con placas oceánicas como lo son la de Rivera y de Cocos que subducen a la Norte Americana, esta actividad tectónica origina la zona identificada como Trincheras Mesoamericanas, y la península de Baja California pertenece a la placa del Pacífico (Figura 7) (J. E. Aguayo and Trápaga, 1996).

En la parte sur de México se identifican dos placas la de Rivera y la de Cocos. La placa de Rivera se localiza al sur del Golfo de California frente a las costas de los estados de Colima y Jalisco.

La Placa de Cocos se distribuye a lo largo de los estados de Michoacán, Guerrero y Oaxaca, en las costas de Chiapas colinda con la placa del Caribe llegando hasta la frontera sur de Costa Rica, toda esta región de subducción es conocida como la Trincheras Mesoamericanas, y su límite sur colinda con la Placa del Pacífico. Así mismo se observan diversas fracturas que contribuyen a la actividad sísmica registrada como lo son las fracturas de Orozco, O'Gorman, Tehuantepec, Galápagos y Grijalba (J. E. Aguayo and Trápaga, 1996).



Figura 7. Diagrama de la distribución de las placas tectónicas en el mundo. USGS (2019).

En el sureste del país casi no tiene presencia la placa del Caribe, sin embargo, al ser una placa que converge con la placa Norte Americana al sur del estado de Campeche y al este del estado de Chiapas, y extendiéndose en dirección suroeste hasta colindar con la Placa de Cocos, también tiene influencia en la actividad tectónica y sísmica identificada en la trinchera Mesoamericana.

#### **2.4. Zona de Subducción Mexicana (ZSM)**

La ZSM tiene una gran dinámica tectónica debido a las 4 placas que interactúan aquí, los movimientos de estas son complejos, y generan tensiones debido a la interacción de las zonas de contacto entre estas (SGM, 2017).

La placa Norteamérica tiene un movimiento hacia el norponiente y poniente, la del caribe es desplazada al oriente, al sur de ambas la placa de Cocos en dirección noroeste subduciendo bajo la placa de Norteamérica y más al sureste con la placa del Caribe, esta dinámica en este límite tiene como resultado una gran actividad sísmica (J. E Aguayo and Trápaga, 1996)

Así mismo estos grandes movimientos son parte de un equilibrio conocido como isostasia, que de manera semejante a la flotación hidrostática la litósfera se mantiene en un nivel relativo en función de su espesor y densidad, en el que tiene mucho que ver la plasticidad de las rocas y por ende su movimiento derivado de estas características sobre el manto de la astenosfera (Strahler, 1994).

Como ejemplo de la isostasia (Gilchrist et al., 1994) utiliza este concepto para evaluar si algunas elevaciones son producto de la disección del relieve o por el levantamiento derivado de la actividad tectónica, este fenómeno es estudiado en la orogenia de los Alpes Europeos.

#### 2.4.1. Sismo / terremoto.

El movimiento de las placas tectónicas es el principal motor de los sismos y por lo tanto es una consecuencia de esa dinámica, y se generan diferentes tipos de estos debido a la ruptura y fractura de la corteza en las zonas de unión de las placas, por ejemplo los eventos que se generan en las zonas limítrofes entre placas son llamados interplaca, y aquellos que suceden al interior de una placa son conocidos como intraplaca (Bolt, 1993).

Los sismos son el reflejo de la actividad tectónica existente en nuestro planeta y su medición ha evolucionado considerando la intensidad y la magnitud, ambas medidas principalmente por Mercalli y por Richter respectivamente, y ha evolucionado hasta que la más reciente forma de realizarla es considerando las propiedades físicas de la roca, así como el área afectada, a esto se le conoce como Momento Sísmico ( $M_w$ ) (Kanamori, 2003, 1983; Ramírez-Herrera and Castillo-Aja, 2016).

Los sismos son medidos en función de dos tipos de onda que se generan al momento de ocurrencia, una es la onda "P" que se caracteriza por tener una amplitud de onda relativamente baja y causa poco daño, y las ondas "S" con una amplitud de onda alta y genera un mayor movimiento del suelo, lo que genera más daños (Allen and Kanamori, 2003).

Con las ondas "P" se logra tener mayor tiempo de advertencia, alertar a la población y con esta misma onda es posible conocer la ubicación de su origen, este mecanismo es usado en Japón con un sistema de alerta sísmica conocido como UrEDAS que utiliza este tipo de onda para estimar tanto la magnitud como la ubicación del sismo (Allen and Kanamori, 2003).

#### 2.4.2. Sismicidad en México

En México, las zonas con mayor presencia de sismos se localizan en los estados de Guerrero, Oaxaca y Chiapas principalmente, el estado de Jalisco también presenta eventos, pero con menor frecuencia, esto es debido a la presencia de la ZSM en donde la actividad tectónica provoca el rompimiento de las placas, estas rupturas son identificadas como fallas. (Ramírez-Herrera and Castillo-Aja, 2016).

Según la Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica (SMIS) a finales del siglo XIX y principios del Siglo XX en muchos países incluyendo México se instalaron estaciones sismológicas, iniciando así, la medición instrumental de las ondas generadas por este tipo de fenómenos (SMIS, consultada en febrero de 2019).

De acuerdo con el Servicio Geológico de Estados Unidos y la universidad de San Diego, California, los sismos se categorizan en función de su magnitud, estos van desde los que no presentan ningún daño, perceptibles solo de manera instrumental, y hasta los de mayor destrucción, esta clasificación se basa en el Momento Sísmico (USGS, 2019; SDSU, 2009).

**Tabla 1.** Clasificación de los sismos según la USGS.

<b>Sismo</b>	<b>Magnitud (Mw)</b>	<b>Daño</b>
<b>Micro</b>	menor a 3.0	Poco o nulo
<b>Menor</b>	3.0 – 3.9	Poco o nulo
<b>Ligero</b>	4.0 – 4.9	Moderado
<b>Moderado</b>	5.0 – 5.9	Considerable
<b>Fuerte</b>	6.0 – 6.9	Severo
<b>Mayor</b>	7.0 – 7.9	Fuerte y Amplio
<b>Gran sismo</b>	Mayor a 8.0	Muy Fuerte

*Fuente: USGS, 2019; SDSU, 2009.*

## 2.5. Tectónica

### 2.5.1. Deformación cosísmica

La etapa cosísmica de un sismo se identifica como el relajamiento de las fuerzas de tensión o de los esfuerzos elásticos acumulados en la zona donde se dio lugar la ruptura repentina de la corteza o el desplazamiento de una falla (Ruegg, 1994).

Esta etapa es más identificable en sismos de magnitud alta ( $> 8.0$  M) y se registran algunos fenómenos de manera casi inmediata, como puede ser la deformación de la superficie e incluso mar adentro, o fuera de la zona de ruptura, por lo que este fenómeno puede ser entendido como un proceso en el cual la tensión o perturbación provocada por el temblor se dispersa o relaja provocando cambios en la superficie terrestre o bien hacia otras zonas lejanas al lugar donde sucedió el fenómeno (Agata et al., 2019).

En otras ocasiones los efectos cosísmicos pueden representar hundimientos de manera continua como consecuencia de eventos posteriores a un ciclo de terremotos como lo es el caso del antearco al noroeste de Japón (Sasajima et al., 2019).

### 2.5.2. Deformación intersísmica

Ruegg (1994) menciona que el ciclo sísmico se fundamenta en la ocurrencia de sismos en periodos de tiempo regular y de manera estimada en el mismo lugar, este ciclo se describe en 4 etapas:

**Cosísmica:** Se refiere al momento de la ruptura abrupta de una falla.

**Postsísmica:** Periodo en el que se producen las réplicas del sismo principal, considerando un reajuste en la región cercana a la fuente sísmica.

**Intersísmica:** La re-acumulación gradual de esfuerzos, es la etapa de mayor duración del ciclo, 90% aproximadamente.

**Presísmica:** Posterior a la etapa intersísmica se pueden generar comportamientos anormales antes de la siguiente ruptura, como una deformación lenta o rápida. (Ruegg, 1994)

Para esta investigación nos concentraremos en la tercer etapa, la intersísmica, ya que esta es la que ocurre después del evento principal dando continuidad a la deformación o ajuste de la superficie, proceso que se desarrolla entre eventos de gran magnitud, estos grandes sismos son asociados a las zonas de convergencia de las placas (Burbank and Anderson, 2001).

Estos ajustes pueden verse reflejados en levantamientos de la corteza en zonas donde han ocurrido sismos de gran magnitud como el ocurrido en 1964 en Prince William Sound, Alaska, en donde el efecto cosísmico provocó un hundimiento de 2 m en la parte oriental de la península de Kenia, y 30 años después se ha registrado un levantamiento de 1 m desde esa fecha (Cohen et al., 1995).

Los efectos de la deformación intersísmica son difíciles de observar si no son relacionados a las etapas cosísmica y postsísmica. En la Figura 8 Burbank y Anderson (2001) explican que el patrón de la deformación intersísmica es definido por la relación entre la deformación cosísmica y la estructura geológica, es decir, los efectos provocados en el momento del sismo y el tipo de roca (dureza y plasticidad de esta), estos son los principales agentes que van a determinar los efectos de la deformación intersísmica.

En cuanto a la deformación intersísmica su comportamiento depende del flujo viscoso del manto, así como de la respuesta a la carga de sedimentos (isostasia) y la erosión que también juega un papel importante (Burbank and Anderson, 2001).

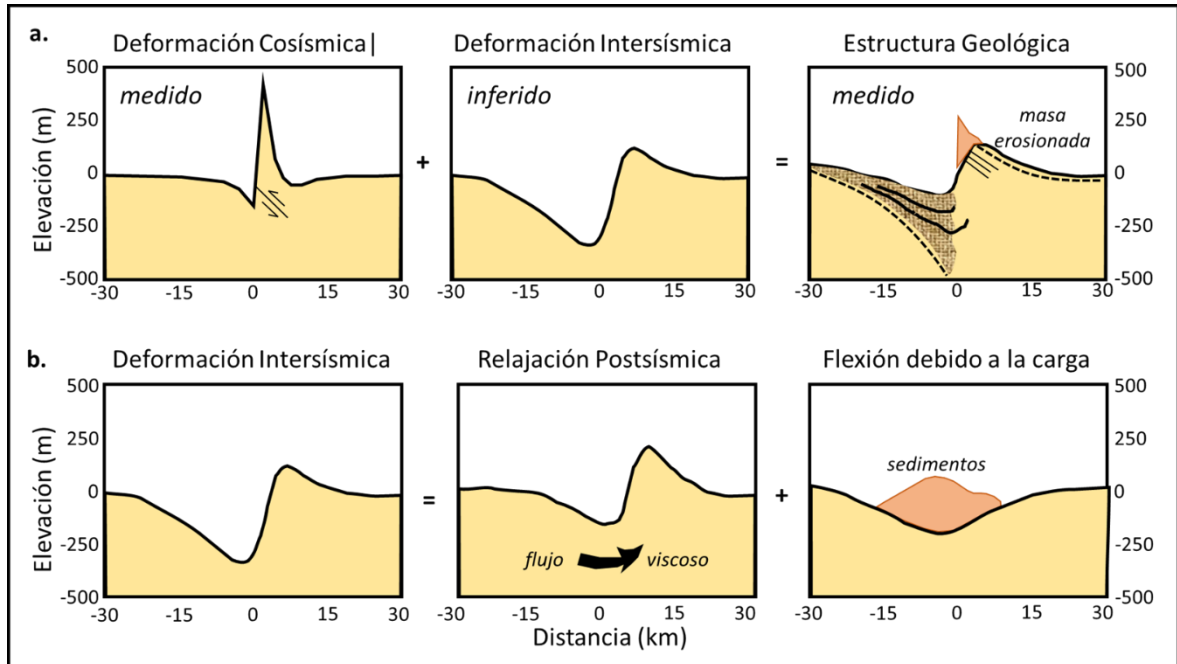


Figura 8. Deformación cosísmica y deformación intersísmica. Arriba la deformación cosísmica mas la deformación intersísmica y su resultado observado en donde la estrucutura geologica es importante. Abajo la deformación intersísmica y las dos eapas de comportamiento, la primera es la relajación postsísmica en combinación con el flujo viscoso del manto, y en segundo lugar la flexibilidad a la carga de sedimentos erosionados. Fuente: Modificado de (Burbank and Anderson, 2001).



### 3. METODOLOGÍA.

En este trabajo de investigación se propone una metodología basada en tres etapas para identificar y analizar los contrastes del relieve, así como los cambios provocados por la tectónica diferencial (Figura 9).

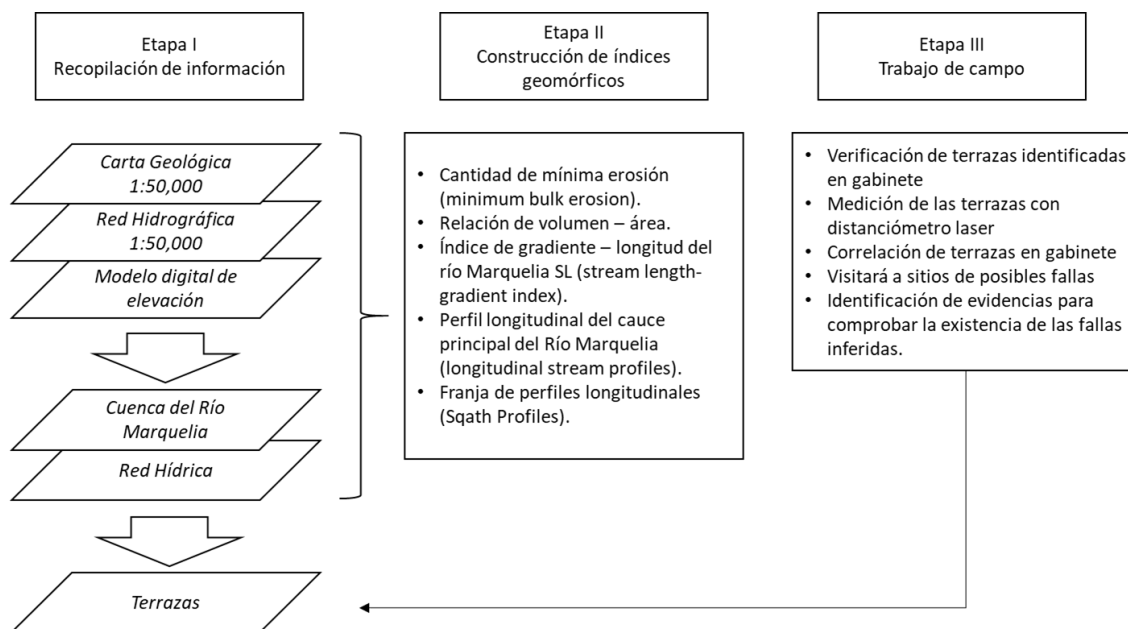


Figura 9. Metodología. Análisis de contrastes del relieve, cambios por tectónica diferencial, variaciones en las tasas de erosión e incisión por la actividad fluvial.

#### Etapa 1. Recopilación de Información

Recopilación de insumos para el análisis del terreno que consta de la consulta de la cartografía del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) de los temas geológico e hidrológico. La información consultada consistió en: 1) Carta Geológica (INEGI, 2010c) y 2) Red Hidrográfica versión 2.0 (INEGI, 2010d), ambas a escala 1:50,000 en formato digital.

El tercer insumo es un Modelo Digital de Elevación (DEM por sus siglas en inglés *Digital Elevation Model*) con una resolución de 12 metros por píxel (TanDEM) y fue utilizado para identificar la red hídrica en la zona de estudio, así mismo, para la delimitación de la Cuenca del Río Marquelia. Fue procesado con el software especializado en manejo de información geográfica ArcGIS en su versión 10.5 (ESRI, 2019).

En esta etapa y con el uso de las herramientas SIG, se identificarán las alteraciones de la red hídrica para asociar su presencia y dinámica a la actividad tectónica, también con base a la interpretación de imágenes satelitales de consulta libre por internet se identifican y digitalizan las terrazas formadas en las laderas del Río Marquelia utilizando el software de licenciamiento libre Google Earth versión Pro del año 2018 (Google, 2019).

## **Etapa II. Construcción de Índices geomórficos**

Construcción de índices geomórficos para identificar las posibles variaciones de las tasas de erosión y la incisión provocada por la actividad fluvial en la cuenca del Río Marquelia, como probable respuesta a la actividad tectónica y sus resultados en el modelado del relieve.

De acuerdo con diversos autores permiten identificar los cambios en el relieve por la deformación derivado de la tectónica (Gaidzik and Ramírez-Herrera, 2017) así mismo el análisis de índices geomórficos permite señalar lugares en donde se observan cambios en la expresión del relieve, estructuras tectónicas activas o deslizamientos (Galve et al., 2015).

Los índices geomórficos propuestos para el análisis de la zona de estudio y para obtener los resultados esperados son:

- 1) Relación de volumen – área ( $R_{VA}$ ) (Frankel and Pazzaglia, 2005; Giaconia et al., 2012)
- 2) Perfil longitudinal del cauce principal, Knipoints (*longitudinal stream profiles*) (Keller and Pinter, 2000; Kirby and Whipple, 2001; Whipple and Tucker, 1999)
- 3) Cantidad de mínima erosión (*minimum bulk erosion*) (Brocklehurst and Whipple, 2002; Giaconia et al., 2012)
- 4) Índice de gradiente – longitud SL (*Stream length-gradient index*) (Hack, 1973; Keller and Pinter, 2000)
- 5) Índice normalizado de la pendiente del cauce  $K_{sn}$  (*Normalized channel steepness index*) (Kirby and Whipple, 2001; Snyder et al., 2000; Whipple and Tucker, 1999; Wobus et al., 2006).

### **Etapas III. Reconocimiento de campo**

**1) Terrazas.** Trabajo de campo para la verificación de terrazas fluviales, éstas son rasgos del relieve que reflejan los levantamientos por actividad tectónica (Ramírez-Herrera et al., 2011; Ramírez-Herrera and Urrutia-Fucugauchi, 1999), mismas que fueron identificadas en gabinete, se llevará a cabo la medición de terrazas con distanciómetro laser, para registrar su altura respecto al nivel del Río Marquelia, se llevará a cabo la identificación de la estratigrafía para su clasificación de acuerdo al tipo de terraza, fluvial o Strath (Pazzaglia and Brandon, 2001) y posteriormente se hizo la correlación en gabinete.

