An aerial photograph showing a wide, muddy river on the left side of the frame. A paved road runs parallel to the riverbank on the right. Several vehicles, including a white van, a white truck, and a white car, are parked along the road. A group of people is gathered on the road near the riverbank. The surrounding area is lush with green vegetation and trees. The text 'TOMO II' is written in yellow, and 'FENÓMENOS GEOLÓGICOS' is written in white, both enclosed in a white border.

**TOMO II**  
**FENÓMENOS GEOLÓGICOS**

## Índice

II. Fenómenos Geológicos .....	5
II.1 Vulcanismo .....	5
II.1.1 Metodología.....	9
II.1.2 Riesgo Volcánico.....	10
II.2 Sismos .....	13
II.2.1 Micro sismicidad .....	22
II.2.2 Riesgo sísmico.....	26
II.3 Deslizamiento de laderas.....	35
II.3.1 Peligro.....	36
II.3.2 Riesgo .....	46
II.4 Licuación de suelos .....	61
II.4.1 Susceptibilidad.....	64
II.4.2 Hundimiento y agrietamiento del terreno .....	65
II.4.3 Subsistencia.....	66
II.4.4 Agrietamientos.....	69
II.4.5 Karstificación.....	72
II.5 Tsunamis .....	73
II.5.1 Peligro.....	77
II.5.2 Riesgo .....	81
Literatura citada.....	86

## Índice de Mapas

Mapa 1. Emplazamiento y tipo de volcanes cercanos al municipio .....	8
Mapa 2. Distancia a los volcanes activos de la región .....	11
Mapa 3. Mapa de ocurrencia de sismos.....	16
Mapa 4. Intensidad de aceleración en un periodo de retorno a 10 años .....	18
Mapa 5. Intensidad de aceleración en un periodo de retorno a 100 años .....	19
Mapa 6. Intensidad de aceleración en un periodo de retorno a 500 años .....	20
Mapa 7. Periodos de retorno para aceleraciones del 0.15 de g o mayores .....	21
Mapa 8. Riesgo sismológico por localidad, T a 10 .....	29
Mapa 9. Riesgo sismológico por localidad, T a 100 y 500 años .....	30
Mapa 10. Riesgo sismológico AGEB urbana, T a 10 años .....	31
Mapa 11. Riesgo sismológico AGEB, urbana T a 100/500 años .....	32
Mapa 12. Riesgo estructural de vivienda por localidad.....	34
Mapa 13. Riesgo estructural de vivienda por AGEB .....	34
Mapa 14. Disección vertical del relieve. Factor de altura para la estimación de peligro .....	38
Mapa 15. Susceptibilidad por deslizamientos de laderas en el municipio .....	40
Mapa 16. Peligro de deslizamientos de laderas en el municipio .....	41
Mapa 17 Peligro de Deslizamiento de ladera periodo de retorno de 2 años .....	42
Mapa 18 Peligro de Deslizamiento de Laderas por período de retorno de 5 años .....	43
Mapa 19 Peligro de Deslizamiento de Laderas por período de retorno de 10 años .....	43
Mapa 20 Peligro de Deslizamiento de Laderas por período de retorno de 25 años .....	44
Mapa 21 Peligro de Deslizamiento de Laderas por período de retorno de 50 años .....	44
Mapa 22 Peligro de Deslizamiento de Laderas por período de retorno de 100 años .....	45
Mapa 23 Peligro de Deslizamiento de Laderas por período de retorno de 500 años .....	45
Mapa 24. Riesgo por Deslizamiento en la Cruz de Huanacaxtle .....	48
Mapa 25. Riesgo de deslizamiento en El Coatante y El Colomo .....	49
Mapa 26. Riesgo por deslizamiento en El Guamúchil – San Ignacio – San Quintín .....	50
Mapa 27. Riesgo por deslizamiento en Fortuna de Vallejo.....	52
Mapa 28. Riesgo por deslizamiento en Lo de Marcos .....	53
Mapa 29. Riesgo por deslizamiento en Los Sauces.....	54
Mapa 30. Riesgo por deslizamiento en San Francisco .....	55
Mapa 31. Riesgo por deslizamiento en Sayulita.....	56
Mapa 32. Riesgo por deslizamiento en Tondoroque .....	57
Mapa 33. Riesgo por deslizamiento San Ignacio-San Quintín y El Guamúchil .....	58
Mapa 34. Riesgo por deslizamiento carretera El Coatante-Aguamilpa.....	59
Mapa 35. Riesgo de deslizamiento tramo Aguamilpa-El Ahuejote .....	60
Mapa 36. Susceptibilidad física por licuación de suelos .....	64
Mapa 37. Zonas de subsidencia.....	68
Mapa 38. Rasgos físicos asociados a hundimientos y agrietamientos .....	71
Mapa 39. Grado de Peligro por lo ocurrencia de una ola de tsunami de 10 metros.....	78
Mapa 40. Grado de peligro por la ocurrencia de una ola de tsunami de 6 metros .....	79

Mapa 41. Grado de peligro por la ocurrencia de una ola de tsunami de 2 metros .....	80
Mapa 42. Grado de Riesgo por la ocurrencia de una ola de Tsunami de 10m .....	83
Mapa 43. Grado de Riesgo por la ocurrencia de una ola de Tsunami 6m.....	84
Mapa 44. Grado de Riesgo ante la ocurrencia de una ola de Tsunami 2m .....	85

### Índice de Cuadros

Cuadro 1. Escala de magnitud e intensidad más utilizadas .....	14
Cuadro 2. Frecuencia de sismos según magnitud en un radio de 200 km del municipio.....	16
Cuadro 3. Aceleración máxima en el municipio de Bahía de Banderas.....	20
Cuadro 4. Periodos de retorno para aceleraciones del 0.15 de g o mayores a nivel de localidad .....	22
Cuadro 5. Ponderación de peligro sísmico .....	26
Cuadro 6. Clasificación del riesgo sismológico .....	27
Cuadro 7. Cálculo del riesgo sísmico en el municipio de Bahía de Banderas por localidad	27
Cuadro 8. Ponderación de factores para estimar la susceptibilidad y el peligro de deslizamiento de laderas .....	36
Cuadro 9. Velocidad de propagación .....	75
Cuadro 10. Distancias de recorrido de las olas.....	76
Cuadro 11. Peligro por localidad en escenario 1 .....	77
Cuadro 12. Peligro por localidad en escenario 2 .....	78
Cuadro 13. Peligro por localidad en escenario 3 .....	80
Cuadro 14. Velocidad de propagación .....	81
Cuadro 15. Distancias de recorrido de las olas.....	82

### Índice de Ilustraciones

Ilustración 1 Entorno tectónico y principales centros volcánicos de la Faja Volcánica Transmexicana.....	7
Ilustración 2. Ubicación de las estaciones de la RESAJ .....	24
Ilustración 3 Selección de eventos por rango ML .....	25
Ilustración 4. Daño a infraestructura urbana por hundimiento.....	66
Ilustración 5 Daño a infraestructura por agrietamiento .....	70

### Índice de Figuras

Figura 1 Alcance de la ceniza de acuerdo al tamaño de partícula y espesor de la capa de ceniza de acuerdo a la distancia al volcán .....	12
Figura 2. Regionalización sísmica del territorio nacional .....	15
Figura 3. Localización de puntos de estudio .....	23
Figura 4. Eventos sísmicos .....	26
Figura 5. Procesado de imágenes en SNAP .....	67

## II. Fenómenos Geológicos

Son aquellos que están relacionados con la actividad y dinámica interna de la Tierra y de la corteza terrestre, y que tienen que ver con la transformación de la superficie, incluyendo el fondo marino, dando origen a las fallas y las fracturas, a los plegamientos, el vulcanismo, los sismos, deslizamiento de tierra, etcétera. Sin embargo, algunos de estos fenómenos, aunque son de carácter natural, se han intensificado debido a la acción del hombre.

Cabe resaltar que, en el municipio existe una elevada cantidad de estructuras geológicas, de las cuales algunas se consideran activas por la asociación de sismicidad histórica, mismas que formaron un graben (llamado Graben de Ixtapa) y una depresión en el piso oceánico. Existe una falla regional que afecta la parte norte de Punta de Mita. En la zona serrana se encuentran algunas fallas de carácter local que no afectan a localidades extensas.

### II.1 Vulcanismo

Los volcanes son una manifestación de la energía interna del planeta. Un volcán es un sitio asociado al material magmático o sus derivados, en el que se da una acumulación de material que suele ser de forma cónica. Un volcán activo se caracteriza por tener magma fundido en su interior, puede recibir nuevas aportaciones de magma y por tanto tiene el potencial de producir erupciones (CENAPRED, 2014).

Las erupciones volcánicas resultan del ascenso del magma que se ubica al interior de un volcán, son emisiones de mezclas de magma (roca fundida que sobresale por sus materiales volátiles), gases volcánicos (por ejemplo: vapor de agua, bióxido de carbono o bióxido de azufre) y fragmentos de rocas de la corteza. Tales materiales son expulsados con distinto grado de violencia, dependiendo de la presión de los gases provenientes del magma o del agua subterránea sobrecalentada.

Es relevante identificar el tipo de las erupciones. El vulcanismo monogenético es aquel en el que la erupción ocurre en una sola etapa, con una duración que varía desde unos meses hasta aproximadamente 10 años y es predominantemente efusiva. El vulcanismo poligenético destaca por la formación de edificios volcánicos a causa de la acumulación de materiales emitidos en varias erupciones a lo largo del tiempo geológico.

En ese sentido, se distinguen dos tipos de erupción: la **erupción efusiva** que se caracteriza por liberar con facilidad la presión dentro del magma (a una tasa similar a la que se acumula), por lo tanto, el magma puede salir a la superficie sin explotar. Por su parte, la **erupción explosiva** se caracteriza por que el magma acumula más presión de la que puede liberar y se fragmenta violentamente, estas pueden producir densas columnas de ceniza que se conocen como columnas eruptivas, mismas que pueden alcanzar alturas superiores a los **20 km**.

De igual forma, conocer el tipo de volcán, proporciona mucha información acerca de la actividad que ha presentado en el pasado. Los tipos de volcán son los siguientes (CENAPRED, ibid.):

*Caldera:* depresión circular o elíptica que mide desde 1 a 100 km de diámetro. Se forma cuando el magma se obtiene de un reservorio somero.

*Cono Cinerítico:* es una montaña con laderas muy inclinadas, que se forma debido a la acumulación de partículas y lava mezclada con gases. Alcanzan alturas entre 30 y 450 m. Sus magmas son de baja viscosidad.

*Maar:* son conos con cráteres muy grandes de bajo relieve, que corta el nivel freático, por lo que forma un lago en el fondo llamado “mare”. Se forma por erupciones explosivas someras, generalmente provocadas por el calentamiento del agua freática, cuando el magma invade estos niveles.

*Volcán Escudo:* es un volcán amplio con pendientes suaves (menos de 10°) construidas por erupciones de lava basáltica fluida. El nombre proviene del parecido con los escudos de los guerreros. Los volcanes más grandes del mundo son volcanes escudo.

*Estratovolcán:* son volcanes con formas cónicas y pendientes pronunciadas, construidos por la erupción de flujos de lava viscosa, flujos piroclásticos y tefra. Se desarrollan, generalmente, en periodos de cientos o miles de años. Estos volcanes pueden producir una variedad de tipos de magma, incluyendo basalto, andesita, dacita y riolita. Todos estos magmas, con excepción del basalto, generan erupciones explosivas. De los 1511 volcanes que han hecho erupción en el mundo en los últimos 10,000 años, 699 son estratovolcanes.

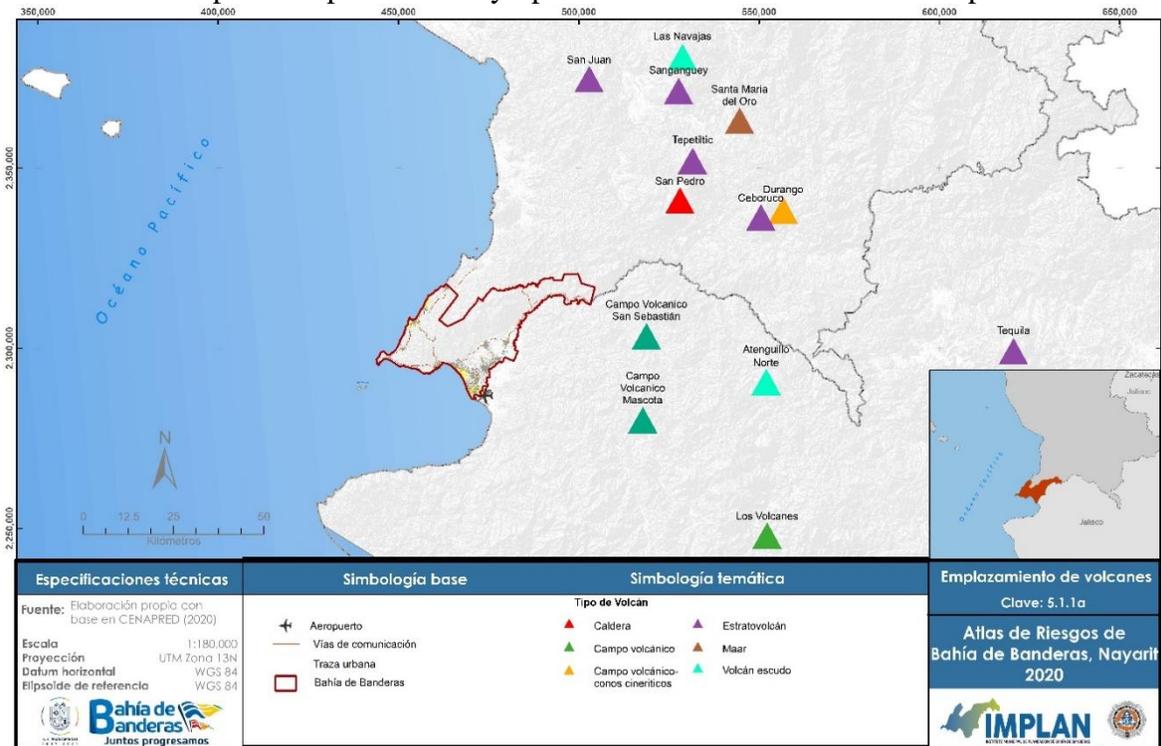
*Domos:* los domos están formados por masas de lava relativamente pequeñas. Esta lava es demasiado viscosa para fluir a grandes distancias, por lo que se apila sobre y alrededor de su centro emisor. Presentan pendientes fuertes que tienden a derrumbarse y formar flujos de bloques y cenizas. Llegan a medir hasta 200 m de diámetro y 500 m de altura.

En México, gran parte del vulcanismo está relacionado con la zona de subducción formada por las placas tectónicas de Rivera y Cocos en contacto con la gran placa de Norteamérica, y tiene su expresión volcánica en la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM). Son parte del Anillo de Fuego del Pacífico, también llamado Cinturón Circumpacífico que rodea casi totalmente el Pacífico. (Servicio Geológico Mexicano, 2007)

La Faja Volcánica Transmexicana corresponde al arco volcánico, formado sobre la margen meridional de la Placa Norteamericana (Ilustración 1); presenta características peculiares tal como una gran variabilidad del estilo volcánico y de la composición química de sus productos, la oblicuidad de su parte central y oriental con la trinchera y la notable variación del ancho del arco. Se suele dividir en tres sectores: occidental, central y oriental que presentan diferencias significativas en lo que respecta al tipo de vulcanismo y su composición química. (Ferrari, 2000).



Mapa 1. Emplazamiento y tipo de volcanes cercanos al municipio



Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de CENAPRED 2020.

### Principales volcanes de México

*Ubicados en Baja California, Noroeste de México e Islas Mexicanas (16 volcanes):* Cerro Prieto, Pinacate, San Quintín, Isla San Luis, Jaraguay, Coronado, Guadalupe, San Borja, Sin nombre, El Aguajito, Tres Virgenes, Isla Tortuga, Punta Pulpito, Comondú- La Purísima, Bárcena, Socorro.

*Ubicados al Oeste y centro de México (24 volcanes):* Durango, Sangangüey, Ceboruco, Mascota, Sierra la Primavera, Parícutín (Michoacán-Guanajuato), Los Azufres, Los Atlixcos, Jocotitlán, Los Humeros, Naolinco, Colima, Zitácuaro-Valle de Bravo, La Gloria, Papayo, Serdán-Oriental, La Malinche, Iztaccíhuatl, Las Cumbres, Nevado de Toluca, Chichinautzín, Pico de Orizaba, Popocatepetl, San Martín.

*Ubicados al Sur de México (2 volcanes):* El Chichón, Tacaná. (Servicio Geológico Mexicano, 2007)

Existen diversos peligros asociados al vulcanismo, estos pueden variar dependiendo de las características volcánicas de una región y de la distancia entre cierto sistema y un volcán determinado. Los principales peligros son (CENAPRED, ibid.):

- *Caída de tefra:* fragmentos de material volcánico compuesto por ceniza, pómez y bloques incandescentes. Es expulsada al momento de la explosión.
- *Proyectiles balísticos (bombas):* fragmentos de material mayor de 64 mm, pueden alcanzar diámetros de algunos metros. Son causados por explosiones en el cráter.

- *Flujos de lava*: corriente de roca fundida que se desliza pendiente abajo como un fluido viscoso, puede quemar las zonas de bosques, cultivos y construcciones.
- *Lahares o flujos de lodo*: son generados cuando los materiales expulsados durante las erupciones se mezclan con agua y forman flujos que se mueven pendientes abajo.
- Gases volcánicos: son la parte volátil del magma que se emite a través de fumarolas y cráteres.
- *Flujos y oleadas piroclásticas*: son una mezcla turbulenta de fragmentos de roca a alta temperatura, ceniza, pómez y gases peligrosos.

Entre los volcanes activos relevantes para el municipio, destaca el Ceboruco, uno de los estratovolcanes más peligrosos del país, se ubica a una distancia aproximada de 84 km. al noreste del municipio. En el año de 1870 tuvo una fuerte explosión que generó grandes daños a las poblaciones aledañas, pero no se cuenta con registro de víctimas. Actualmente, el volcán emite fumarolas y se le considera activo, con la posibilidad de presentar erupciones en el futuro (Nelson, 1986).

Otro volcán relevante para el municipio es el campo volcánico de Mascota, que encuentran a una distancia aproximada de 40 km. Un caso más distante es el volcán de Colima, que ostenta una elevación sobre el nivel del mar de 3 860 m, por lo que representa la octava cima más alta del país. Se encuentra a 220 km al sureste del municipio. Durante el 2005 presentó actividad que no superó el nivel 3 del Índice de Explosividad Volcánica (VEI), está se caracterizó por el desarrollo de domos y su destrucción casi inmediata, a través de explosiones que formaron columnas eruptivas que alcanzaron alturas entre los 4,500 y 9,000 msnm, así como el desarrollo de flujos piroclásticos que alcanzaron hasta 3.5 km de distancia del cráter. Tras los eventos explosivos se generaron emisiones de ceniza que se esparcieron hacia los cuatro puntos cardinales, alcanzando distancias de hasta 100 km (ARN, 2012).

Actualmente, el volcán de Colima emite fumarolas y se le considera como activo con posibilidad de presentar erupciones en el futuro, pero para que se presentase esta situación se requiere de la conjunción de varios factores, como el cambio de los vientos dominantes y que las cenizas permanecieran varios días concentradas en la atmósfera, así mismo debido a la distancia que separa los volcanes del municipio (Volcán de Colima a una distancia de 220 Km S-SE y Volcán Ceboruco a una distancia de 84.3 Km. al NE). Por lo tanto, se descarta la afectación al municipio causada por flujos piroclásticos, lahares volcánicos y avalanchas de ladera volcánica.

### II.1.1 Metodología

Inicialmente se realizó una búsqueda de bibliografía asociada a la actividad volcánica, entre los documentos consultados destacan los de CENAPRED (2014, 2006). Para identificar la susceptibilidad por eventos volcánicos en Bahía de Banderas, se consideró la capa de volcanes activos publicada por CENAPRED (2020) y la distancia entre estos y el municipio. Para representar dicha distancia, se generaron buffers cada 20 km a partir de los volcanes de la zona. De esta forma fue posible asociar el área de influencia volcánica con la cantidad de vivienda y población en las localidades del municipio.

## II.1.2 Riesgo Volcánico

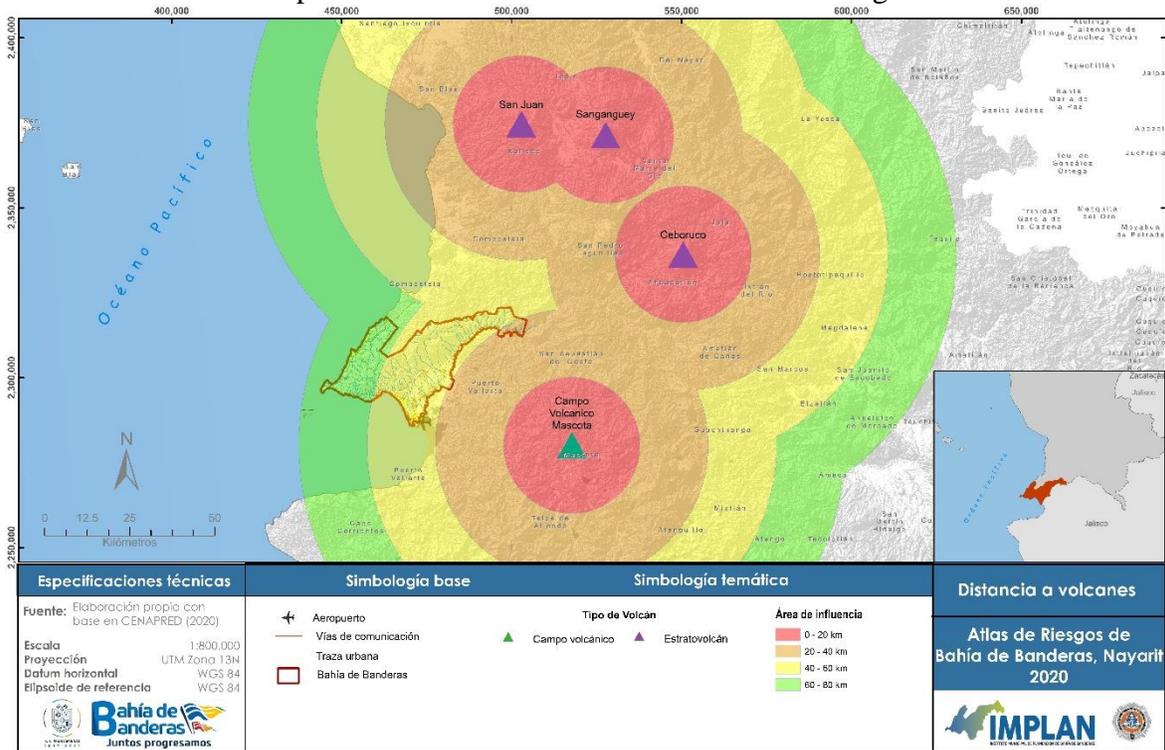
Derivado del análisis, se concluye que no existen volcanes que, por su proximidad al municipio, representen un peligro asociado a flujos piroclásticos, flujos de lava, avalanchas de ladera volcánica o lahares. Sin embargo, Bahía de Banderas se encuentra dentro del área de caída de ceniza volcánica que podrían emitir los volcanes activos de la zona. Es posible que la emisión de ceniza volcánica afecte al territorio municipal, pero esto depende de la confluencia de ciertos factores, como el cambio de dirección de los vientos dominantes y la permanencia de altas concentraciones de ceniza volcánica en la atmósfera.

En el Mapa 2 se aprecia que la zona este del territorio municipal se encuentra entre los 35 y 60 km de distancia de los volcanes activos de la región. A menos de los 40 km, se encuentra expuesta la localidad del Ahuejote, donde podrían ser afectadas un aproximado de 180 viviendas y una población de 630 habitantes en la zona sierra. Entre los 40 y los 60 km es la distancia en la cual la mayor parte del territorio está expuesta, siendo un total de 60,073 viviendas correspondientes a localidades como Mezcales, Bucerías, Nuevo Vallarta o San Vicente, por mencionar algunos ejemplos. La zona más distante a los volcanes es la costera, que se emplaza entre los 60 y los 80 km de distancia, donde se ubican localidades como Punta de Mita, Higuera Blanca, Sayulita, Lo de marcos y San pancho, siendo un total de 5,376 viviendas las que resultarían dañadas

El riesgo ante la caída de ceniza volcánica puede ocasionar en personas y animales, efectos como el agravamiento de enfermedades pulmonares, trastornos gastrointestinales por la ingestión de agua y alimentos contaminados con flúor y posiblemente con metales pesados (arsénico, mercurio, etc.); daños oculares como conjuntivitis y abrasiones en la córnea.

La inhalación o exposición excesiva a la ceniza volcánica también llega a ser dañina, por su carácter erosivo y, en ciertos casos, por los materiales volátiles que puede condensar. La ceniza puede acarrear depósitos de flúor a niveles tóxicos. Sin embargo, la inhalación y exposición puede ser reducida permaneciendo en casas o sitios en los que se evite la entrada del polvo. También debe evitarse que la ceniza caiga en el agua potable, y de ser posible proteger o trasladar animales y ganado doméstico a un lugar seguro.

Mapa 2. Distancia a los volcanes activos de la región



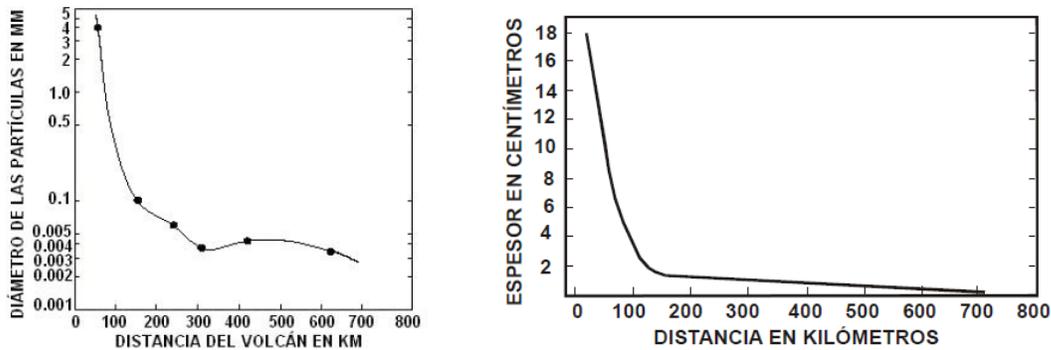
Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de CENAPRED 2020.

El daño principal que causa la ceniza en las poblaciones se deriva de su acumulación en los techos, provocando su colapso, lo que puede evitarse removiendo la ceniza acumulada, teniendo gran cuidado de no arrojarla al drenaje. Capas de cenizas de 2 a 3 cm de espesor pueden causar el colapso de techos con pendientes menores a 20° así como en estructuras de mala calidad.

En una erupción volcánica, los fragmentos de ceniza más grandes caen rápidamente cerca del volcán y los fragmentos más finos pueden ser arrastrados por el viento sobre distancias de cientos y hasta miles de kilómetros ( Figura 1), especialmente cuando la columna eruptiva alcanza alturas mayores a los 11 km y penetra en la estratosfera produciendo lluvias de ceniza sobre grandes extensiones.

El municipio de Bahía de Banderas se encuentra a menos de 80 km de los volcanes de la región por lo que se consideran partículas de ceniza con un diámetro de hasta 0.5 mm y capas de ceniza de un espesor de 3 cm, pero en la porción este del municipio estas cantidades pueden ser mayores. Las cenizas secas tienen un peso de 400-700 kg/m<sup>3</sup>, la lluvia puede incrementarlo de un 50 a un 100%. Una capa de cenizas de 10 cm de espesor representará una carga extra de 40-70 kg/m<sup>2</sup> si está seca, y de 100-125 kg/m<sup>2</sup> si está húmeda.

Figura 1 Alcance de la ceniza de acuerdo al tamaño de partícula y espesor de la capa de ceniza de acuerdo a la distancia al volcán



Fuente: CENAPRED (2014), p. 135.

Para evitar daños durante este tipo de eventos, se deben seguir medidas de mitigación tales como: evitar actividades al aire libre, proteger ojos, nariz y boca, mantener cerradas puertas y ventanas, tapar tinacos y otros depósitos para que no se contaminen, evitar conducir el automóvil, ya que la ceniza reduce la visibilidad y vuelve el pavimento resbaladizo y revisar que el agua y los alimentos que se consumen no se encuentren contaminados (CENAPRED, 2018).

## II.2 Sismos

Los sismos son fenómenos derivados de la dinámica interna de la Tierra que han estado presentes en la historia geológica de nuestro planeta, y que seguramente continuarán manifestándose de manera similar a lo observado en el pasado. Sin embargo, en ocasiones, como parte de una evaluación y análisis, se ha llegado a afirmar que las pérdidas humanas y materiales van en aumento como consecuencia de la ocurrencia más frecuente de fenómenos naturales.

Los sismos son un fenómeno que se producen por el rompimiento repentino en la cubierta rígida del planeta llamada corteza terrestre. Como consecuencia, se producen vibraciones que se propagan en todas direcciones y que se perciben como una sacudida o un balanceo con duración e intensidad variable (CENAPRED, 2011). En los límites entre placas donde éstas hacen contacto, se generan fuerzas de fricción que impiden el desplazamiento, generando grandes esfuerzos. Si dichos esfuerzos sobrepasan la resistencia de la roca o se vencen las fuerzas friccionantes, ocurre una ruptura violenta y la liberación de energía acumulada, ésta se irradia en forma de ondas sísmicas a través del medio sólido de la Tierra en todas direcciones. El punto interior donde se origina la ruptura, se denomina hipocentro o foco y el de la superficie terrestre directamente por arriba del foco, epicentro (CENAPRED, 2014).

De acuerdo con la Guía básica para la elaboración de Atlas Estatales y municipales de peligros y riesgos, en el apartado de Integración de información para la estimación de Peligro Sísmico, Para conocer y comparar objetivamente el tamaño de los terremotos se necesita una medida que no dependa, como la intensidad, de la densidad de población ni del tipo de construcción afectada. La manera de evaluar el tamaño real de un sismo se basa en registros sísmicos y está relacionada con la cantidad de energía liberada, la cual es independiente de la ubicación de los instrumentos que lo registran por lo que, en 1932, Charles Richter desarrolló una escala estrictamente cuantitativa, aplicable a sismos ocurridos en regiones habitadas o no, utilizando las amplitudes de las ondas registradas por un sismógrafo. Su escala tiene aplicación para sismos superficiales y relativamente cercanos.

Se reconocen tres maneras de medir los sismos: intensidad, magnitud y aceleración (Cuadro 1). La Intensidad está relacionada con los efectos que provoca un sismo. Existen diferentes escalas utilizadas, sin embargo, la más referida es la Escala de Mercalli. Esta clasifica a los sismos en doce grados de intensidad, es de carácter subjetivo y varía de acuerdo con los daños causados en las edificaciones, los efectos en el terreno, en los objetos y en las personas.

Cuadro 1. Escala de magnitud e intensidad más utilizadas

Escala de Magnitud de Richter	Escala de Intensidad de Mercalli	Núm. de sismos por año	Efectos
< 3.5	I - II	800000	Registrado solo por sismógrafos
3.5 - 4.5	III - V	30000	Sentido por algunas personas
4.5 - 6	V - VII	6000	Sentido por muchos, ocasiona daños locales menores
6.1 - 7	VIII - IX	500	Daños severos en áreas muy pobladas
7.1 - 8	X	15	Sismo de gran magnitud, daños severos en infraestructura y construcciones
> 8	XI - XII	1 c/5 años	Destrucción casi total

*Fuente: Elaboración propia con base en información del SSN.*

En México, el Servicio Sismológico Nacional (SSN), así como en otras agencias internacionales como el USGS, no se emplea la escala de Richter, los valores de magnitud que reportan es la Magnitud de Coda (Mc) para sismos de magnitud menor de 4.5; para sismos mayores de 4.5, con epicentros en Guerrero, se usan la Magnitud de Energía (ME), y Magnitud de Amplitud (MA), para México. Para sismos de magnitud mayor de 4.5, se reporta la Magnitud de Momento (Mw). Esta escala no se satura cerca de valores altos, es decir, a diferencia de otras escalas, no tiene un valor por encima del cual todos los sismos más grandes reflejan magnitudes muy similares, la otra ventaja que posee es que coincide y continúa con los parámetros de la escala de Richter (SSN, 2008).

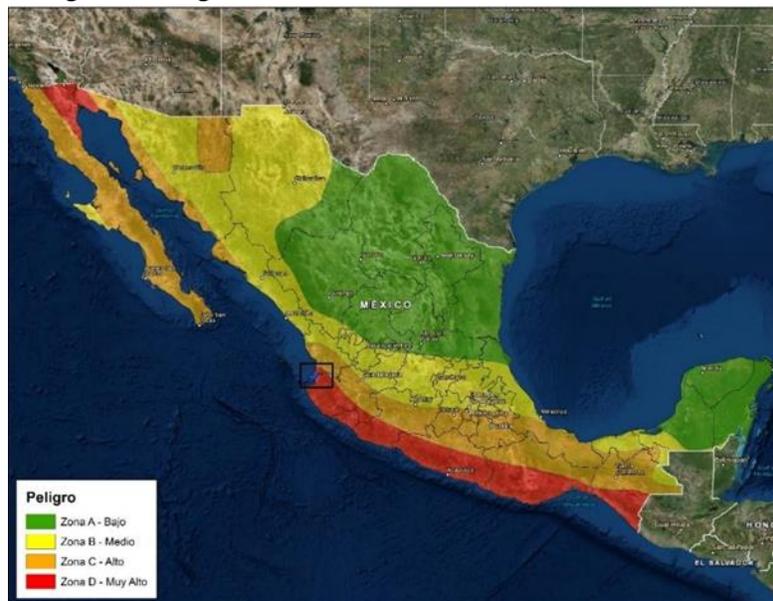
Por otro lado, el conocimiento de la aceleración sísmica es una medida utilizada en los sismos en ingeniería. Normalmente la unidad utilizada es la intensidad del campo gravitatorio ( $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ ). El valor de aceleración es utilizado para establecer normativas y zonas de riesgo sísmico, aunque no es directamente aplicable en la población con fines de protección civil, es un elemento fundamental para el diseño de nuevas construcciones, modificación o refuerzo de obras civiles existentes ya que, durante los sismos, el daño en ellas está relacionado con la velocidad y la aceleración sísmica, y no tanto con la magnitud del movimiento (CENAPRED, 2014).

México se localiza en una de las zonas sísmicas más activas del mundo, el Cinturón de Fuego del Pacífico, cuyo nombre se debe al alto grado de sismicidad que resulta de la movilidad de cuatro placas tectónicas: Norteamérica, Cocos, Rivera y del Pacífico (CENAPRED, 2011). En función de la cantidad de sismos y el nivel de peligro, el territorio nacional se clasifica en cuatro regiones, de la A-D (Figura 2). Esta clasificación se emplea en los reglamentos de construcción para fijar los requisitos mínimos que se deben seguir en la construcción de las edificaciones y otras obras civiles, de tal manera que, éstas resulten suficientemente seguras ante los efectos producidos por un sismo (CFE, 2010).

La zona A es aquella donde no se tienen registros históricos de sismos y las aceleraciones del terreno se esperan menores al 10% de g. En la zona D, ocurren con frecuencia temblores de gran magnitud  $> 7$ , y las aceleraciones del terreno pueden ser superiores al 70% de g. Los niveles de sismicidad y aceleración propios de las zonas B y C, están acotados por los valores correspondientes de A y D, los sismos grandes son poco frecuentes y se estima que las aceleraciones se mantienen por debajo del 70% de g (CENAPRED, 2014).

Por lo tanto, para el caso del municipio de Bahía de Banderas, presenta un nivel de peligro **Muy Alto** (Figura 2) debido a la interacción de la placa de Rivera y de Norteamérica. El dinamismo de estas placas genera bordes convergentes o zonas de subducción donde chocan por tener movimientos con direcciones opuestas, la más densa (de Rivera) se hunde debajo de la menos densa (placa de Norteamérica). Esta zona de subducción, genera deformación de la corteza, vulcanismo, formación de montañas, metamorfismo y actividad sísmica (SGM, 2017).

Figura 2. Regionalización sísmica del territorio nacional



Fuente: Elaboración propia con base en datos del Atlas Nacional de Riesgos, 2015.

Según los registros del SSN desde el año 1900, el movimiento de las placas de Rivera y Cocos contra la placa de Norteamérica, hasta la elaboración de este documento, ha ocasionado la ocurrencia de 2,750 sismos de diversas magnitudes en un radio de 200 km del municipio de Bahía de Banderas (Cuadro 2). Cabe señalar que los de magnitud  $< 3$ , en muchas ocasiones no logran ser detectados por los equipos de medición, por lo que, esta cifra puede ser mucho mayor.

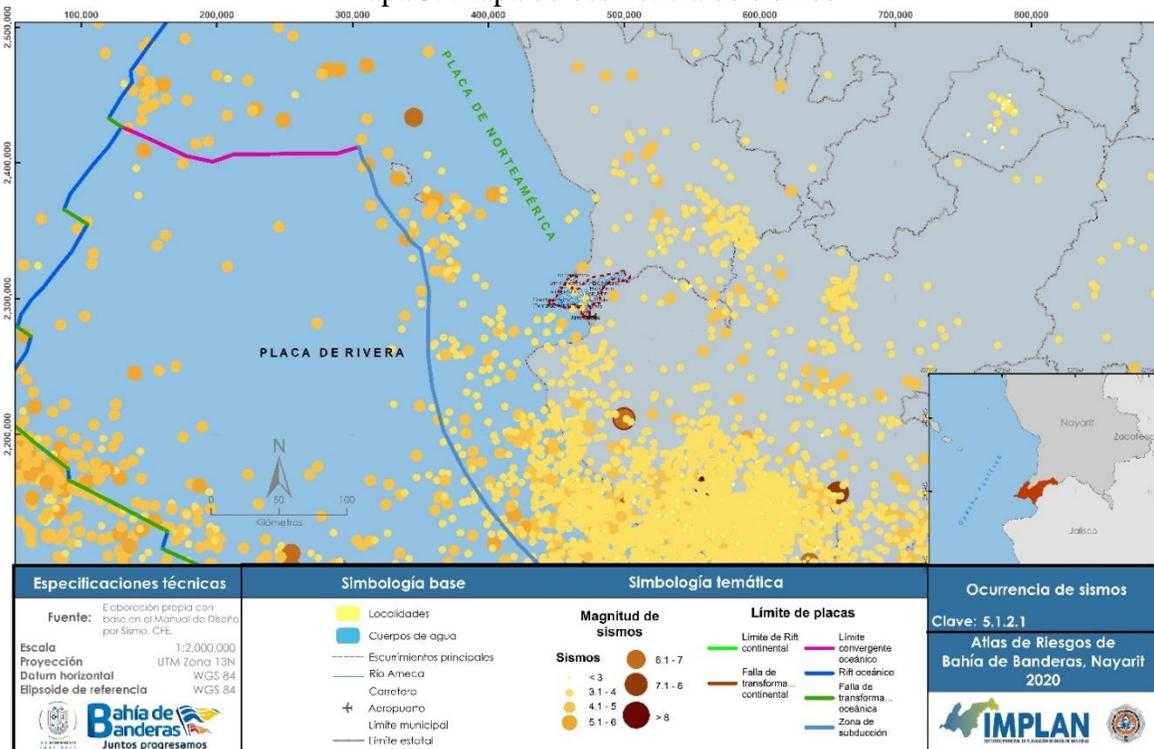
Cuadro 2. Frecuencia de sismos según magnitud en un radio de 200 km del municipio

Magnitud	Frecuencia
< 3	192*
3.1 - 4	2289
4.1 - 5	247
5.1 - 6	16
6.1 - 7	4
7.1 - 8	1
> 8	1

Fuente: Elaboración propia con base en los datos publicados por el SSN, 2018.

La mayor cantidad de sismos son de magnitud menor a 4, de hecho, son de esta magnitud los que han ocurrido dentro del territorio municipal, no obstante, los sismos no solo son ponderables si se presentan en alguna región cercana, la afectación de estos es de carácter regional y el municipio de Bahía de Banderas se encuentra al norte de una zona con alta actividad sísmica ocasionada por la subducción de la placa de Cocos y el movimiento del Bloque de Jalisco (Mapa 3).

Mapa 3. Mapa de ocurrencia de sismos



Fuente: Elaboración propia con base en el Manual de Diseño por sismo de CFE.

Sin embargo, a pesar de la actividad sísmica regional, frente a las costas y al sur del municipio, hay un Gap Sísmico, lo que quiere decir que no se ha presentado un sismo de gran magnitud en al menos 30 años. No obstante, no se debe descartar la ocurrencia de grandes sismos. En este sentido, hay estudios que han agrupado las acumulaciones sísmicas en la región, que se han correlacionado con fallas y con dimensiones de cientos de metros, consideradas como asperezas o barreras en estructuras tectónicas con longitudes entre 10 y 30 km. Estas estructuras pueden generar sismos someros con magnitudes entre 5.0 y 6.0 (Rutz-López et al., 2013).

Una consideración importante para el análisis sísmico del municipio, es la importante convergencia de las placas: Placa de Cocos bajo la placa Norteamericana, en la costa occidental de nuestro país.

En la zona de convergencia entre la placa de Rivera y el Bloque de Jalisco con la placa de Norteamérica, se han investigado las posibles fuentes estructurales que pueden dar lugar a sismos y tsunamis. Para ello, se han recopilado una amplia base de datos geofísicos tanto en mar como en tierra. Se ha encontrado que el espesor de la corteza continental bajo la región de Bahía de Banderas es de unos 20 km y que esta se encuentra bajo fuertes esfuerzos de movimiento de las placas que generan lineamientos estructurales, siendo posiblemente el resultado del empuje entre estructuras y estableciéndose como comienzo del actual proceso de la actividad sísmica asociada (Núñez-Cornú et al., 2016) citado en (Camargo, 2015).

En esta región se han definido tres zonas sísmicas:

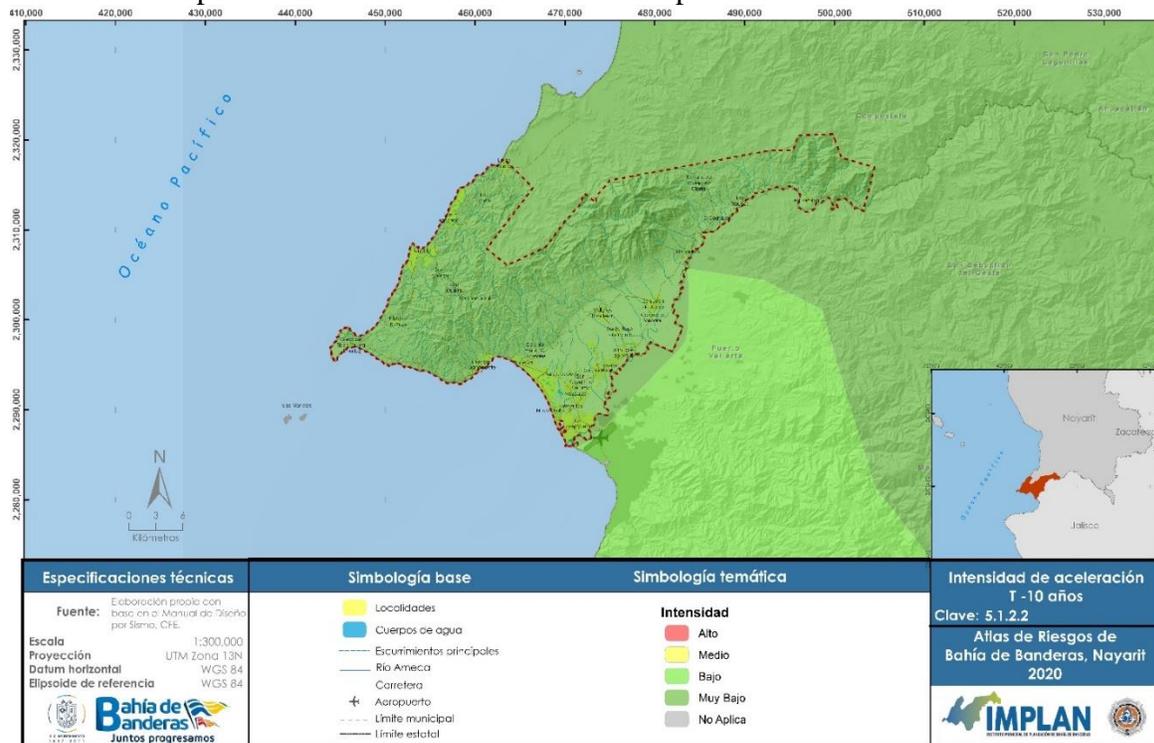
- *Zona norte de la Bahía.* Hay una gran dispersión de las señales sísmicas, todos los sismos ocurren a profundidades someras. Este hecho aporta datos para la hipótesis que sugiere la existencia de una estructura tectónica importante que atraviesa la bahía en dirección E-W (Dañobeitia et al., 1997).
- *Zona centro de la bahía.* Es en esta zona se producen los eventos más profundos, que podrían correlacionarse con la estructura, que marca el límite norte del Bloque de Jalisco, “Borde de Banderas”, que hoy en día está aún sin delimitar y que podría prolongarse hacia el este uniendo la zona sísmica del centro de la Bahía con la de Amatlán de Cañas-Ameca.
- *Zona sur de la Bahía.* Esta zona está definida por los eventos que ocurren en la parte suroriental de la bahía. Estos incluyen los sismos del área de Puerto Vallarta, el Tuito y la costa sur de la bahía. Todos estos eventos son superficiales y se pueden correlacionar con rasgos morfoestructurales, lo que implica que hay estructuras locales continentales activas y, por lo tanto, potencialmente peligrosas. Son este tipo de temblores los que se producen continuamente en los enjambres; entre estos enjambres se pueden observar familias de sismos.

El conocer solamente las magnitudes, no da una idea clara del impacto que éstos producirían en una determinada región, ya que pueden presentarse a diferentes profundidades y distancias

de los asentamientos humanos. Para un acercamiento mayor de los posibles impactos, se realizaron mapas de distribución de las intensidades en términos de aceleración del terreno asociada a periodos de retorno. Este fue el resultado del programa Peligro Sísmico en México (PSM, 1996), que constituye un sistema de información sobre el peligro sísmico en cuya elaboración participaron la UNAM, la CFE y el CENAPRED. Para facilitar la definición de los niveles de peligro, se eligieron los mapas de aceleración más representativos en función de la vida útil de la gran mayoría de las construcciones, correspondientes a periodos de retorno de 10, 100 y 500 años (CENAPRED, 2014).

Con base en los mapas de aceleración, para el municipio de Bahía de Banderas, la aceleración máxima en un periodo de retorno de 10 años es de 34 cm/s<sup>2</sup>, considerada como una intensidad **Muy Baja** (Mapa 4).

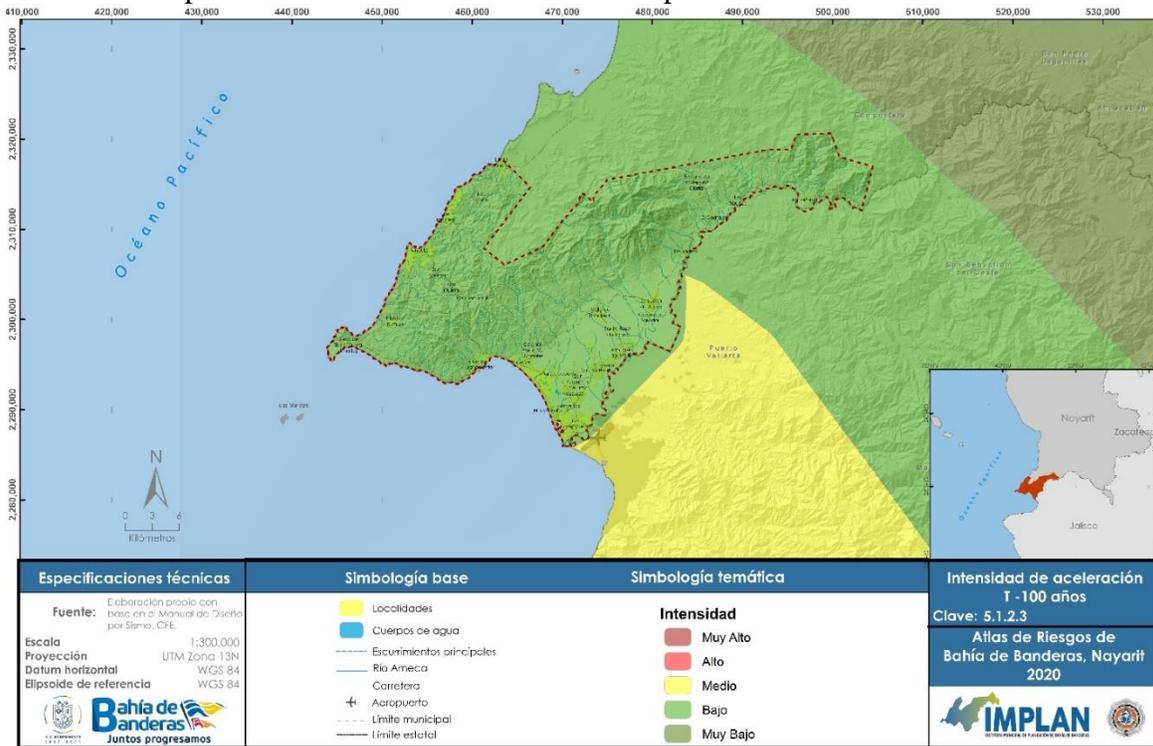
Mapa 4. Intensidad de aceleración en un periodo de retorno a 10 años



*Fuente: Elaboración propia con base en el Manual de Diseño por sismo de CFE*

Para el análisis del periodo de retorno a **100 años**, la intensidad es **Baja**, ya que muestra una aceleración máxima de **135 cm/s<sup>2</sup>** (Mapa 5).

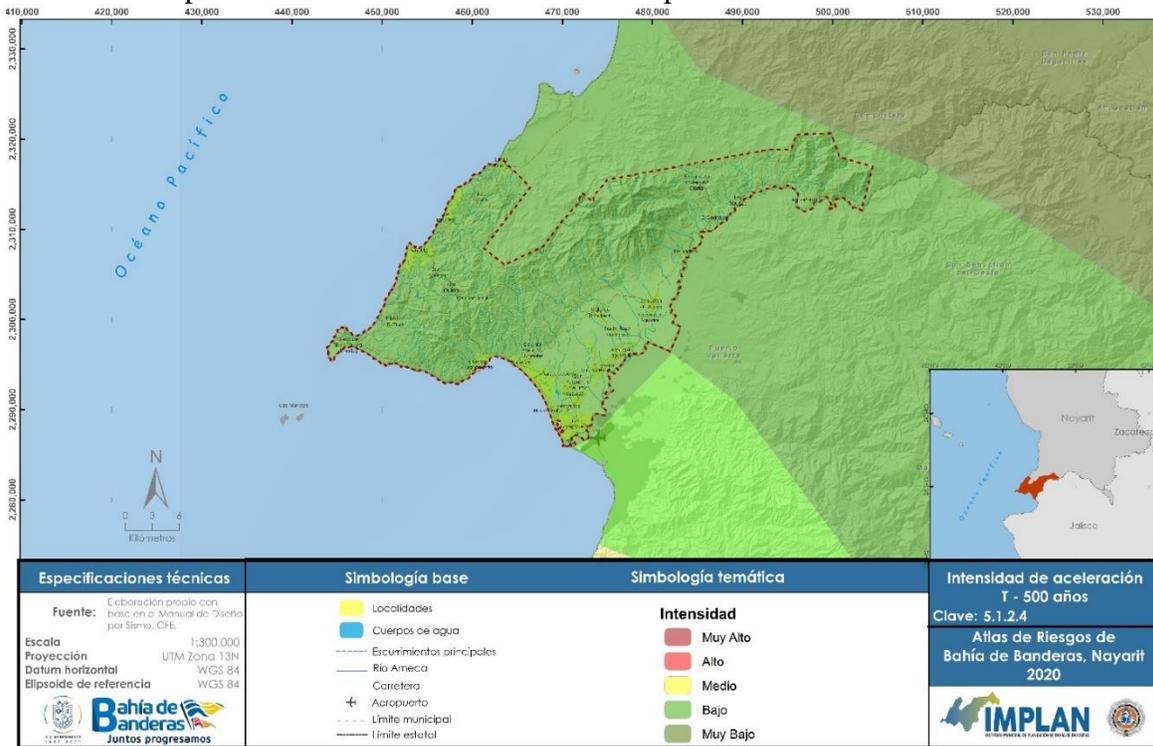
Mapa 5. Intensidad de aceleración en un periodo de retorno a 100 años



Fuente: Elaboración propia con base en el Manual de Diseño por sismo de CFE

Por su parte, la aceleración máxima para un periodo de retorno de 500 años es de 225 cm/s<sup>2</sup>, como en el caso anterior, la intensidad es **Baja** (Mapa 6).

Mapa 6. Intensidad de aceleración en un periodo de retorno a 500 años



Fuente: Elaboración propia con base en el Manual de Diseño por sismo de CFE

Esta información, aunque no es directamente aplicable en la población con fines de protección civil, es un elemento fundamental para que los especialistas emitan recomendaciones en el diseño de nuevas construcciones y modificación o refuerzo de obras para disminuir la exposición de la población y de las obras mismas (CENAPRED, 2014).

La información antes señalada, ayuda a los municipios para que cuenten con datos que les permita tomar medidas apropiadas para la evaluación y mitigación de peligros y riesgos por sismos.

Aunado a los mapas anteriormente mencionados, CENAPRED (2014), reporta los valores de aceleración máxima promedio del terreno para cada municipio. De acuerdo con esta información, la aceleración máxima del terreno para el municipio de Bahía de Banderas es de un **Peligro Bajo** (Cuadro 3), sin embargo, se deben tomar distintas medidas ante la ocurrencia de un sismo de importante magnitud, como ya se mencionó anteriormente.

Cuadro 3. Aceleración máxima en el municipio de Bahía de Banderas

Municipio/ Estado	A max (gal) para Tr = 10 años	A max (gal) para Tr = 100 años	A max (gal) para Tr = 500 años
Bahía de Banderas, Nay.	34	81-135	135-225

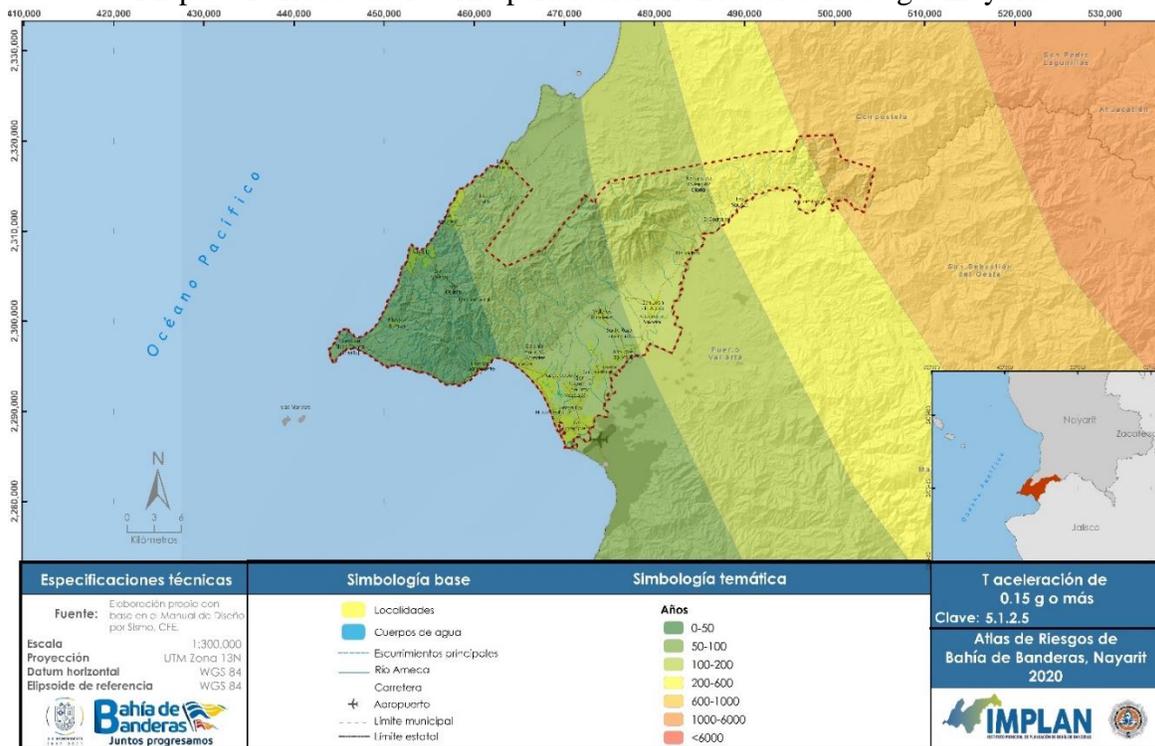
Fuente: Elaboración propia con base en CENAPRED, 2014.

Esta información ayudará a fortalecer el reglamento de construcción para definir las directrices de diseño para edificaciones de poca altura, de uno o dos niveles, construcciones típicas en nuestro país.