**2) Fallas.** Se visitaron también los sitios donde fueron identificadas posibles fallas, de acuerdo con algunos autores por lo regular los cambios litológicos o fallas activas presentan estos accidentes en el relieve (Kirby and Whipple, 2001; Wobus et al., 2006) y se realizó la examinación del sitio para la búsqueda de evidencias que permitan comprobar la existencia o no de las fallas inferidas.

#### **3.1. Geomorfología del valle del Río Marquelia**

Debido a su ubicación la cuenca del Río Marquelia presenta un relieve principalmente montañoso, donde su mayor elevación es de 2,010 m, las zonas de montaña se localizan al norte de la cuenca desde su límite superior muy próximo a la latitud 17° 07' N, y se extienden hacia el sur aproximadamente hasta la latitud 16° 50' N. Hacia el sur y hasta su desembocadura con el Océano Pacífico las elevaciones son menores a 700 m llegando al nivel de base a 0 m (INEGI, 2010).

Hacia el sur de la cuenca los registros altitudinales indican la presencia de valles de gran extensión entre los ríos tributarios al cauce principal (TanDEM, 2015; INEGI, 2010). La distribución de la red hídrica es típica del tipo dendrítica en la mayor parte de la cuenca, solo en una pequeña extensión de la vertiente derecha del río cercana a la latitud 16° 30' N se puede observar una distribución diferente de tipo Trellis (Strahler, 1994, 1952).

##### **3.1.1. Análisis de la Red Hídrica.**

En este estudio se analiza la cuenca del Río Marquelia, Guerrero, México, éste río presenta una orientación casi perpendicular al eje de la Zona de Subducción Mexicana (ZSM) en la costa del estado de Guerrero, para el análisis topográfico se utilizó un Modelo Digital de Terreno (MDT, conocido también como DEM por sus siglas en inglés (*Digital Elevation Model*) y que es usado como una herramienta útil para el análisis de la actividad tectónica debido a su uso con técnicas de SIG para la elaboración de índices geomórficos y manejo de información en varias escalas (Keller et al., 1982; Keller and Pinter, 2000; Kirby and Whipple, 2001; Mahmood and Gloaguen, 2012; Ramírez-Herrera, 1998)

El modelo utilizado tiene una resolución espacial de 12 m (TanDEM) en el año 2015, el DEM es una rejilla de celdas ordenada en filas y columnas que almacena los valores de elevación en cada una de ellas, los valores son tomados para identificar y delimitar el límite de la cuenca en estudio.

Con este modelo se utilizaron técnicas de percepción remota con la finalidad de reconocer los accidentes o rasgos geográficos que permitan identificar el comportamiento de la red hídrica y sus características de distribución superficial, así como, los cambios de elevación en el trayecto del río que representan diferencias significativas para la identificación de fallas o zonas de contacto litológico (Keller and Pinter, 2000; Kirby and Whipple, 2001).

Se utilizó el software Arc Gis 10.5 para la identificación de los límites de la cuenca hidrológica, la distribución de la red hidrológica y los índices geomórficos.

#### 3.1.1.1. Delimitación de cuenca hidrológica.

El análisis de la geometría de los accidentes geográficos fluviales es la base para la descripción de los procesos y formas fluviales (Gardiner and Park, 1978), se usaron técnicas de análisis geomorfológicos basados en Sistemas de Información Geográfica (SIG) para la delimitación de cuencas de drenaje (Morrish, 2015).

La delimitación de las cuencas se realizó con dos insumos base, el primero es el DEM y el segundo es la red de drenaje que se obtiene con las herramientas *Flow direction* y *Flow accumulation* (dirección de flujo y acumulación de flujo respectivamente), estos insumos se generan con el módulo de Análisis espacial de Arc GIS.

La dirección de flujo es calculada con base al cambio máximo de elevación de cada celda del modelo raster, el DEM es utilizado para identificar los cambios de elevación para cada una de las celdas vecinas de la celda que se está analizando, lo que se conoce como modelo de flujo de 8 direcciones (Jenson and Domingue, 1988), este procedimiento se realiza de manera iterativa para todas y cada una de las celdas del modelo raster y el resultado es expresado en porcentaje, con lo que se identifica la red de drenaje.

El proceso de acumulación de flujo se desarrolla de manera similar a la dirección de flujo, pero no calcula la dirección sino el peso que las celdas ejercen (Tarboton et al., 1991), este procedimiento utiliza como base el raster de la dirección de flujo, el resultado es expresado en valores enteros, por lo que se busca en este procedimiento aquellos pixeles que concentran los valores más altos.

El resultado de la acumulación de flujo es reclasificado para obtener la red de drenaje, considerando que se tienen valores enteros y que representan el peso ejercido por las celdas contiguas, por lo que se buscan aquellas celdas con mayor peso, estableciendo un valor de 5,000 como peso inicial y la herramienta *Reclassify* identifica los pixeles a partir de este valor y hasta el de mayor peso, los pixeles que se van a excluir de esta clasificación se les asigna un valor nulo o se indica dentro de la herramienta como valor "No Data", con lo que el resultado será un raster con los pixeles que representan la red hídrica simulando la trayectoria de los cauces de los ríos.

Para la delimitación de la cuenca de la zona de estudio se considera como perímetro de referencia la delimitación de cuencas hidrográficas del INEGI, esta corresponde a la región hidrológica 20, subcuenca Marquelia (INEGI, 2010d).

Una vez adquirida la red de drenaje y considerando el método para la delimitación de una cuenca (Jenson and Domingue, 1988) se debe localizar el sitio que tenga la menor altura sobre el nivel medio del mar, que esté sobre el flujo que se identifica como el de salida al punto base de la cuenca principal y que sea lo más cercano al límite de cuenca, en este caso la Subcuenca Marquelia de INEGI (Figura 10).

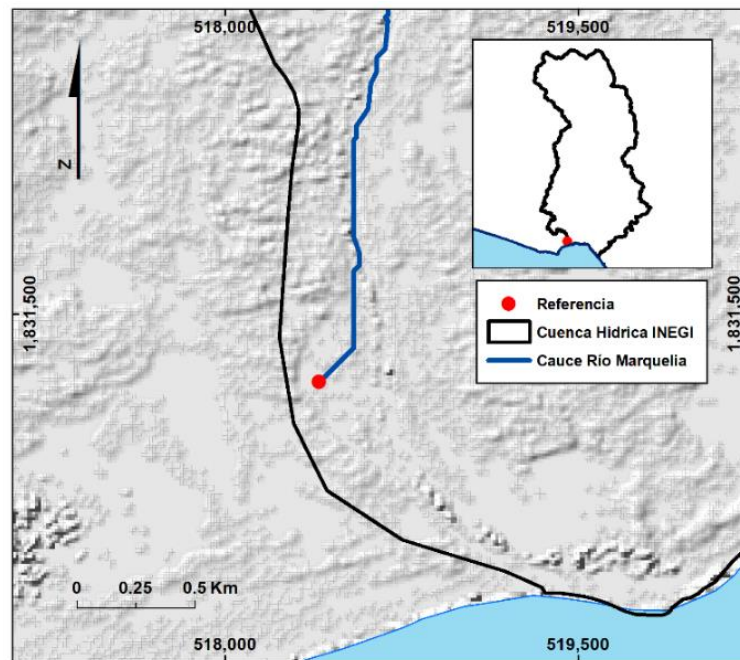


Figura 10. Identificación del punto más bajo de acuerdo con la red de drenaje obtenida con los procesos de Flow direction y Flow Accumulation.

El SIG identifica los valores de elevación con respecto al punto de referencia indicado, este proceso lo hace de manera iterativa en todo el DEM, identificando así los valores de mayor elevación y de menor peso para ser considerados en la delimitación de la cuenca. El uso del DEM es utilizado confiablemente como un insumo base y su procesamiento para la delimitación de cuencas (Curie et al., 2007; Gaidzik and Ramírez-Herrera, 2017).

### 3.1.1.2. Delimitación del DEM con la cuenca obtenida.

Debido a que los índices geomórficos se calcularán solo para la cuenca del Río Marquelia es necesario delimitar el DEM a este perímetro, por lo que se sustrajo la información de la

superficie al interior de la cuenca con la herramienta clip raster de Arc GIS, este será el modelo final que se utilizará para la elaboración de los índices geomórficos (Figura 11).

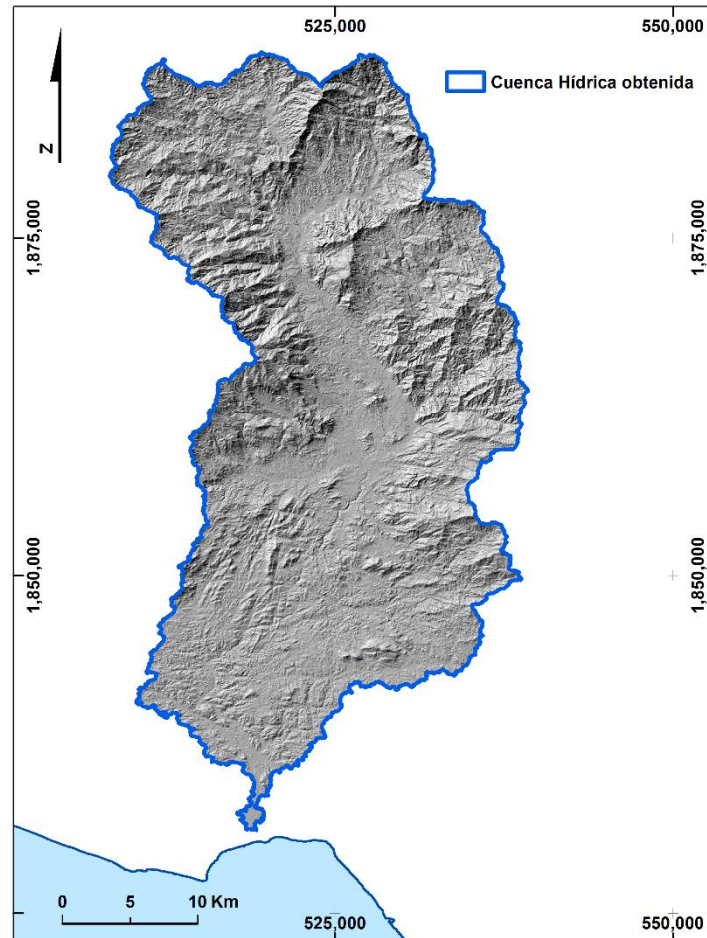


Figura 11. Delimitación del DEM al perímetro de la cuenca del Río Marquelia para la elaboración de los índices geomórficos.

El modelo que nos muestra la trayectoria de los cauces dentro de la cuenca obtenido anteriormente es un producto derivado de un archivo raster, por lo que está en este mismo formato y es necesario transformarlo a formato vector (líneas) con la herramienta *Raster to polyline* del módulo *Conversion* de Arc GIS.

La red hídrica fue clasificada de acuerdo a Strahler, que indica un valor por cada uno de los nodos generados entre los afluentes que se unen, iniciando el conteo desde los más altos y continúa río abajo hasta llegar al cauce que es la desembocadura de la cuenca (Strahler, 1994),

este procedimiento se realiza con la herramienta *Stream order* del submódulo *Hydrology* del módulo *Spatial Analyst* de Arc GIS, se incluyen los archivos de dirección del flujo y red hídrica obtenida, se asigna el método de clasificación que en este caso es Strahler y el nombre del archivo de salida.

El modelo que nos muestra la trayectoria de los cauces dentro de la cuenca obtenido anteriormente es un producto derivado de un archivo raster, por lo que está en este mismo formato y es necesario transformarlo a formato vector (líneas) con la herramienta *Raster to polyline* del módulo *Conversion* de Arc GIS. Se obtiene un archivo en formato vector con los atributos asignados en cuanto al orden de los cauces de la red.

### **3.2. Índices geomórficos.**

Los índices geomórficos propuestos son calculados a partir de diversas fuentes base como lo son: información topográfica, herramientas análogas como la fotografía aérea y herramientas digitales como los MDT (Keller and Pinter, 2000) y como ya se mencionó permiten identificar los cambios en el relieve por la deformación que ejerce la tectónica relativa (Gaidzik et al., 2016; Ramírez-Herrera et al., 2018). A continuación, se describen los índices geomórficos que serán utilizados en esta investigación.

#### **3.2.1. Cantidad de mínima erosión (*minimum bulk erosion*).**

Describe el posible volumen que pudo haber sido transportado debido a la erosión fluvial en una cuenca, se basa en estimar el material que existió previamente antes de haber sido erosionado de una cuenca, esto se hace con base a una superficie hipotética generada con los valores más altos de la cuenca hidrográfica, es decir, con el límite de cuenca. (Brocklehurst and Whipple, 2002; Gaidzik and Ramírez-Herrera, 2017; Giaconia et al., 2012; Ramírez-Herrera et al., 2018).

Para el cálculo de este indicador, es necesario tener dos insumos base: **1)** límite de cuenca y **2)** DEM, ambos obtenidos anteriormente (ver inciso 3.1.1.1) y de los cuales se obtendrán los



puntos con las elevaciones del límite de la cuenca y el TIN que indicará la superficie hipotética existente previo a la erosión fluvial (Gaidzik and Ramírez-Herrera, 2017).

### **Puntos de mayor elevación derivados del límite de cuenca.**

El límite de cuenca es una poli línea que es uno de los dos insumos necesarios para generar un punto por cada uno de sus nodos, esta conversión se realiza con la herramienta *Feature vertices to points* del módulo *Data Management*, los puntos obtenidos son manipulados en sus atributos asignándoles el valor de elevación con la herramienta *Extract values to point* del módulo *Spatial Analyst*, para lo que se utiliza el archivo de puntos recién creado y el DEM como insumo de los valores de elevación (Z).

### **Creación del TIN**

Para generar la superficie hipotética del nivel original de la cuenca previa a su erosión, se crea una superficie de triángulos irregulares, con los puntos obtenidos y con el valor de las elevaciones asignados a estos.

La herramienta *Create TIN* del submódulo *Data Management* del módulo *3D Analyst* permite generar esta superficie con el archivo de puntos creado anteriormente, el modelo obtenido es una superficie homogénea que representa de manera hipotética el nivel original que pudo tener la cuenca hidrográfica del río Marquelia.

Finalmente se transforma el modelo TIN de su formato vectorial a formato raster, lo que permite realizar operaciones entre mapas, en este caso se realiza la sustracción entre el DEM con los valores actuales de elevación y el modelo obtenido de pre – erosión. Lo que nos arroja el valor por píxel que indica la cantidad de material hipotéticamente erosionado en  $\text{km}^3$ .

### **3.2.2. Relación de volumen – área $R_{VA}$ .**

Existe una razón de relación entre el volumen de una cuenca de drenaje en  $\text{m}^3$  y la superficie de la misma cuenca en  $\text{m}^2$  (Frankel and Pazzaglia, 2005) y se describe con la relación:

$$Rva = V/A$$

Donde:

**Rva** = Relación del volumen respecto al área

**V** = Volumen de la cuenca en m<sup>3</sup>

**A** = es la superficie métrica de la cuenca en m<sup>2</sup>

El cálculo de  $R_{VA}$  se realiza con dos insumos que fueron obtenidos en apartados anteriores, uno de ellos es el resultado de la sustracción del material hipotéticamente erosionado (Gaidzik and Ramírez-Herrera, 2017), el otro es la superficie de la cuenca hidrológica del Río Marquelia en km<sup>2</sup>.

### 3.2.3. Índice de gradiente – longitud SL. (*stream length-gradient index*).

El índice de gradiente – longitud (SL) es empleado para el análisis del terreno Hack (1973) demuestra que se puede hacer comparaciones de segmentos de río de diferentes longitudes, las mediciones se realizan en mapas topográficos y/o fotografías aéreas por medio de métodos fotogramétricos, o con los datos obtenidos por medio de levantamientos terrestres (Hack, 1973) en el esquema de la Figura 12 se muestran los parámetros de medición.

Donde:

**SL** = Índice gradiente – longitud.

**ΔH** = Diferencia de elevación entre los extremos del segmento del cauce medido.

**ΔL** = Longitud del cauce o segmento del cauce medido.

**L** = Distancia desde el punto de interés hasta el límite de cuenca, se mide sobre el fragmento siguiendo el trazo del cauce principal o del cauce más largo de la red hídrica.