Por otro lado, se sabe que, para los tipos constructivos predominantes, los daños son considerables a partir de un nivel de excitación del terreno igual o mayor al 15% de  $g^2$ . Por tal razón, utilizando información reciente, la CFE actualizó el mapa de Periodos de Retorno para Aceleraciones de 0.15 de  $g$  o mayores (CENAPRED, 2014d) (Mapa 7).

De acuerdo con esta información, el municipio presenta cuatro intervalos de periodos de retorno, que van desde los 0 a los 600 años. Esto quiere decir que para una localidad donde el periodo de retorno sea de 25 años, significa que podrá ser afectada por una aceleración igual o mayor al 15% de  $g$ , 4 veces en un siglo, u 8 veces en 200 años, a consecuencia de sismos con epicentro en un cierto entorno de dicha localidad.

Mapa 7. Periodos de retorno para aceleraciones del 0.15 de  $g$  o mayores



Fuente: Elaboración propia con base en el Manual de Diseño por sismo de CFE

En este sentido CENAPRED calculó el periodo promedio de retorno de una aceleración máxima que puede producir daños importantes a las construcciones en localidades mayores a 10,000 habitantes, no obstante, al momento de la elaboración del análisis, ninguna localidad del municipio cumplía con esta condicionante, por lo anterior, para tener un acercamiento a los posibles periodos retornos que afectarían el territorio municipal, se presentan los periodos para localidades más cercanas en las que sí fue calculado (Cuadro 4).

Cuadro 4. Periodos de retorno para aceleraciones del 0.15 de g o mayores a nivel de localidad

Estado	Municipio	Localidad	T (años)
Nayarit	Compostela	Las Varas	271
Jalisco	Puerto Vallarta	Ixtapa	59
Jalisco	Puerto Vallarta	Puerto Vallarta	46

*Fuente: Elaboración propia con base en CENAPRED, 2014.*

Las localidades de Ixtapa y Puerto Vallarta, Jalisco, más cercanas a los mayores centros de población del municipio de Bahía de Banderas; los periodos de retorno para la ocurrencia de aceleraciones del 0.15 de g o mayores fueron de 59 y 46 años respectivamente, mientras que, para las Varas, el periodo es más grande. Por lo anterior, el municipio podría sufrir una aceleración igual o mayor al 15% de g, que dañe edificaciones de poca altura, aproximadamente dos veces en 100 años.

### II.2.1 Micro sismicidad

Ahora bien, la región de Bahía de Banderas en la costa Norte del Estado de Jalisco, México, se encuentra en la convergencia de tres estructuras tectónicas: placa de Rivera, Bloque Jalisco y la placa de Norteamérica, además de ser actualmente un gap sísmico relacionado con los terremotos de 1932 con magnitud 8.2 y 7.8, uno de los más grandes que se han registrado en México, lo que muestra un alto nivel de sismicidad en el área (Núñez-Cornú, 2011).

Existe un estudio sobre los patrones sísmicos en la región presenta el primer análisis detallado de los patrones sísmicos en la zona de Cabo Corrientes en el periodo de enero a junio de 2012 con estaciones fijas de la Red Sísmica y Acelerométrica de Jalisco (RESAJ).

#### *Metodología*

El análisis de estudio se realizó con la utilización del programa ANTELOPE mediante el cual, se hace la detección, asociación y localización de los eventos mediante un proceso automatizado, después, se seleccionaron los eventos locales, teniendo como resultado 6,708 eventos.

Posteriormente, se localizaron geográficamente con el programa HYPO71, para posteriormente sepáralos, por menor residual y localización en el área de estudio, quedando 1,113 eventos.

Finalmente se refinó la selección y se procesaron los eventos que su  $RMS \leq 0.5$  s, y los errores EHZ y EHH  $\leq 10$  km., quedando 623 de ellos. De los 623 eventos finales, 490 se encuentran a una profundidad menor o igual a 20 km, 123 están en el rango de 20 a 40 km, 7 eventos entre 40 a 60 km, y 3 a más de 60 km., lo anterior sugiere un alto nivel de sismicidad. Los restantes 490 de los 1,113 eventos localizados no cumplen con los parámetros antes mencionados.

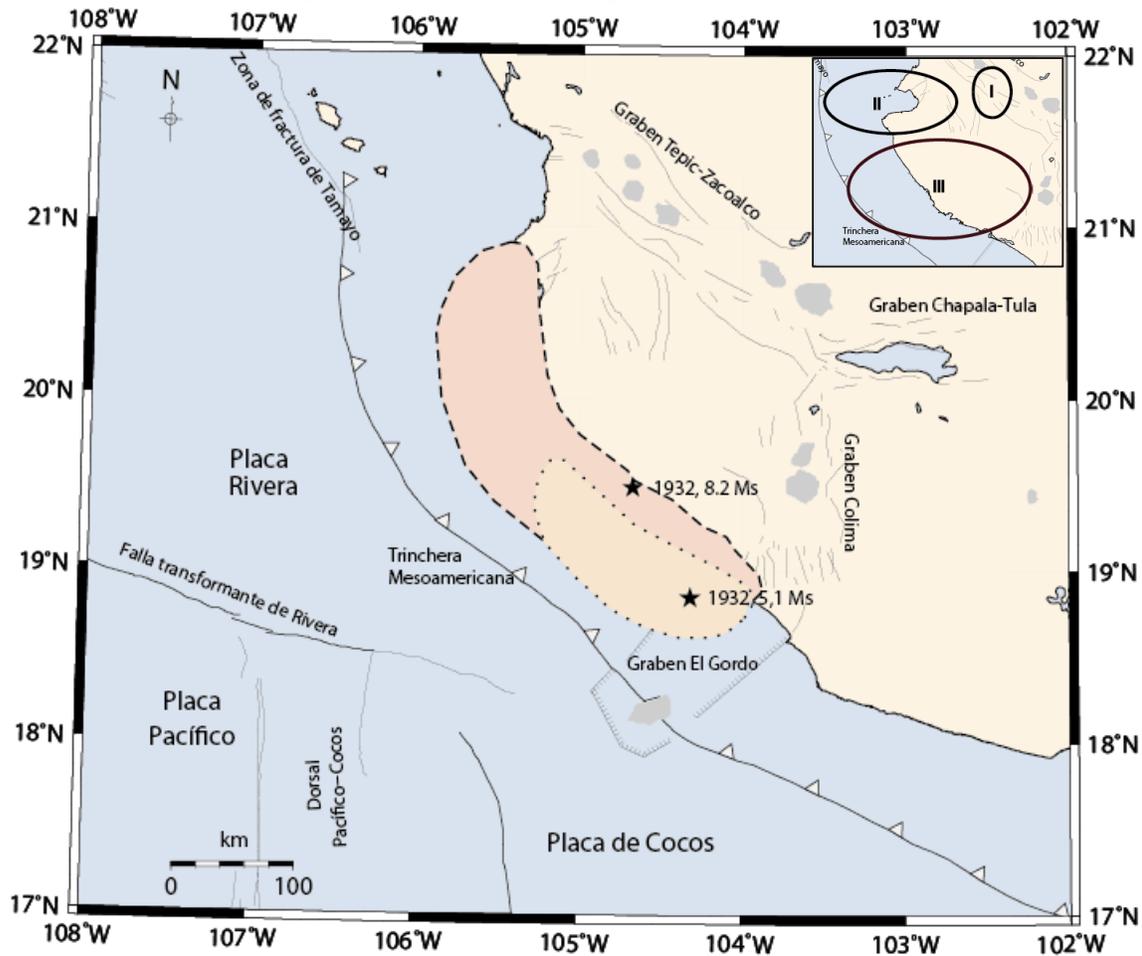
La mayor magnitud local encontrada en este periodo es un evento de ML = 5.1.

Al observarse un alto nivel de sismicidad y que la mayoría de los epicentros están localizados en la tierra firme, a no más de 100 km de la Trinchera Mesoamericana con bajas magnitudes locales ( $0 < ML < 4$ ), lo expuesto nos sugiere que esta sismicidad actúa como un mecanismo para liberar energía de deformación en pequeñas cantidades. (Camargo, 2015)

### *Rasgos Tectónicos*

El municipio se encuentra dentro de lo que se denomina “El Bloque Jalisco”, el cual, se ubica en los estados de Nayarit, Jalisco, Colima, y Michoacán. Esta unidad tectónica se propuso debido a las características estructurales y tectónicas de sus límites.

Figura 3. Localización de puntos de estudio



*Recuperado de la tesis de Patrones sísmicos en la zona de cabo corrientes, Jalisco, 2015.*

Este gran bloque, se divide en tres zonas:

- Zona I Amatlán de Cañas
- Zona II Bahía de Banderas
- Zona III Costa

El municipio, correspondiendo a la zona II, que comprende un área marítima desde la Trincheras Mesoamericana hasta la costa de la Bahía de Banderas y una región continental, se caracteriza como una zona sísmica doble (ZSD) con la geometría que sugiere una placa de flexión, y probablemente la subducción es oblicua. Esta Zona fue dividida a su vez en 3 zonas sismogénicas (Rutz-López, 2001, citado en): Centro de la bahía (en donde se producen eventos más profundos); Punta de Mita (donde se sugiere la existencia de una estructura importante que atraviesa la bahía en dirección EW, y ocurren a profundidades superficiales); y Sur de la Bahía de Banderas (en donde los eventos superficiales, producen enjambres de varios tipos de familias de eventos)( lo anterior (Rutz-López, 2001) citado en (Camargo, 2015)).

Para su estudio, se consideraron las estaciones de la RESAJ, las cuales se muestran en la siguiente ilustración:

Ilustración 2. Ubicación de las estaciones de la RESAJ

ESTACIÓN	NOMBRE	LATITUD (°N)	LONGITUD (°E)	m.s.n.m. (km)
PVIJ	La Aguacatera	20.606	-105.198	0.564
SMTJ	San Miguel Tuxpan	19.5717	-103.3243	1.257
YETJ	Yelapatapa	20.4774	-105.4659	0.648
PSSJ	San Sebastián del Oeste	20.7169	-104.8271	2.534
ALGJ	Algodones	20.3887	-105.4788	0.395
CAFJ	Cerro Alto	19.535	-103.5233	2.086
MCUJ	Minas del Cuale	20.3819	-105.1042	2.215
PIHJ	Pihuamo	19.2291	-103.4076	1.073
CB01	Ceboruco 01	21.1464	-104.4698	1.42
CB02	Ceboruco 02	21.0839	-104.4918	1.203
CB03	Ceboruco 03	21.1123	-104.5771	0.926
CEBN	Ceboruco	21.1114	-104.5152	1.91

Recuperado de la tesis de Patrones sísmicos en la zona de cabo corrientes, Jalisco, Camargo 2015.

#### *Cálculo de la Magnitud $M_L$*

La estimación de la magnitud local ( $M_L$ ) se realizó después de localizar el sismo; para este cálculo el programa ANTELOPE cuenta con rutinas para calcular la magnitud de Richter o magnitud local ( $M_L$ ), la cual es definida como el logaritmo de máxima amplitud de una onda S registrada en un sismógrafo tipo Wood-Anderson, más una función de atenuación, como se muestra a continuación:

$$M_L = \log (A) + 2.76 \log (\Delta) - 2.48$$

donde  $\log (A)$ , es la amplitud máxima de S, (mm)

donde  $\log (\Delta)$ , es la distancia a la estación, (km); Stein y Wysession, (2003).

Y el resultado se puede observar en la siguiente ilustración:

Ilustración 3 Selección de eventos por rango ML

Rango de $M_L$	No. Eventos
0 A 1	474
1.1 A 2	342
2.1 A 3	261
3.1 A 4	34
4.1 A 5	1
5.1 A 6	1
<b>TOTAL</b>	<b>1,113</b>

*Recuperado de la tesis de Patrones sísmicos en la zona de cabo corrientes, Jalisco, Camargo, 2015.*

La investigación aplica hacer más confiable la localización de los eventos, por lo que se restringen a que cumplan con los siguientes parámetros:

- RMS (error cuadrático medio de los residuales de tiempo, de las fases
- P y S, en segundos) = 0.5 s
- EHZ (error focal estándar de la profundidad, en km) = 10 km
- EHH (error estándar horizontal del epicentro, en km) = 10 km
- $S - P < 30$  s

Revisando la base de datos para separar los eventos que cumplieron con los parámetros anteriores, obteniendo 623 eventos.

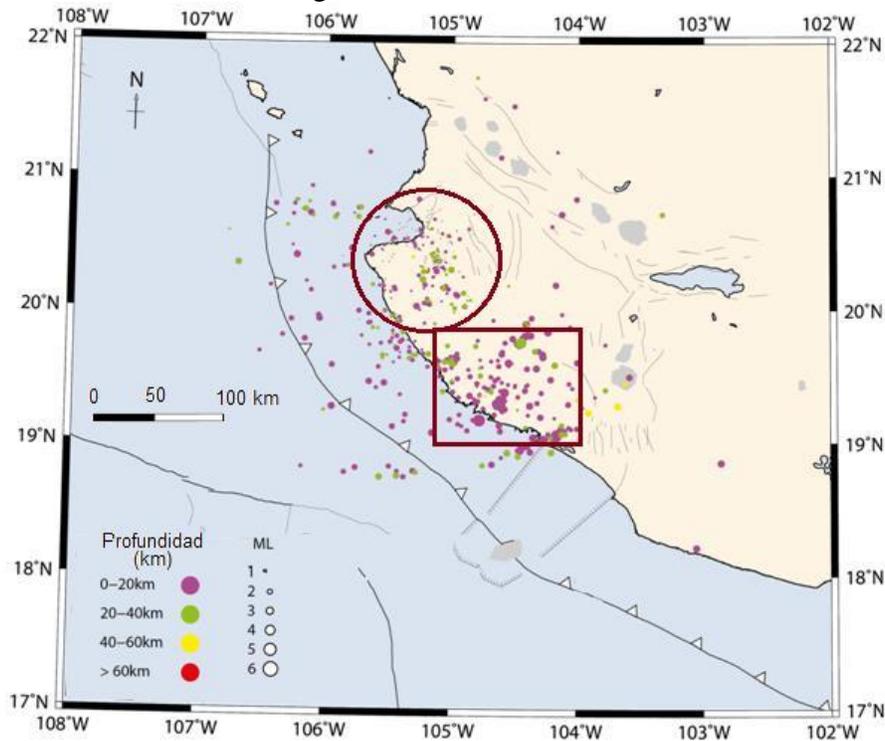
### *Resultados*

Como se puede observar en la siguiente figura, la mayor concentración de eventos en mayor magnitud se encuentra en Jalisco.

Las magnitudes  $M_L$  que fueron encontradas están entre 0 y 1.5. Lo anterior sugiere que el nivel de sismicidad es alto, con magnitudes  $M < 3$  y profundidades de 20 a 40 km.

En el área que abarca el rectángulo parte sur el Bloque de Jalisco se presentan más sismos con un rango de profundidad entre 0 - 20 km y de magnitud  $M_L = 2.0$ , también se encuentra el evento de  $M_L = 5.1$  que es la máxima magnitud encontrada en el análisis realizado. (Camargo, 2015).

Figura 4. Eventos sísmicos



*Recuperado de la tesis de Patrones sísmicos en la zona de cabo corrientes, Jalisco, Camargo, 2015.*

Como resultado de la investigación, se obtuvo un alto nivel de microsismicidad en la región y que la mayoría de los epicentros están localizados en la corteza continental, a no más de 100 km de la Trinchera 41 Mesoamericana, con bajas magnitudes locales, por lo que nos sugiere que esta actúa liberando energía de deformación en pequeñas cantidades. (Camargo, 2015)

### II.2.2 Riesgo sísmico

Para la obtención de los niveles de peligro en las localidades y zonas urbanas del municipio de Bahía de Banderas, en primera instancia, el grado de Peligro (P) fue reclasificado de las estimaciones de aceleración máxima del terreno, correspondientes a periodos de retorno de 10, 100 y 500 años a nivel municipal, obtenidas por CENAPRED con el objetivo de estandarizar el cálculo del Riesgo (Cuadro 5).

Cuadro 5. Ponderación de peligro sísmico

Aceleración (cm/s <sup>2</sup> )	Peligro	Ponderación de Riesgo
0 - 50	Muy bajo	0.066
51 - 250	Bajo	0.132
251 - 350	Moderado	0.198
351 - 450	Alto	0.264
>450	Muy alto	0.33

*Fuente: Elaboración propia con base en CENAPRED (2014).*

Con la obtención de los valores de las variables involucradas y los fenómenos perturbadores, la ponderación del riesgo se realizó a nivel localidad para establecer el grado de riesgo conforme a la unidad, que, posteriormente fue clasificado para obtener el grado de riesgo de forma cualitativa (Cuadro 6).

Cuadro 6. Clasificación del riesgo sísmológico

Valor de riesgo	Grado de Riesgo
0 – 0.2	Muy bajo
0.21 – 4	Bajo
0.41 – 0.6	Moderado
0.61 – 0.8	Alto
0.81 - 1	Muy alto

*Fuente: Elaboración propia*

Cuadro 7. Cálculo del riesgo sísmico en el municipio de Bahía de Banderas por localidad

Núm. Localidad	Localidad	Tamaño de localidad	Grado de marginación	T 10	T 100	T 500	R 10	R 100/500
1	Valle de Banderas	6	2	1	2	2	0.45	0.51
4	Aguamilpa	3	4	1	2	2	0.49	0.55
5	El Ahuejote	1	4	1	2	2	0.42	0.48
13	Bucerías	7	2	1	2	2	0.48	0.54
18	Carricito	1	2	1	2	2	0.26	0.32
19	El Carrizo	1	4	1	2	2	0.42	0.48
20	Casa Blanca	1	4	1	2	2	0.42	0.48
22	La Ceiba	1	4	1	2	2	0.42	0.48
24	Flamingos	2	1	1	2	2	0.22	0.28
25	El Coatante	2	3	1	2	2	0.38	0.44
26	El Colomo	4	2	1	2	2	0.37	0.43
27	Cruz de Huanacastle	5	2	1	2	2	0.41	0.47
35	Fortuna de Vallejo (La Gloria)	1	4	1	2	2	0.42	0.48
37	El Guamúchil	2	4	1	2	2	0.46	0.52
40	La Compuerta	1	4	1	2	2	0.42	0.48
41	Higuera Blanca	4	3	1	2	2	0.45	0.51
43	Las Jarretaderas	6	2	1	2	2	0.45	0.51
46	Lo de Marcos	4	2	1	2	2	0.37	0.43
47	Las Lomas	1	4	1	2	2	0.42	0.48
49	San Clemente de Lima	4	2	1	2	2	0.37	0.43
53	Mezcales	8	1	1	2	2	0.44	0.50
54	Mezcalitos	3	3	1	2	2	0.41	0.47
55	La Mojonera	1	4	1	2	2	0.42	0.48
59	Nuevo Vallarta	4	1	1	2	2	0.29	0.35

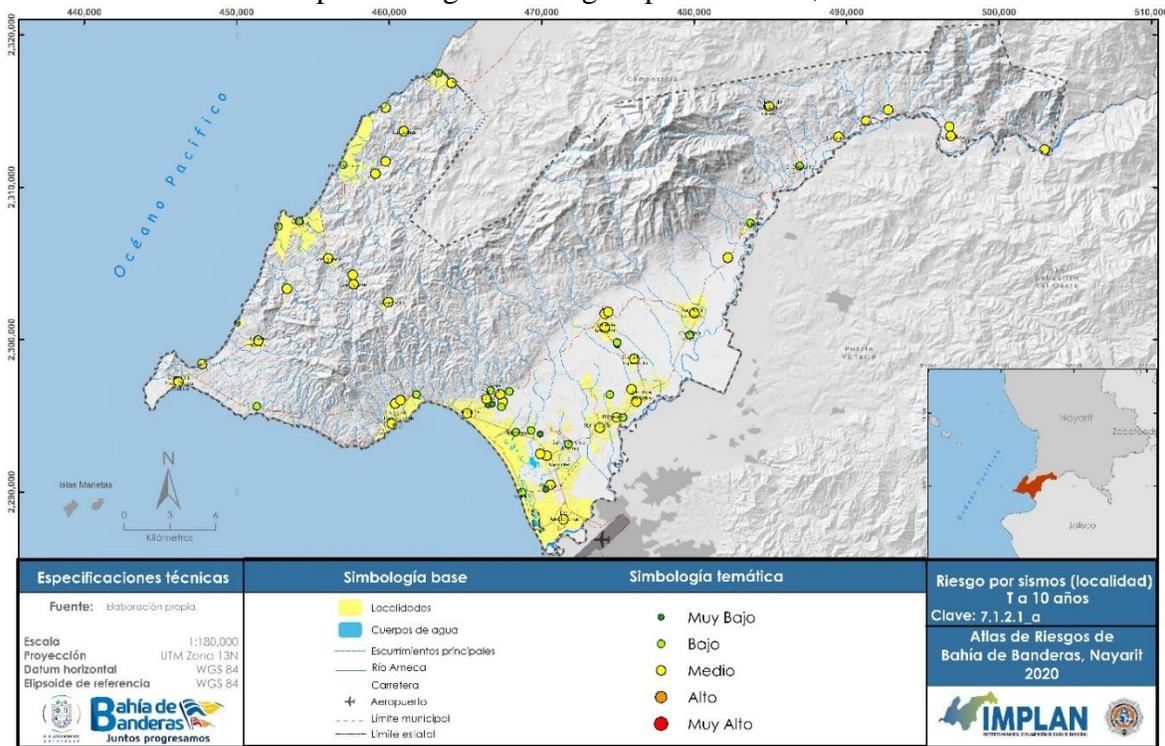
68	Punta Monterrey	1	4	1	2	2	0.42	0.48
69	El Porvenir	6	2	1	2	2	0.45	0.51
77	Rancho de Rejo	1	4	1	2	2	0.42	0.48
81	San Francisco	4	2	1	2	2	0.37	0.43
82	San Ignacio	3	4	1	2	2	0.49	0.55
83	San José del Valle	8	1	1	2	2	0.44	0.50
84	San Juan de Abajo	7	2	1	2	2	0.48	0.54
87	San Quintín	1	4	1	2	2	0.42	0.48
88	San Vicente	7	2	1	2	2	0.48	0.54
89	Santa Rita	1	4	1	2	2	0.42	0.48
90	Santa Rosa Tapachula	3	3	1	2	2	0.41	0.47
91	Los Sauces	2	4	1	2	2	0.46	0.52
92	Sayulita	4	2	1	2	2	0.37	0.43
98	Tondoroque	3	2	1	2	2	0.33	0.39
103	Punta Negra (Carrilleros)	1	4	1	2	2	0.42	0.48
106	Corral del Risco (Punta de Mita)	4	3	1	2	2	0.45	0.51
115	Las Amapas (Pontoque)	1	2	1	2	2	0.26	0.32
118	Litibú	1	1	1	2	2	0.18	0.24
123	Los Algodones	1	3	1	2	2	0.34	0.40
170	La Parota	1	1	1	2	2	0.18	0.24
192	Villa las Parotas	1	1	1	2	2	0.18	0.24
212	Colonia Flores Magón	1	4	1	2	2	0.42	0.48
213	Bandera de Reyes	1	4	1	2	2	0.42	0.48
217	Colonia Emilio M. González	1	2	1	2	2	0.26	0.32
232	Colonia el Mirador	2	2	1	2	2	0.30	0.36
246	Colonia Deportiva	1	4	1	2	2	0.42	0.48
253	El Pitayo	1	2	1	2	2	0.26	0.32
254	Fraccionamiento Colibrí	1	1	1	2	2	0.18	0.24
270	Palmarito	1	4	1	2	2	0.42	0.48
289	Los Arcos	1	1	1	2	2	0.18	0.24
337	Los Moreno	1	5	1	2	2	0.50	0.56
351	Colonia las Iguanas	1	3	1	2	2	0.34	0.40
354	Colonia el Mangal	1	4	1	2	2	0.42	0.48
396	Los Izotes	1	4	1	2	2	0.42	0.48
412	Las Ladrilleras (La Papaya Roja)	1	1	1	2	2	0.18	0.24
429	Las Parotas	1	2	1	2	2	0.26	0.32
459	Colonia las Parotas	1	4	1	2	2	0.42	0.48
460	Colonia Magisterio	1	3	1	2	2	0.34	0.40
463	Colonia Toscano	1	2	1	2	2	0.26	0.32

467	Entrada a la Laguna el Quelele	1	4	1	2	2	0.42	0.48
475	Los Galleros	1	4	1	2	2	0.42	0.48
509	La Providencia	1	4	1	2	2	0.42	0.48

Fuente: Elaboración propia del Instituto Municipal de Planeación.

En el escenario a una aceleración máxima de 34 cm/s<sup>2</sup> (T10), el 62% de las localidades analizadas se encuentran en un riesgo moderado, el 29% en riesgo bajo, mientras el 9% se encuentra en un riesgo muy bajo. Estos niveles de riesgo son la conjugación del peligro sísmico, el cual presenta índice bajo a nivel municipio, mientras que a nivel localidad este índice aumenta un poco debido al grado de marginación que presenta cada localidad (Mapa 8).

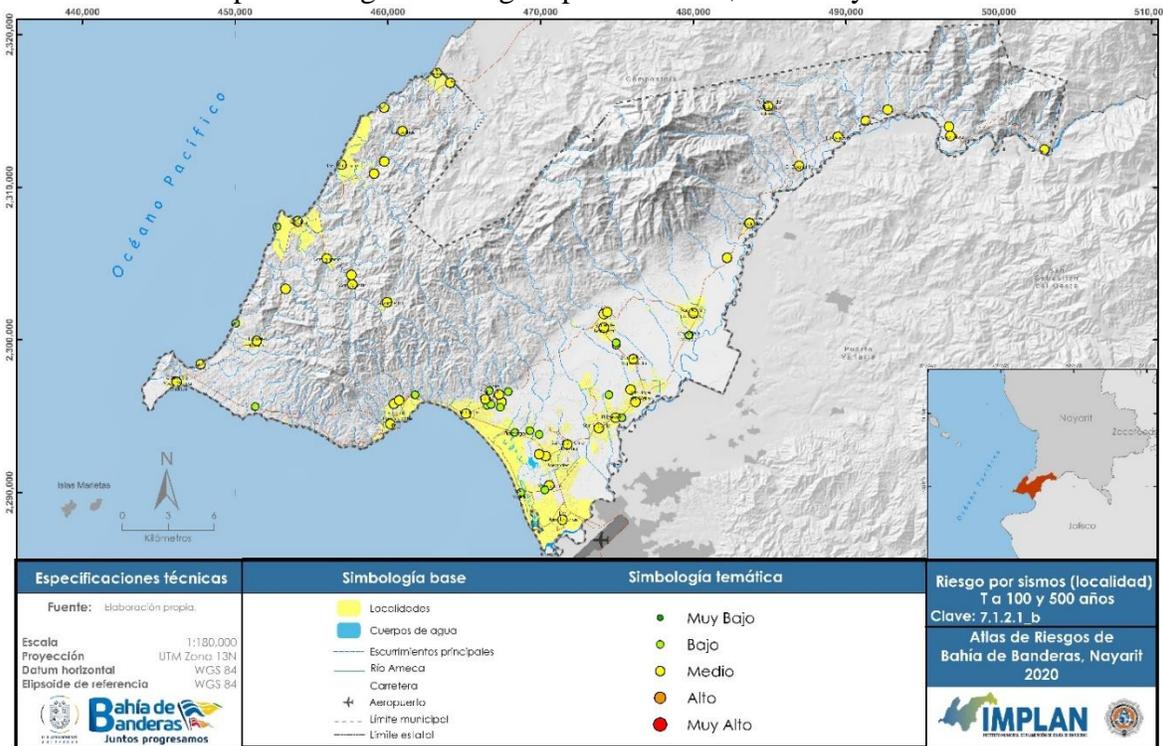
Mapa 8. Riesgo sísmológico por localidad, T a 10



Fuente: Elaboración propia del Instituto Municipal de Planeación.

Para el escenario de riesgo a una aceleración máxima de 135 cm/s<sup>2</sup> (T 100), el municipio aumentó su grado de peligro de muy bajo a bajo, lo que ocasionó que las localidades que se encontraban en la parte superior del intervalo en el cálculo de cada grado de riesgo aumentaran su grado. De esta manera, el porcentaje de localidades en riesgo moderado paso del 62 al 71%, mientras que las de riesgo moderado se quedó en el 29% (Mapa 9).

Mapa 9. Riesgo sísmológico por localidad, T a 100 y 500 años



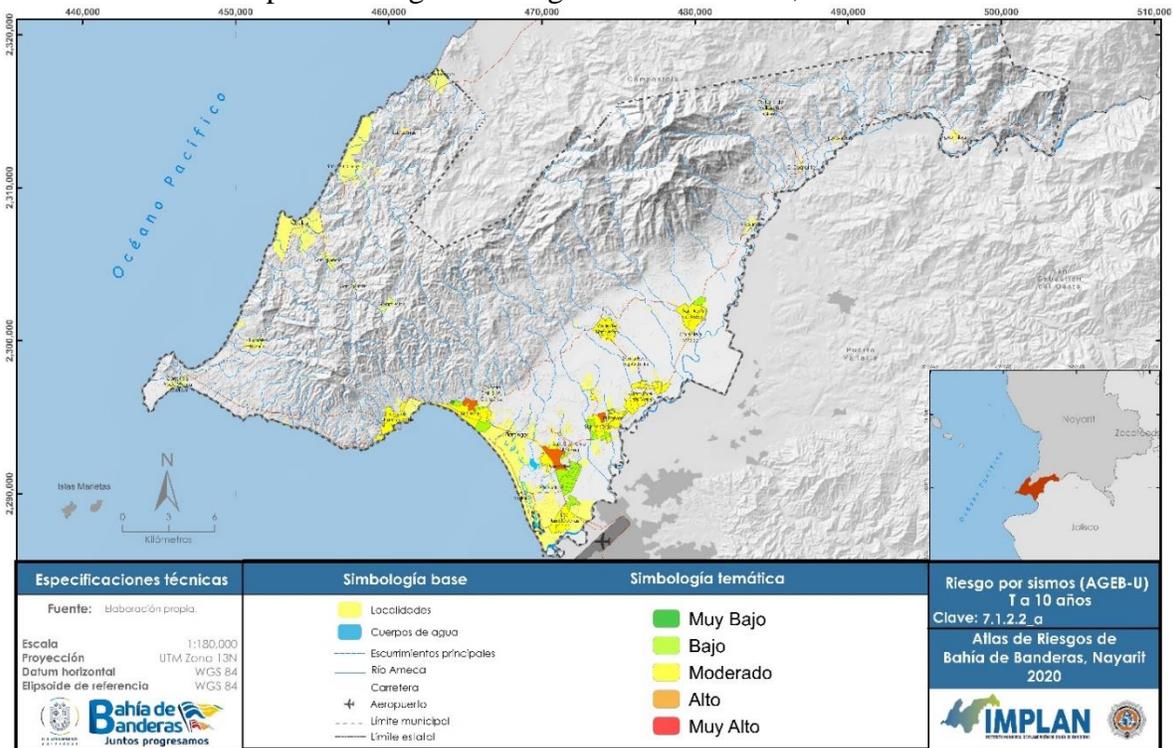
Fuente: Elaboración propia del Instituto Municipal de Planeación.

Para el caso del escenario de aceleración máxima de  $225 \text{ cm/s}^2$  (T 500), el nivel de peligro se mantiene en un grado bajo, similar que, en el periodo de retorno a 100 años, por lo que el nivel de riesgo es igual en ambos escenarios.

Por otro lado, con el objetivo de estimar el grado de riesgo en las principales zonas urbanas, se ponderó igual que en el caso anterior. Se aplicó el nivel de peligro en los periodos de retorno a 10, 100 y 500 años de la aceleración máxima, pero para este caso se utilizó la información por AGEB de la cantidad de población y viviendas, para el factor de los Bienes Expuestos, y el grado de marginación por cada unidad, para el factor de Vulnerabilidad.

En el escenario de periodo de retorno a 10 años, los centros de población de La Cruz de Huanacastle, Valle de Banderas, San José del Valle, La Jarretadera y la mayor parte del Porvenir y San Juan de Abajo, se mantienen con el nivel de riesgo moderado, similar a lo observado en el análisis del nivel de localidad, incluso en estas últimas, hay áreas dentro del centro de población donde se reducen el nivel de riesgo a Bajo (Mapa 10).

Mapa 10. Riesgo sísmológico AGEB urbana, T a 10 años



Fuente: Elaboración propia del Instituto Municipal de Planeación

Por el contrario, en el caso de San Vicente, Bucerías y Mezcales, hay un gradiente más amplio de nivel de riesgo. En San Vicente, la colonia Villas Miramar presenta un grado de riesgo muy alto, debido a la densidad de población y el grado alto de vulnerabilidad social en el que se encuentran. Por otro lado, la zona de los fraccionamientos Palma Real, Hacienda San Vicente y los Palmares, registra una reducción de su riesgo, debido a los bajos escenarios de marginación de la población.

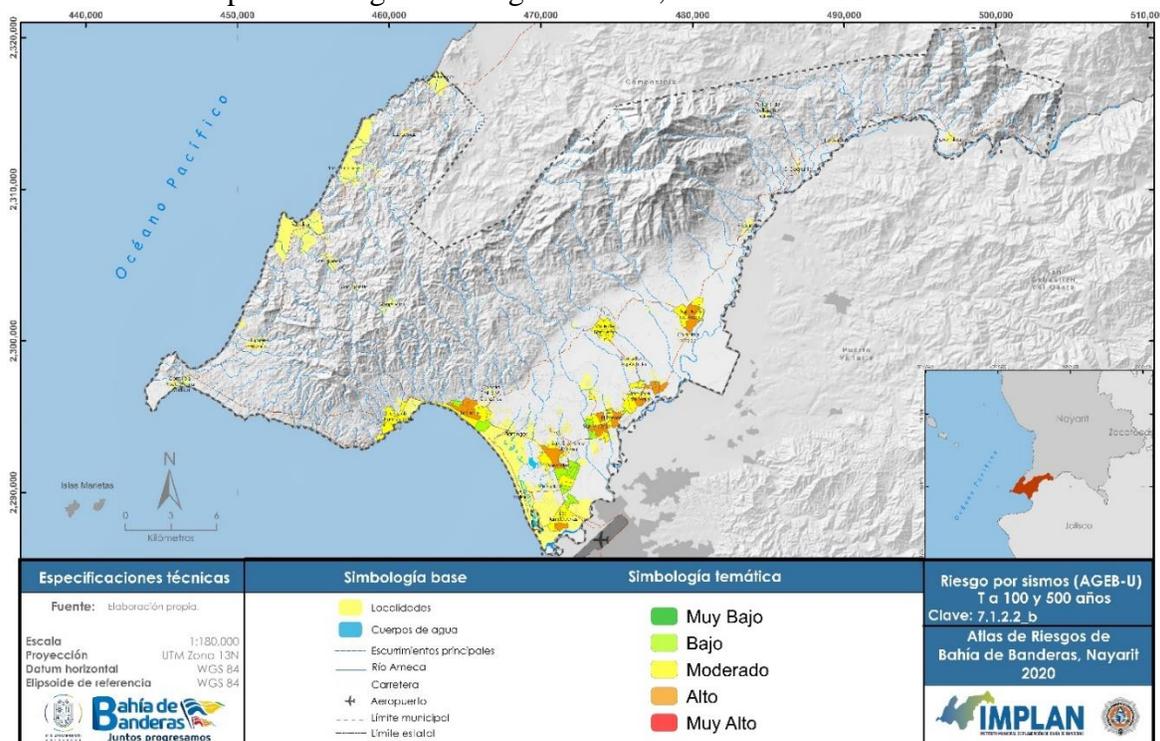
En Mezcales, a nivel de localidad presenta un grado de marginación bajo, pero en el análisis detallado del centro de población, presenta una variación importante, ya que, la CONAPO contempló las condiciones sociales de los habitantes del fraccionamiento Valle Dorado, por lo que a nivel de localidad generó que el índice bajara. Esto se vio reflejado en el análisis por AGEB, ya que los fraccionamientos Valle Dorado y Las Ceibas, presentan índices bajos de marginación, generando que su riesgo sísmológico sea bajo, a pesar de tener bienes expuestos. Por el contrario, Mezcales viejo, sigue registrando nivel de riesgo moderado, pero la porción de Mezcales en el corredor Mezcales-San Vicente, presenta un riesgo Alto principalmente por la cantidad de población y su grado de marginación.

En Bucerías, en los asentamientos cercanos a la colonia Francisco Javier Ovando, el riesgo sísmológico es alto, especialmente ocasionado por el grado marginación y la localización de viviendas en pendientes pronunciadas. En Bucerías, los principales fraccionamientos poseen

un riesgo bajo y muy bajo. Sin embargo, la mayoría del asentamiento sigue conservando su riesgo moderado, como en el caso del análisis a nivel de localidad.

En el escenario de periodo de retorno a 100 y 500 años, solo Valle de Banderas y la Cruz de Huanacastle, sigue conservando su grado de riesgo moderado. Muchas áreas urbanas aumentan sus grados de riesgo, esto se debe a las cantidades de población y bienes expuestos (Mapa 11).

Mapa 11. Riesgo sísmológico AGEB, urbana T a 100/500 años



Fuente: Elaboración propia del Instituto Municipal de Planeación

En la zona más poblada de San Juan de Abajo, el riesgo aumenta a Alto; en San José la zona de los fraccionamientos Santa Fe y Jardines del Sol, la zona centro de este asentamiento, así como en los límites con la localidad del Porvenir, pasan de tener un riesgo moderado a alto. En el mismo Porvenir más de la mitad del asentamiento cambia de riesgo moderado a alto, sobre todo en la zona centro. Lo mismo pasa con San Vicente, toda la zona centro aumenta a grado de riesgo alto.

El mismo caso que en los anteriores señalados, se presenta en La Jarretaderas, la zona centro a un periodo de retorno a 100 y 500 años con un riesgo alto. En el caso de Mezcales, el fraccionamiento de Valle Dorado, donde anteriormente se presentaban riesgos bajos, cambian a moderados, principalmente en la zona con mayor densidad de población. Para este escenario, en Bucerías hay un aumento importante de riesgos sobre todo en los asentamientos adyacentes al arroyo del Indio, este aumento es debido a los índices de marginación y bienes expuestos detectados en estas zonas.

### *Riesgos estructurales en vivienda.*

Uno de los sectores que resultan con mayor afectación ante la presencia de un fenómeno perturbador, es la vivienda, principalmente por la acción de los sismos y vientos fuertes generados por huracanes.

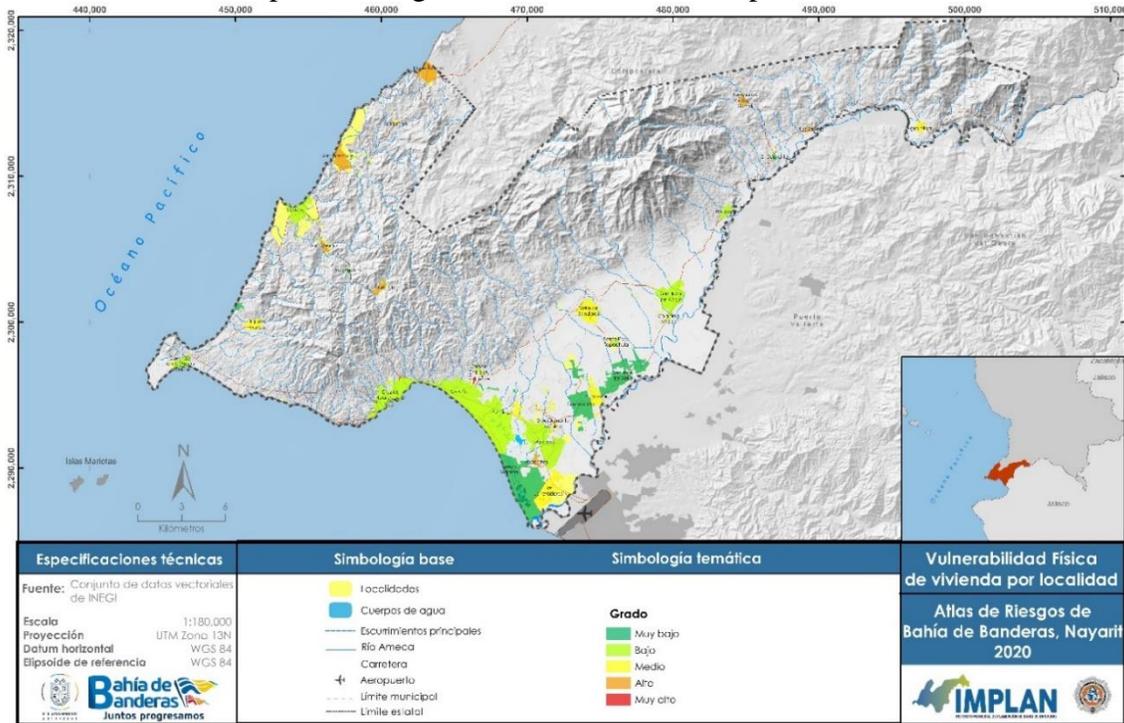
En los riesgos estructurales en edificaciones, los principales generadores de daño son los sismos, viento y hundimiento.

De acuerdo con su tipo, la estructura con la que está diseñada la vivienda, puede presentar distintas formas, fallas o daños físicos, sin embargo, debido a que son puntos de mayor concentración de seres humanos, son objeto importante de estudio.

En el informe final municipal del 2016 de Bahía de Banderas para el Índice básico de ciudades prosperas, hace mención en la Dimensión infraestructura de desarrollo, en el tema de vivienda durable, establece la proporción de vivienda considerada durable por la calidad de su construcción (pisos, paredes y techos con material durable), con relación al total de viviendas particulares habitadas en las localidades urbanas del municipio. Su objetivo es determinar las condiciones de seguridad de la población con relación a la calidad de la vivienda.

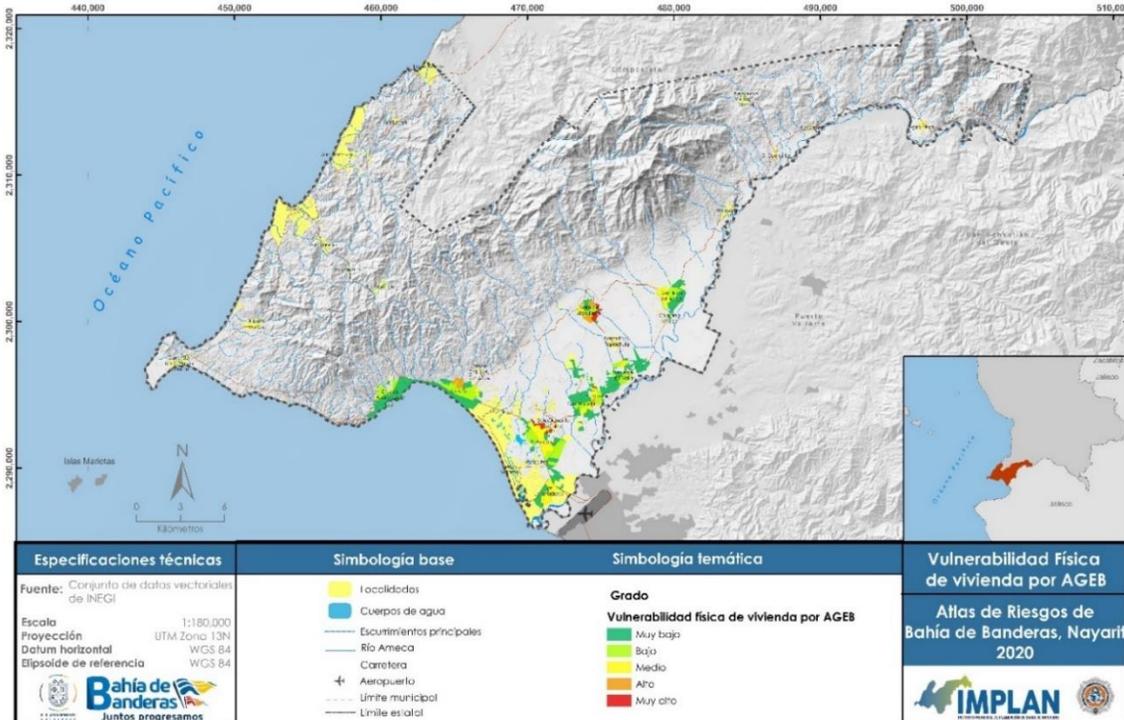
El estudio nos arroja como resultado a nivel de AGEB (), que en Mezcales hasta el 37% de las viviendas cuentan con piso de tierra. En Valle de Banderas, estas deficiencias llegan a casi al 20% en algunos AGEB, mientras que, en algunas zonas de El Porvenir, llega a ser de casi el 15%. A nivel de localidad, los porcentajes más altos se presentan en Las Lomas, Fortuna de Vallejo, Mezcalitos, San Ignacio, El Guamúchil y Los Sauces como se muestra en el siguiente mapa.

Mapa 12. Riesgo estructural de vivienda por localidad



Fuente: Elaboración propia con información de INEGI 2010, vuelo fotogramétrico de Bahía de Banderas 2019 y Guía básica para la elaboración de Atlas de riesgo Estatales y Municipales CENAPRED.

Mapa 13. Riesgo estructural de vivienda por AGEB



Fuente: Elaboración propia con base en INEGI 2010, vuelo fotogramétrico de Bahía de Banderas 2019 y Guía básica para la elaboración de Atlas de riesgo Estatales y Municipales CENAPRED.

### II.3 Deslizamiento de laderas

Los eventos naturales son inevitables, pero lo que sí se puede evitar o al menos reducir, son los desastres que en ocasiones resultan de esos eventos. El problema de los deslizamientos de laderas en México es un fenómeno que ha cobrado un número considerable de vidas humanas y daños materiales cuantiosos, por lo que resulta necesario establecer los criterios que permitan a los ciudadanos y a las autoridades identificar y evaluar el riesgo asociado al deslizamiento de laderas.

El término genérico deslizamiento, dentro del contexto de laderas, se refiere (Cruden, 1991) “...al movimiento de una masa de roca, tierra o detritos pendiente abajo” (CENAPRED, 2014).

Los Deslizamientos se dividen en tres tipos:

- Deslizamiento rotacional: Se caracterizan porque la caída del material se da en una ladera o una superficie cóncava, es decir, hacia arriba en forma de cuchara o concha, estos deslizamientos ocurren generalmente en los suelos blandos con demasiadas cantidades de partículas de arcilla, aunque puede también presentarse en formaciones de rocas blandas.
- Deslizamiento Translacional: Ocurren cuando el material se desplaza hacia afuera y hacia abajo a lo largo de la superficie principal generalmente plana, con un movimiento de rotación mínimo, normalmente se determinan deslizamientos superficiales débiles en sus formaciones rocosas, tales como planos de estratificación, juntas y zonas de cambio por el estado meteorización de las rocas.
- Movimientos complejos: Los movimientos complejos son resultado de la transformación del movimiento inicial en otro tipo de movimiento al ir deslizándose ladera abajo. Las avalanchas de rocas y los flujos deslizantes son de los más comunes y pueden ocasionar cuantiosas pérdidas.

Los procesos que ocasionan la inestabilidad de las laderas están determinados por dos tipos de factores; externos e internos. Los factores externos ocasionan un incremento en los esfuerzos que se dan en una ladera, es decir, producen una mayor concentración de las fuerzas motoras o actuantes, mientras que los factores internos reducen la resistencia de los materiales, en otras palabras, disminuyen la concentración de fuerzas resistentes.

Entre los factores externos destacan los procesos que se relacionan con las modificaciones de la geometría de una ladera (por erosión, socavación, incisión de un río, excavaciones artificiales, entre otros), las cargas y descargas, el efecto de los sismos o vibraciones por explosiones y maquinaria pesada, así como los cambios en el régimen hidrológico como consecuencia de la variabilidad de la intensidad y duración de las precipitaciones. Por otro lado, los factores internos están relacionados con las características de los materiales térreos en cuanto a composición, textura, grado de intemperismo, características fisicoquímicas, etcétera, y las modificaciones que éstos van sufriendo.

Por lo tanto, las áreas susceptibles a deslizamientos se pueden proyectar con base en los factores físicos condicionantes, como: los deslizamientos que hayan ocurrido en la zona, las características topográficas y geomorfológicas, las tipologías geotécnicas de los materiales, y las condiciones ambientales. No es posible la predicción de dónde y cuándo han de ocurrir los deslizamientos, aún con la mejor información disponible. Sin embargo, es posible identificar áreas susceptibles a deslizamiento.

### II.3.1 Peligro

A fin de estimar el peligro que puede representar el deslizamiento de una ladera, es necesario conocer la susceptibilidad de los suelos o rocas a deslizarse y su interacción con los factores que detonan los movimientos, como las lluvias y sismos.

#### *Metodología*

Para estimar la susceptibilidad del terreno a presentar deslizamientos de laderas, en este trabajo se ha empleado la propuesta de CENAPRED (2014). Es una metodología de naturaleza cualitativa y empírica para juzgar la susceptibilidad al deslizamiento, y con ello el peligro en una ladera; es una versión modificada y ampliada de los criterios y calificaciones planteados por Suárez (1998).

Esta metodología de estimación de la susceptibilidad del terreno a deslizamiento está basada en la asignación de valores numéricos a cada uno de los factores condicionantes según sus atributos. Tales factores reúnen aspectos topográficos, geotécnicos, históricos, geomorfológicos y ambientales. En función de la suma total de las calificaciones asignadas, se establecieron cinco grados de la susceptibilidad del unidiiiento (Muy Bajo a Muy Alto).

En el Cuadro 8 se muestran los factores que se proponen para estimar la susceptibilidad y el peligro de deslizamiento de laderas, así como la clasificación de estos y el peso relativo. Cabe resaltar que, la precipitación total anual sólo se utilizó para estimar el peligro.

Cuadro 8. Ponderación de factores para estimar la susceptibilidad y el peligro de deslizamiento de laderas

FACTORES TOPOGRÁFICOS		
Factor	Intervalos o categorías	Valor
Inclinación de pendientes	> de 45°	2
	35° a 45°	1.8
	25° a 35°	1.4
	15° a 25°	1
	< 15°	0.5
Altura (Diseccción vertical)	> 200 m	2
	100 a 200 m	1.6
	50 a 100 m	1.2
	< 50 m	0.6
FACTORES GEOTÉCNICOS		
Factor	Intervalos o categorías	Valor

Tipo de suelos o rocas	Suelos granulares medianamente compactos a sueltos. Suelos que se reblandecen con la absorción de agua. Formaciones poco consolidadas	1.5 - sismos
	Rocas metamórficas de poco a muy intemperizadas	1.2 - 2
	Suelos arcillosos consistentes o areno limosos compactos	0.5 - 1
	Rocas sedimentarias y tobos competentes	0.3 - 0.6
	Rocas ígneas sanas	0.2 - 0.4
<b>FACTORES GEOMORFOLÓGICOS Y AMBIENTALES</b>		
<b>Factor</b>	<b>Intervalos o categorías</b>	<b>Valor</b>
Evidencias geomorfológicas	Grandes volúmenes faltantes	1
	Volúmenes moderados	0.5
	Inexistentes	0
Vegetación y Uso del Suelo	Zona Urbana	2
	Área deforestada	2
	Cultivos anuales	1.5
	Vegetación moderada	0.8
	Vegetación intensa	0
Régimen de precipitación	Precipitación < 500 mm anuales	0.5
	Precipitación 500 – 1,000 mm anuales	1
	Precipitación 1,000 – 1,500 mm anuales	1.5
	Precipitación > 1,500 mm anuales	2

*Fuente: Elaboración propia con base en la Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos. Fenómenos Geológicos (CENAPRED, 2014).*

Algunos de los insumos de información ya fueron descritos en el presente documento, sin embargo, se describen de manera breve a continuación:

*Pendientes.* Se obtuvieron a partir del continuo de Elevaciones Mexicano de INEGI, a una resolución espacial de 15 x 15 m por píxel.

*Tipo de suelos o rocas.* La información de estructuras litológicas y de suelo, se obtuvo del Conjunto de datos vectoriales de Geología, mientras que las texturas de suelo, se obtuvo con base al Conjunto de datos Edafológicos de INEGI. Ambas capas fueron cruzadas para obtener la estructura litológica y la capacidad de absorción del suelo.

*Vegetación y Uso de Suelo.* Esta información se obtuvo del Conjunto de datos Vectoriales de Uso de Suelo y Vegetación, serie IV de INEGI.

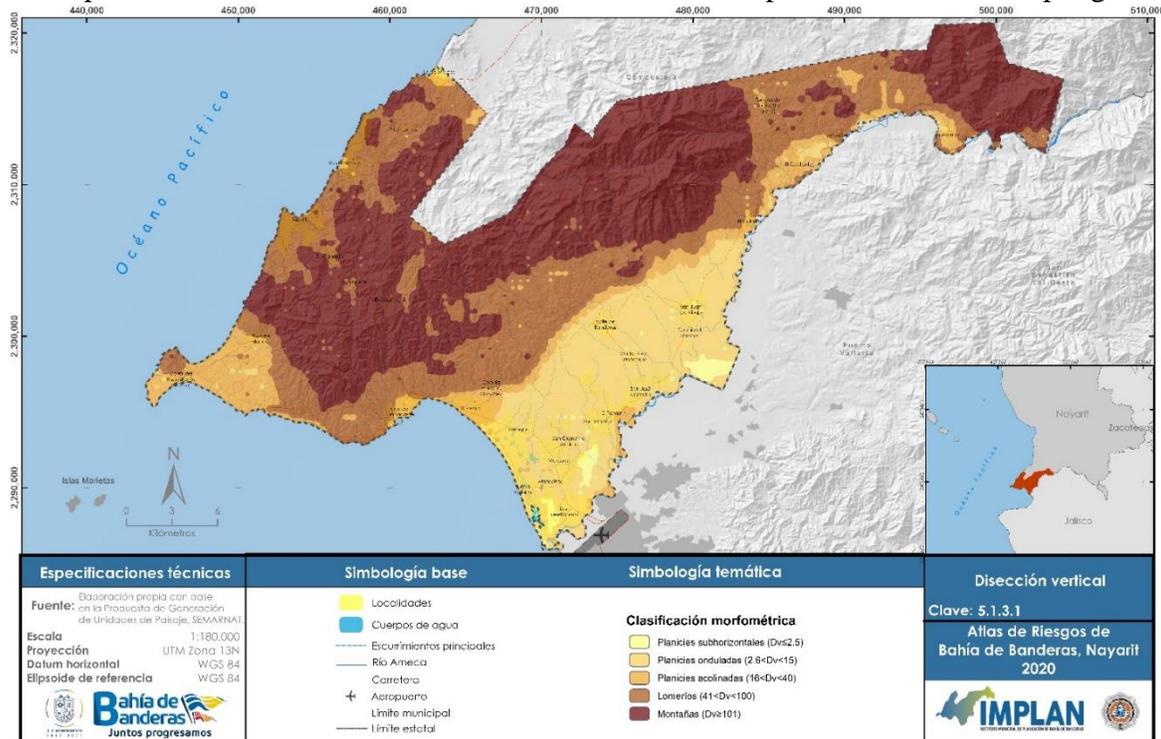
*Régimen de Precipitación.* Se obtuvo a partir de métodos determinísticos de interpolación (Kriging) de los valores medios anuales de las estaciones meteorológicas que se encuentran en el municipio, así como en sus confluencias.

*Altura.* Para determinar el desnivel de relieve, se calculó el grado de disección vertical. Este es un parámetro morfométrico que representa la amplitud del relieve (altura relativa) por unidad de área, ofrece información sobre la energía del relieve. Este parámetro se obtuvo mediante la confección de una malla de unidades de 1 km<sup>2</sup>, y se estimó la diferencia de altura para cada cuadrícula, esto para obtener la altura absoluta por unidad de área. Estos valores

fueron interpolados con el método Distancia Inversa Ponderada (IDW), este método presupone que la variable que se representa cartográficamente disminuye su influencia a mayor distancia desde su ubicación de muestra (Priego, Bocco, Mendoza, & Garrido, 2008).

El modelo de Disección Vertical del municipio de Bahía de Banderas se puede observar a continuación (Mapa 14).

Mapa 14. Disección vertical del relieve. Factor de altura para la estimación de peligro



Fuente: Elaboración propia con base en la propuesta de Generación de Unidades de Paisaje de SEMARNAT.

En cuanto a las evidencias geomorfológicas, no se obtuvo información de ello, por la tanto en la sumatoria se omite esta variable.

Calificados los diferentes factores (condicionantes y detonantes) que influyen en la estabilidad de una ladera, podrá hacerse la sumatoria, a fin de estimar el peligro de deslizamiento que pudiera adjudicarse a una ladera, esto se realizó con álgebra de mapas, que se define como el conjunto de análisis o geoprocursos que se desarrollan sobre varias capas para obtener información derivada de las mismas a partir de la combinación de las capas iniciales, gracias a la explotación de las capas iniciales se puede generar nueva cartografía. Se utilizó la siguiente ecuación:

$$P_{dl} = S + GE + C + Rpp + Dv$$

Donde  $P_{dl}$  es el Peligro de Deslizamiento, S es Pendientes, GE son las estructuras litológicas y la textura de suelo,  $Rpp$  es el régimen de Precipitación y  $Dv$  es Disección Vertical. Valor máximo probable, 10.