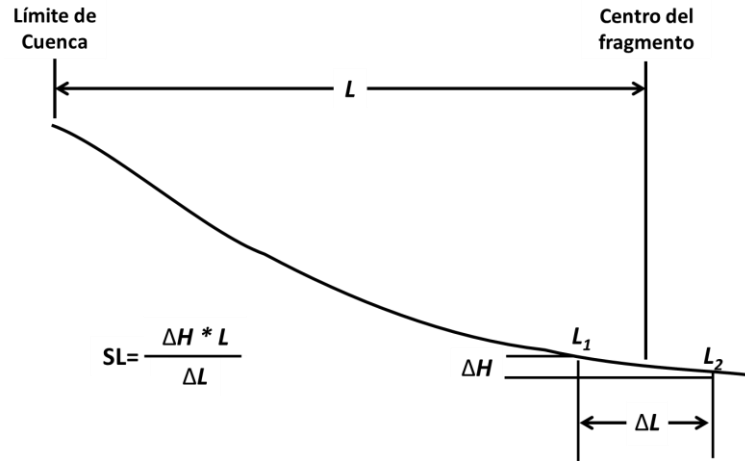


Figura 12. Esquema para el cálculo del Índice de gradiente – Longitud. Modificado de Hack (1973)

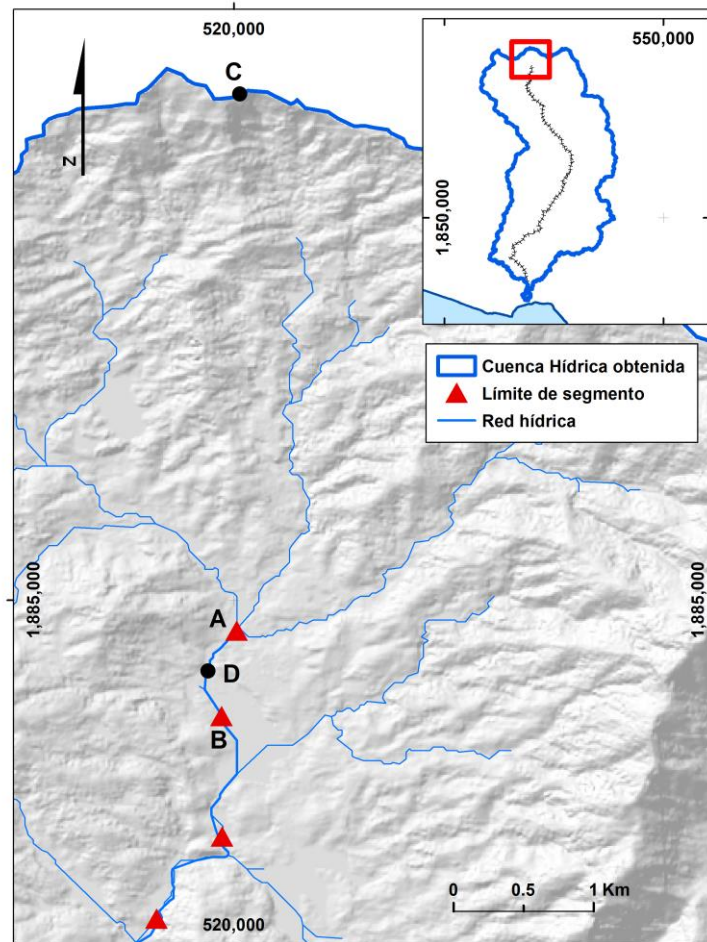
El punto de interés puede ser la mitad del segmento como se indica en (Hack, 1973) un lugar en específico como una localidad o bien como otros autores mencionan (Keller and Pinter, 2000; Ramírez-Herrera et al., 2018) el punto medio del segmento del cauce en cuestión, incluso el cauce principal o de análisis puede ser segmentado equidistantemente y el punto medio de cada uno de estos es usado para la medición de  $L$  (Ramírez-Herrera et al., 2018).

Este índice ha sido utilizado para detectar las anomalías que reflejan cambios en las corrientes lo que ha ayudado a señalar la influencia de deslizamientos de tierra asociados a la tectónica activa o por anomalías litológicas (Galve et al., 2015, 2014). Los cambios de pendiente del cauce, permite la evaluación de las relaciones posibles entre actividad tectónica, resistencia de la roca y topografía, por lo que los resultados que se obtengan podrán representar las anomalías del relieve, éstos valores por lo regular se asocian con la actividad tectónica, en específico: levantamientos (Hack, 1973).

De acuerdo con la metodología desarrollada por Hack (1973), se consideró el cauce principal del Río Marquelia para la medición de la Longitud ( $L$ ), dividido en segmentos equidistantes de 1 km (Ramírez-Herrera et al., 2018) con un total de 81 de sur a norte (río arriba) lo que originó un último fragmento menor a 1 km, mismo que es también considerado en los cálculos (Figura 13).

Para cada uno de los fragmentos del cauce se obtuvieron los valores de elevación del inicio y fin obteniendo con esto Delta H ( $\Delta H$ ), la diferencia de longitud ( $\Delta L$ ) es igual a 1 km para todos, salvo el último segmento que resultó de 734.32 m.

El valor de  $L$  se obtiene a partir del punto medio de cada uno de los 81 segmentos y continuando por el cauce principal hasta la cabecera de este, cabe mencionar que de acuerdo con Hack (1973) se debe considerar también la distancia entre la cabecera y el límite de la cuenca, de esta manera se considera la longitud total para cada uno de los segmentos.



*Figura 13. Elementos para calcular el índice SL. A. punto de mayor altura del segmento. B. Punto de menor altura del segmento. C. Punto sobre línea divisoria. D. Punto medio del segmento. La diferencia de alturas ( $\Delta H$ ) se obtiene por A-B, La diferencia de longitud  $\Delta L$  es de 1 km y la longitud  $L$  es la distancia medida desde el punto C hasta el punto D sobre el cauce del escurrimiento.*

Los valores obtenidos fueron almacenados en una tabla de Excel en el que se configuraron los parámetros para el cálculo del índice, en esta tabla se organiza la información de manera sencilla de acuerdo con Borges y Silva (2017) (Figura 14).

INDICE SL										
No. Segmento	Distancia a Límite de cuenca	Cálculo de inclinación	Longitud del segmento (ΔL)	Sumatoria de segmentos	Mitad del segmento	Valor del segmento (L)	Altura Máxima	Altura Mínima	Dif altura (ΔH)	Índice SL
1	4,533.99	0.0123	734.39	734.39	367.20	4,901.19	1,030.00	1,021.00	9	60.0642
2	4,533.99	0.0000	1,000.00	1,734.39	500.00	5,768.38	1,021.00	1,021.00	0	0.0000
3	4,533.99	0.0150	1,000.00	2,734.39	500.00	6,768.38	1,021.00	1,006.00	15	101.5257
4	4,533.99	0.0140	1,000.00	3,734.39	500.00	7,768.38	1,006.00	992.00	14	108.7574
5	4,533.99	0.0120	1,000.00	4,734.39	500.00	8,768.38	992.00	980.00	12	105.2206
6	4,533.99	0.0100	1,000.00	5,734.39	500.00	9,768.38	980.00	970.00	10	97.6838
7	4,533.99	0.0780	1,000.00	6,734.39	500.00	10,768.38	970.00	892.00	78	839.9339
8	4,533.99	0.0440	1,000.00	7,734.39	500.00	11,768.38	892.00	848.00	44	517.8089
9	4,533.99	0.1590	1,000.00	8,734.39	500.00	12,768.38	848.00	689.00	159	2030.1729
10	4,533.99	0.0790	1,000.00	9,734.39	500.00	13,768.38	689.00	610.00	79	1087.7023
11	4,533.99	0.0600	1,000.00	10,734.39	500.00	14,768.38	610.00	550.00	60	886.1030

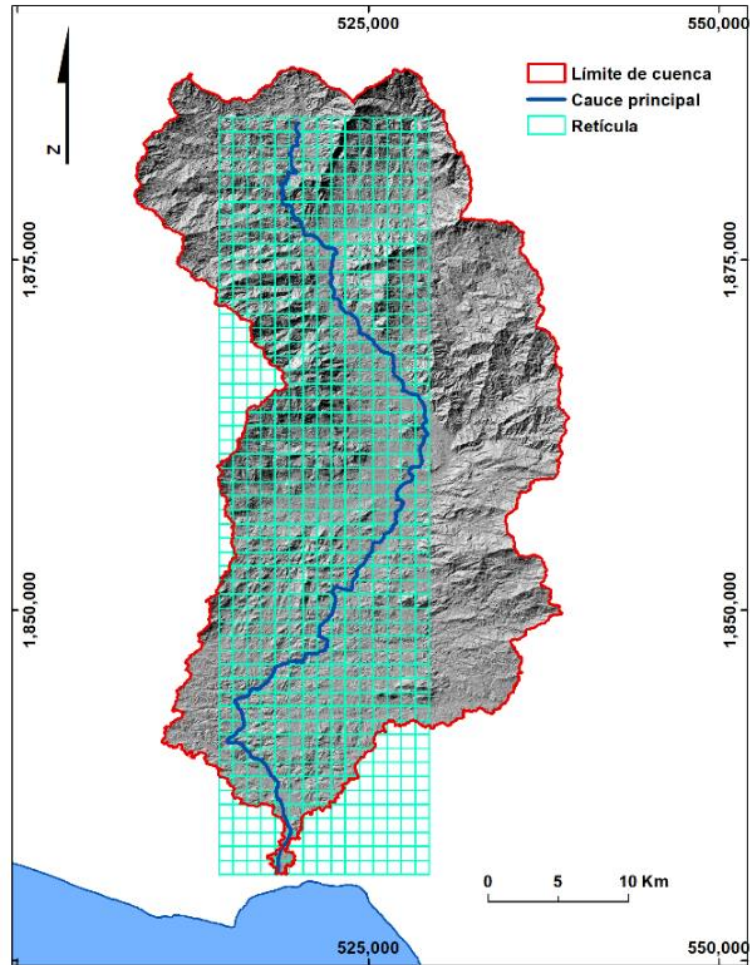
Figura 14. Cálculo del Índice SL. Datos obtenidos de los segmentos y organizados en una hoja de cálculo.

#### 3.2.4. Franja de perfiles longitudinales (Swath).

Este indicador permite hacer una relación entre la concavidad de los canales y la incisión del río, es usado en tectónica activa para identificar las relaciones entre el relieve, la elevación y tasa de denudación (Kirby and Whipple, 2001, 2012).

De acuerdo con Ramírez-Herrera et al. (2018), se generó una retícula de 15 km de ancho con subdivisiones equidistantes de 1 km para cubrir toda la trayectoria del río (Figura 15) con un total de 54 secciones (15 x 54 km), con esta retícula se calculan las alturas Máxima, Mínima y Promedio de cada segmento.

La distribución de esta retícula se realiza a lo largo del cauce principal de la cuenca, los valores se obtienen con la herramienta *Zonal Statistics* del módulo *Spatial Analyst* de ArcGIS, que calcula los valores de altura que se requieren para este indicador, es decir, la altura máxima, la mínima y el promedio para cada celda de 1 x 1 km.



*Figura 15. Se generó una retícula de 15 x 54 km con celdas de 1 km por lado a lo largo y ancho del cauce del Río Marquelia para obtener a partir de estas celdas los valores de la altura Máxima, Mínima y Promedio con los que se generó el perfil longitudinal.*

### 3.3. Terrazas.

La fuerza que genera los cambios en el relieve se asocia a las zonas de subducción, en el caso de la cuenca en estudio en el estado de Guerrero se encuentra en el ante arco de la zona de subducción del pacífico mexicano generada por la acción existente entre las placas tectónicas de Cocos y Norteamericana (Pazzaglia and Brandon, 2001; Ramírez-Herrera and Urrutia-Fucugauchi, 1999) y se ha comprobado que las formaciones de terrazas también obedezcan a cambios levantamientos de la superficie derivados de dicha actividad (Pazzaglia and Brandon, 2001).

Se pueden identificar dos tipos de terrazas, las que son por acumulación de sedimentos y que por cambios en la incisión del río quedan abandonadas como y se identifican como terrazas aluviales (Burbank and Anderson, 2001) las que son creadas por el socavamiento lateral del río en las paredes de las laderas, esta acción genera erosión y posteriormente deja de tener fuerza lo que genera terrazas “strath” (Strahler, 1994).

Utilizando el software Google Earth (Google, 2018), se realizó el trazo de las zonas en donde se identificaron terrazas, apoyado en la visualización en tercera dimensión (3D) se observaron los cambios de altura a partir del cauce y hacia ambas vertientes del río.

#### **3.4. Fallas.**

Se considera que existen accidentes geográficos, también identificados como evidencias morfológicas o “marcas” que muestran las características principales en el relieve: **1)** Geometría no deformada, **2)** Edad conocida; y **3)** El grado de conservación que puede ser alto con respecto a la escala de tiempo del proceso tectónico que se estudia (Burbank and Anderson, 2001).

En este estudio con el análisis de la red hídrica de la cuenca del Río Marquelia, se utilizaron los cauces y sus trayectorias para la identificación de las evidencias morfológicas que puedan señalar los accidentes en el relieve y con esto inferir fallas que confirmen la actividad tectónica.

Con el trayecto de los cauces de la red hídrica se observaron cambios de dirección (cercaos a los 90°), con este análisis se identificaron 4 sitios de posibles fallas, posteriormente se procedió a revisar la litología de la zona para descartar elementos como zonas de transición entre uno dos o más tipos diferentes, así como su influencia en el tipo de patrón del escurrimiento.

#### **Trabajo de Campo.**

Se realizaron mapas de recorrido en los que se identificaron dos características principales, en primer lugar, los sitios en donde se espera recabar evidencia de la presencia activa de fallas,

en segundo lugar y debido a la agrupación de las terrazas identificadas fue necesario localizar los accesos más cercanos hacia estas.

Fueron programados cuatro días tanto para la llegada a la zona de estudio como para el recorrido a los máximos sitios posibles, ya que la distribución de las terrazas se presenta a lo largo de los 80 km de longitud del Río Marquelia en agrupamientos dispersos.

Se realizó el recorrido de la zona de estudio con el objetivo de ratificar los accidentes geográficos identificados con los índices geomórficos construidos, verificar la litología, realizar mediciones de las terrazas identificadas y extraer muestras para la datación de terrazas.

El recorrido se realizó a lo largo de la trayectoria del Río Marquelia, aunque en zonas de poca o nula accesibilidad no se logró la visita en este primer recorrido, sino en un segundo viaje, el trabajo de campo fue programado con base al análisis previo de la cartografía consultada (INEGI, 2010c), imágenes de satélite (Google, 2019) y, el DEM con resolución de 12 metros (TanDEM). Los productos obtenidos (Red hídrica y el límite de cuenca) también fueron empleados para la programación del recorrido en campo.

Se visitaron un total de 10 sitios registrados con GPS, en los que se llevó a cabo la medición de 10 terrazas, 2 sitios en los que se obtuvieron muestras para correlación de terrazas, 1 sitio en la que se tomó la muestra de cerámicas para obtener la datación y 1 sitio para la verificación de falla geológica.

La medición de las terrazas se realizó con distanciómetro laser, en algunos casos se realizó desde la vertiente contraria y en otras en la misma vertiente en la que se identificaron, obteniendo también el registro gráfico (fotografías), registro GPS y altura por cada terraza



## 4. RESULTADOS.

### 4.1. Análisis de la Red Hídrica.

La red hídrica fue clasificada en gradientes de corrientes, que indica un valor por cada uno de los nodos que se unen entre los afluentes, iniciando el conteo desde los más altos y continuando río abajo hasta llegar al fin del cauce o desembocadura de la cuenca, ), donde los cauces sin ramificación son de orden 1, al unirse a otro se clasifica como orden 2, así sucesivamente hasta llegar al orden máximo que en este caso es orden 6 (Figura 16) (Strahler, 1952).

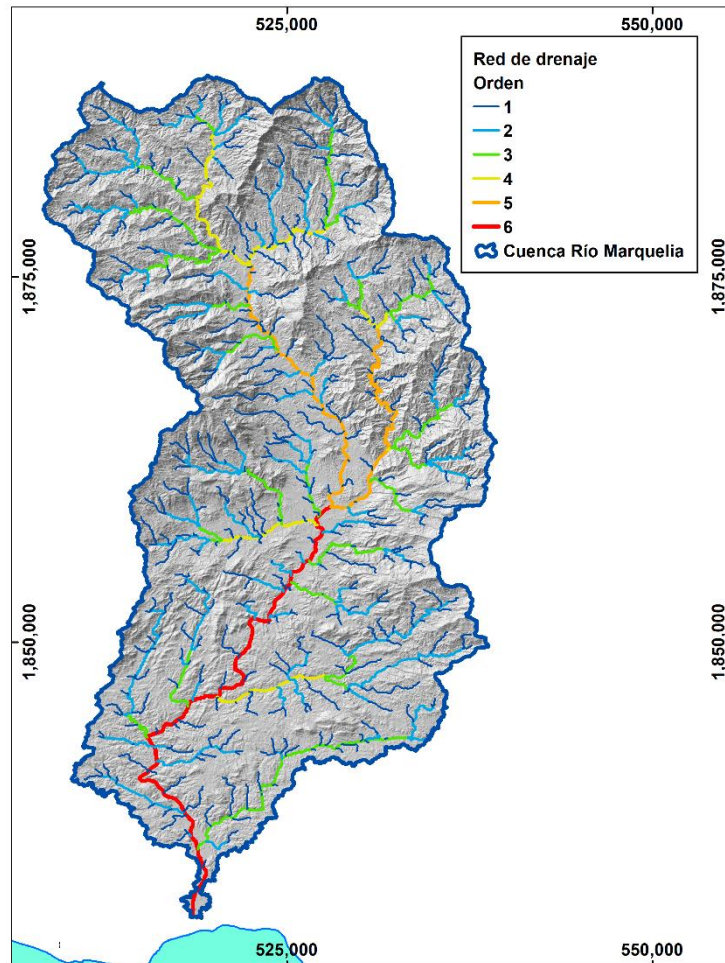


Figura 16. Red Hídrica y Orden de la red de la cuenca del Río Marquelia. Se muestra el orden de los ríos de la red de acuerdo con la clasificación de Strahler (1952).

Se observa en general una distribución de tipo dendrítico en toda la cuenca, a excepción de la vertiente derecha del Río Marquelia al sur de la esta, en donde se presenta un patrón de tipo Trellis, ya que se compone de cauces cuyos tributarios son cortos y forman ángulos rectos (Strahler, 1994).

El límite de la cuenca del Río Marquelia obtenido muestra una superficie menor con el delimitado por INEGI (2010b), entre ambos se observa una diferencia de 250.28 km<sup>2</sup>, para el análisis de este estudio se considera el obtenido con el procedimiento del apartado 3.1.1.2 (Figura 17).

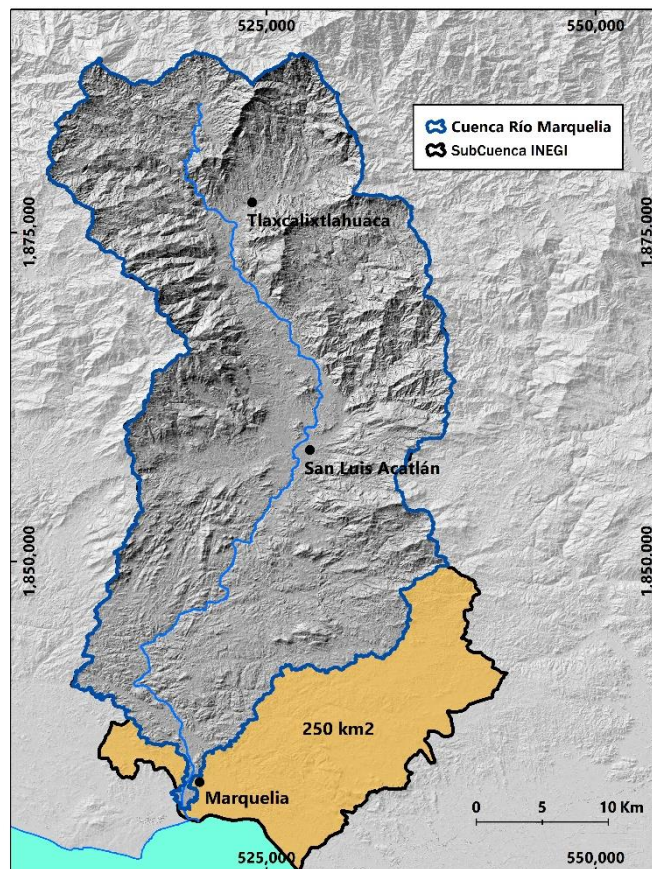


Figura 17. En azul el límite de cuenca del Río Marquelia obtenida, y en negro el de la subcuenca de INEGI, 2010b.