A partir de la sumatoria anterior con álgebra de mapas, se pudo estimar la susceptibilidad y el peligro al que se encuentra expuesto el municipio de Bahía de Banderas ante el deslizamiento de laderas.

### *Resultados*

En el municipio de Bahía de Banderas se cuenta el registro de deslizamientos de terreno en el Atlas de Riesgos Naturales del municipio de Bahía de Banderas (2012), plasmados a continuación (Mapa 15).

- En la localidad de Sayulita se registró un deslizamiento en la parte norte del poblado durante el evento de la lluvia atípica del 10 de septiembre del 2010, no hubo registro de pérdidas humanas.
- Cerca de la Comunidad de Higuera Blanca, existe una zona donde ya han ocurrido deslizamientos (acontecidos es 10 de septiembre del 2010).
- Por último, en la localidad el Guamúchil han existido pequeños deslizamientos primordialmente en el margen sur del arroyo el Guamúchil.

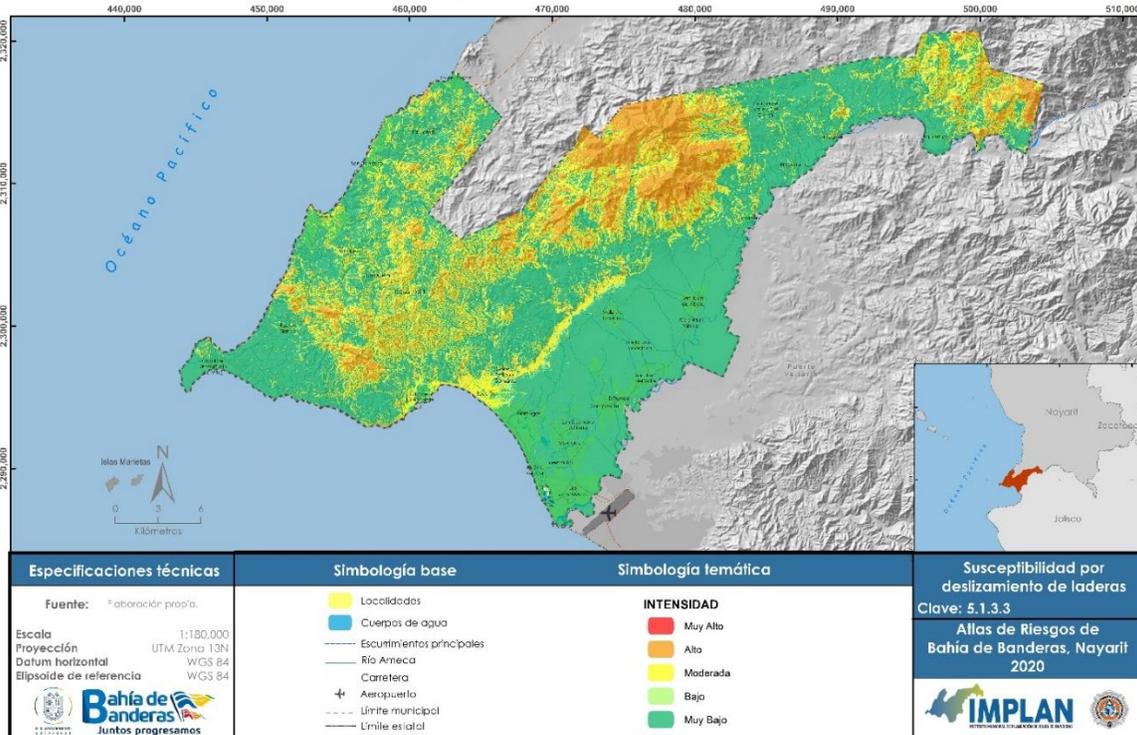
Un registro más reciente es el realizado por la Unidad Municipal de Protección Civil, con el que se cuenta con los procesos de deslizamientos de ladera, ocurridos sobre la carretera federal 200 y la carretera Higuera Blanca - Sayulita desde el año 2019:

ID	Localidad	Fecha	Coordenadas UTM	
			x	Y
1	Lo de Marcos	15/07/2019	463001.75	2315105.21
2	La Cruz de Huanacastle	06/08/2019	453886.45	2295150.72
3	Sayulita	29/09/2019	453562.62	2307065.23
4	La Cruz de Huanacastle	01/10/2019	456603.82	2293329.97
5	Sayulita	11/10/2019	455800.36	2306229.18
6	San Ignacio	17/10/2019	456458	2304672
6a	San Ignacio	06/09/2020	456458	2304672
7	San Quintín	19/10/2019	458307.78	2302720.52
8	El Guamúchil	20/10/2019	459546	2301726
9	Sayulita	21/10/2019	455851.04	2305768.31
10	San Quintín	24/10/2019	457393.79	2304320.91
11	Bucerías	21/03/2020	462297.93	2296053
12	El Guamúchil	07/07/2020	459904.48	2300805.37
13	San Quintín	28/08/2020	457918.04	2303269.66
14	El Guamúchil	15/09/2020	459346.33	2302082
15	El Guamúchil	16/09/2020	459925	2300748
16	La Cruz de Huanacastle	18/09/2020	453414.82	2295076.88

Por otro lado, de acuerdo a la interacción de los factores condicionantes, se obtuvo la susceptibilidad de deslizamiento de laderas. Como se muestra en la Figura X, la mayor parte del territorio municipal tiene un grado de susceptibilidad Muy Bajo, sin embargo,

en las zonas de la Serranas, la susceptibilidad es Moderada y Alta, lo que se debe, principalmente a las pendientes pronunciadas asociadas a suelos muy propensos a ser erosionados.

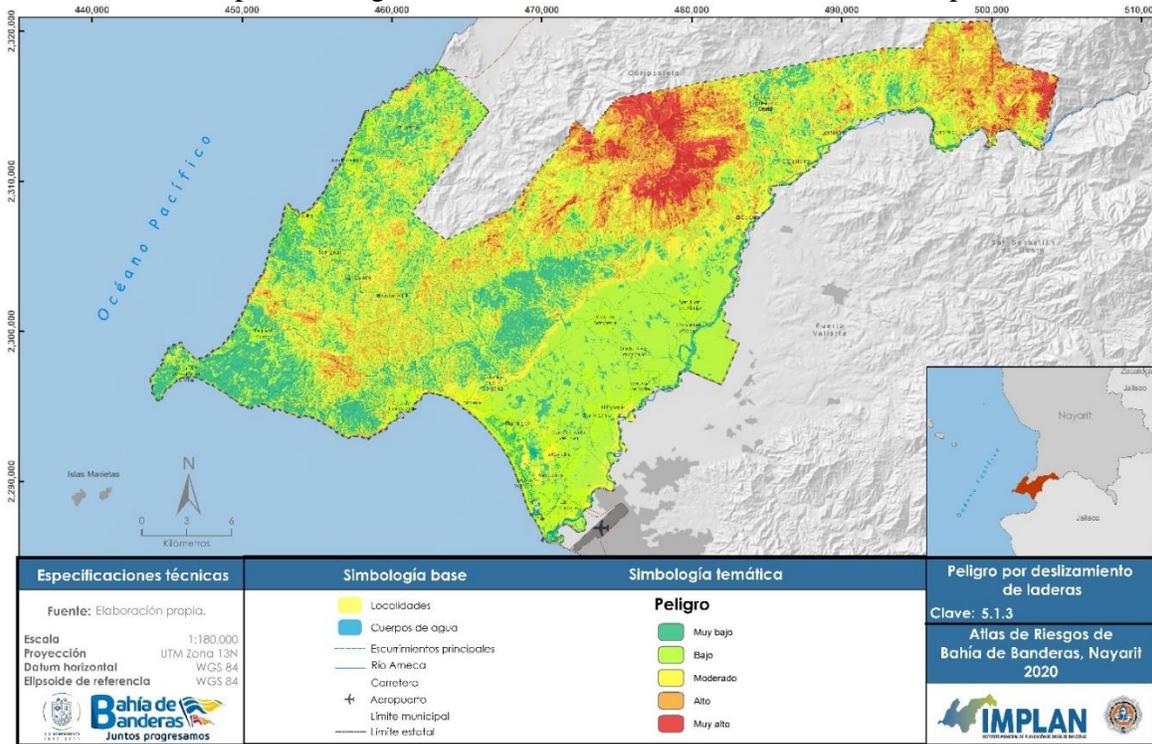
Mapa 15. Susceptibilidad por deslizamientos de laderas en el municipio



Fuente: Elaboración propia de Instituto Municipal de Planeación.

Con base en la interacción entre la susceptibilidad y la precipitación media anual, el 18% del territorio municipal, presenta un nivel de peligro Muy Alto y Alto de ocurrencia de deslizamientos de laderas, estos se ubican principalmente en tres zonas: 1) en el macizo montañoso de la Sierra de Vallejo, ubicado en la porción centro-norte del municipio de Bahía de Banderas; 2) el extremo NE del municipio, al norte de la localidad de El Ahuejote, conformado por la Sierra de Zapotán; y 3) en el eje compuesto del cerro El Caloso, ubicado al NW de La Cruz de Huanacastle, hasta El Cerro del Mono, al norte de la localidad de Higuera Blanca. El resto de las áreas con peligro bajo se encuentran dispersas en todo el municipio, pero sin dejar de ser importantes (Mapa 16).

Mapa 16. Peligro de deslizamientos de laderas en el municipio

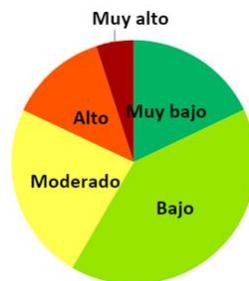


Fuente: Elaboración propia de Instituto Municipal de Planeación.

El resultado de este peligro se debe a la acción conjunta de factores determinantes, los cuales condicionan la estabilidad sin que ésta se inicie (equilibrio límite). La combinación de los factores determina la relación entre las fuerzas resistentes y activadoras de la inestabilidad. Los factores determinantes dependen bien de la naturaleza de los materiales (litología, textura, discontinuidades, etc.) o de la morfología del terreno (pendiente, orientación, altitud, curvatura, etc.) (Jiménez-Perálvarez, 2005).

En general, el resto del territorio municipal se encuentra en un peligro Muy Bajo (40%), Bajo (18%) y con un peligro Moderado, el 24% del territorio municipal (Gráfica 1). Esto debido a que no hay una interacción de las distintas variables utilizadas, y que las localidades se encuentran dispersas, en su mayoría, localizadas al sur y en toda la costa, donde la altitud es menor, por lo que son zonas planas.

Gráfica 1. Porcentaje del territorio municipal bajo peligro por deslizamientos de laderas



Fuente: Elaboración propia.

Aunado a lo anterior se realizaron mapas de riesgo de deslizamientos por influencia de la precipitación.

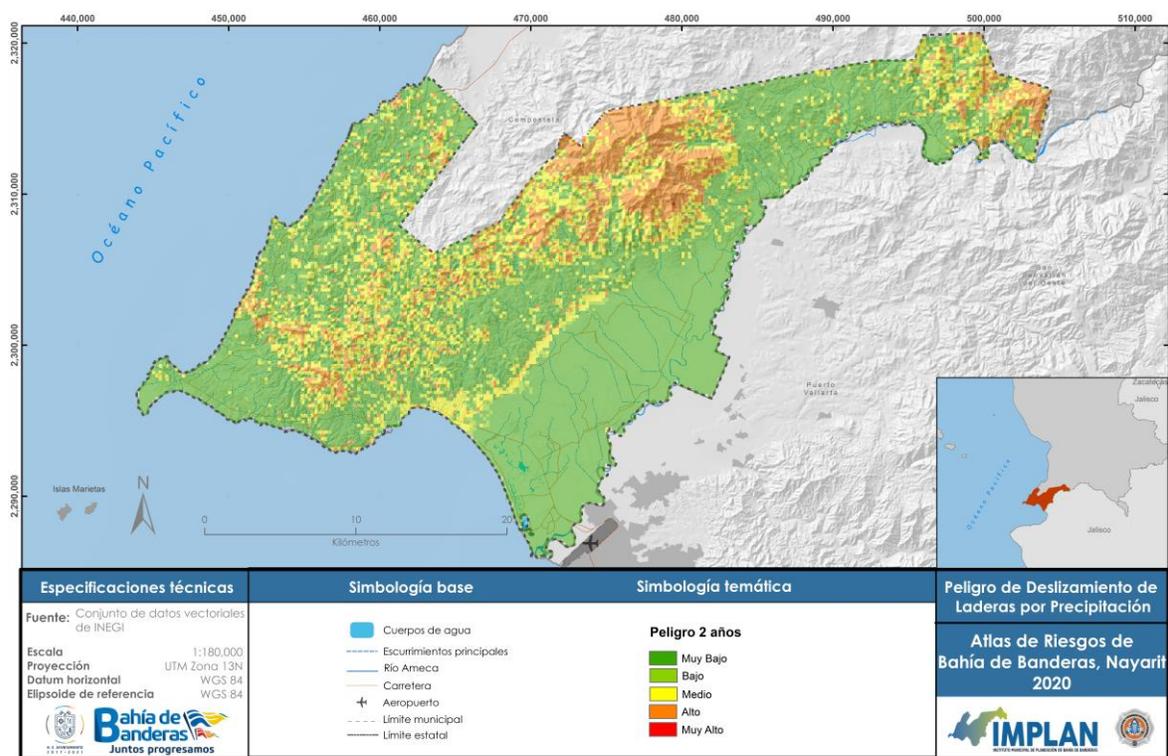
Mediante los indicadores de lluvia que detonan deslizamientos, también conocidos como umbrales críticos de precipitación a partir de los cuales la situación de estabilidad de una ladera o talud alcanza un proceso de estabilidad crítica, por lo que a partir de dicho valor la posibilidad de que se presente un deslizamiento es prácticamente inminente.

Las determinaciones de dichos umbrales proporcionan información que puede ser utilizada para la evacuación preventiva de zonas propensas a deslizamientos.

Se definen o establecen los valores mínimos o máximos mediante la cantidad de lluvia (intensidad, acumulada o la combinación de ellas) que detona o moviliza el deslizamiento de una masa de suelo o roca, con o sin lluvias precedentes. (SISTEMA NACIONAL DE PROTECCIÓN CIVIL, 2016)

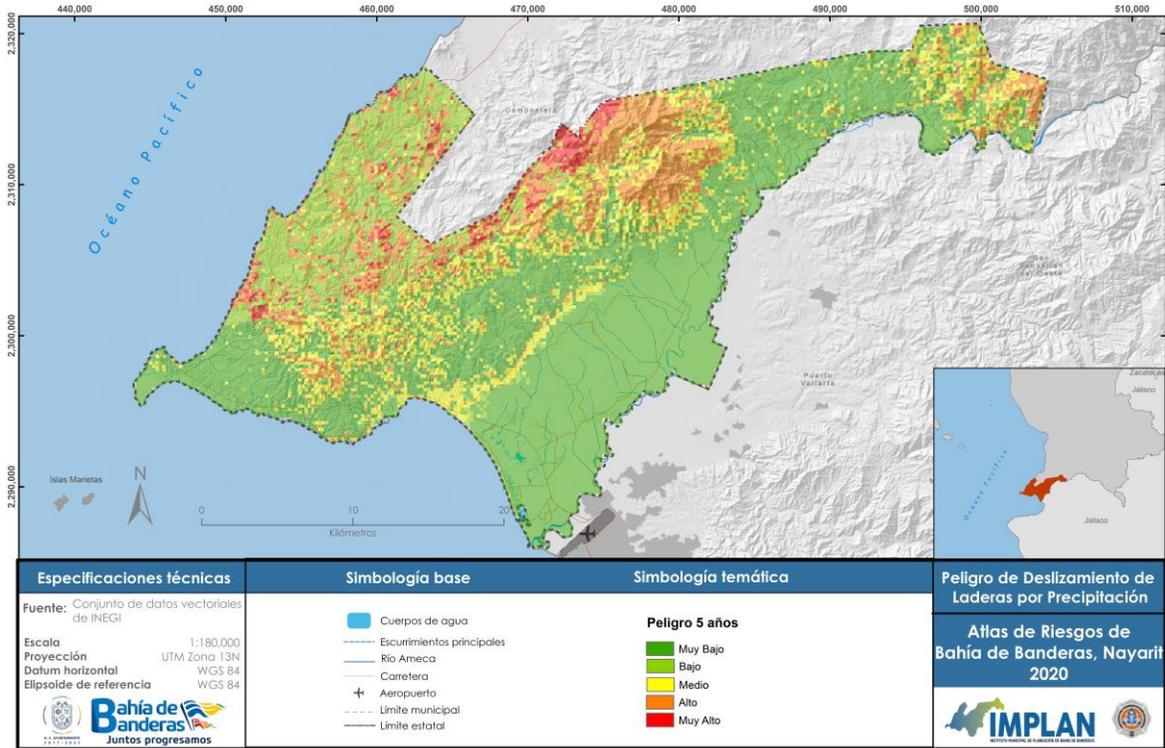
Se elaboraron 7 escenarios de peligro, con periodos de retorno de 2 años, 5 años, 10 años, 25 años, 50 años, 100 años y 500 años, los resultados se muestran a continuación:

Mapa 17 Peligro de Deslizamiento de ladera periodo de retorno de 2 años



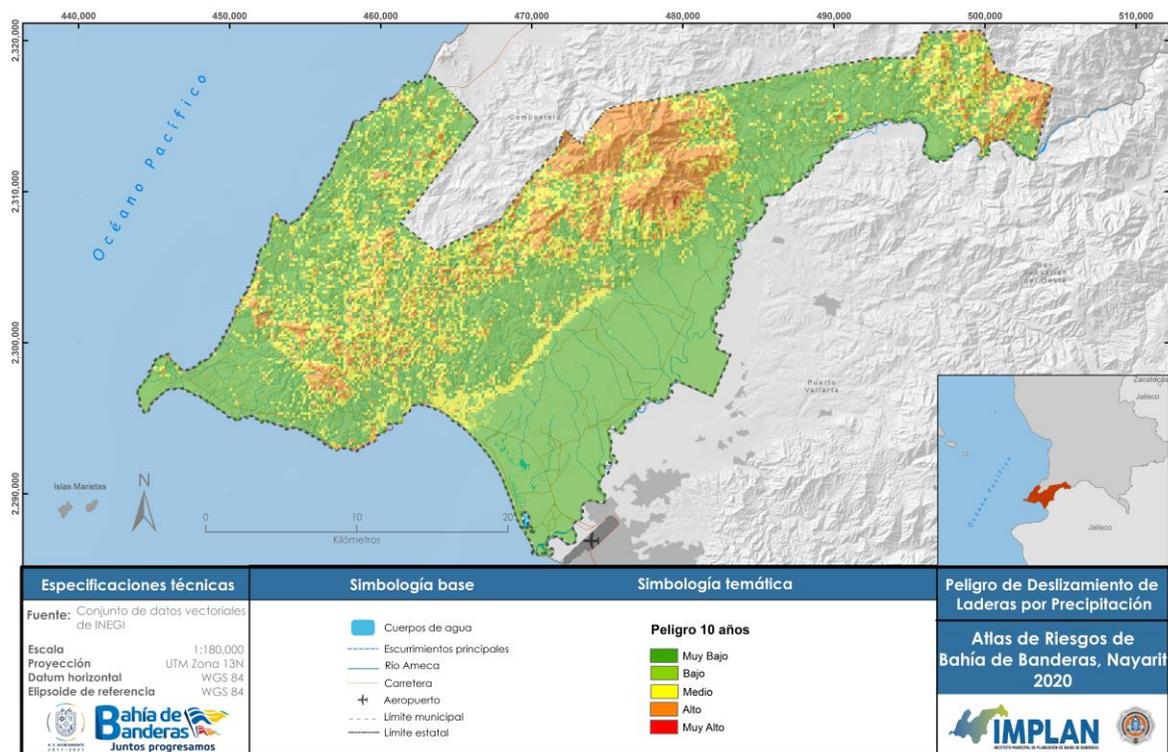
Fuente: Elaboración propia con base en Sistema Nacional de Protección Civil, 20016.

Mapa 18 Peligro de Deslizamiento de Laderas por período de retorno de 5 años



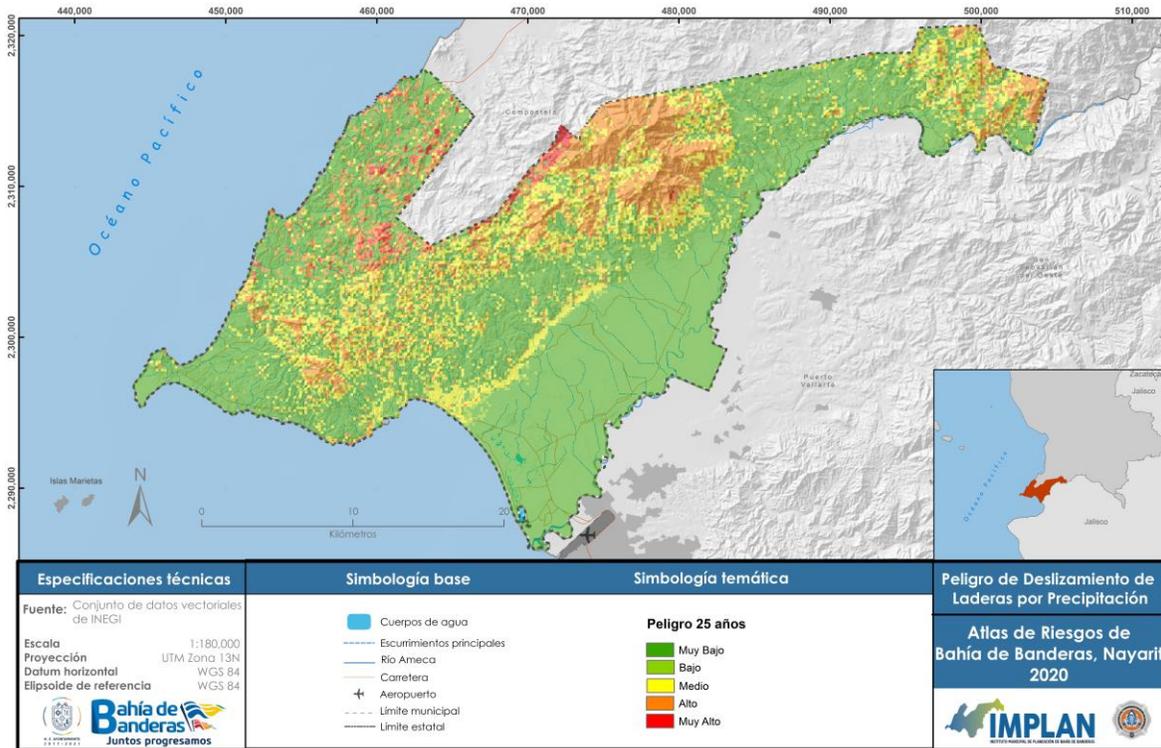
Fuente: Elaboración propia con base en Sistema Nacional de Protección Civil, 2016.

Mapa 19 Peligro de Deslizamiento de Laderas por período de retorno de 10 años



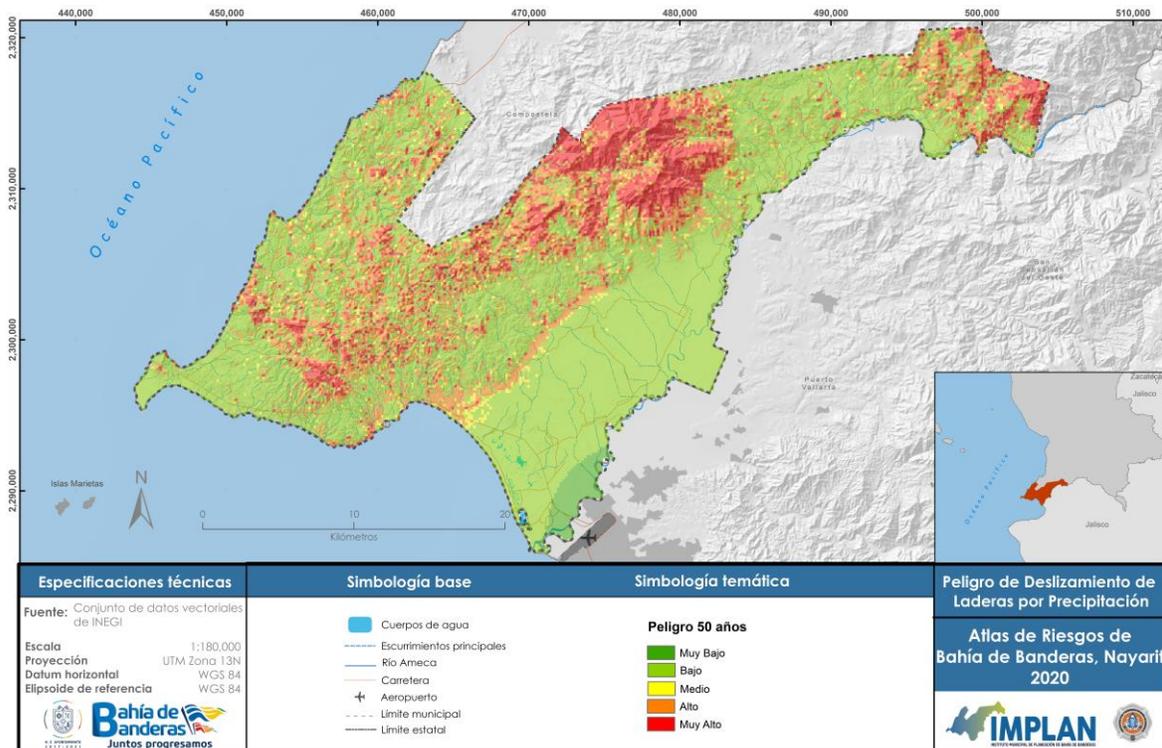
Fuente: Elaboración propia con base en Sistema Nacional de Protección Civil, 2016.

Mapa 20 Peligro de Deslizamiento de Laderas por período de retorno de 25 años



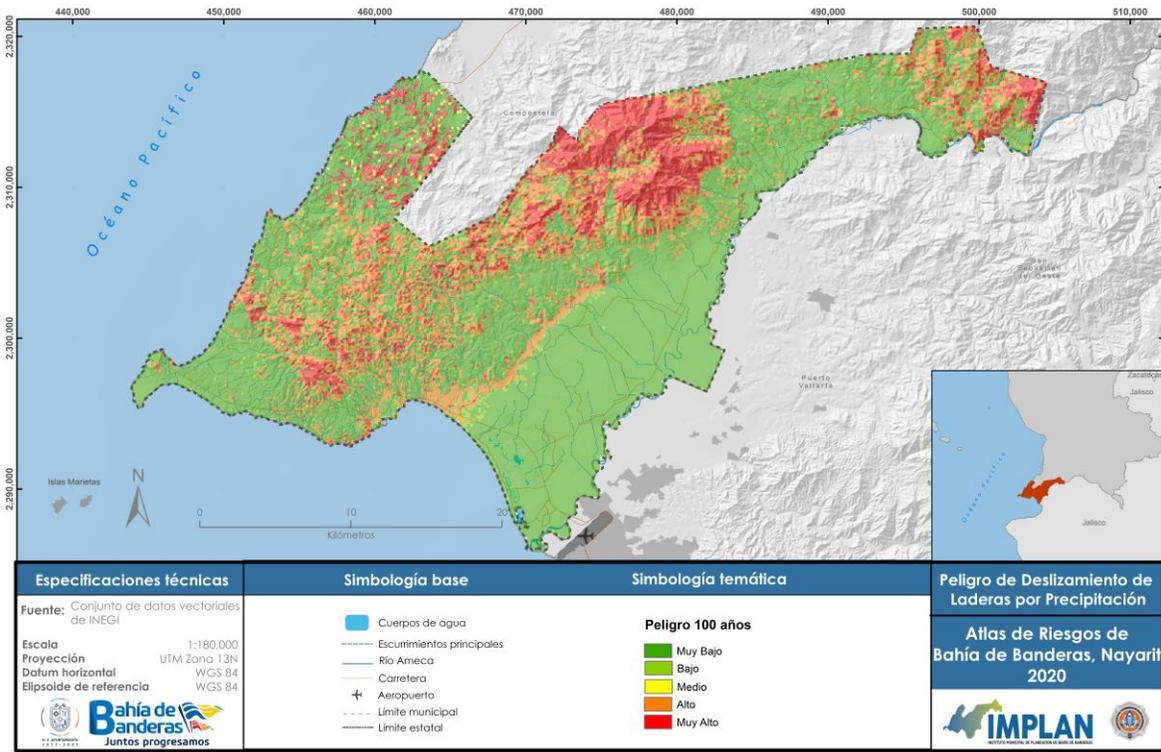
Fuente: Elaboración propia con base en Sistema Nacional de Protección Civil, 20016

Mapa 21 Peligro de Deslizamiento de Laderas por período de retorno de 50 años



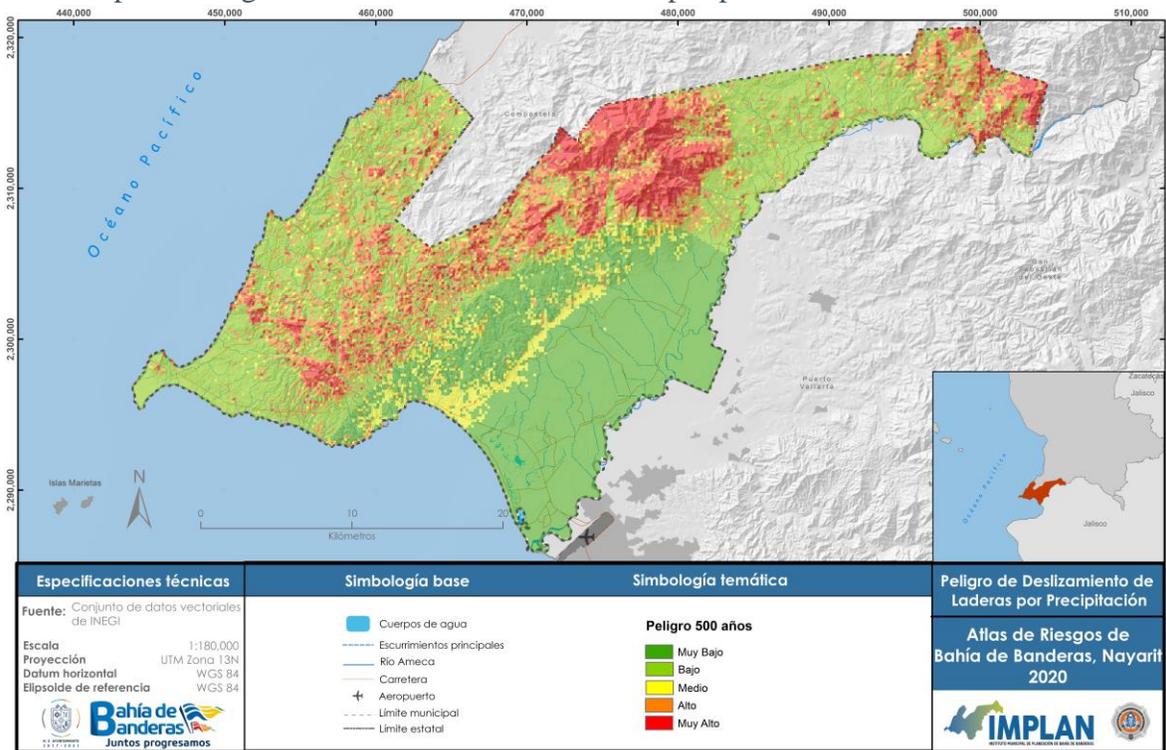
Fuente: Elaboración propia con base en Sistema Nacional de Protección Civil, 20016

Mapa 22 Peligro de Deslizamiento de Laderas por período de retorno de 100 años



Fuente: Elaboración propia con base en Sistema Nacional de Protección Civil, 2016.

Mapa 23 Peligro de Deslizamiento de Laderas por período de retorno de 500 años



Fuente: Elaboración propia con base en Sistema Nacional de Protección Civil, 2016

### II.3.2 Riesgo

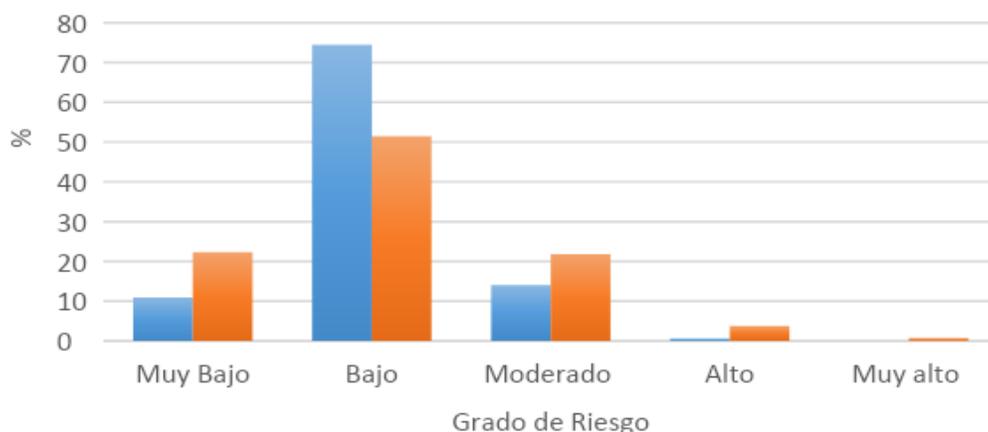
Para realizar análisis de riesgo es necesario incorporar la Vulnerabilidad. Lo anterior, comprende un tratamiento matemático basado en el peligro, los elementos en riesgo y la vulnerabilidad de éstos; para ello, se recurre al álgebra probabilista (como podrían ser árboles de eventos), o bien a métodos de confiabilidad o simulación (CENAPRED, 2014). Sin embargo, al no existir datos históricos del fenómeno en el municipio, la estimación de la probabilidad se obstaculiza, por lo que, para la incorporación de la variable, se recurrió a álgebra de mapas para analizar las localidades que podrían estar bajo riesgo por la ocurrencia de un deslizamiento. Además, se incluye la infraestructura carretera como elemento importante articulador del territorio. En la actualidad el transporte por carretera ha vivido un incremento considerable de la demanda de vehículos, una progresiva flexibilización de las redes y un desarrollo notable del transporte urbano (López-Azcárraga, 2013).

El transporte carretero se ha convertido en el modo dominante para la movilización de personas y bienes (Hilling, 1996). La demanda por parte de personas puede dividirse en dos grupos, el segmento de desplazamientos diarios por motivos de trabajo y el segmento que agrupa los viajes por placer. Ambos grupos generan en el mundo unos 23 millones de pasajeros/km, lo que representa el 80% de todos los desplazamientos de viajeros en el mundo. Por lo que respecta a las mercancías, el 13% de los movimientos de bienes se realizan por este medio (López-Azcárraga, 2013).

Por lo anterior, para obtener el Riesgo por deslizamiento de laderas, se incluyen las localidades (vidas humanas, viviendas, entre otros) e infraestructura carretera, como elementos expuestos que pueden sufrir algún daño por este fenómeno, que, aunque hasta al momento se carece de registros, no se debe descartar la ocurrencia de ellos ante la interacción de variables desencadenantes y el emplazamiento de asentamientos humanos e infraestructura, que cada día es mayor.

Dentro de las áreas donde se estimó el riesgo de deslizamientos, menos del 1%, de las superficies de las localidades contempladas se encuentran en un grado de riesgo Alto y Muy alto (Gráfica 2). Aunque es un área con un porcentaje bajo, el establecimiento de medidas para reducir la exposición de las personas y sus bienes que podrían resultar afectados, es de suma importancia. Por su parte, el 5% de las áreas que cubren las vías de comunicación del municipio, principalmente carreteras y terracerías, se encuentran en un riesgo Alto y Muy alto de sufrir deslizamientos, que en caso de ocurrir, el impacto de afectación entorpecería el funcionamiento social y económico de los territorios afectados, debido a que las vías de comunicación no son un solo ente, sino que, son un elemento que provee conectividad dentro del espacio socioeconómico al que sirven y que al mismo tiempo constituyen.

Gráfica 2. Porcentaje según grado de riesgo



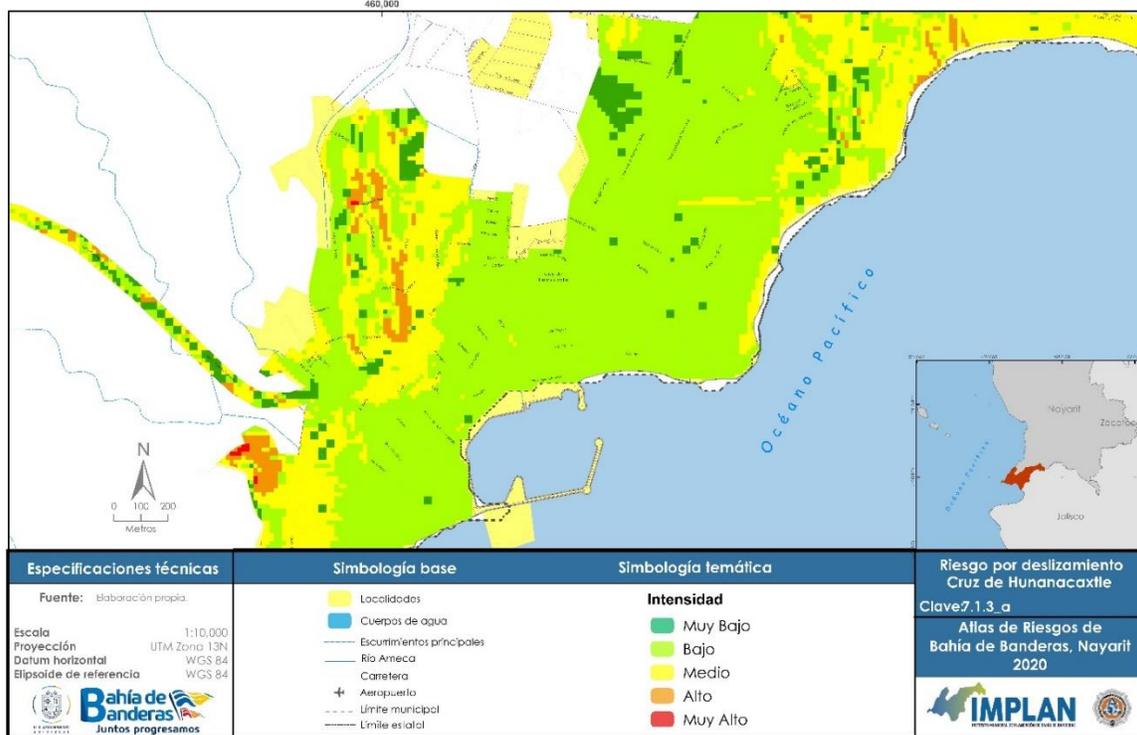
*Fuente: Elaboración propia del Instituto Municipal de Planeación*

Aunque un porcentaje bajo, el riesgo de deslizamiento al interior de las localidades, puede ocasionar pérdidas de vidas humanas e importantes afectaciones a las viviendas y en general a los bienes materiales de las personas. En este sentido la identificación de dichas áreas es muy importante para el establecimiento de medidas de mitigación que reduzcan el riesgo.

A continuación, se presentan las localidades que cuentan con algún área de riesgo.

Se identificaron tres zonas de Riesgo de Deslizamiento en La Cruz de Huanacastle (Mapa 24 ). Una de ellas se ubica al noroeste de la localidad entre las calles Monte Calvario y Pulpo, afectaría principalmente zonas residenciales hacia la calle Pulpo, y hacia el sur de esta estructura de lomeríos, podría afectar la carretera a Punta de Mita, entorpeciendo el tránsito que por esta vía se realiza. La segunda zona se ubica al oeste de la localidad, especialmente en la zona de montaña donde se ubican los condóminos ALAMAR. En caso de un deslizamiento afectaría principalmente a estas propiedades. La tercera zona se ubica al extremo suroeste de la localidad, en la línea de costa, donde se ubican los condominios Real del Mar. La afectación sería principalmente en esta propiedad.

Mapa 24. Riesgo por Deslizamiento en la Cruz de Huanacaxtle

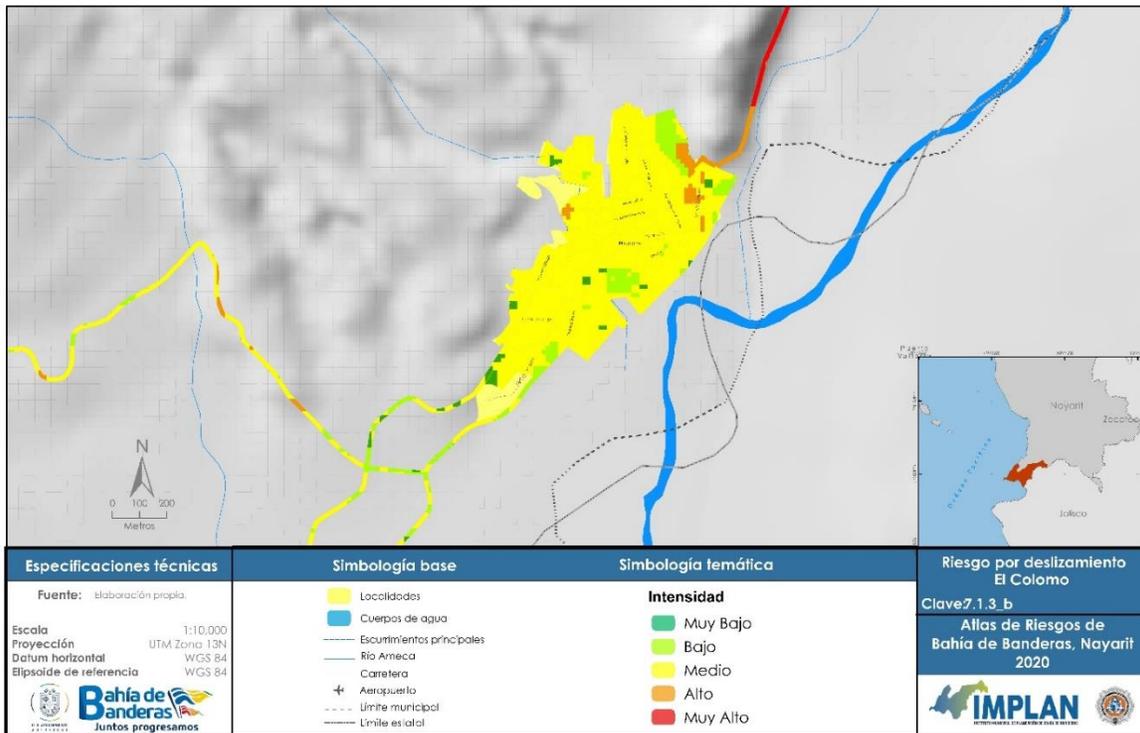


Fuente: Elaboración propia del Instituto Municipal de Planeación

El riesgo de deslizamiento de laderas, detectado en la localidad del Coatante, se ubica en la porción suroeste de la localidad, a unos metros de la carretera que comunica esta localidad con El Colomo (Mapa 25). Es una pequeña área con lomeríos, que tiene presencia de viviendas de manera dispersa. En este sentido el riesgo de afectación es hacia viviendas de autoconstrucción emplazadas en las inmediaciones de esta zona.

Los riesgos de deslizamientos en la localidad del Colomo están en la porción este de la localidad. Esta zona se encuentra en la ladera que alimenta el arroyo El Clavellino. En esta área se encuentran viviendas precarias, en una zona con pendiente pronunciada y desprovistas de vegetación. Lo que en caso de ocurrencia la afectación es sobre estas viviendas.

Mapa 25. Riesgo de deslizamiento en El Coatante y El Colomo

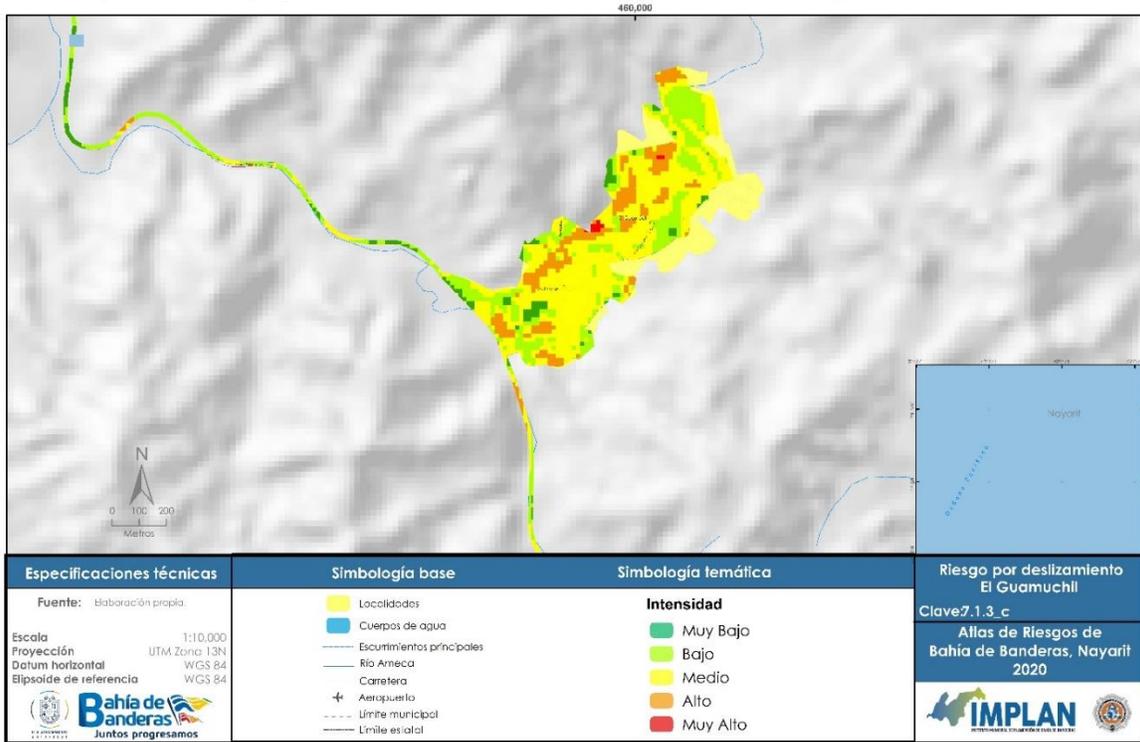


Fuente: Elaboración propia del Instituto Municipal de Planeación

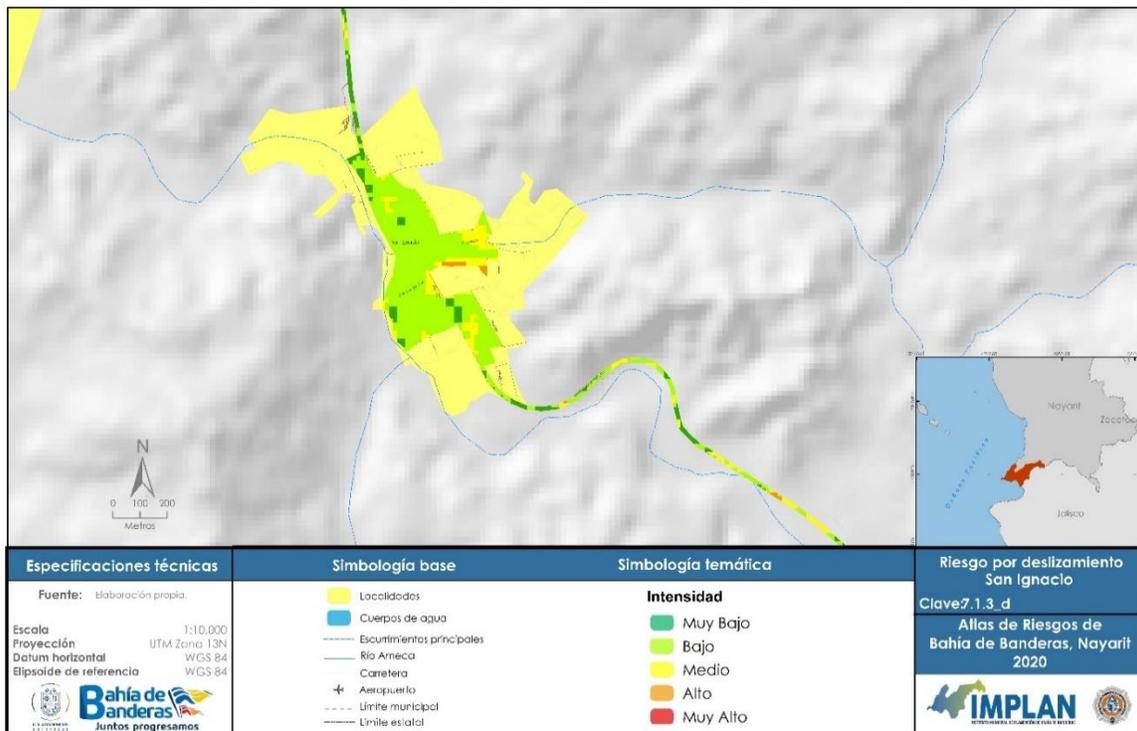
La localidad de Guamúchil es la que se encuentra con mayores riesgos de deslizamientos por su ubicación, más del 15% del territorio que compone la localidad se encuentra con un riesgo alto y muy alto de deslizamiento de laderas ( Mapa 26 ). Se encuentra en el pequeño valle inter montano que hace que una gran porción de la ladera ubicada en el margen izquierdo a partir del ingreso principal tenga un alto riesgo de deslizamientos. Se tienen que implementar estrategias comunitarias que ayuden a mitigar el riesgo al que está sometida.

En San Ignacio, el riesgo se presenta en el lomerío donde se ubica la antena de telecomunicaciones. La zona con mayor riesgo se presenta al final de la calle Jacarandas. En caso de deslizamiento la afectación sería a las telecomunicaciones, aunque dispersas, también impactaría a algunas viviendas con una construcción precaria. En San Quintín no hay un área con importantes riesgos de deslizamientos.

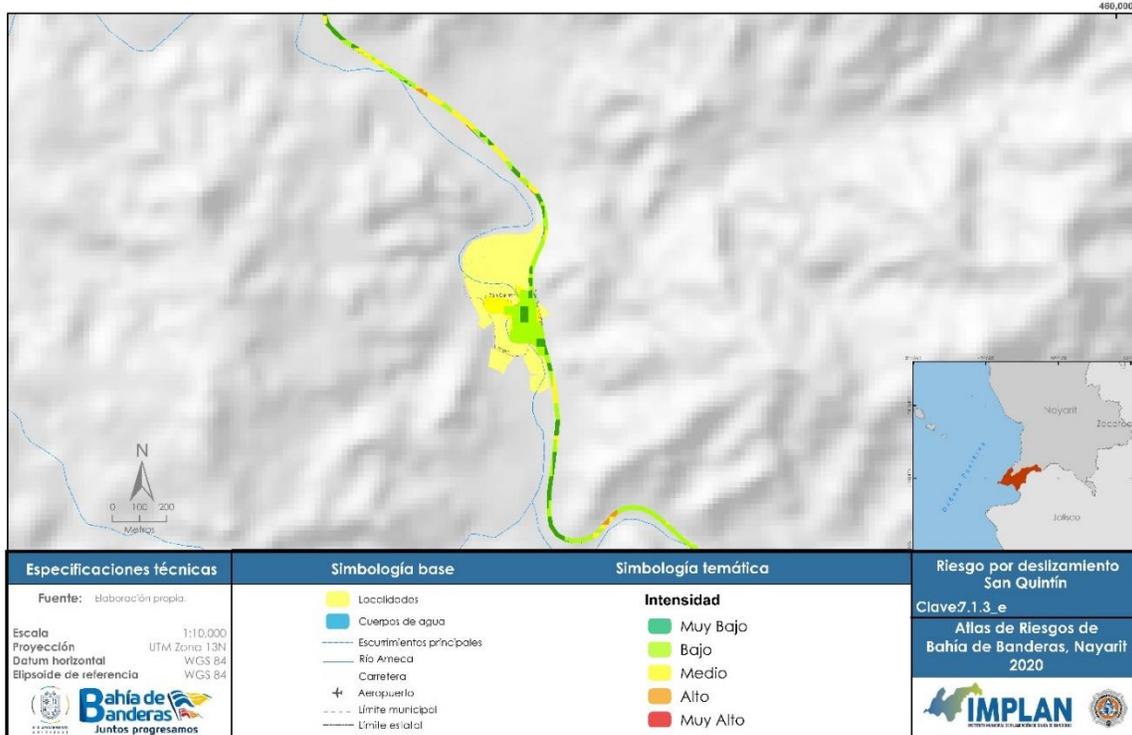
Mapa 26. Riesgo por deslizamiento en El Guamúchil – San Ignacio – San Quintín



Fuente: Elaboración propia del Instituto Municipal de Planeación



Fuente: Elaboración propia del Instituto Municipal de Planeación

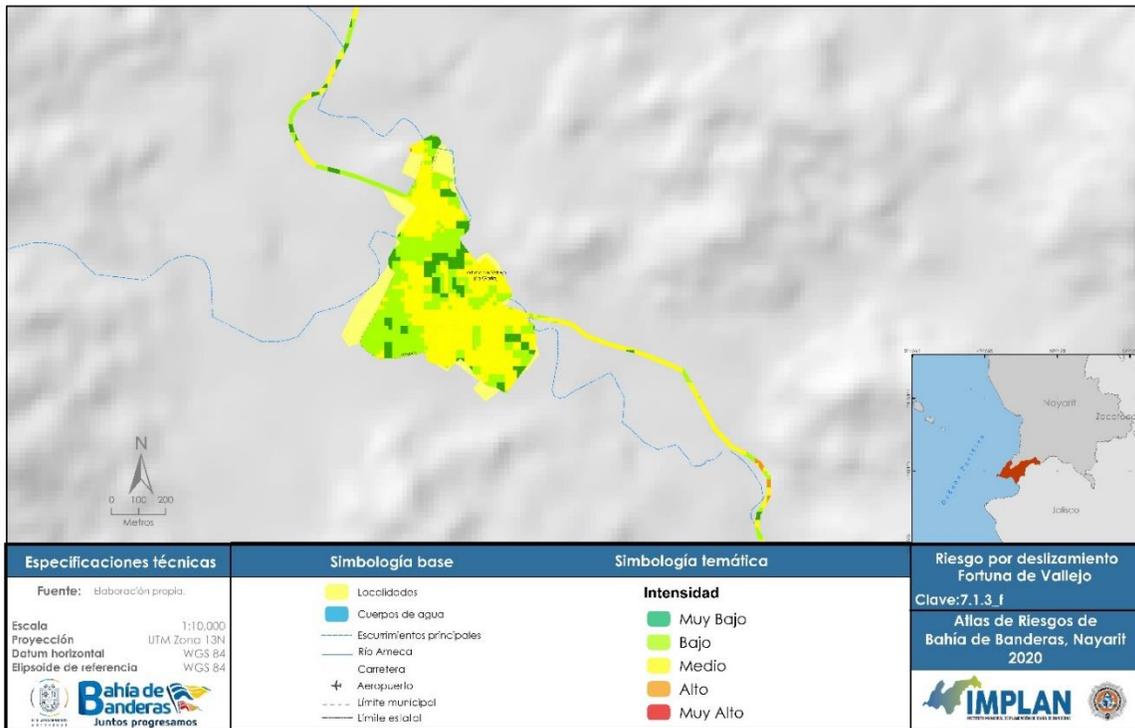


Fuente: Elaboración propia del Instituto Municipal de Planeación

### Riesgo de Deslizamiento en Fortuna de Vallejo

En el caso de Fortuna de Vallejo, a pesar de encontrarse en medio de la Sierra de Vallejo, sólo presenta un área marginal de riesgo (Mapa 27). Esta se ubica en el extremo norte de la localidad. En caso de ocurrir algún deslizamiento, la afectación sería a un par de viviendas con construcción precaria.