### **Fisiografía de la cuenca.**

La cuenca presenta una orientación general en sentido Norte – Sur, se distribuye a través de 2 municipios, San Luis Acatlán al Norte y Marquelia al Sur, tiene una superficie de 1,086.35 km<sup>2</sup>, con un perímetro de 221.19 km.

El cauce principal es identificado con el nombre de Marquelia, aunque en la cabecera municipal de San Luis Acatlán lo identifican como Río Grande. El valle de este río se caracteriza de acuerdo con el modelo de pendientes en tres zonas, la primer zona se identifica como Cuenca Alta a partir de la latitud 16°56'23.49"N y hasta el parteaguas al norte de la cuenca, donde se observa un valle escarpado con pendientes mayores a 20°.

La Zona II o Cuenca Media se define desde el límite sur de la Zona I y hasta los 16°48'12" caracterizada por escarpes con pendientes entre entre 5° y 19°, algunos perfiles muestran pendientes mayores a 20°, finalmente la zona identificada como Cuenca Baja cuyo límite es la desembocadura de la cuenca presenta pendientes menores a 11°y algunas de 18° (Figura 18).

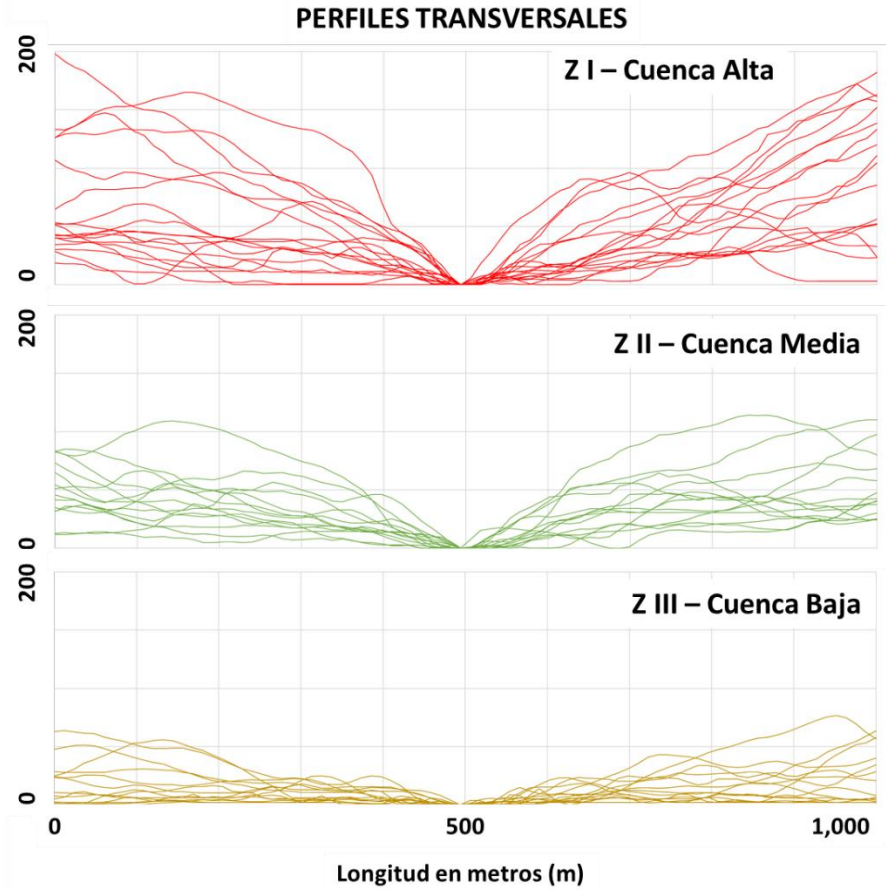
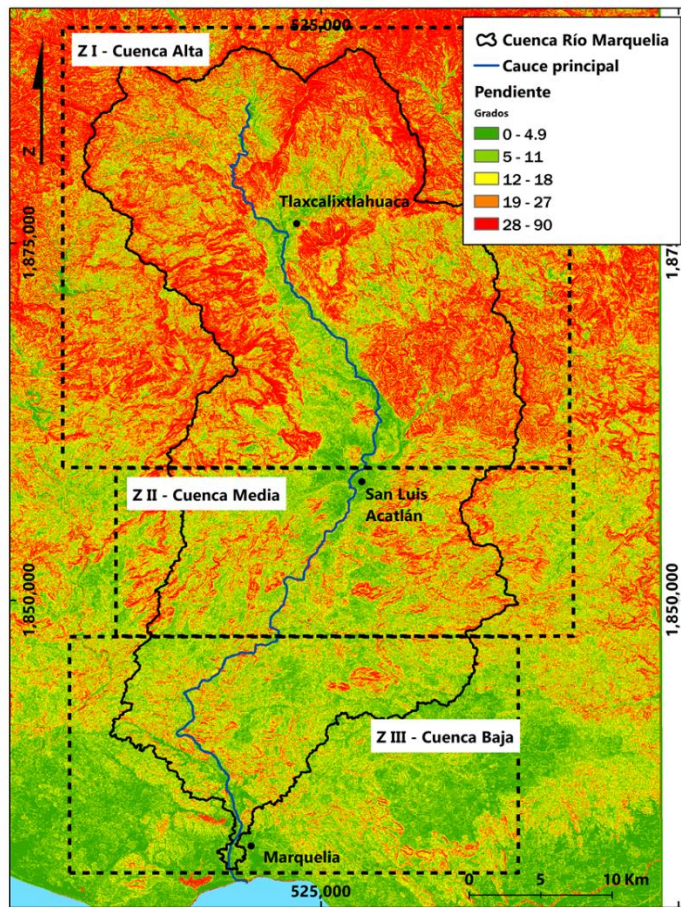


Figura 18. Izquierda. Zonas identificada a partir de las pendientes obtenidas. Derecha. Perfiles longitudinales del valle del Río Marquelia, en Zona I se llegan a obtener valores de 200 m de altura relativa respecto a la base del cauce, así mismo en la Zona II estas alturas llegan a los 100 m mientras que en la Zona III son de alturas bajas con algunos picos de hasta 70 m, en esta última zona se observa un valle amplio que se va reduciendo hacia las zonas II y I respectivamente.

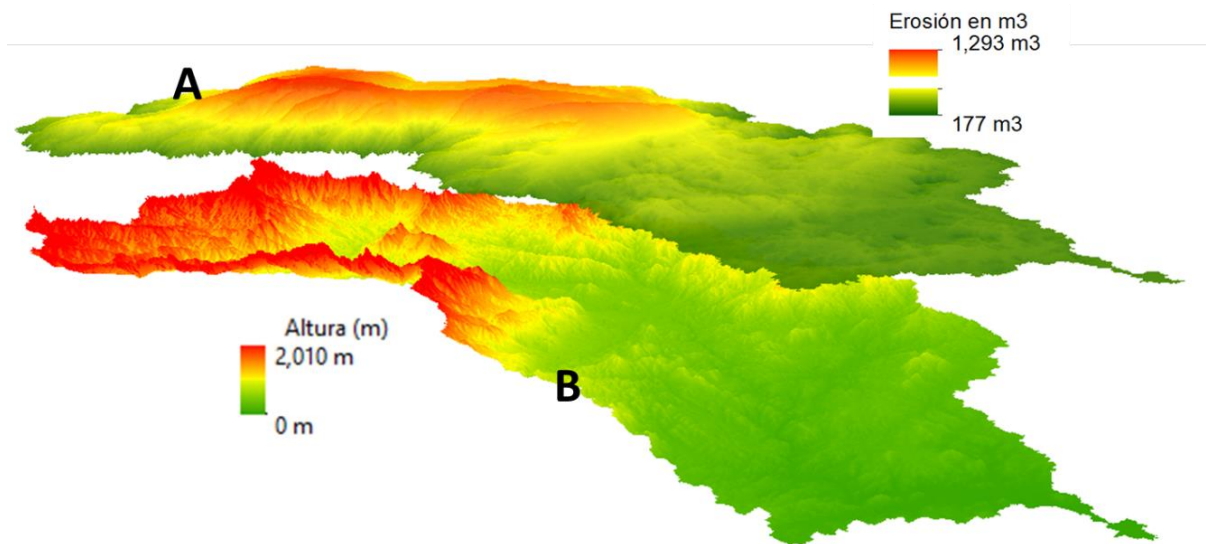
## 4.2. Aplicación de Índices geomórficos en tectónica activa.

### 4.2.1. Cálculo de la Cantidad Mínima de Erosión.

La superficie o área en  $\text{km}^2$  de la cuenca del Río Marquelia es de  $1,086.35 \text{ km}^2$ . El Volumen de Mínima Erosión igual a  $468.33 \text{ km}^3$ . En la Figura 19 se observa la superficie de la Cuenca del Río Marquelia y la superficie de pre-erosión.

La superficie **A** es el resultado del modelo de pre-erosión en el que se observa en tonos verdes las zonas con menor erosión y las rojas identifican la máxima erosión, la superficie **B** representa las configuración altitudinal de la cuenca donde los colores verdes indican alturas bajas y un valle más extendido y los tonos en rojo las alturas mayores de la cuenca en donde se identifican los valles escarpados.

### Superficie de pre – erosión (A) y cuenca hídrica actual (B)



*Figura 19. Índice de Mínima Erosión. Superficie hipotética (A) es el modelo de pre – erosión en el que se obtienen valores de hasta  $1,293 \text{ m}^3$  erosionados. Cuenca del Río Marquelia (B). Se observa que la acción fluvial ha trabajado más en la zona norte (A) de la cuenca, con este indicador se puede identificar una zona norte de máxima erosión y una zona sur de acumulación de sedimentos, puesto que el resultado es de hasta  $-177 \text{ m}^3$  de erosión. Derivado de este índice es posible identificar tres zonas en función de la distribución de los valores del modelo de pre – erosión.*

**Zona I Cuenca Alta.** La máxima erosión obtenida por el modelo se observa desde la localidad San Luis Acatlán y el límite norte de la cuenca, en donde los valores a partir del cauce del río

oscilan entre los 600 m<sup>3</sup> y 1,293 m<sup>3</sup>; cabe mencionar que en los límites de esta se obtuvieron valores de 12 m<sup>3</sup> (Figura 20).

**Zona II Cuenca Media.** Se obtuvieron valores entre los 129 m<sup>3</sup> y 600 m<sup>3</sup>, estos valores se distribuyen al sur de la localidad San Luis Acatlán y hasta la latitud 16°41'31.71"N.

**Zona III Cuenca Baja.** Se obtuvieron valores menores a 129 m<sup>3</sup>, incluso se registran valores negativos de hasta -177 m<sup>3</sup>

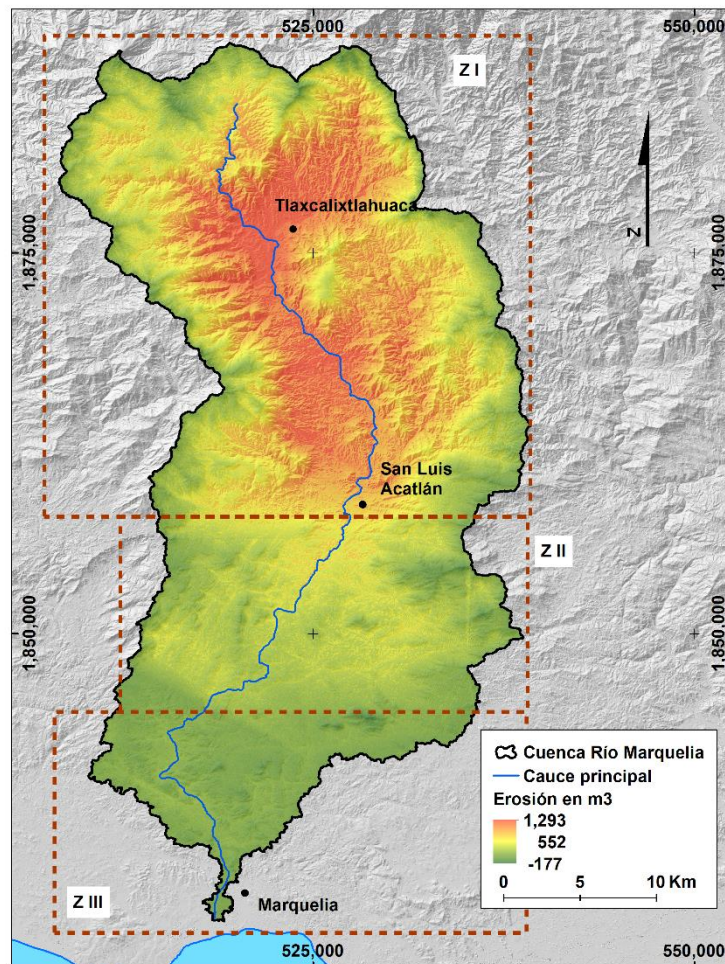


Figura 20. Distribución de la erosión mínima en tres grandes zonas dentro de la cuenca del Río Marquelia.

#### 4.2.2. Cálculo de la Relación Volumen – Área.

Este cálculo nos indica a manera de razón la relación existente entre el volumen de una cuenca en km<sup>3</sup> respecto a la superficie en km<sup>2</sup> (Frankel and Pazzaglia, 2005), el resultado es el siguiente:

$$R = 468.33 / 1,086.35 \text{ km}^2$$

$$R = \mathbf{0.43} \text{ km, también puede expresarse en m } R = 430 \text{ m}$$

El material estimado de erosión en la cuenca demuestra la actividad tectónica en esta, los valores cercanos a 0 no son representativos de la actividad tectónica, sin embargo y de acuerdo con (Frankel and Pazzaglia, 2005) aquellos resultados mayores a 100 m son generados debido a las altas tasas de elevación y pendientes con ángulos mayores, por lo tanto, el resultado obtenido de 430 m indica una tasa alta de elevación relativa en la zona de estudio.

#### 4.2.3. Índice de Gradiente - Longitud (SL).

El índice de Hack o **SL** presenta resultados desde 0 hasta 2,100 , con una distribución de valores más altos en la zona norte de la cuenca y al sur de esta, en la Figura 21 se muestra el perfil longitudinal (azul) y el Índice **SL** (amarillo), se observa una diferencia de 238 m en el cauce del Río Marquelia en los segmentos 73 y 74, en donde el valor del índice es de 1,951 y 1,048 respectivamente, cabe mencionar que el Índice **SL** es una medida adimensional (Hack, 1973).

El índice SL se relacionó con el tipo de roca, con lo que se observaron diversos segmentos en los que el resultado presenta valores altos, mismos que están asociados a los límites entre diferentes tipos litológicos, sin embargo, se observan dos sitios en donde no sucede esto.

El primero de estos se encuentra a 13 km de la costa sobre el cauce del río (punto rojo), lugar en donde se realizó verificación en campo observando una ruptura de pendiente, cambio del ancho del cauce y cambio en la energía de este. El otro punto que se observa en la gráfica se localiza en la parte alta de la cuenca a 74 km de la costa sobre el río, al norte de la localidad Tlaxcalixtlahuaca.

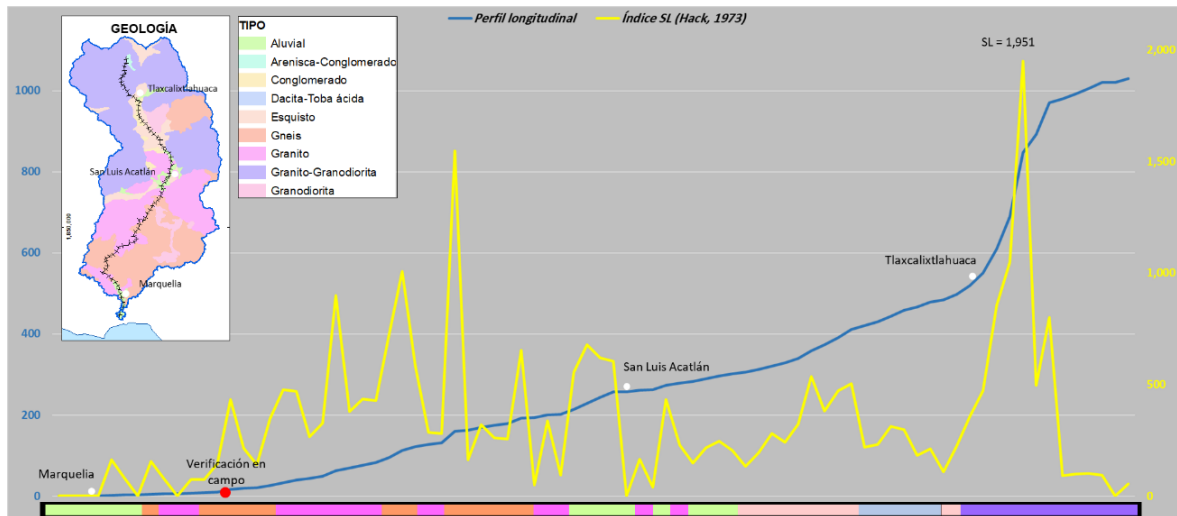


Figura 21. Gráfica del índice Gradiente – Longitud (SL). Perfil topográfico del Río Marquelia con la sobreposición del índice SL, ambos se relacionan con el tipo de roca representado en las bandas de colores en la parte inferior.

#### 4.2.4. Franja de perfiles longitudinales (Swath).

Con base a los perfil longitudinales se observa de manera general un incremento gradual en la elevación desde la línea de costa hasta el límite superior de la cuenca, con una cambio notorio entre el segmento delimitado por el km 29 (450 m.s.m.m) y el (1,050 m.s.m.m), la diferencia en altura es de 600 m. Sobre la trayectoria de los perfiles, se identifican tres inflexiones importantes, la primera sobre el kilómetro 12 localizada aproximadamente a 8 km al norte de la cabecera municipal Marquelia. (Figura 22.).

La segunda inflexión se identifica en el kilómetro 28 ubicada al sur y muy cercana de la localidad San Luis Acatlán y una tercera a la altura del km 47 que coincide también con la ubicación de la localidad Tlaxcalixtlahuaca.



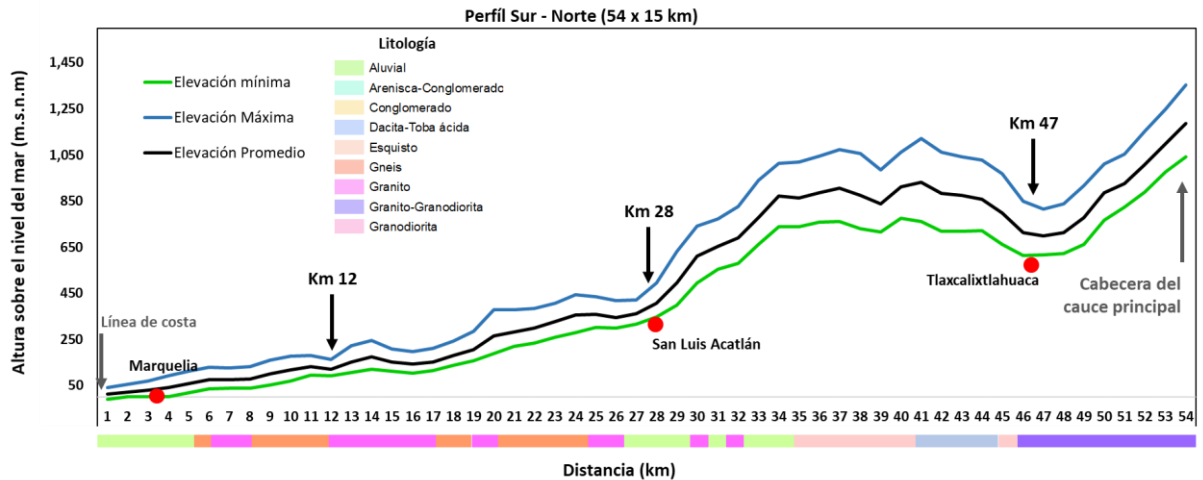


Figura 22. Franja de perfiles longitudinales. Valores: Máximos en azul. Mínimo en verde y Promedio en negro. Se observa tres cambios significativos de la elevación del río. Litología al borde inferior de la gráfica.

### 4.3. Terrazas.

El modelado de la topografía se debe a dos factores el primero es la actividad erosiva de la precipitación y el segundo es la actividad tectónica (Pazzaglia and Brandon, 2001), debido al segundo factor, el relieve presenta zonas de acumulación y de abandono del cauce, estas se identifican como terrazas, se digitalizaron un total de 103 en ambas vertientes del Río Marquelia (Figura 23).



Figura 23. Digitalización de terrazas utilizando Google Earth (Google, 2018), se identificaron un total de 103 polígonos.

Debido a su distribución a lo largo del Río Marquelia las terrazas fueron agrupadas en función de su ubicación en la cuenca en: alta, media y baja para su análisis. En la (Figura 24) se muestran y se enlistan en sentido norte a sur.

- I. Cuenca Alta. Con 27 terrazas desde la localidad San Luis Acatlán hasta la localidad Tlaxcalixtlahuaca.
- II. Cuenca Media. 11, desde la localidad San Luis Acatlán y hasta 16 km hacia el sur.
- III. Cuenca Baja. 65 que se distribuyen desde la desembocadura del Río Marquelia hasta 27 km sobre el cauce en dirección río arriba.

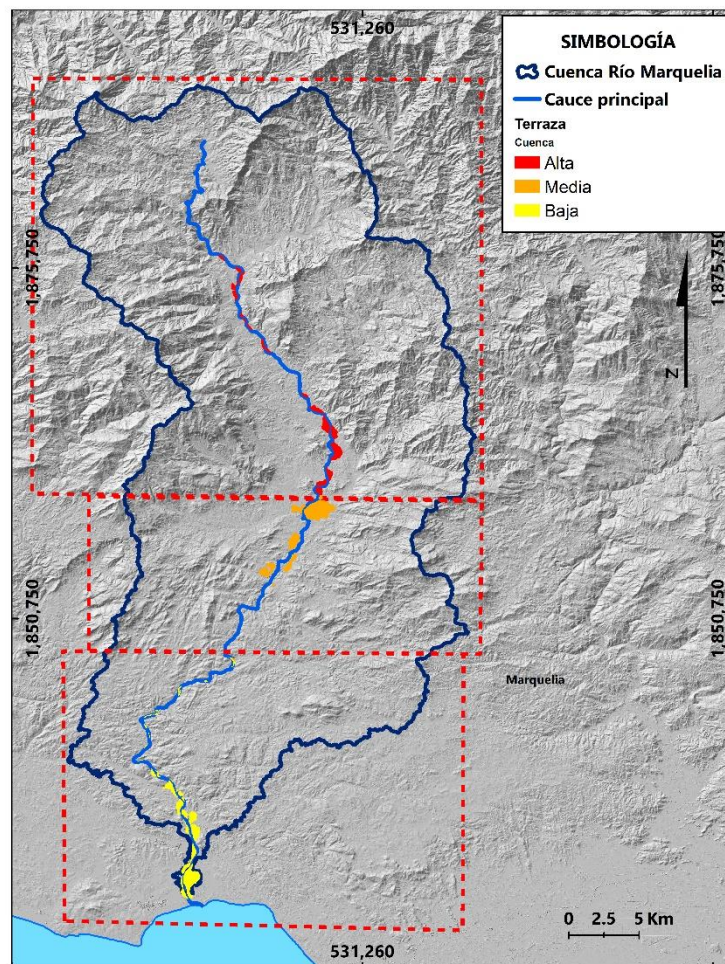


Figura 24. Terrazas identificadas y su distribución por zonas para el análisis y vista en campo.

#### 4.4. Fallas.

En este estudio con el análisis de la red hídrica de la cuenca del Río Marquelia, se utilizaron los cauces y sus trayectorias para identificar los rasgos en la topografía que puedan señalar cambios en el relieve y con esto inferir fallas que demuestren la actividad tectónica, el estudio de las características de los sistemas fluviales ha servido para confirmar la actividad tectónica, e incluso para discutir sobre las mediciones que se realizan geodésicamente (Keller and Pinter, 2000). Con la trayectoria de los cauces de la red hídrica se observaron cambios de dirección (cercanos a los 90°), con este análisis se identificaron sitios en los que se infiere la presencia de fallas (Figura 25).

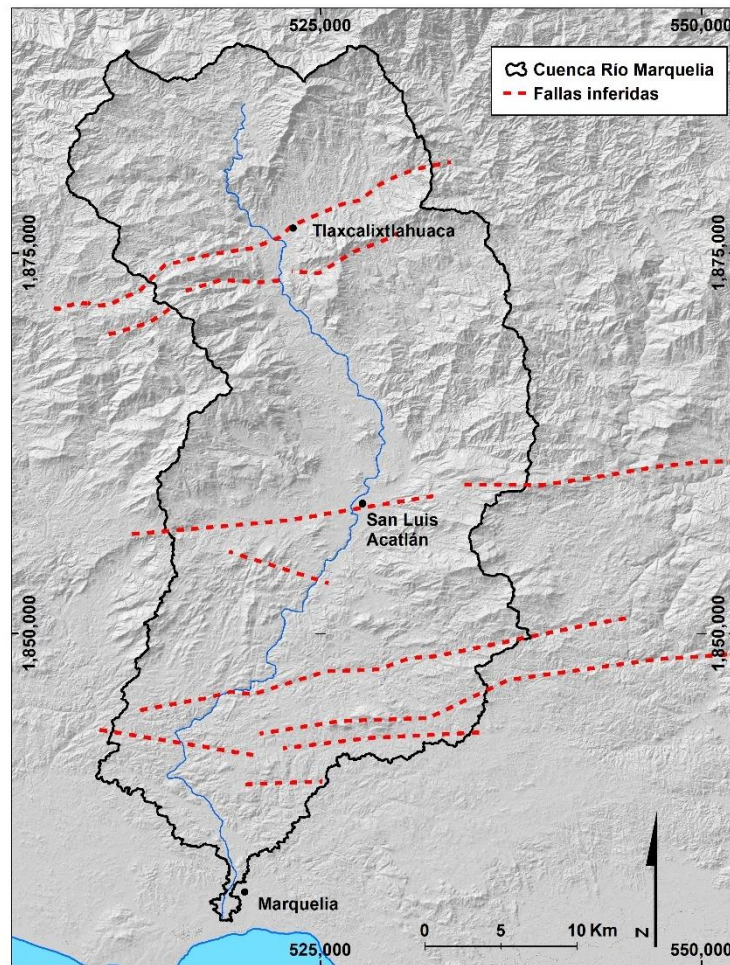
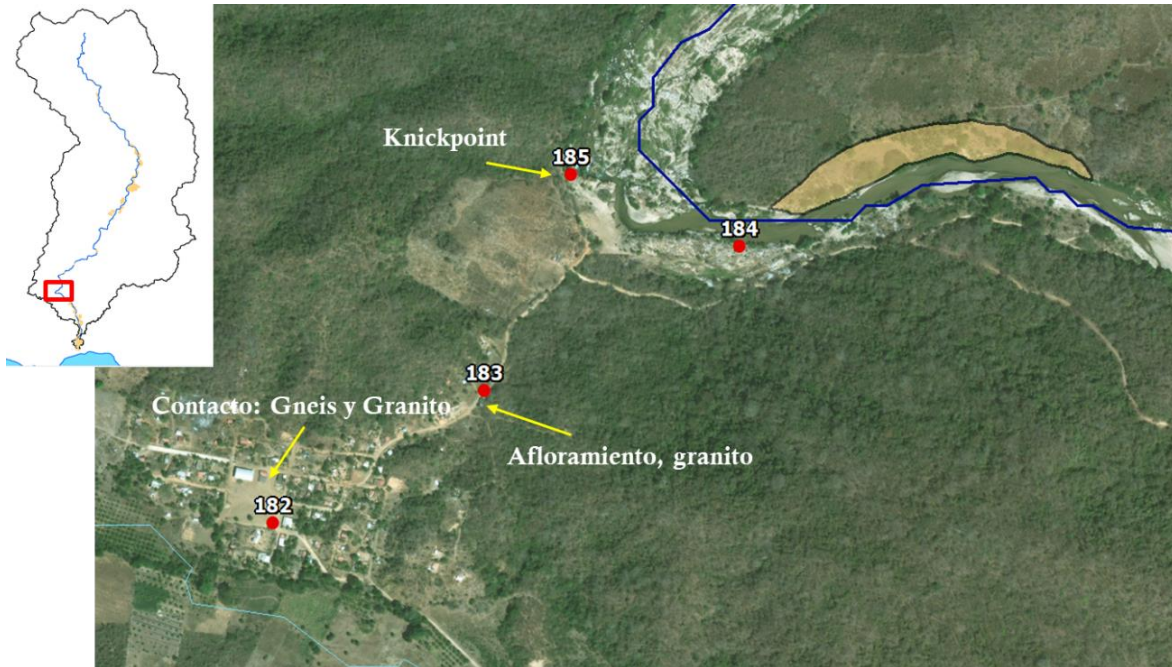


Figura 25. Derivado del análisis de la trayectoria de los cauces se identificaron 4 zonas en las que se infiere la presencia de fallas.

#### 4.5. Trabajo de Campo

El primer sitio que se visitó se encuentra muy cercano a la localidad “Cañada de Azúcar” misma en la que se identificó un afloramiento de contacto entre roca de tipo gneis y granito (Punto GPS 182), así como de granito en un costado del camino hacia el Río Marquelia (Figura 26).



*Figura 26. Sitio de falla Inferida. Punto GPS 185: Zona de cambio de altura del río, así como inicio del cambio de trayectoria. Puntos GPS 182 y 183 identificación de afloramientos de roca.*

En el río se observó que la roca es granito, sin encontrar evidencia de algún otro tipo, así mismo se identificó un “Knickpoint” coincidente con el cambio de la trayectoria del río, en esta zona, se observa un valle ancho con exposición de rocas, el cauce se encajona ganando fuerza hacia el punto de ruptura de la pendiente (Figura 27 A), y posterior a este se amplía reduciendo también la fuerza del río (Figura 27 B).

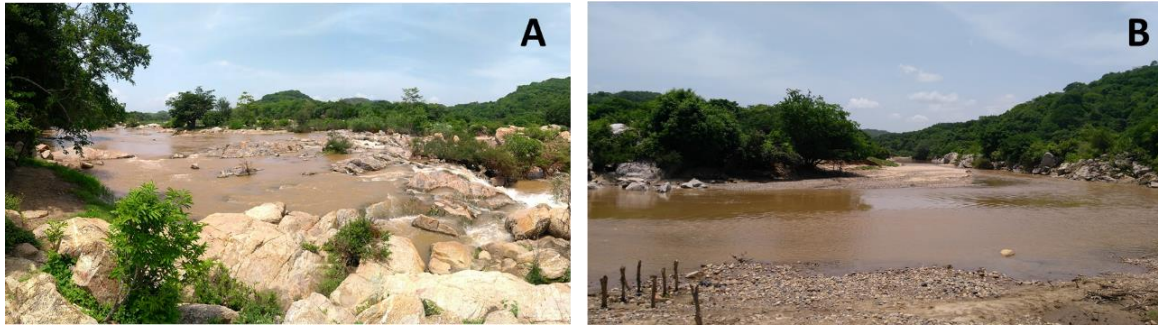


Figura 27. Knickpoint. A) Ancho del Río antes del cambio de altura identificado. B) Ancho del río posterior al salto observado.

Se realizó el recorrido en la zona de estudio con el objetivo de confirmar los rasgos geográficos identificados con los índices geomórficos construidos, verificar la litología, realizar mediciones de las terrazas identificadas y extraer muestras para su datación.

Se visitaron un total de 14 sitios y fueron registrados con GPS, en los que se llevó a cabo la medición de 14 zonas de terrazas, de estos en 3 sitios se obtuvieron un total de 4 muestras para examinar por OSL (Huntley et al., 1985), en uno de estos sitios en la que se tomó la muestra de lajas para obtener la datación, y 1 sitio para la verificación de presencia de falla geológica.

#### 4.5.1. Terrazas

Se visitaron en campo un total de 45 de las 103 terrazas identificadas en gabinete lo que equivale a un 43 % del total, que a su vez fueron medidas e identificadas según su formación (Strath o de depósito -Fill-), se observó y registró que las terrazas cuya formación es por depósito se localizan principalmente hacia la zona baja de la cuenca, en contraste a las de tipo Strath que son localizadas en su mayoría hacia la zona alta.

En la Figura 28 se muestra la distribución de las terrazas en mención, se concentran en tres grupos de acuerdo con su localización en el segmento de cuenca al que corresponden, ya sea alta media o baja. Las visitas se realizaron en los sitios con mejor accesibilidad con la finalidad de optimizar los tiempos en campo para realizar las mediciones *in situ*. La descripción específica se describe más adelante.

## DISTRIBUCIÓN DE TERRAZAS POR TIPO

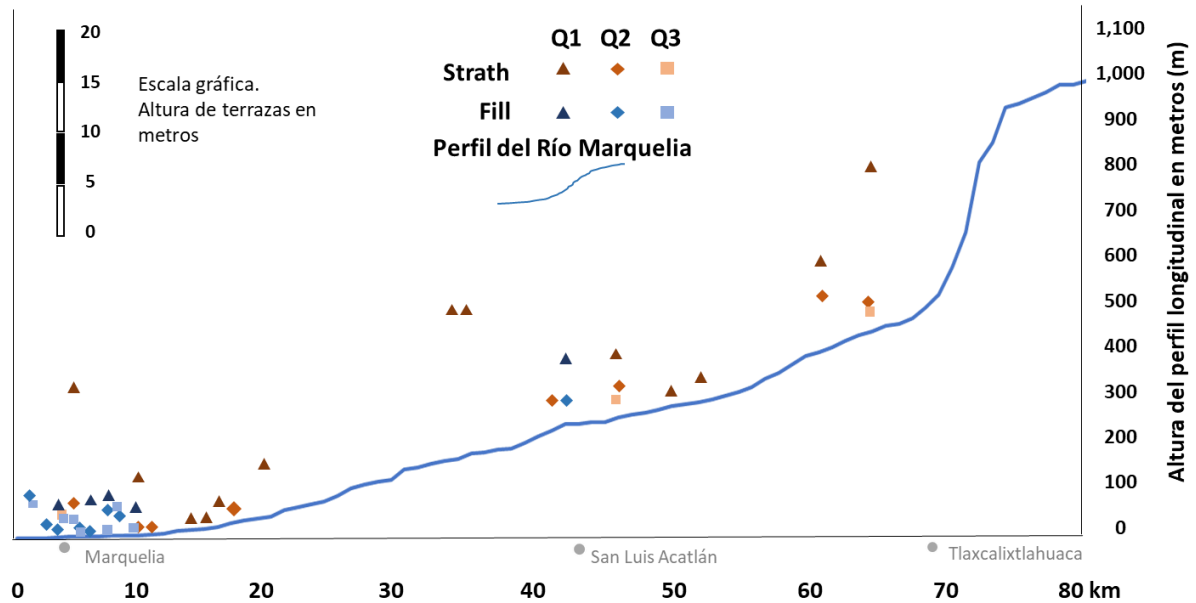


Figura 28. Terrazas localizadas en las zonas de visita. Q1 terrazas con mayor altura relativa y menor cercanía al cauce, Q2 terrazas con menor altura relativa. Q3 Terrazas de menor altura relativa y junto al cauce del Río.