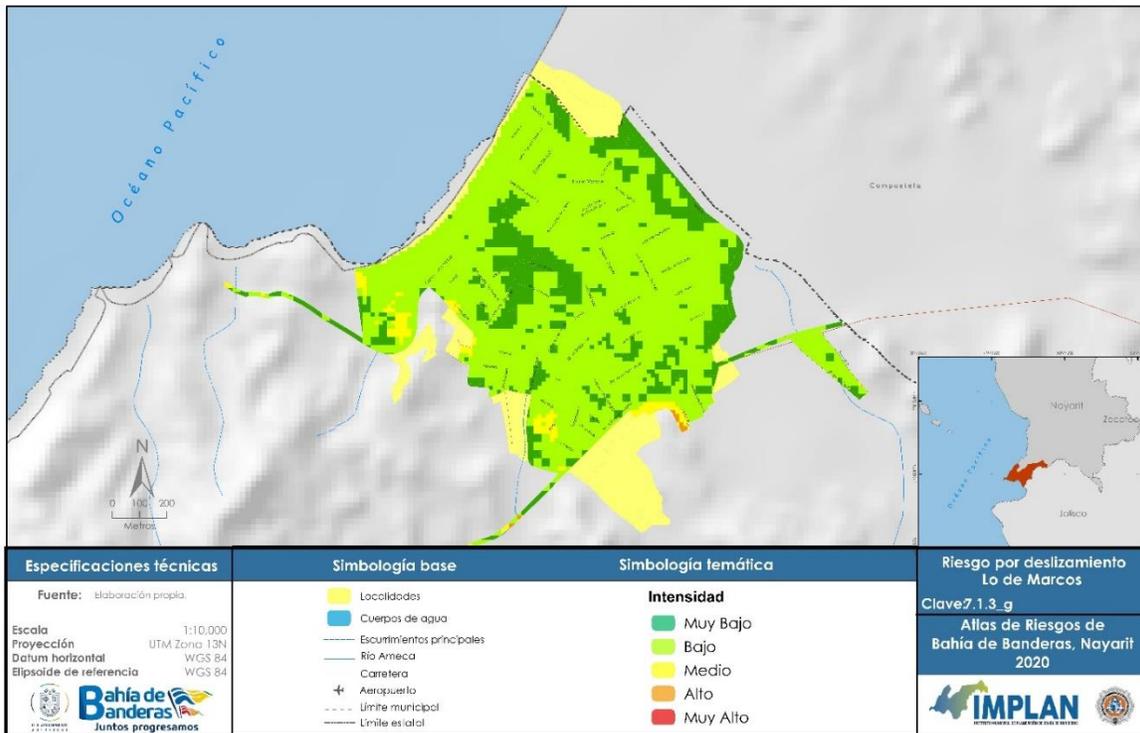
Mapa 27. Riesgo por deslizamiento en Fortuna de Vallejo



*Fuente: Elaboración propia del Instituto Municipal de Planeación*

Al igual que en el caso anterior, en Lo de Marcos, existe una pequeña área de riesgo importante de deslizamiento ( Mapa 28), esta se ubica al sureste del asentamiento cruzando la carretera 200. Es un área con pequeños lomeríos, desprovistos de vegetación. Hay presencia de viviendas de manera aislada, las cuales podrían resultar afectadas en caso de la ocurrencia de algún deslizamiento.

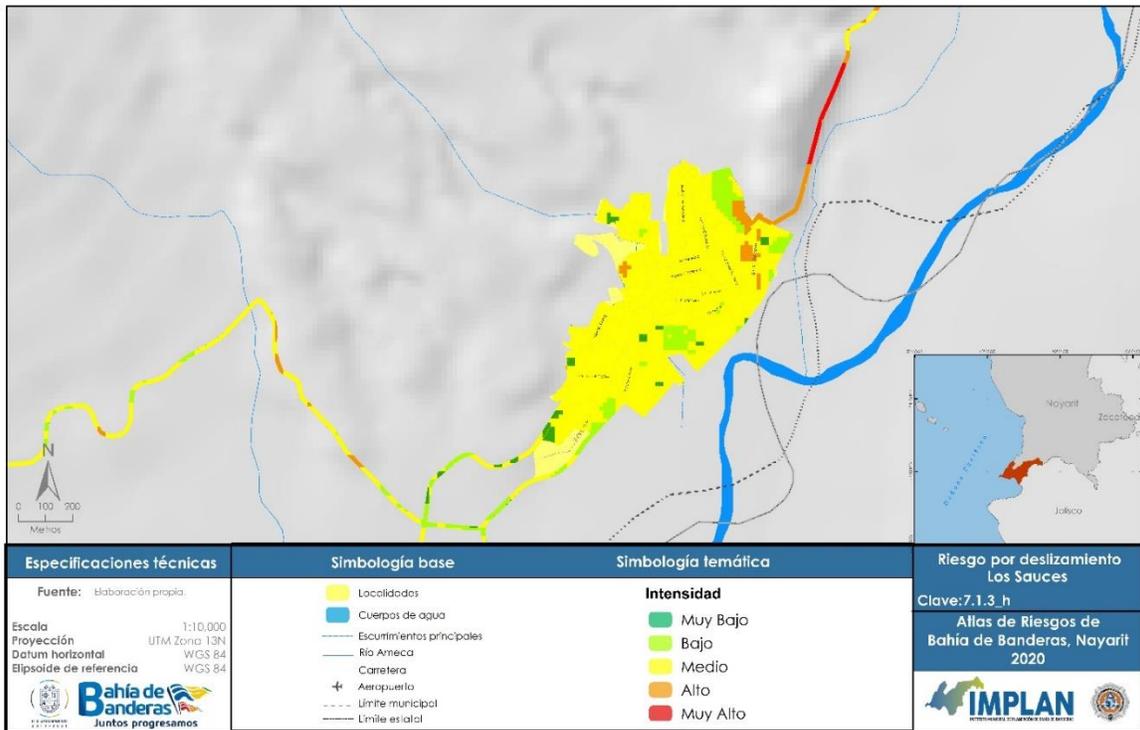
Mapa 28. Riesgo por deslizamiento en Lo de Marcos



Fuente: Elaboración propia del Instituto Municipal de Planeación

En la localidad de los Sauces, el riesgo se suscita en gran porcentaje en ladera en toda la porción norte de la localidad (Mapa 29 ). Actualmente la localidad sufre del asolvamiento y arrastre de material sedimentario en el temporal de lluvias, lo que podría desencadenar un arrastre mayor de detritos, siendo este un deslizamiento de flujo de tierra.

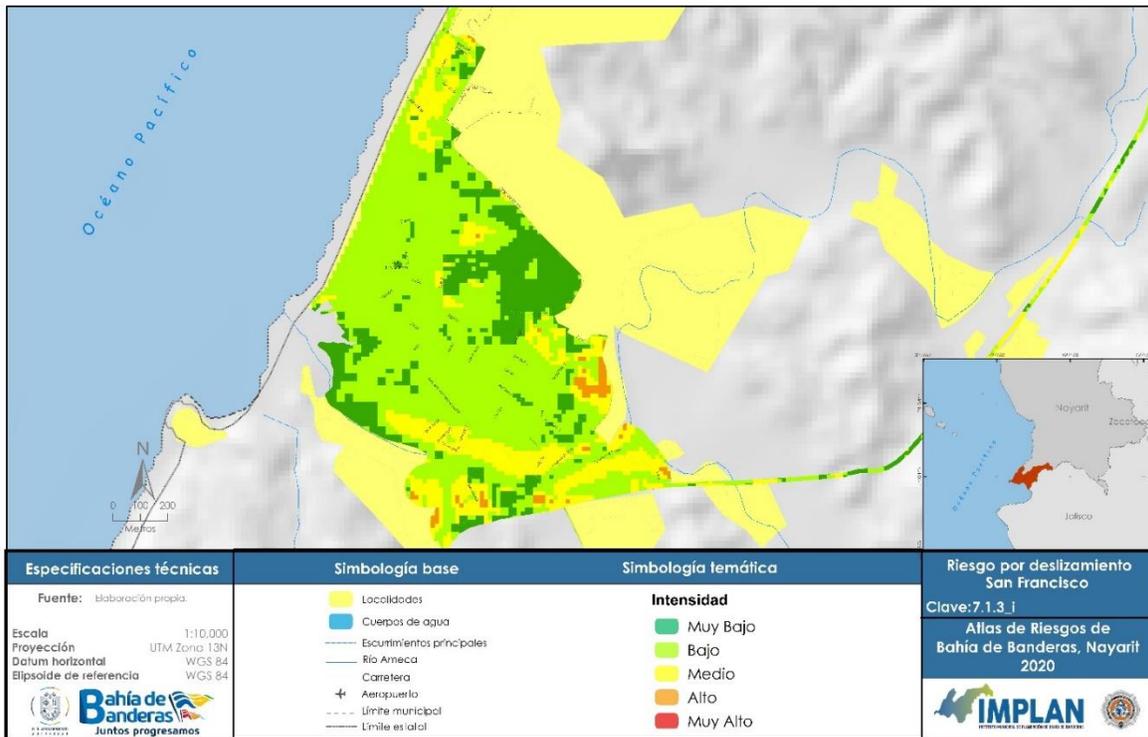
Mapa 29. Riesgo por deslizamiento en Los Sauces



Fuente: Elaboración propia del Instituto Municipal de Planeación

En la localidad de San Francisco, el riesgo de deslizamiento se encuentra en el lomerío frente al club de polo (Mapa 30) Actualmente ya hay emplazamiento de viviendas de importante poder adquisitivo, aunque aún hay espacios para la construcción de más viviendas, éstas deberán contar con medidas de mitigación del riesgo. Por otro lado, también hay la presencia de pequeñas zonas de riesgo, en la porción sur, muy cercanas a la carretera 200.

Mapa 30. Riesgo por deslizamiento en San Francisco

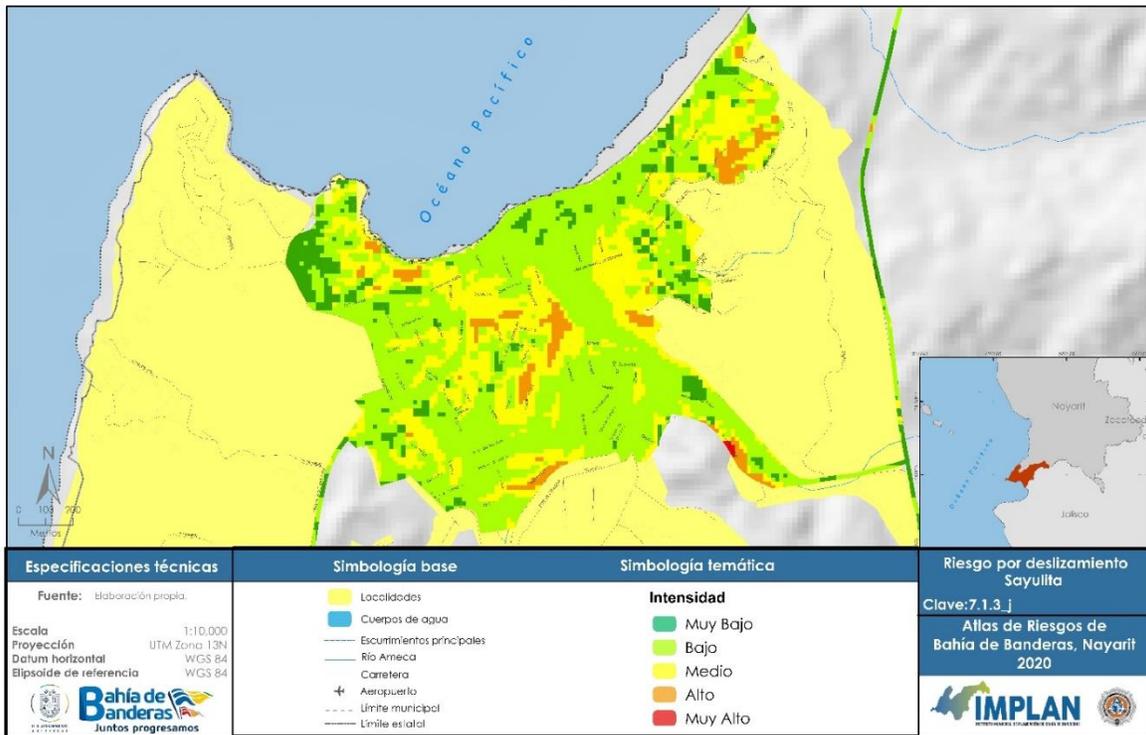


*Fuente: Elaboración propia del Instituto Municipal de Planeación*

En Sayulita hay importante presencia de zonas con riesgo de deslizamiento, algunas de ellas con importante densidad poblacional. Se debe poner especial atención en esta localidad, ya que en los últimos años ha sufrido un crecimiento acelerado, aumentando los niveles de riesgo por el emplazamiento de viviendas con fines turísticos y residencial, principalmente en zonas de pendientes pronunciadas, desprovistas de vegetación ( Mapa 31).

Las áreas detectadas, cubren diversos asentamientos, ya sean residenciales turísticos, con baja vulnerabilidad, principalmente en la zona costera y residencial en extremo noreste de la localidad; así como viviendas con condiciones precarias en su construcción, p. ej. sobre la carretera a Punta de Mita, casi en su intersección con la calle de ingreso, donde anteriormente ya se han suscitado incidentes por derrumbes.

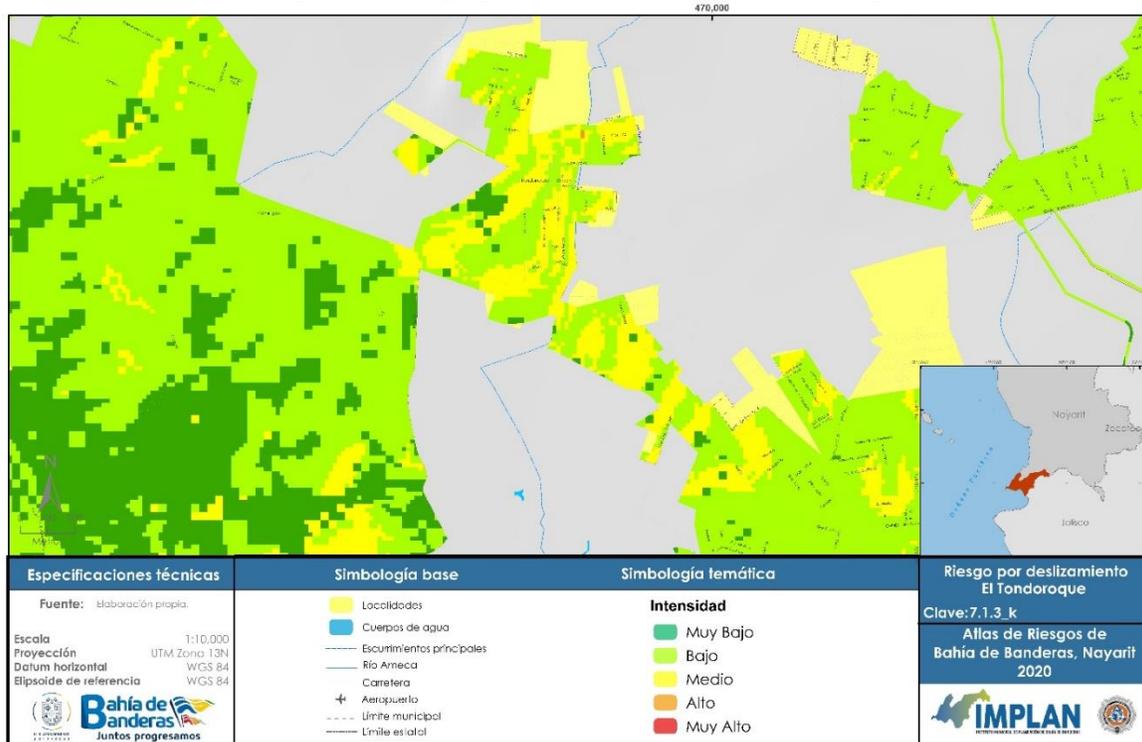
Mapa 31. Riesgo por deslizamiento en Sayulita



Fuente: Elaboración propia del Instituto Municipal de Planeación

En el Tondoroque el riesgo de deslizamientos está en una pequeña área en la porción norte de la carretera localizada cercana al arroyo homónimo. Actualmente no hay emplazamiento de viviendas, por lo que se deberá desalentar la construcción de alguna en dicha zona (Mapa 32).

Mapa 32. Riesgo por deslizamiento en Tondoroque



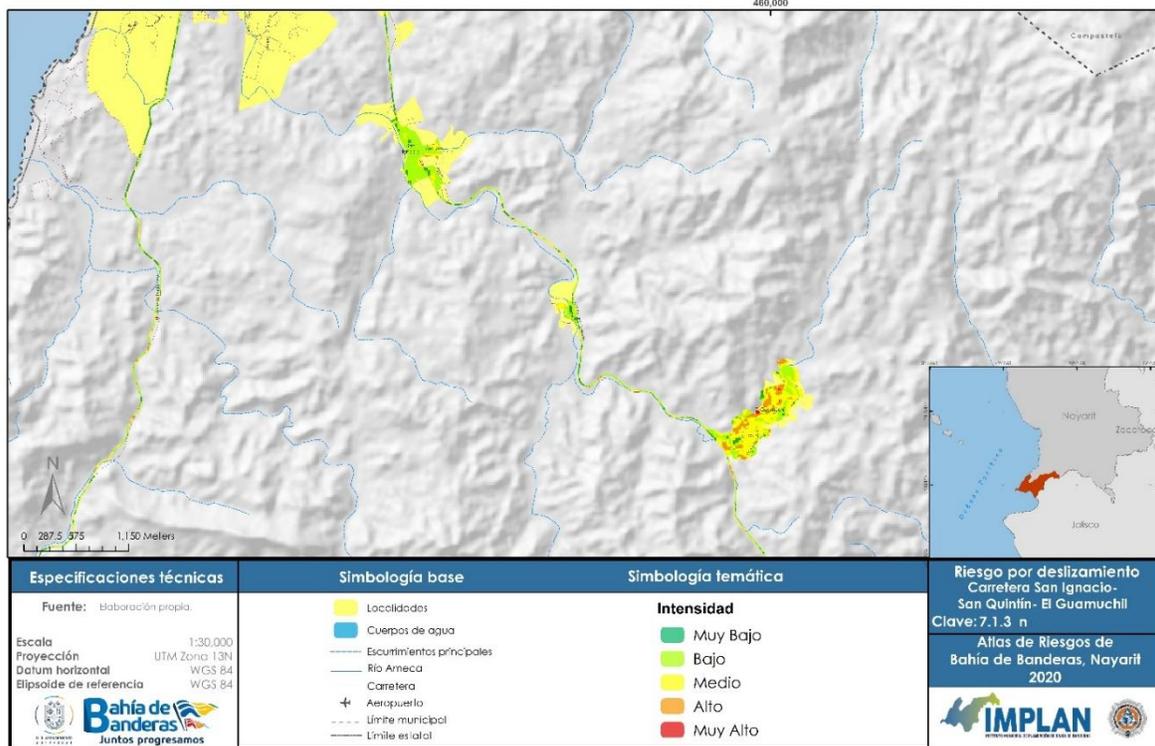
Fuente: Elaboración propia del Instituto Municipal de Planeación

A continuación, se presentan algunos tramos carreteros que cuentan con algún área de riesgo.

Ante la ocurrencia periódica de deslizamientos de laderas, anualmente se registran considerables daños a la red carretera del país, por lo que se estima que el costo es muy elevado y que esos montos suelen alterar significativamente los programas presupuestales de los espacios dañados. La infraestructura carretera en general enfrenta los efectos de fenómenos naturales, pero los caminos alimentadores y rurales son especialmente vulnerables a los efectos de estos fenómenos (López-Azcárraga, 2013).

En el caso del municipio de Bahía de Banderas, la ocurrencia de deslizamientos de laderas sobre algunas de las carreteras afectaría seriamente la conectividad de la red de transporte, ya que la conexión a nivel regional solo se realiza por la carretera 200. En este sentido, con base en el análisis realizado se han detectado distintos tramos que pudieran entorpecer la circulación por la ocurrencia de estos fenómenos. Ocho segmentos con riesgo de deslizamientos sobre esta carretera, fueron identificados; cuatro de ellos se encuentran en el tramo La Cruz de Huanacastle-El Guamúchil ( Mapa 33), dos de ellos sobre El Guamúchil-San Quintín, los otros dos de San Quintín a San Ignacio.

Mapa 33. Riesgo por deslizamiento San Ignacio-San Quintín y El Guamúchil



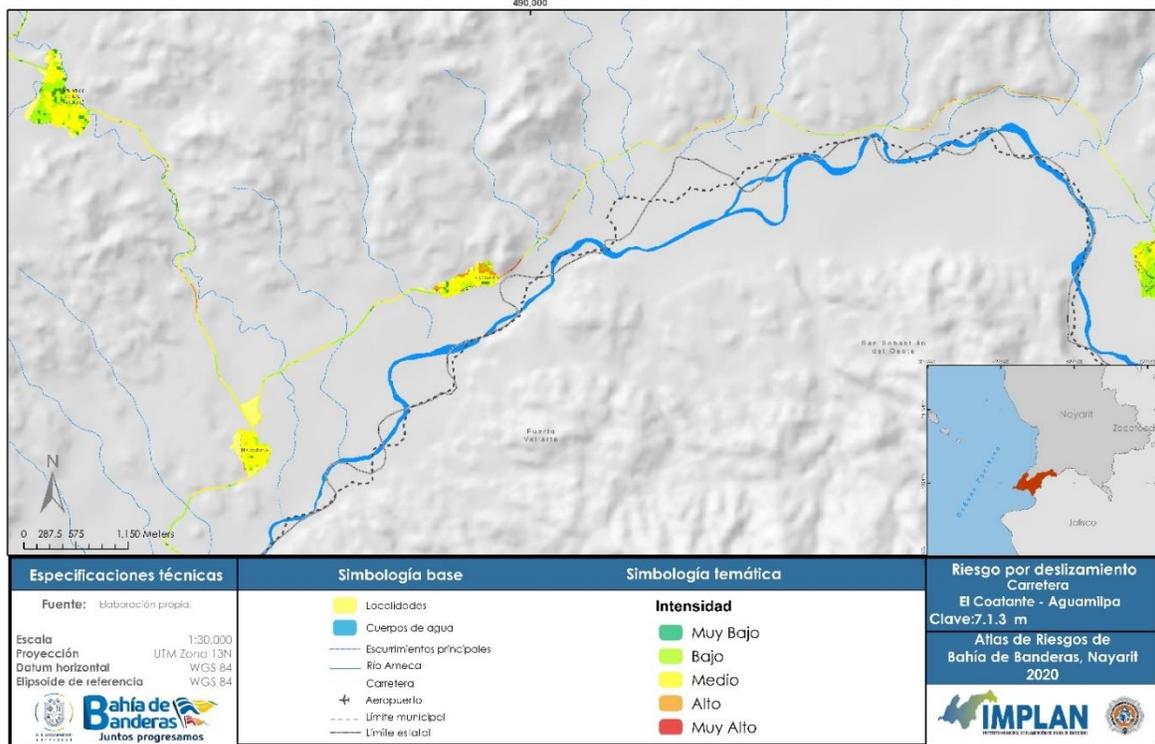
Fuente: Elaboración propia del Instituto Municipal de Planeación

Se identificaron diversas zonas susceptibles de deslizamiento, una de las más importantes se ubica en el tramo que conecta a El Colomo con El Coatante (Mapa 33), se observa que hay una zona, a la salida del Colomo con alto grado de riesgo de deslizamiento, debido a que es una zona de alta pendiente, desprovista de vegetación, que continuamente presenta caída de material terrígeno. En caso de ocurrir, no solo afectaría la conectividad, también podría traer efectos adversos a la población por su cercanía con la localidad.

En el tramo Los Sauces – Aguamilpa, se identifican tres zonas susceptibles de deslizamientos (Mapa 34). La ocurrencia de alguno de ellos dejaría incomunicada a las localidades de Aguamilpa y El Ahuejote, sumado a la problemática de incomunicación que año con año sufren, ocasionado por la creciente de los arroyos en temporada de lluvias.

La carretera que conecta a Fortuna de Vallejo con El Coatante presenta dos zonas que pueden interrumpir la conectividad de esta localidad, con el interior del municipio de Bahía de Banderas. El reblandecimiento de suelo y posterior precipitación en estas zonas, aunado a la afectación vial que puede ocasionar, podría ocasionar represamientos y posteriores inundaciones en el arroyo que corre de manera paralela a la vía.

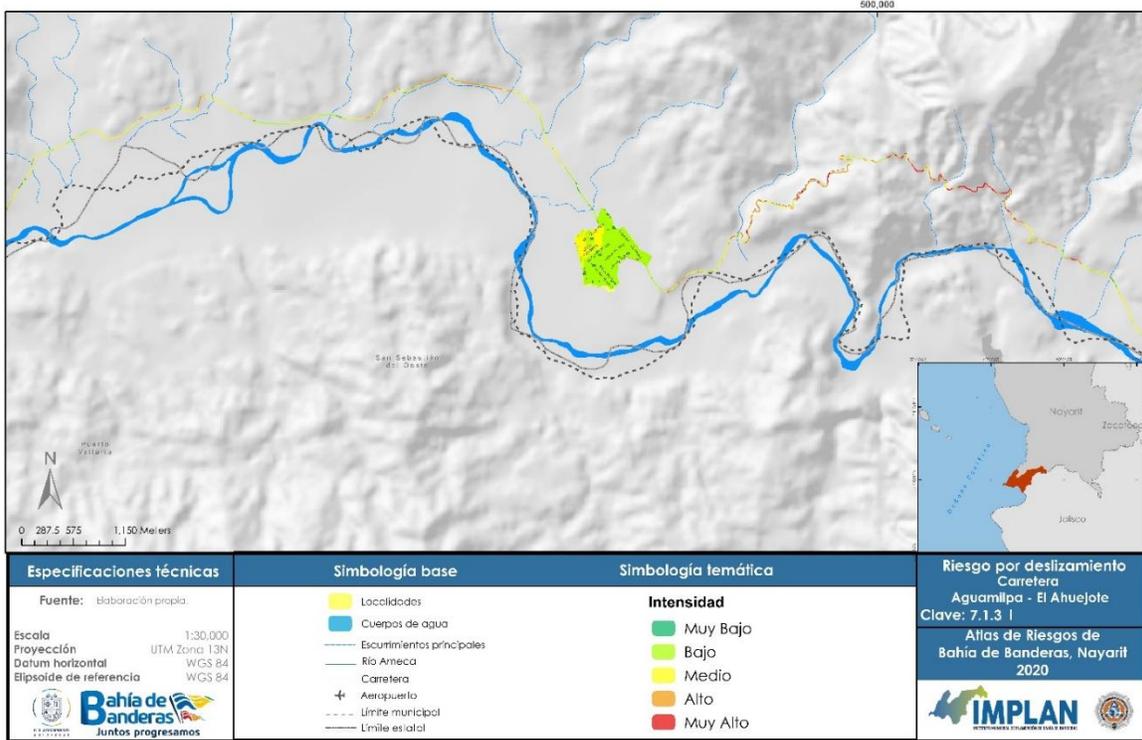
Mapa 34. Riesgo por deslizamiento carretera El Coatante-Aguamilpa



Fuente: Elaboración propia del Instituto Municipal de Planeación

Por su parte, en el camino que conecta a Aguamilpa con El Ahuejote presenta una gran cantidad de zonas susceptibles a deslizamiento presenta la mayor concentración de áreas con riesgos muy alto en la ocurrencia de este fenómeno (Mapa 35). Es una vía con alta vulnerabilidad por el bajo tránsito que por ella se realiza, es la única vía de acceso a la localidad de El Ahuejote.

Mapa 35. Riesgo de deslizamiento tramo Aguamilpa-El Ahuejote



Fuente: Elaboración propia del Instituto Municipal de Planeación

## II.4 Licuación de suelos

La licuación o licuefacción de suelos es un fenómeno en el que los terrenos pierden su firmeza, debido a la saturación de agua y como resultado de los esfuerzos provocados en ellos debido a los temblores. La licuefacción es una causa mayor de destrucción relacionada con movimientos sísmicos, es capaz de desplazar, hundir o incluso volcar infraestructura, como casas, edificios o puentes.

La licuación de suelos se define como la reducción drástica de la resistencia y rigidez de un suelo granular saturado por efecto de cargas cíclicas o monotónicas. Formalmente, Terzaghi (1950, en Rosado, 2010) define a este fenómeno como:

*“El arreglo de las partículas de una arena fina o de un limo grueso puede ser tan inestable que una ligera perturbación del equilibrio de los granos ocasiona un rearrreglo de las partículas; en consecuencia, las partículas se asientan en posiciones más estables y la porosidad del sedimento decrece. Cuando ocurre este proceso arriba del nivel freático, no tiene más efecto notable que el generar asentamientos en la superficie del terreno. Opuestamente, de ocurrir bajo el nivel freático sus consecuencias pueden ser catastróficas, ya que la viscosidad del agua que ocupa los vacíos de la arena impide un decremento rápido de la porosidad.”*

Este fenómeno sucede cuando las ondas sísmicas (principalmente las ondas S), al pasar por estratos granulares saturados, distorsionan el arreglo estructural constituido por partículas del suelo, provocando una densificación o una serie de colapsos de arreglos sueltos. Tales colapsos generan un aumento en la presión de poro entre los granos cuando no hay drenaje. Cuando la presión de poro aumenta, el estrato granular se comporta como un líquido denso. Lo anterior ocasiona deslizamientos en laderas o pérdida de firmeza superficial, ocasionando que la infraestructura pierda su verticalidad (Ramírez, 2002).

Un suelo licuado se deforma ya que presenta poca resistencia. El potencial de licuación de un suelo, depende principalmente de lo suelto que se encuentre, de la cantidad de arcilla que tenga entre sus partículas y de que tan limitado sea su drenaje. Los sedimentos más susceptibles son, los depósitos de arena limpia, arena arcillosa y arena limosa, sin embargo, también se han presentado casos de licuación en gravas.