### Zona I. Cuenca Alta.

#### Grupo 1.

Se visitaron dos sitios donde se identificaron terrazas en gabinete, midiendo un total de 5 de estas (Figura 29), en el primer sitio se midieron tres terrazas: Q3: 1,90 m, Q2: 3.54 m y Q1: 18 m, estas alturas son relativas al nivel del cauce en el lugar de la medición, y se identificó por el sustrato rocoso que son de tipo Strath, cabe señalar que para la terraza Q1 no se identificó una evidencia clara para definir el tipo.

En este mismo sitio se identificó un “Knickpoint” con roca expuesta, no se logró realizar la medición del cambio de altura con el distanciómetro en esta parte del Río Marquelia.

En el sitio Atotonilco se midieron dos terrazas más, con alturas relativas de Q1: 6.00 m y Q2: 9.08 m, ambas de tipo Strath debido a su composición con poca formación de suelo y una

evidente exposición de rocas en toda la superficie de las terrazas. Cabe mencionar que también presentan una densidad alta de vegetación de tipo arbórea, por lo que es difícil su delimitación por medio de imágenes satelitales.

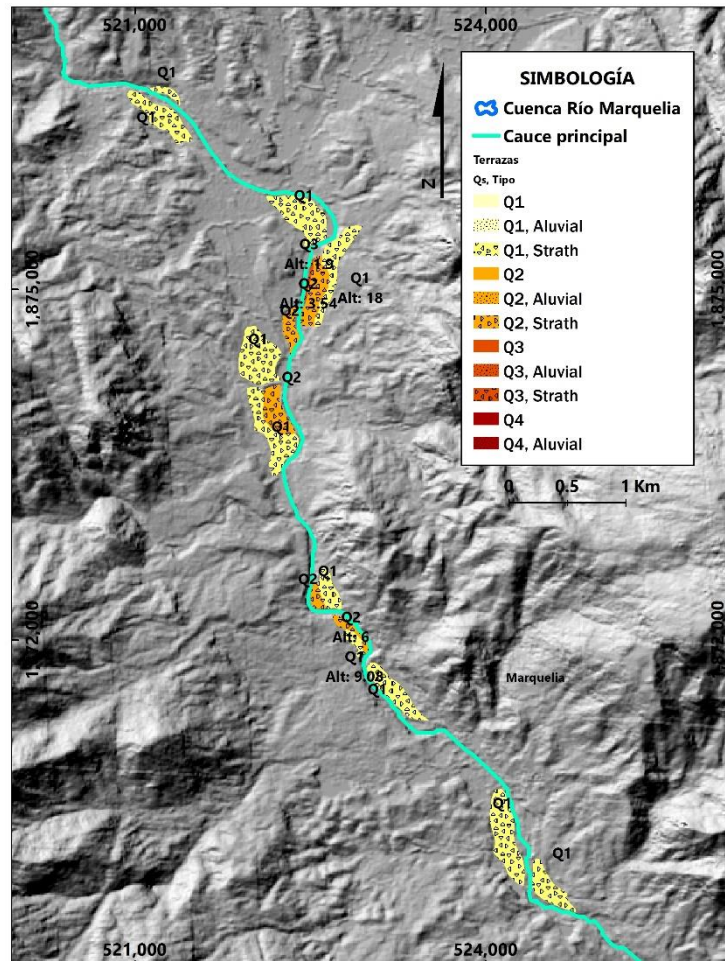


Figura 29. Zona I. Identificación de terrazas, en esta zona todas corresponden al tipo Strath.

## Grupo 2

Cabe mencionar que este segundo grupo de terrazas ha quedado dividido en dos partes una que se localiza en la cuenca alta y la otra en la cuenca media por lo que esta segunda se describirá en dicho segmento.

En este grupo se visitaron 4 sitios identificando, midiendo y clasificando 10 terrazas, de las cuales 2 son de tipo aluvial y 6 de tipo Strath (Figura 30). Originalmente se identificaron las terrazas en donde se encuentra emplazada la localidad San Luis Acatlán, pero debido a su alto grado de alteración y urbanización se decidió identificar la vertiente derecha del Río Marquelia.

Se midieron dos terrazas de tipo aluvial con alturas de Q1: 2.53 m y Q2: 6.09 m, se realizó una medición hacia la vertiente izquierda obteniendo un valor de Q2: 5.40 m, se correlaciona con el mismo nivel que Q2: de la vertiente izquierda.

Al norte de esta localidad se midieron 3 terrazas con alturas relativas de Q1: 2.1, Q2: 3.63 y Q3: 6.71. estas terrazas se extienden a lo largo de la vertiente izquierda del Río Marquelia con una longitud aproximada de 1 km, en esta extensión también fue posible identificar un “Knickpoint” de 5 metros de acuerdo con la medición realizada con el distanciómetro laser.



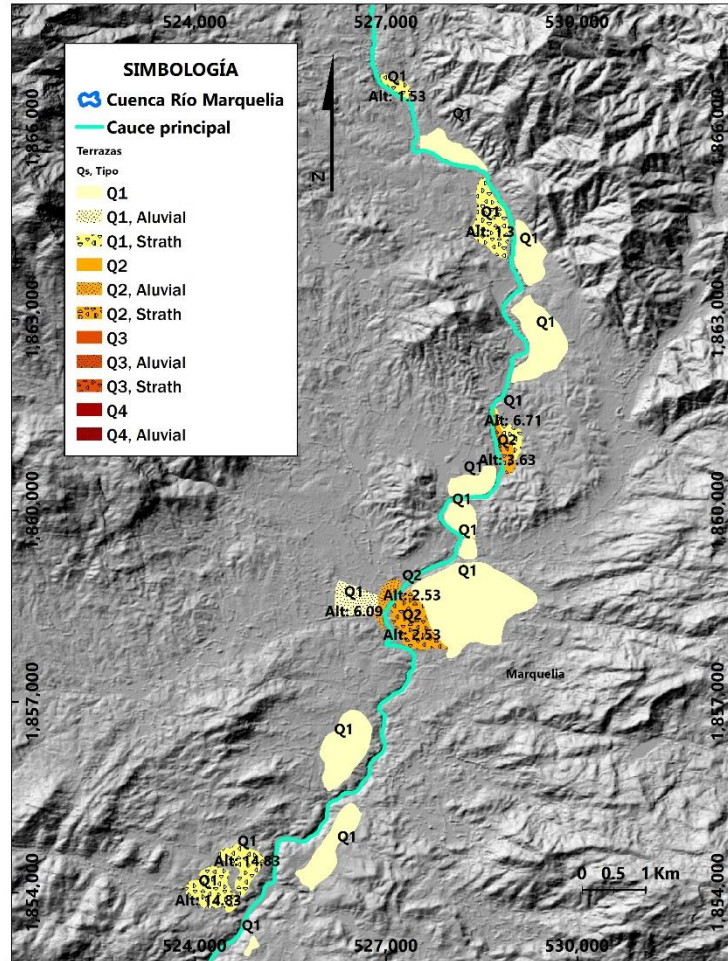


Figura 30. Zona Centro. Clasificación de terrazas Aluviales y Strath.

Esta parte del río presenta muchas rocas expuestas, sin depósitos de material aluvial, logrando identificar diferentes tipos de roca como son: riolita, pegmatita (solo algunas venas), granito y conglomerado.

Se tomó una muestra para su análisis por OSL (Huntley et al. 1985; Muñoz-Salinas y Castillo-Rodríguez, 2014) de Q1, con lo que se espera llevar a cabo una datación de los sedimentos y la correlación con terrazas de la zona sur. También se realizó una cepa para la obtención de muestras de carbono y llevar a cabo una datación por  $^{14}\text{C}$  (Carbono 14).

## Zona II. Cuenca Media.

Del grupo dos se identificaron dos terrazas más cercanas a las localidades “El Cuajilote” con una altura de Q1:1.30 m y otra en la localidad “Horcasitas” con altura de Q1: 1.53 m ambas de tipo aluvial

### Grupo 3

En este grupo se identificaron en gabinete 17 terrazas, de las cuales, y debido a la difícil accesibilidad hacia estas solo 8 se midieron en campo, estas terrazas muestran roca expuesta y poca o nula formación de suelo (Figura 31). Estas terrazas presentan depósitos de arena, sin materia orgánica por lo tanto sin formación de suelo.



*Figura 31. Terrazas de tipo Strath con altura relativa de 5.09 m, sin presencia de suelo o sedimentos y con depósito de arena.*

En las rocas expuestas se observa la marca del nivel del agua, indicando que por temporadas el cauce del río llega hasta este nivel (5.09 m por arriba del cauce identificado en la fecha del registro 20/02/2019), estas terrazas se encuentran distribuidas en la zona central del Río Marquelia a 5 km río arriba desde la localidad Cañada de Azúcar (Figura 32).

Las alturas relativas de estas terrazas se registraron desde los 0.45 m hasta los 5.09 m, con algunas cercanas a los 3.00m, cabe mencionar que en general el río en toda esta zona muestra grandes rocas expuestas de más de 2 metros de altura, que se identifican como rodantes (Figura 33) y que han sido transportadas o desprendidas por el río. Cabe mencionar que en

diversos puntos de la zona III se observó que la pared del río en la margen derecha presenta roca desnuda.

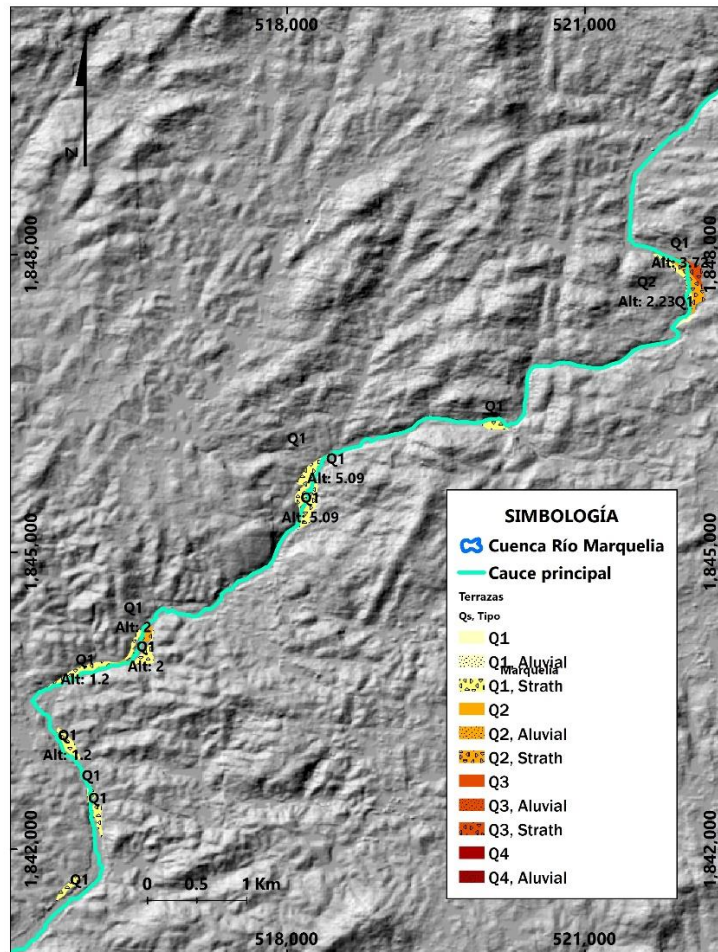


Figura 32. Zona III. Identificación de terrazas y clasificación por tipo.



Figura 33. Izquierda. Roca rodada o depositada en el sitio con altura aproximada de 2 m, en esta sección del río el relieve predominante es de rocas de este tipo. Derecha. Ladera derecha del río constituida por roca desnuda.

### Zona III Cuenca Baja.

Las terrazas visitadas en esta zona fueron 10 de 48, de estas 7 fueron clasificadas de tipo aluvial debido al registro de depósitos de material fino y 3 de tipo Strath en donde se observó roca de tipo granito y gneis, estas últimas se encuentran en la localidad “El Zapote”, con alturas en metros relativos (respecto al nivel del Río Marquelia) de Q1: 1.38, Q2: 2.60 y Q3: 14.26. (Figura 34). En este sitio se identificó una zona de contacto entre depósitos aluviales y rocas de granito y gneis, este contacto se localiza en la terraza Q3.

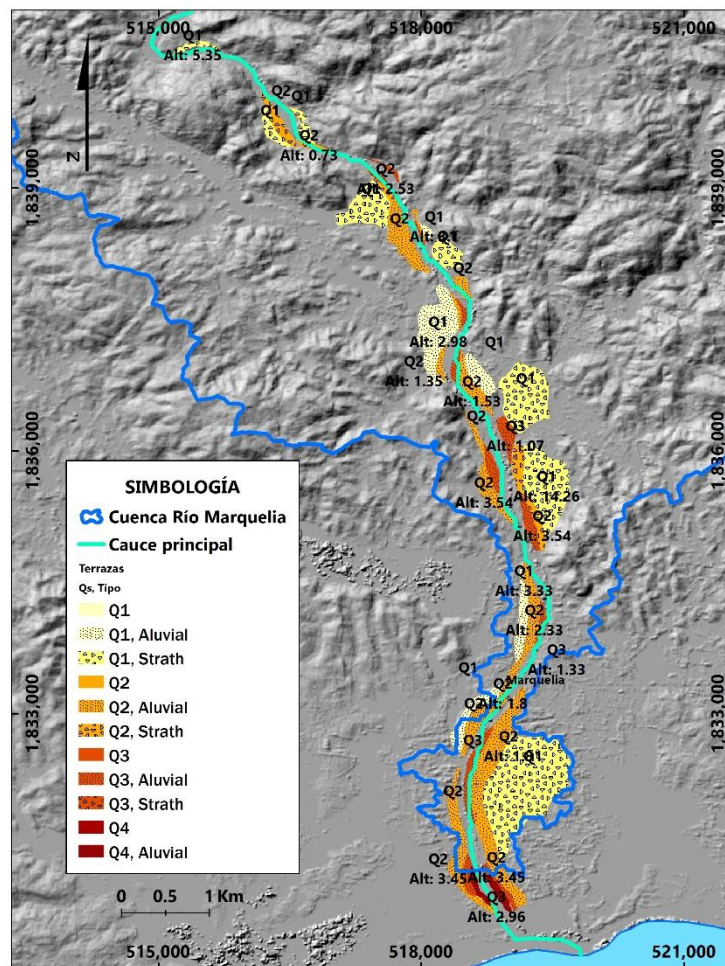


Figura 34. Zona Sur. Clasificación de terrazas Aluviales y Strath.

Se tomaron dos muestras, una en Q3 y otra en Q1 para su medición con base a la técnica de Luminiscencia Ópticamente Estimulada OSL, por sus siglas en inglés (Huntley et al., 1985) con el objetivo de obtener la datación de sedimentos que pueden ser de origen eólico, fluvial y

fluvio-glacial (Mahan et al., 2009; Pope et al., 2008; Sanderson et al., 2007). Para Q3 la muestra fue tomada 20 cm arriba de la zona de contacto, para Q1 se tomó la muestra a 50 cm hacia abajo del nivel del suelo.

## **5. DISCUSIÓN.**

### **5.1. Geomorfología de la Cuenca del Río Marquelia**

La cuenca del Río Marquelia presenta tres zonas, una es la zona norte que presenta un relieve montañoso con valles escarpados, en algunas laderas presenta más de 20° de pendiente, los perfiles topográficos obtenidos (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) así lo demuestran, así mismo, estos presentan en su mayoría que son simétricos, esta zona de la cuenca se compone en su mayoría de roca granito – granodiorita, los valles reflejan una mayor incisión del cauce, que probablemente sucede como respuesta al levantamiento diferencial provocado por la actividad tectónica en la zona (Gaidzik and Ramírez-Herrera, 2017; Ramírez-Herrera et al., 2011; Ramírez-Herrera and Gaidzik, 2017).

Una segunda zona de la cuenca se identifica por valles menos escarpados, con pendientes superiores a los 10° y menores a 20°, en esta zona se identifica menos actividad erosiva de acuerdo con modelo de mínima erosión, se observan algunas montañas no escarpadas y la formación de pequeños valles, la litología existente se compone de gneis y granito principalmente, con una porción menor de granodiorita en la vertiente izquierda del cauce principal del Río Marquelia (INEGI, 2010c).

En la zona sur de la cuenca los perfiles transversales permiten observar una formación del valle muy amplia, ya no se observa la forma de “V”, las pendientes son menores a 10° llegando casi a 0° en las zonas bajas del río. La roca que se observa en esta zona de la cuenca es gneis principalmente, con depósitos aluviales en las laderas cercanas al río aproximadamente 8 km antes de su desembocadura con una extensión lateral al río menor a 1 km (INEGI, 2010).

### **5.2. Análisis de la Red Hídrica.**

La red hídrica presenta un patrón de distribución del tipo dendrítico, salvo un sector en la zona suroeste de la cuenca en la vertiente derecha del Río Marquelia el patrón de distribución es del tipo Trellis (Strahler, 1994), esto hace pensar que el tipo de roca granito (INEGI, 2010c) mantiene una relación estrecha con esta distribución de la red, sin embargo en la vertiente

izquierda del río con el mismo tipo de roca la distribución es de tipo dendrítica como el resto de la cuenca.

En la zona norte de la cuenca, el orden de la red hídrica es de 5 (Strahler, 1952), por lo que la cantidad de afluentes es mayor en esta zona, llegando finalmente a un orden 6 a partir de la cabecera municipal San Luis Acatlán y hacia el sur hasta su desembocadura. Esto indica una mayor concentración de escurrimientos en la zona norte que de acuerdo con VanLaningham (2006) puede ser una concentración tanto de la actividad del levantamiento tectónico o acumulación por lluvias orográficas.

La red hídrica muestra que la zona sur de la cuenca se tiene mayor acumulación de sedimentos, ya que en esta zona es donde se presenta el afluente de mayor orden (6 según Stralher, 1952).

### **5.3. Índices geomórficos.**

#### **5.3.1. Cantidad de mínima erosión (minimum bulk erosion).**

La zona de mayor erosión es identificada al norte de la cuenca como se mostró en el capítulo 4 (Figura 19), donde el modelo presenta valores de 600 m<sup>3</sup> hasta 1,293 m<sup>3</sup> de erosión, presentando la mayor cantidad de energía de la red hídrica, lo que indica una mayor incisión, dicha actividad, también se observa en estudios de otros sitios como: en la Sierra Alhamilla al sureste de España, donde la erosión en masa en algunas partes como en la pendiente norte de la cresta presenta niveles altos, como reflejo del levantamiento del bloque sur (Giaconia et al., 2012), así mismo en la zona oeste y centro del estado de Guerrero, México (Gaidzik et al., 2016; Gaidzik and Ramírez-Herrera, 2017; Ramírez-Herrera et al., 2018).

La zona central el nivel de erosión es menor que en la zona norte, ya que los valores obtenidos están entre 129 m<sup>3</sup> y 600 m<sup>3</sup> reduciendo la actividad de incisión de la red hídrica y por lo tanto menor levantamiento, y finalmente la tercera zona presenta valores menores a 129 m<sup>3</sup> llegando hasta los -177 m<sup>3</sup>, estos valores se presentan en la zona sur de la cuenca, en donde los valles son amplios y las pendientes menores a 10°, lo que sugiere la acumulación de sedimentos.

### 5.3.2. Relación de volumen – área RVA.

Este indicador ha permitido identificar las zonas con un alto o medio nivel de erosión, así como las zonas que no presentan este proceso, es decir, se interpreta un proceso de acumulación de sedimentos, los valores de mayor erodabilidad se identifican al norte de la cuenca lo que indica la posible erosión en respuesta al levantamiento de tipo diferencial manifestado en las rocas de la cuenca debido a la actividad tectónica (Frankel and Pazzaglia, 2005; Gaidzik and Ramírez-Herrera, 2017).

El índice  $R_{VA}$  obtenido para la zona de estudio es de  $430 \text{ m}^3$ , que de acuerdo con (Frankel and Pazzaglia, 2005) los valores altos identificados en Sierra Nacimiento, Taos Range, en Estados Unidos de América representan un mayor levantamiento relativo, principalmente en las zonas con fallas activas en donde se tenían tasas de deslizamiento relativamente altas.

En México los estudios realizados por Gaidzik y Ramírez – Herrera (2017) en la zona del antearco del estado de Guerrero en 9 cuencas, y que de acuerdo con (Frankel and Pazzaglia, 2005) en zonas tectónicamente activas las tasas de levantamiento relativo los valores para el  $R_{VA}$  suelen ser mayores a  $100 \text{ m}^3$  (Gaidzik and Ramírez-Herrera, 2017).

### 5.3.3. Índice de gradiente – longitud SL. (stream length-gradient index).

El índice de gradiente (SL) o índice de Hack (1973), del Rio Marquelia, muestra diversos cambios en su trayectoria, se obtuvieron valores desde 0 (cero) en la zona baja del río desde la línea de costa y hasta los 3 km río arriba, hasta el mayor valor registrado de 1,951 a 74 km río arriba, al norte de la localidad Tlaxcalixtlahuaca.

Para descartar la posibilidad de que los valores del índice SL se obtuvieran por la presencia de los contactos litológicos, este índice fue comparado en toda la trayectoria longitudinal del río con la litología de la zona descartando así los valores que presentaron esta condición. Se obtuvieron dos sitios, uno de ellos al norte de la cuenca con tipo de roca Granito – Granodiorita con el valor más alto de SL (1,951). El otro sitio se localizó al sur de la cuenca, éste último punto



fue visitado en campo y se observó la presencia de roca tipo Gneis, así mismo, se identificó el cambio en el valle del río, la existencia de un Knickpoint en este sitio y el incremento de la energía del río debido al cambio en la trayectoria vertical del mismo. Esta evidencia ha sido registrada en otros estudios en Estados Unidos y México (Frankel and Pazzaglia, 2005; Gaidzik and Ramírez-Herrera, 2017; Hack, 1973; Whipple and Tucker, 1999).

5.3.4. Índice normalizado de la pendiente del cauce Ksn, (normalized channel steepness index).

La trayectoria longitudinal registrada con este indicador muestra la existencia de inflexiones en diferentes puntos del río, por lo que se puede inferir que se tienen cambios en la elevación del río debido a la actividad tectónica, este indicador presenta el cambio en la pendiente del río, es decir, la incisión derivada del levantamiento relativo, que en conjunto con los resultados del índice SL (Hack, 1973) los valores altos coinciden con la identificación de los knickpoints, esto se ha investigado por otros autores en el antearco del estado de Guerrero (Gaidzik and Ramírez-Herrera, 2017).

5.3.5. Perfil longitudinal del cauce principal. (longitudinal stream profiles).

El perfil obtenido muestra que el río ha sufrido diferentes cambios en su trayectoria vertical, se identifican tres inflexiones, mismas que sugieren una respuesta al levantamiento diferencial de la roca por la actividad tectónica en la zona (Pazzaglia and Brandon, 2001; VanLaningham et al., 2006), hacia el norte se observa una inflexión cerca del km 74 sobre el río desde la línea de costa en donde la litología de acuerdo con INEGI es de tipo granito - granodiorita, roca ígnea intrusiva del sistema plutónico (INEGI, 2010). Es un tipo de roca dura por lo que los ríos difícilmente crean zonas de inundación, lo cual genera ambientes con roca expuesta y terrazas de tipo strath (Ortega-Becerril et al., 2018).

La segunda incisión identificada se localiza muy cercana a la cabecera municipal San Luis Acatlán, en esta zona se identifica predominantemente roca granito – granodiorita, y diversos manchones con rocas de tipo granito J-K (Gr), conglomerado Q(cg) y suelo aluvial Q(al), la presencia del suelo aluvial indica que ya la incisión del río permite la acumulación, pero son

pequeñas zonas ya que el resto de las rocas identificadas son de la clase Ígnea intrusiva y metamórficas.

Por último, se observa un cambio de dirección vertical al norte de la cabecera municipal Marquelia, aproximadamente a 12 km de la línea de costa sobre el río, en esta zona el tipo de roca es gneis J(gn), metamórfica y también con resistencia alta debido a su origen de granito principalmente.

El cambio del nivel del mar o el levantamiento diferencial de la zona provocarán que el río incida para identificar su nivel de base, el tipo de litología identificado en los tres casos presenta mayor resistencia a la acción erosiva, por lo que la incisión o cambios bruscos en su dirección vertical se observan en los knickpoints identificados en diferentes secciones del río (DeLong et al., 2017; Gaidzik and Ramírez-Herrera, 2017; Monteiro and Missura, 2010).

#### **5.4. Terrazas.**

El registro de las terrazas fluviales en la trayectoria de un río indica todo el proceso de incisión fluvial, y estos accidentes geográficos se registran de manera geológica, así mismo son un indicador de la actividad tectónica e incluso climática, también observados a escala de cuenca. (Pazzaglia et al., 1998; Ramírez-Herrera et al., 2018)

Las terrazas identificadas en la cuenca demuestran diferente actividad a lo largo del río, el análisis realizado en gabinete permitió la localización de estas y con el trabajo de campo se obtuvo información para su clasificación por tipo, Strath o de acumulación de sedimentos (Pazzaglia et al., 1998).

A partir del km 44 río arriba se concentran terrazas de tipo Strath, que fueron medidas registrando tres niveles diferentes, la de mayor elevación relativa (ER) es de 18 m, identificada a 60 km de la línea de costa, también se identificó un Knickpoint en esta zona, corroborando un cambio en el nivel del cauce a consecuencia de la incisión del río (VanLaningham et al., 2006).

Estas terrazas coinciden con zonas en donde los valores de Índice SL son entre 505 y 537 sugiriendo que, si bien el cambio más fuerte en la trayectoria vertical del río está a 14 km río arriba, aquí también existe una diferencia en la ER del cauce. Las terrazas ubicadas en las cercanías del km 45 y en las cuales se registró una ER entre los 6 y 9 m, también son de tipo Strath, así mismo presentan litología expuesta con un valor SL de 605, muy cercano a los anteriores, de acuerdo con Hack, (1973) los cambios abruptos identificados en la trayectoria de un río pueden ser asociados a la resistencia de las rocas lo que indica el poder de la corriente y por lo tanto la incisión del cauce (Borges and Silva, 2017; Hack, 1973; Monteiro and Missura, 2010; Pazzaglia et al., 2003).

Por la ubicación de la cuenca del Río Marquelia y a la actividad tectónica en el antearco de la ZSM, los cambios en el índice SL, la formación de terrazas de tipo Strath y la presencia de Knickpoints, se relacionan al levantamiento diferencial (Pazzaglia and Brandon, 2001; VanLaningham et al., 2006).

El siguiente segmento se puede identificar entre los km 35 al 44 del cauce del río, en donde la presencia de terrazas es escasa, solo dos niveles fueron identificados con ER entre 2.3 m y 14.8 m, en este segmento del río se observaron ambos tipos de terrazas (Strath y Fill), las terrazas de tipo Fill se identificaron como Q3 y Q2, las de tipo Strath como Q1, ésta última la más alta y es la más alejada del cauce del río. Mostrando un proceso inicial de incisión del río y eventos posteriores que permitieron la disposición de sedimentos. (Borges and Silva, 2017; Hack, 1973; Monteiro and Missura, 2010; Pazzaglia et al., 2003)

Entre los kilómetros 10 y 20 sobre el cauce del río, se registra otra concentración de terrazas de tipo Strath, sus ER son presentan una diferencia de 4 m, la más alta es de 5.9 m y la más baja es de 1.2 m. distribuidas en un lecho de río ancho, siendo en la terraza más alta en la que se identificó un Knickpoint, en donde el río se encajona y toma fuerza, posterior a este punto el río vuelve a presentar un lecho amplio. El valor de SL más alto en esta zona es de 433, lo que indica el alto nivel de incisión del cauce del río. (Hack, 1973; Pazzaglia and Brandon, 2001).

Cabe mencionar que entre los kilómetros 20 y 34 se identificaron solo 5 terrazas cercanas al km 20, con ER entre 0.45 y 3.72, posterior a esta ubicación no se identificaron más terrazas, en este segmento del río se observa roca de tipo gneis y valores de SL muy altos coincidiendo una terraza en el km 22 y el valor de SL 899, 1,007 en el km 27 donde se encuentran las terrazas con valores de 3.72, 2.23 y 0.45, por último existe un valor de SL de 1,547 en el km 31, pero no se identifica alguna terraza en este lugar.

En el segmento del km 0 a 10 km se identifica la mayor concentración de terrazas, 30 de estas fueron medidas y clasificadas, en su mayoría son de depósito (Fill), su patrón de distribución es simétrico en ambas márgenes del río, las ER son desde 0.73 m hasta 14.3, ésta última es de tipo Strath identificada en la localidad El Zapote.

Las terrazas de tipo Fill fueron identificadas en campo con observación de un perfil estratigráfico que demostraba el depósito de limos y arenas en los niveles Q1 y Q2 ubicadas en la localidad El Zapote, así mismo, la altura de las terrazas de depósito son de menor altura que la terraza Strath mencionada, esto sugiere que ésta última es de mayor antigüedad de acuerdo con un estudio realizado en el antearco de Cascadia al occidente del estado de Washington, USA (Pazzaglia and Brandon, 2001).

En las proximidades del km 10 del cauce se observa una zona de terrazas dispares, es decir, que solo se presentan en alguna de las dos laderas del río, en donde la terraza Q3 es de depósito con una ER de 0.73 m, la terraza Q2 es de tipo Strath con ER de 2.53 y la terraza Q3 no fue posible medirla, debido a la densidad de vegetación que no permitió hacerlo de manera clara. La presencia de terrazas dispares de acuerdo con Pazzaglia (2001) es debido a la generación de eventos locales en el cauce del río (Pazzaglia and Brandon, 2001).

## **5.5. Fallas.**

En esta investigación no hay elementos fehacientes que permitan aseverar la presencia de fallas activas, sin embargo, se logró identificar rasgos que permiten su inferencia, así como el nivel de influencia que tienen en la consolidación del drenaje.

Los desplazamientos en la red de drenaje se observan tanto a la izquierda como a la derecha, es un patrón que difiere con la demostrada por (Fasola et al., 2018; Gaidzik et al., 2016) en la región, ya que se ha identificado la presencia de una falla de este a oeste desde los límites de Guerrero con Michoacán, y de acuerdo con Fasola (2018) en el estado de Oaxaca se identifica la presencia de esta falla con la misma orientación izquierda, y que no se observa claramente en la zona de estudio de esta investigación.

El patrón de desplazamiento izquierdo en la red de drenaje no es evidente, sin embargo, se observa que la zona norte de la cuenca si presenta este patrón de comportamiento, lo que hace pensar que de manera regional hay coincidencia en lo identificado por Gaidzik et al., (2017), Ramírez-Herrera et al., (2018) y no así de manera local.

Otra relación identificada es la ubicación del trazo de las fallas inferidas, que coinciden con el cambio en el orden del drenaje, la cuenca presenta un orden de 6 (Strahler, 1952), el Rio Marquelia cambia de orden 5 a 6 al llegar a la localidad San Luis Acatlán, y posteriormente río arriba cambia de 5 a 4 a una distancia aproximada de 2 km al sur de la localidad Tlaxcalixtlahuaca, en ambas se infiere la presencia de las fallas San Luis y Tlaxcalixtlahuaca respectivamente. Por lo anterior se identifica una aparente relación entre la presencia de estas marcas y el orden del drenaje, que a su vez permiten la observación de la geometría deformada del relieve de la cuenca (Burbank and Anderson, 2001).

De acuerdo con el indicador de Mínima Erosión (Figura 4.5) la falla San Luis, se localiza en el límite entre la erosión alta y media, lo que divide a la cuenca en dos grandes zonas Norte y Sur, esta coincidencia hace notar la actividad erosiva provocada por el levantamiento en la zona norte de la cuenca y que deja de tener presencia en la zona sur a partir de la ubicación de esta falla.

Debido a los valles escarpados, a la presencia de terrazas de tipo Strath en las zonas más altas del río, la incisión del cauce y la mayor concentración de cauces en la zona norte de la cuenca es posible inferir la actividad tectónica en la zona de estudio, así mismo el resultado de

gabinete obtenido con el índice de  $R_{VA}$  ( $430 \text{ m}^3$ ) demuestran erosión alta y concentrada en esta sección del río como resultado del levantamiento relativo.

## 6. CONCLUSIÓN.

El estudio de la cuenca del Río Marquelia, en Guerrero, México, se enfocó a la identificación de parámetros que dieran certeza de la actividad tectónica en esta zona del sur del país, para lo que se emplearon cinco índices geomórficos, de los cuales algunos han sido utilizados desde la década de los años 70's mostrando su efectividad para la identificación de accidentes geográficos, así como parámetros que apoyan en la inferencia de actividad tectónica en cuencas hidrológicas.

La técnica utilizada para la obtención de la red hídrica a partir de un Modelo Digital de Elevaciones (DEM) es práctico y útil, aunque no se debe olvidar la fotointerpretación que se realizó con imágenes satelitales de libre consulta con software si licenciamiento como Google Earth, así mismo la utilización de otros recursos de mayor detalle de información es necesaria, tal es el caso de los DEM's generados a partir de datos LiDAR, que no fue posible consultarlos durante la elaboración de esta investigación, debido a que no se encontraron a disposición en la fuente consultada que fue INEGI.

Los resultados obtenidos en esta investigación arrojan evidencia de que las expresiones del relieve son una respuesta a la actividad tectónica provocada por la ZSM, así mismo, es posible relacionar el modelado del relieve en las partes altas de la cuenca al levantamiento relativo debido a la gran incisión encontrada y al alto índice de mínima erosión.

La presencia de terrazas de tipo Strath también son evidencia ya que al estar concentradas en la parte alta de la cuenca en donde se identifica mayor erosión de acuerdo con el índice  $R_{VA}$  indican en conjunto el este levantamiento tectónico.

En esta investigación se infirieron algunas fallas desde gabinete con el análisis de la red hídrica, la visita a la ubicación de una de estas permitió identificar cambios en la trayectoria del río, incisión de este y amplitud del valle después del Knickpoint observado, sin embargo, no se logró identificar fehaciente la actividad de la falla en campo.

## 1. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- Agata, R., Barbot, S.D., Fujita, K., Hyodo, M., Iinuma, T., Nakata, R., Ichimura, T., Hori, T., 2019. Rapid mantle flow with power-law creep explains deformation after the 2011 Tohoku mega-quake. *Nat. Commun.* 10, 1385. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-08984-7>
- Aguayo, J. E., Trápaga, R., 1996. Geodinámica de México y minerales del mar [WWW Document]. III Tectónica Actual México. URL [http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/141/htm/sec\\_6.htm](http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/141/htm/sec_6.htm) (accessed 6.1.19).
- Aguayo, J. E., Trápaga, R., 1996. Geodinámica de México y minerales del mar [WWW Document]. VI Presente Pasado Las Placas Terr. URL [http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/113/htm/sec\\_11.htm](http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/113/htm/sec_11.htm) (accessed 6.1.19).
- Allen, R.M., Kanamori, H., 2003. The Potential for Earthquake Early Warning in Southern California. *Science* 300, 786–789. <https://doi.org/10.1126/science.1080912>
- Bolt, B.A., 1993. Earthquakes. W. H. Freeman and Company, New York.
- Bolt, B.A., 1978. Earthquake hazards. *Eos Trans. Am. Geophys. Union* 59, 946. <https://doi.org/10.1029/EO059i011p00946>
- Borges, M. dos S., Silva, K.C., 2017. Análise do perfil longitudinal e aplicação de índice de Hack no Córrego Rico no município de Paracatu – MG, in: Os Desafios da Geografia Física na Fronteira do Conhecimento. INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS - UNICAMP, pp. 552–561. <https://doi.org/10.20396/sbgfa.v1i2017.1825>
- Brocklehurst, S.H., Whipple, K.X., 2002. Glacial erosion and relief production in the Eastern Sierra Nevada, California. *Geomorphology* 42, 1–24. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(01\)00069-1](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(01)00069-1)
- Burbank, D.W., Anderson, R.S., 2001. *Tectonic Geomorphology*, 1ra ed. USA.
- Cohen, S., Holdahl, S., Caprette, D., Hilla, S., Safford, R., Schultz, D., 1995. Uplift of the Kenai Peninsula, Alaska, since the 1964 Prince William Sound earthquake. *J. Geophys. Res. Atmospheres* 100. <https://doi.org/10.1029/94JB02880>
- Curie, F., Gaillard, S., Ducharne, A., Bendjoudi, H., 2007. Geomorphological methods to characterise wetlands at the scale of the Seine watershed. *Sci. Total Environ.* 375, 59–68. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.12.013>
- DeLong, S.B., Hilley, G.E., Prentice, C.S., Crosby, C.J., Yokelson, I.N., 2017. Geomorphology, denudation rates, and stream channel profiles reveal patterns of mountain building adjacent to the San Andreas fault in northern California, USA. *Geol. Soc. Am. Bull.* 129, 732–749. <https://doi.org/10.1130/B31551.1>
- Fasola, S., Brudzinski, M., G. Holtkamp, S., E. Graham, S., Cabral-Cano, E., 2018. Earthquake Swarms and Slow Slip on a Sliver Fault in the Mexican Subduction Zone. <https://doi.org/10.31223/osf.io/8jkmg>
- Frankel, Pazzaglia, F.J., 2005. Tectonic geomorphology, drainage basin metrics, and active mountain fronts. *Geogr. Fis. E Din. Quat.* 28, 7–21.



- Gaidzik, K., Ramírez-Herrera, M.T., 2017. Geomorphic indices and relative tectonic uplift in the Guerrero sector of the Mexican forearc. *Geosci. Front.* 8, 885–902. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2016.07.006>
- Gaidzik, K., Ramírez-Herrera, M.T., Kostoglodov, V., 2016. Active Crustal Faults in the Forearc Region, Guerrero Sector of the Mexican Subduction Zone. *Pure Appl. Geophys.* 173, 3419–3443. <https://doi.org/10.1007/s00024-015-1213-8>
- Galve, J.P., Pérez-Peña, J.V., Alvarado, G.E., Azañón, J.M., Mora, M.M., Giaconia, F., Booth-Rea, G., Becerril, L., 2015. Aplicación de técnicas morfométricas para analizar la actividad tectónica, volcánica y de deslizamientos en la región central de Costa Rica. XIV Reunión Nac. Cuaternario 4.
- Galve, J.P., Piacentini, D., Troiani, F., Seta, M.D., 2014. Stream Length-Gradient Index Mapping as a Tool for Landslides Identification, in: Pardo-Igúzquiza, E., Guardiola-Albert, C., Heredia, J., Moreno-Merino, L., Durán, J.J., Vargas-Guzmán, J.A. (Eds.), *Mathematics of Planet Earth*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 343–346. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-32408-6\\_76](https://doi.org/10.1007/978-3-642-32408-6_76)
- García, E., 1998. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köpen., Quinta. ed, Libros. Ciudad de México.
- Gardiner, V., Park, C.C., 1978. Drainage basin morphometry: review and assessment. *Prog. Phys. Geogr. Earth Environ.* 2, 1–35. <https://doi.org/10.1177/030913337800200102>
- Giaconia, F., Booth-Rea, G., Martínez-Martínez, J.M., Azañón, J.M., Pérez-Peña, J.V., Pérez-Romero, J., Villegas, I., 2012. Geomorphic evidence of active tectonics in the Sierra Alhamilla (eastern Betics, SE Spain). *Geomorphology* 145–146, 90–106. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.12.043>
- Gilchrist, A.R., Summerfield, M.A., Cockburn, H.A.P., 1994. Landscape dissection, isostatic uplift, and the morphologic development of orogens. *Geology* 22, 963. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1994\)022<0963:LDIUAT>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1994)022<0963:LDIUAT>2.3.CO;2)
- Hack, J.T., 1973. Stream-profile analysis and stream-gradient index. *J. Res. US Geol. Surv.* 1, 421429.
- Huntley, D.J., Godfrey-Smith, D.I., Thewalt, M.L.W., 1985. Optical dating of sediments. *Nature* 313, 105. <https://doi.org/10.1038/313105a0>
- Jenson, S.K., Domingue, J.O., 1988. Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis. *Photogramm. Eng.* 8.
- Kanamori, H., 2003. 72 Earthquake prediction: An overview, in: *International Geophysics*. Elsevier, pp. 1205–1216. [https://doi.org/10.1016/S0074-6142\(03\)80186-9](https://doi.org/10.1016/S0074-6142(03)80186-9)
- Kanamori, H., 1983. Magnitude scale and quantification of earthquakes. *Tectonophysics* 93, 185–199. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(83\)90273-1](https://doi.org/10.1016/0040-1951(83)90273-1)
- Keller, E.A., Bonkowski, M.S., Korsch, R.J., Shlemon, R.J., 1982. Tectonic geomorphology of the San Andreas fault zone in the southern Indio Hills, Coachella Valley, California. *GSA Bull.* 93, 46–56. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1982\)93<46:TGOTSA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1982)93<46:TGOTSA>2.0.CO;2)
- Keller, E.A., Pinter, N., 2000. *Active tectonics. Earthquakes, Uplift, and Landscape*, Second. ed. Prentice Hall, USA, New Jersey.
- Kious, W.J., Tilling, R.I., 1994. *This dynamic earth: the story of plate tectonics*. U.S. Geological Survey : For sale by the U.S. G.P.O, Washington, D.C.

- Kirby, E., Whipple, K., 2001. Quantifying differential rock-uplift rates via stream profile analysis. *Geology* 29, 415. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(2001\)029<0415:QDRURV>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2001)029<0415:QDRURV>2.0.CO;2)
- Kirby, E., Whipple, K.X., 2012. Expression of active tectonics in erosional landscapes. *J. Struct. Geol.* 44, 54–75. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2012.07.009>
- Kostoglodov, V., Pacheco, J.F., 1999. CIEN AÑOS DE SISMICIDAD EN MEXICO, IGF UNAM, SSN [WWW Document]. Cien Años Sismicidad En México. URL <http://usuarios.geofisica.unam.mx/vladimir/sismos/100a%F1os.html> (accessed 9.17.19).
- Kostoglodov, V., Valenzuela, R.W., Gorbatov, A., Mimiaga, J., Franco, S.I., Alvarado, J.A., Peláez, R., 2001. Deformation in the Guerrero seismic gap, Mexico, from leveling observations. *J. Geod.* 75, 19–32. <https://doi.org/10.1007/s001900000144>
- Lugo, H.J.Inocente., 2015. Diccionario Geomorfológico. Geografía para el siglo XXI., Segunda ed, Textos universitarios. Ciudad de México.
- Mahan, S.A., Noe, D.C., McCalpin, J.P., 2009. Use of OSL dating to establish the stratigraphic framework of Quaternary eolian sediments, Anton scarp upper trench, Northeastern Colorado High Plains, USA. *Quat. Int.* 199, 92–103. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2008.09.006>
- Mahmood, S.A., Gloaguen, R., 2012. Appraisal of active tectonics in Hindu Kush: Insights from DEM derived geomorphic indices and drainage analysis. *Geosci. Front.* 3, 407–428. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2011.12.002>
- Molnar, P., 1994. Quaternary climate change and the formation of river terraces across growing anticlines on the north flank of the Tien Shan, China. *J. Geol.* 102, 583–602.
- Monteiro, K. de A., Missura, R., 2010. Application of the Hack index - or Stream Length Gradient Index (SL Index) - to the Tracunhaém river watershed, Pernambuco, Brazil. *Geocienc. UNESP* 29, 533–539.
- Morrish, S., 2015. Characterization and digital morphotectonic analysis of drainage basins in a deforming forearc, Nicoya Peninsula, Costa Rica. (Master). California State Polytechnic University.
- Ortega-Becerril, J.A., Garzón, G., Tejero, R., 2018. Controls on strath terrace formation and evolution: The lower Guadiana River, Pulo do Lobo, Portugal. *Geomorphology* 319, 62–77. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.07.015>
- Pazzaglia, F.J., Brandon, M.T., 2001. A Fluvial Record of Long-term Steady-state Uplift and Erosion Across the Cascadia Forearc High, Western Washington State. *Am. J. Sci.* 301, 385–431. <https://doi.org/10.2475/ajs.301.4-5.385>
- Pazzaglia, F.J., Gardner, T.W., Merritts, D.J., 1998. Bedrock fluvial incision and longitudinal profile development over geologic time scales determined by fluvial terraces, in: Tinkler, J., Wohl, E. (Eds.), *Geophysical Monograph Series*. American Geophysical Union, Washington, D. C., pp. 207–235. <https://doi.org/10.1029/GM107p0207>
- Pazzaglia, F.J., Thackray, G.D., Brandon, M.T., Wegmann, K.W., Gosse, J., McDonald, E., Garcia, A.F., Prothero, D., 2003. Tectonic geomorphology and the record of Quaternary plate boundary deformation in the Olympic Mountains. *GSA Field Guid.* 4, 37–67. <https://doi.org/10.1130/0-8137-0004-3.37>

- Pérez-Peña, J.V., Azañón, J.M., Azor, A., Delgado, J., González-Lodeiro, F., 2009. Spatial analysis of stream power using GIS: SLk anomaly maps. *Earth Surf. Process. Landf.* 34, 16–25. <https://doi.org/10.1002/esp.1684>
- Picotti, V., Ponzza, A., Pazzaglia, F.J., 2009. Topographic expression of active faults in the foothills of the Northern Apennines. Picotti V., Ponzza A. Pazzaglia F. J. *Tectonophysics* 474, 285–294.
- Pope, R., Wilkinson, K., Skourtsos, E., Triantaphyllou, M., Ferrier, G., 2008. Clarifying stages of alluvial fan evolution along the Sfakian piedmont, southern Crete: New evidence from analysis of post-incisive soils and OSL dating. *Geomorphology* 94, 206–225. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2007.05.007>
- Ramírez-Herrera, M.T., 1998. Geomorphic assessment of active tectonics in the Acambay graben, Mexican Volcanic Belt. *Earth Surf. Process. Landf.* 23, 317–332. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9837\(199804\)23:4<317::AID-ESP845>3.0.CO;2-V](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9837(199804)23:4<317::AID-ESP845>3.0.CO;2-V)
- Ramírez-Herrera, M.T., Castillo-Aja, R., 2016. Terremotos y Tsunamis., in: *Geografía de México. Una reflexión espacial contemporánea*. UNAM, Ciudad de México, pp. 86–101.
- Ramírez-Herrera, M.T., Gaidzik, K., 2017. La Pintada landslide—A complex double-staged extreme event, Guerrero, Mexico. *Cogent Geosci.* 3. <https://doi.org/10.1080/23312041.2017.1356012>
- Ramírez-Herrera, M.T., Gaidzik, K., Forman, S., Kostoglodov, V., Bürgmann, R., Johnson, C.W., 2018. Relating the long-term and short-term vertical deformation across a transect of the forearc in the central Mexican subduction zone. *Geosphere* 14, 419–439. <https://doi.org/10.1130/GES01446.1>
- Ramírez-Herrera, M.T., Kostoglodov, V., Urrutia-Fucugauchi, J., 2011. Overview of Recent Coastal Tectonic Deformation in the Mexican Subduction Zone. *Pure Appl. Geophys.* 168, 1415–1433. <https://doi.org/10.1007/s00024-010-0205-y>
- Ramírez-Herrera, M.-T., Urrutia-Fucugauchi, J., 1999. Morphotectonic zones along the coast of the Pacific continental margin, southern Mexico. *Geomorphology* 28, 237–250. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(99\)00016-1](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(99)00016-1)
- Rockwell, T.K., Keller, E.A., Clark, M.N., Johnson, D.L., 1984. Chronology and rates of faulting of Ventura River terraces, California. *Geol. Soc. Am. Bull.* 95, 1466. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1984\)95<1466:CAROFO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1984)95<1466:CAROFO>2.0.CO;2)
- Ruegg, J.C., 1994. Deformación de la corteza terrestre y Terremotos: aplicación al estudio del ciclo sísmico en el Norte de Chile. *Física Tierra* 6, 201–243.
- Sanderson, D.C.W., Bishop, P., Stark, M., Alexander, S., Penny, D., 2007. Luminescence dating of canal sediments from Angkor borei, mekong delta, southern Cambodia. *Quat. Geochronol.* 2, 322–329.

- Sasajima, R., Shibazaki, B., Iwamori, H., Nishimura, T., Nakai, Y., 2019. Mechanism of subsidence of the Northeast Japan forearc during the late period of a gigantic earthquake cycle. *Sci. Rep.* 9, 5726. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-42169-y>
- Snyder, N.P., Whipple, K.X., Tucker, G.E., Merritts, D.J., 2000. Landscape response to tectonic forcing: Digital elevation model analysis of stream profiles in the Mendocino triple junction region, northern California. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(2000\)112<1250:LRTTFD>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(2000)112<1250:LRTTFD>2.0.CO;2)
- Strahler, A.N., 1994. *Geografía Física, 3ra Especial. ed, Edición Especial.* Barcelona España.
- Strahler, A.N., 1952. HYPSONOMETRIC (AREA-ALTITUDE) ANALYSIS OF EROSIONAL TOPOGRAPHY. *Geol. Soc. Am. Bull.* 63, 1117. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1952\)63\[1117:HAAOET\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1952)63[1117:HAAOET]2.0.CO;2)
- Tarboton, D.G., Bras, R.L., Rodriguez-Iturbe, I., 1991. On the extraction of channel networks from digital elevation data. *Hydrol. Process.* 5, 81–100. <https://doi.org/10.1002/hyp.3360050107>
- VanLaningham, S., Meigs, A., Goldfinger, C., 2006. The effects of rock uplift and rock resistance on river morphology in a subduction zone forearc, Oregon, USA. *Earth Surf. Process. Landf.* 31, 1257–1279. <https://doi.org/10.1002/esp.1326>
- Vigil, J.F., 1999. Main types of plate boundaries [This Dynamic Earth, USGS] [WWW Document]. URL <https://pubs.usgs.gov/gip/dynamic/Vigil.html> (accessed 6.24.19).
- Whipple, K.X., Tucker, G.E., 1999. Dynamics of the stream-power river incision model: Implications for height limits of mountain ranges, landscape response timescales, and research needs. *J. Geophys. Res. Solid Earth* 104, 17661–17674. <https://doi.org/10.1029/1999JB900120>
- Wobus, C., Whipple, K.X., Kirby, E., Snyder, N., Johnson, J., Spyropolou, K., Crosby, B., Sheehan, D., 2006. Tectonics from topography: Procedures, promise, and pitfalls, in: *Special Paper 398: Tectonics, Climate, and Landscape Evolution.* Geological Society of America, pp. 55–74. [https://doi.org/10.1130/2006.2398\(04\)](https://doi.org/10.1130/2006.2398(04))

## 2. REFERENCIAS CARTOGRÁFICAS.

- Comisión Nacional del Agua CONAGUA (2007) - Subdirección General Técnica. Regiones Hidrológicas, escala 1:250000. República Mexicana. Shape file en formato vectorial, nombre de la información: rh250kgw. Datum Horizontal: WGS84, Elipsoide: WGS84. Descargado de sitio de CONABIO Regiones Hidrológicas, escala 1:250,000. República Mexicana, Fecha de Acceso: 01-04-2019.
- Comisión Nacional para la Biodiversidad CONABIO (2007). Instituto Nacional de Estadística y Geografía INEGI, Instituto Nacional de Ecología (INE), Comisión Nacional de Agua (CONAGUA), (2007). 'Mapa de Cuencas Hidrográficas de México, 2007'. Escala 1:250000, elaborada por Priego A.G., Isunza E., Luna N. y Pérez J.L. México, D.F. Shape file en formato vectorial, nombre de la información: cue250k\_07gw. Datum Horizontal: WGS84, Elipsoide: WGS84. Descargado de sitio de CONABIO Cuencas Hidrográficas de México, 2007, Fecha de acceso: 01-04-2019.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía INEGI (2010a). Dirección General de Geografía y Medio Ambiente. Documento técnico descriptivo de la Red Hidrográfica escala 1:50, 000. Agosto 2010.

Edición 2.0, Aguascalientes, Ags., México. Disponible en:  
[http://antares.inegi.org.mx/analisis/red\\_hidro](http://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro).

Instituto Nacional de Estadística y Geografía INEGI (2010b). Carta Topográfica escala 1:50 000. Edición 2.0. Dirección General de Geografía y Medio Ambiente. INEGI. México.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía INEGI (2010c). Carta Geológica escala 1:50 000. Edición 2.0. Dirección General de Geografía y Medio Ambiente. INEGI. México.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía INEGI (2010d). Red Hidrográfica escala 1:50 000. Edición 2.0. Documento técnico descriptivo de la red hidrográfica escala 1:50 000. Agosto de 2010. Dirección General de Geografía y Medio Ambiente. INEGI. México.

Modelo Digital de Elevaciones TanDEM (2015)

Servicio Geológico Mexicano SGM (2017). Sismología de México. Disponible en:  
<https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Riesgos-geologicos/Sismologia-de-Mexico.html>  
Fecha de acceso: 03-03-2019.

Servicio Sismológico Nacional. UNAM - SSN. (2019). Disponible en:  
<http://www2.ssn.unam.mx:8080/catalogo/>. Fecha de Acceso: 09-05-2019.

Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica SMIS (2019). Zonas sísmicas del mundo. Disponible en:  
<http://www.smis.org.mx/sismicidad.html>. Fecha de acceso: 06-02-2019.

United States Geological Survey USGS (2019). Disponible en: <https://earthquake.usgs.gov/>. Fecha de Acceso: 07-04-2019.

San Diego State University SDSU (2009). Understanding processes behind natural disasters. Disponible en: <http://www.sci.sdsu.edu/visualgeology/naturaldisasters/Chapters/Chapter6Earthquake.pdf>  
Fecha de acceso: 07-04-2019

### **3. REFERENCIAS TECNOLÓGICAS. SOFTWARE.**

Environmental Systems Research Institute ESRI. (2016) -ArcGIS Versión 10.5.0.6491.

Google Earth Pro (2019). Marquelia, Guerrero, México. Fecha de acceso: del 01-02-2018 al 15-05-2019.