La licuación es ocasionada por las condiciones geológicas e hidrológicas que rodean a un depósito. Los suelos más susceptibles de licuarse son los sedimentos más jóvenes y sueltos con niveles de agua superficiales, por ejemplo, los que se encuentran en deltas de ríos, planicies, depósitos eólicos y rellenos mal compactados (Ramírez, *ibíd.*). Existen dos tipos de licuación, la de flujo y la movilidad cíclica. La primera produce graves efectos de inestabilidad en el suelo debido a su velocidad y a su área de influencia. La segunda suele desencadenarse debido a los ciclos de carga y descarga por lo que la deformación es gradual.

Los efectos de la licuación dependen de su naturaleza, es decir, si fueron efectos de una licuación de flujo o de una movilidad cíclica. La licuación representa un peligro cuando es acompañada de desplazamientos o fallas del suelo en sitios con presencia de infraestructura. Se han registrado distintos tipos de procesos en los eventos de licuación del suelo:

- Desplazamientos laterales: se suelen asociar al efecto de la movilidad cíclica y consisten en la licuación del estrato saturado de un depósito en el que el nivel freático se encuentra cerca de la superficie del suelo. Se genera un movimiento lateral del suelo licuado dividiendo en bloques a la capa superior. El movimiento se da conforme a la pendiente del suelo y está en función de la inercia resultante del sismo, el movimiento de los bloques es irregular y variable en profundidad, dependiendo de la magnitud y duración del sismo. Causa daño a instalaciones de agua potable, drenajes, puentes, entre otras.
- Asentamientos: Son provocados por la densificación que sufren las arenas después de un sismo, están asociados a la disipación de poro generada durante un sismo, lo que ocasiona la reconfiguración del suelo a través de movimientos verticales. Su tiempo de desarrollo depende de la permeabilidad y la compresibilidad del suelo.
- Oscilaciones del suelo: Son efectos similares a los desplazamientos laterales, pero los bloques adoptan un movimiento oscilatorio, provocando una contracción y dilatación de las grietas formadas por los mismos bloques, formando pequeños volcanes de arena. Suelen dañar instalaciones subterráneas.
- Volcanes de arena: se forman debido a la gran presión de poro que se genera en el suelo. A causa de un sismo, se libera la presión, provocando que el agua fluya hacia la superficie, arrastrando partículas y formando montículos conocidos como volcanes de arena.
- Pérdida de la capacidad de carga: la estabilidad de un suelo soportando a una estructura depende de la capacidad de carga del suelo. Un evento de licuefacción produce una drástica disminución en la capacidad de carga debido a las características que adopta el suelo durante el fenómeno. Esto ocasiona que el suelo pierda la capacidad de carga y se producen asentamientos o inclinaciones en las estructuras civiles.

Para evaluar la susceptibilidad de un suelo se suelen considerar cuatro criterios: el geológico, el histórico, el composicional y el estado inicial del suelo. Si el suelo no es susceptible, se descarta la evaluación del riesgo por licuación. A continuación, se describen los criterios de susceptibilidad:

- Criterio geológico: El origen de un suelo nos brinda información relevante pues los procesos geológicos que forman suelos en estado suelto y con granulometría uniforme se asocian a alta susceptibilidad. Principalmente encontramos los suelos

aluviales, los coluviales y los eólicos. También se pueden incluir a los suelos artificiales como los rellenos mal compactados.

- Criterio histórico: Los registros de eventos de licuefacción pasados son relevantes para la prevención de casos futuros. Si un suelo se licuó, es muy posible que uno con rasgos similares también lo haga. Así mismo, el análisis de licuaciones anteriores ha mostrado que los efectos de licuación están en función de la distancia al epicentro.
- Criterio composicional: se vincula con las características de composición de un suelo, en cuanto a cambios de volumen, tamaño, forma y granulometría de las partículas que representan una alta susceptibilidad a la licuación. Un suelo con granulometría uniforme es altamente susceptible a la licuación. Así mismo, la forma de la partícula es importante pues los suelos con partículas redondeadas presentan mayor susceptibilidad que los que tienen partículas angulosas.
- Criterio de estado: Otro factor que influye en la licuación es el estado inicial del suelo, que se constituye de la densidad y los esfuerzos presentes al momento de la perturbación, sin la presencia de este, no necesariamente habría licuación a pesar de cumplir los criterios anteriores.

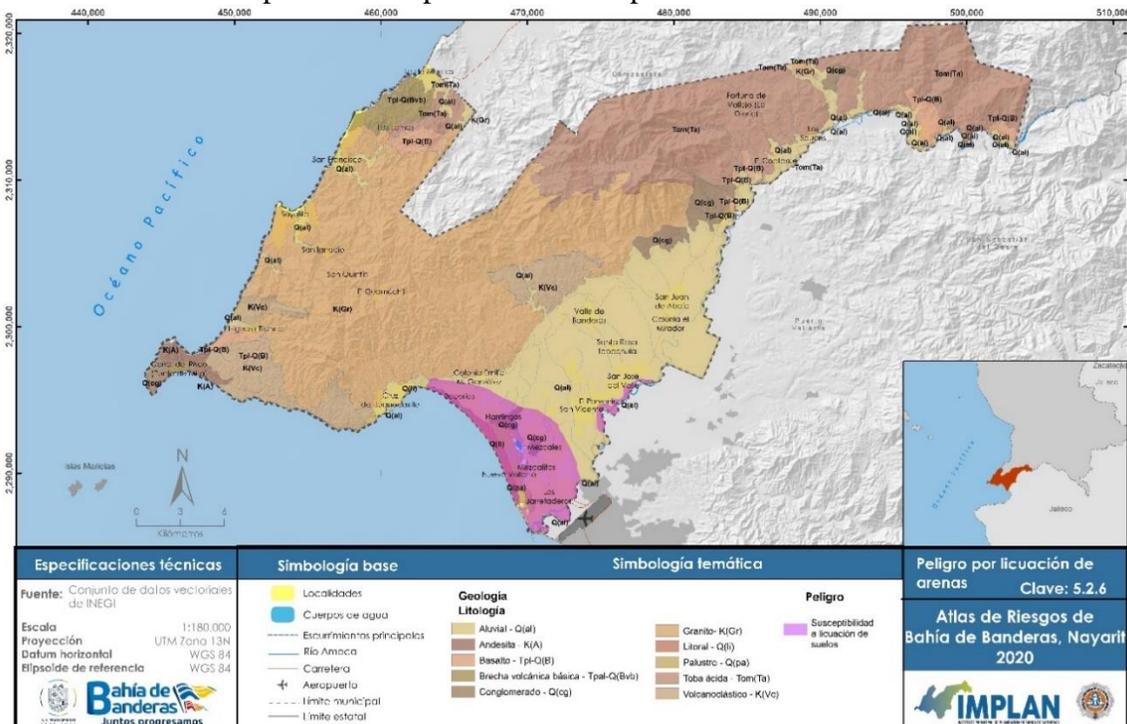
## II.4.1 Susceptibilidad

Los suelos susceptibles a licuación son los constituidos por arenas y limos, con un espesor de al menos 10 m. y además con presencia de un nivel freático somero (menos de 3 m.), donde el grado de compactación sea bajo. Así mismo, el sitio en cuestión debe emplazarse a menos de 200 km de zonas sísmicas con magnitudes mayores o iguales a 6.

De igual forma, la litología juega un papel importante durante los fenómenos sísmicos, dado que las ondas viajan de diferente manera en cada tipo de roca: por las zonas de mayor rigidez, las vibraciones no se dispersan con facilidad, pero en depósitos no consolidados, las ondas se propagan fácilmente. La zona del valle se compone de material aluvial proveniente de las cuencas de los ríos Ameca y Mascota, por lo que presenta una mayor vulnerabilidad ante eventos sísmicos y tiene mayor probabilidad de ocurrencia de fenómenos de licuación de suelos. La zona costera también puede presentar una mayor vulnerabilidad ante a licuación de suelos, así como las áreas cercanas a los cuerpos de agua como lo es la Laguna Quelele y los ríos.

Conforme a investigaciones generadas por el Instituto de Geografía de la UNAM y por la Universidad de Guadalajara en el año 2008, se estimaron dos áreas en el municipio, susceptibles de licuefacción de arenas (Mapa 31) debido a su composición de suelo y a los parámetros que establece el CENAPRED. Sin embargo, no existe evidencia histórica de licuefacción en el territorio de Bahía de Banderas (Bahía de Banderas, Nayarit., 2012).

Mapa 36. Susceptibilidad física por licuación de suelos



Fuente: Elaboración propia con base en datos vectoriales de INEGI

#### II.4.2 Hundimiento y agrietamiento del terreno

Los fenómenos de hundimiento o subsidencia del terreno se asocian a asentamientos o movimientos descendentes del terreno que se manifiestan debido a la compactación paulatina (subducción) o súbita (colapso) de los materiales del suelo. Estos eventos se originan por diversas causas. Lugo (2011) señala brevemente tres factores generadores: la compactación de arcillas debido a la extracción del agua del subsuelo, el relieve kárstico asociado a la presencia de dolinas y el hundimiento tectónico que ocurre en zonas sísmicas activas. Así mismo, el origen de los hundimientos se puede clasificar de acuerdo a factores endógenos, que son los procesos que se generan dentro de la corteza terrestre (como las fallas o el vulcanismo), o exógenos, vinculados a manifestaciones superficiales de la compactación de depósitos.

Los hundimientos son un proceso que suele ser ocasionado por factores ligados a factores hidrogeológicos y a las políticas de uso y manejo de agua. Entre estos podemos encontrar a la actividad tectónica, el deshielo del permafrost, la minería subterránea, la consolidación por extracción de fluidos, oxidación de suelos orgánicos, procesos de hidrocompactación, vulcanismo y formación de sumideros y cenotes por efecto hídrico sobre ciertos tipos de roca (Galloway *et al.* 2011, 2016).

Se han manifestado hundimientos en varias ciudades del mundo, pues en muchas ocasiones está asociado a la sobreexplotación del agua subterránea y es condicionado por las características estratigráficas del área. Un ejemplo relevante es la subsidencia que ocurre en la Ciudad de México debido a la sobreexplotación de los acuíferos del valle de México. Sin embargo, el problema se ha extendido a diversos lugares de la República Mexicana como son los casos de Querétaro, Celaya, Irapuato o Toluca, entre otros ( Ilustración 4).

Existen distintos tipos de hundimiento:

- Natural: los hundimientos naturales suelen ser procesos lentos, sin embargo, se pueden acelerar por las actividades humanas.
- Por disolución subterránea (karstificación): las rocas carbónicas, el yeso y las sales, son de los materiales más solubles que existen en la corteza terrestre, es por ello que cuando entran en contacto con el agua pueden generar huecos, cuya deformación y colapso provocan el hundimiento del terreno.
- Por tectónica: es generado por fallas, regularmente es muy lento (pocos milímetros al año).
- Por erosión subterránea: se produce por un arrastre de partículas de suelo causado por el flujo de agua subterráneo, que durante su recorrido moviliza partículas de suelo, generando canales y, por tanto, colapsos.
- Por flujo lateral: se asocia a formaciones evaporíticas y a la actividad diapírica. Este tipo de fenómenos se han observado en materiales arcillosos intercalados con materiales más competentes como pizarras.

- Antrópico: cuando es causado por la actividad humana. Suele desarrollarse en periodos cortos y pone en peligro a la infraestructura como vías, edificios, o agua potable. Algunos ejemplos son por minería, construcción o explotación de acuíferos.
- Por compactación: las vibraciones generadas por sismos, erupciones explosiones u otras causas, pueden causar la densificación de terrenos suelos.
- Por carga: el peso de la acumulación natural de sedimentos o por ciertos tipos de cimentaciones o construcciones puede causar la consolidación del terreno.
- Por hidrocompactación: consiste en el asentamiento que se produce en determinados tipos de suelo situados sobre el nivel freático.

Ilustración 4. Daño a infraestructura urbana por hundimiento



*Recuperado de Hernandez, 2007*

Son escasos los registros de este tipo de eventos en Bahía de Banderas. Se realizó una búsqueda de bibliografía, en la que se encontraron notas periodísticas reportando hundimientos en el fraccionamiento Altavela, donde se han presentado socavones que ocasionan el hundimiento de algunas de sus calles pavimentadas.

#### II.4.3 Subsistencia

La subsidencia es uno de los principales peligros a nivel mundial, su costo anual por concepto de daños y mitigación es muy alto. Los fenómenos de subsidencia suelen ser paulatinos, se asocian a procesos de compactación del terreno y con frecuencia son acelerados por actividades antrópicas (Fielding *et. al.*, 1998).

La teledetección o percepción remota es la técnica con la que se obtienen datos de un objeto o una superficie sin estar en contacto directo con el objeto de estudio. En ese sentido, una de las técnicas utilizadas para medir la subsidencia superficial es la interferometría radar (InSAR).

Las imágenes obtenidas a través de sensores de radar de apertura sintética (SAR), pueden ser combinadas usando el análisis interferométrico para medir el hundimiento o la deformación de la superficie de forma remota, a través de la técnica InSAR, que es utilizada en la percepción remota para generar mapas de subsidencia de la superficie terrestre. Es posible utilizar múltiples imágenes SAR para detectar muy pequeños cambios en la elevación del terreno (1cm o menos) en grandes áreas (Gabriel *et. al.*, 1989).

Algunas ventajas de InSAR es que provee de una tasa de muestreo bastante densa y detallada de la superficie, no requiere acceso al terreno y puede proveer un mapa de las deformaciones del terreno. Entre algunas de sus desventajas se puede citar la presencia de ruido y de distorsiones en las imágenes y que solo mide el componente de desplazamiento vertical, sin embargo, es el más sensible a movimientos de subsidencia.

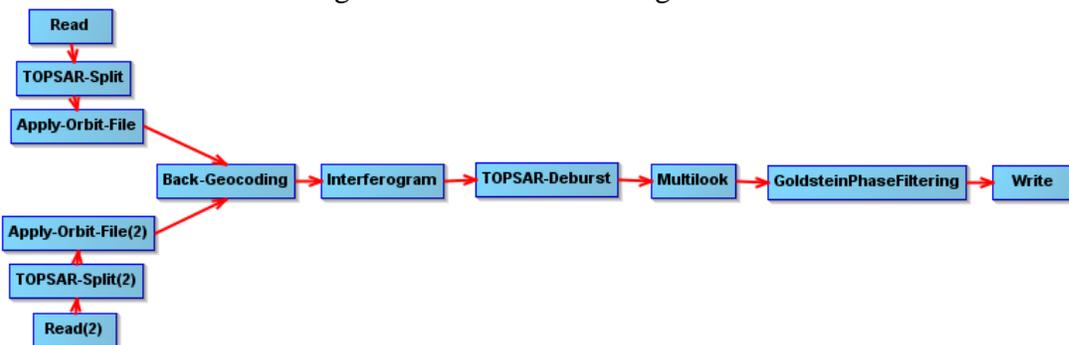
### *Metodología*

El desarrollo del trabajo se puede dividir en tres etapas: inicialmente, se realizó una revisión bibliográfica que brindó un marco teórico amplio (1). En este, sobresalen los trabajos de Fielding (*op. cit.*), Gabriel *et. al.* (*op. cit.*), Cabral *et. al.* (2011), CENAPRED (2017) y Arias (2018). Se realizó la selección y descarga de imágenes desde la página de la Agencia Espacial Europea, así como su procesamiento en el software SNAP (2). Finalmente se generó la cartografía de los resultados (3).

Se seleccionaron 13 imágenes S-1 del territorio municipal, correspondientes al periodo de abril del 2019 a abril del 2020. Cada imagen cuenta con orbita ascendente. Los pares de imágenes generados obtuvieron una coherencia superior al 80%. Los procesos realizados sobre cada par de imágenes son (Figura 22):

- Corregistro
- Interferograma y eliminación de ráfagas
- Filtrado de Goldstein
- Filtrado Multilook
- Exportación de fase para desenvolvimiento mediante algoritmo SNAPHU
- Importación de fase desenvuelta
- Aplicación de correcciones de terreno
- Exportación de imágenes a formato geotiff

Figura 5. Procesado de imágenes en SNAP



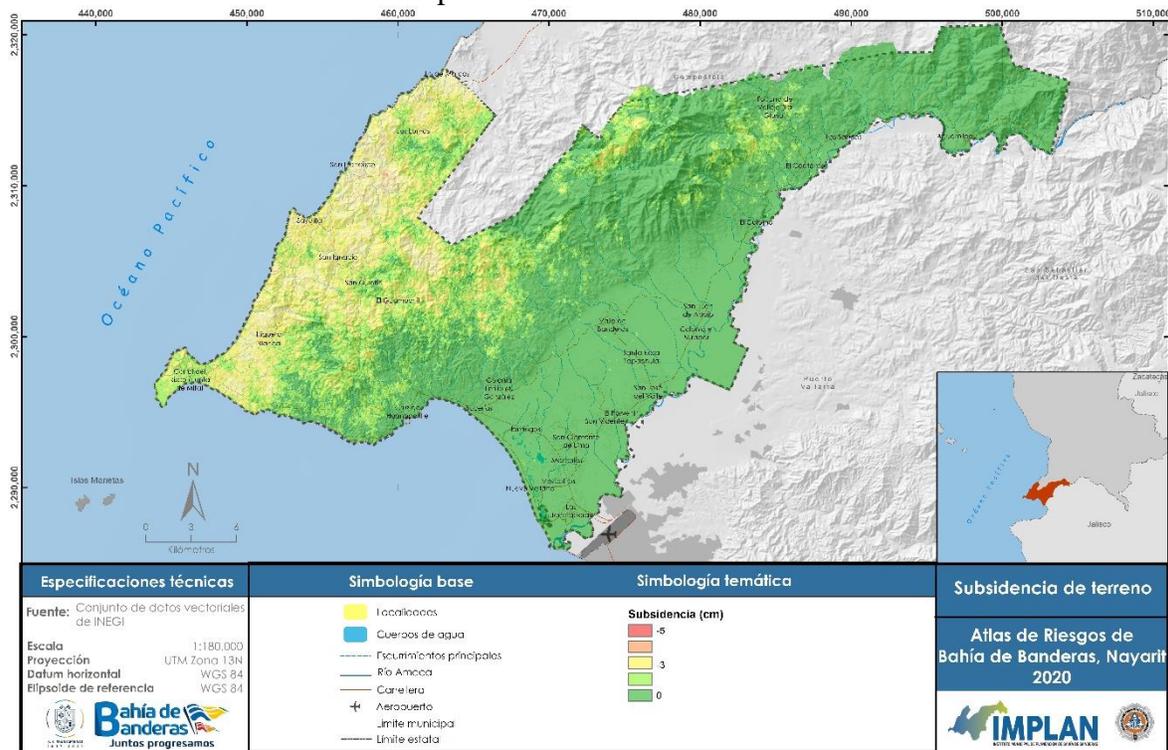
Para cuantificar el desplazamiento en la zona se realizó el proceso de imágenes por pares, para realizar el interferograma y después se midió el desplazamiento entre las dos fechas de las imágenes con la función *phase to displacement*. Con los desplazamientos medidos de cada mes se apilan las imágenes mediante la función *create stack*.

Con esto se alinean los mapas de desplazamiento y se genera un archivo que contiene los datos de todos los meses, con los cuales es posible obtener el desplazamiento acumulado.

## Resultados

Con el procesamiento de las imágenes dentro del programa SNAP y la ejecución del algoritmo SNAPHU, se obtuvieron valores de desplazamiento en la zona de estudio( Mapa 37). La mayor parte del municipio se encuentra sin la presencia de este fenómeno, pues los resultados en localidades como Mezcales, Bucerías, San Vicente o Fortuna de Vallejo se observan valores de 0. Sin embargo, hacia la costa noroeste del municipio, se obtuvo una tasa anual de hasta 3cm de subsidencia.

Mapa 37. Zonas de subsidencia



Fuente: Elaboración propia con base en Imágenes S-1 de la ESA

#### II.4.4 Agrietamientos

Por su parte, los agrietamientos () se definen como una ruptura longitudinal de las rocas o el hielo, sin desplazamiento de las porciones que se separan (Lugo, *op cit.*). El agrietamiento de la superficie del terreno es la manifestación de desplazamientos verticales y horizontales del subsuelo en un área amplia, que resultan del hundimiento regional por la extracción excesiva mediante bombeo profundo del agua subterránea. Las irregularidades del subsuelo pueden favorecer rupturas del paquete arcilloso formando grietas.

Pueden tener origen tectónico y no tectónico. Se han identificado diversos factores naturales que pueden generar agrietamientos, tales como el hundimiento natural de una cuenca lacustre, la desecación del suelo por variaciones climáticas, asociación con el fallamiento regional del basamento rocoso, heterogeneidad mecánica de la secuencia geológica, o actividad sísmica. Así mismo, entre los generadores antrópicos de agrietamientos, se han distinguido factores como la extracción de agua subterránea por encima de la capacidad de recarga de un acuífero o la extracción de materiales del subsuelo y excesivas cargas por infraestructura urbana (Carreón, *et al.*, 2006).

Desde un enfoque geomorfológico, se trata de un proceso relevante debido al riesgo que representa para la infraestructura humana y las tierras de cultivo, ya que las grietas pueden convertirse en agentes de la erosión del subsuelo. Sobresalen tres factores principales de agrietamiento (Hernández, 2007):

- Litología: El cambio de las propiedades mecánicas del suelo en la constitución arcillosa que cambian sustancialmente en los estados húmedo y seco que se manifiesta en grietas y hundimientos. Las irregularidades del subsuelo pueden favorecer rupturas de la capa arcillosa.
- Estructura geológica. Las grietas pueden ser generadas por un contacto litológico subterráneo que ante un hundimiento del material arcilloso provoca una ruptura.
- Fallas geológicas o fracturas de origen profundo. Se distingue por la formación de escarpes superficiales.

La formación de grietas suele constituirse de dos etapas o fases. La primera etapa consiste en la formación de fisuras con un ancho de 1 a 2 mm sobre las arcillas. Estas fisuras pueden crecer gradualmente y captar los escurrimientos superficiales. Una segunda etapa se produce con lluvias extraordinarias que provocan la formación repentina de grietas más anchas y la saturación del subsuelo, se forma presión que ocasiona la ruptura de la capa arcillosa en un plano vertical. La masa de tierra suele colapsar y parte de ésta es removida por el flujo de agua.

### Ilustración 5 Daño a infraestructura por agrietamiento



*Recuperado de Hernandez, 2007*

Los hundimientos y los agrietamientos pueden ocasionar daños severos a la infraestructura civil y poner en riesgo a la población, pues generan deformaciones del terreno, mismas que debilitan o incluso colapsan la estructura de elementos como vías de comunicación, edificios o casas.

Para evitar este tipo de fenómenos es relevante considerar un uso adecuado de los recursos hídricos que se encuentran acuíferos del subsuelo. El territorio de Bahía de Banderas se emplaza sobre cuatro acuíferos: Punta de Mita, Zacualpan-Las Varas, Valle de Banderas y Puerto Vallarta. De acuerdo a documentos oficiales, los primeros tres acuíferos no se encuentran sobreexplotados, sin embargo, el de Punta de Mita cuenta con una disponibilidad de agua limitada. El acuífero de Puerto Vallarta se explota por encima de su tasa de recarga, lo que podría traducirse en hundimientos superficiales.

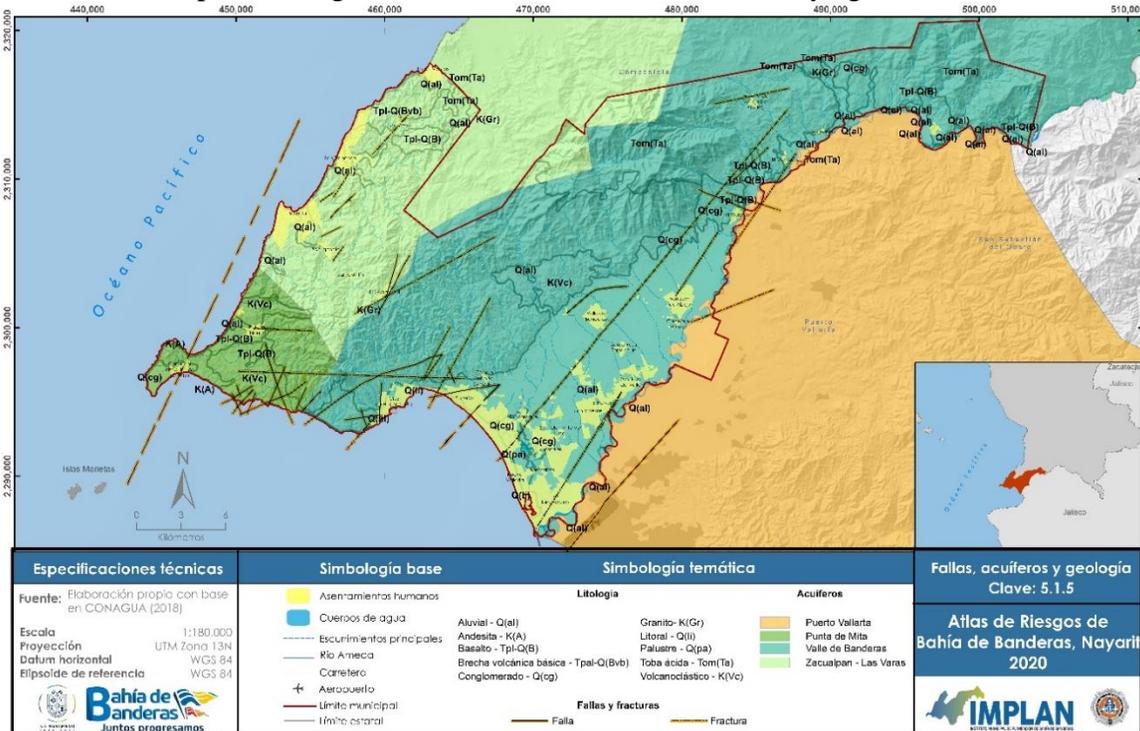
Otro elemento importante a considerar en los fenómenos de hundimiento y agrietamiento, son las estructuras tectónicas, como son las fallas y fracturas geológicas de la región. El fracturamiento, fallamiento y plegamiento son producidos por procesos de tectonismo. Este tipo de procesos ocasionan deformaciones en la corteza terrestre y, por ende, daño a la infraestructura civil.

Un pliegue es una curvatura o flexión sobre el terreno, que con frecuencia indica la forma de superficies como los planos de estratificación. Una falla es una ruptura a lo largo de la cual la roca en un lado ha sido desplazada con respecto a la roca del otro lado. Una fractura es un plano de discontinuidad de una masa rocosa o de material poco consolidado que se observa en la superficie como una línea con una abertura con un ancho de milímetros o varios decímetros (Robinson, 1990).

Las fallas y las fracturas por sí mismas no son detonadores de desastres; sin embargo, pueden acelerar los procesos que ocasionan afectaciones en la infraestructura. El conjunto de fracturas implica una debilidad de la roca o material no consolidado que favorece los deslizamientos, los derrumbes o caída de bloque y en ocasiones los flujos, que pueden afectar una zona urbana (Lundgren, 1973); por otra parte, los diaclasamientos (fisuras de dimensiones reducidas) y fracturamientos permiten un mayor intemperismo físico y químico sobre la roca.

Las fallas, dependiendo de su movimiento son pasivas o activas, las primeras prácticamente no constituyen un riesgo debido a que no presentan desplazamiento, aunque el plano de falla puede tener material poco consolidado. Las fallas activas pueden tener desde un movimiento imperceptible en términos históricos, es decir, de varios siglos, hasta otros que suceden súbitamente y que pueden romper aceras, tuberías, viviendas, surcos de cultivos, o desencadenar sismos, deslaves o derrumbes en las áreas inmediatas a la falla (Mapa 38).

Mapa 38. Rasgos físicos asociados a hundimientos y agrietamientos



Fuente: Elaboración propia con base en información de CONAGUA.

#### II.4.5 Karstificación

Un tipo de hundimiento se desarrolla a causa de un proceso conocido como karstificación. El término 'karst' es utilizado para describir un tipo de paisaje que se caracteriza por desarrollarse sobre rocas calcáreas o carbonatadas que han sido erosionadas por agua. En sentido estricto, un karst se define como un paisaje superficial y subsuperficial creado por la disolución hídrica de rocas calcáreas. La geomorfología kárstica es conocida por sus rocas esculpidas por la acción del agua, como son las depresiones cerradas (dolinas o sumideros), las cuevas y cavernas, y el flujo de agua subterránea a través de cuevas. En México se encuentra la zona kárstica de la península de Yucatán, distinguida por sus cenotes característicos (Gilli, 2015).

Las rocas calcáreas se componen por minerales con la presencia de iones de carbonato ( $\text{CO}_3^{2-}$ ). Los más comunes de estos minerales son el carbonato de calcio, el calcio y el carbonato de magnesio. El carbonato de calcio se encuentra básicamente en dos formas minerales: la calcita y el aragonito. Entre las rocas que son fácilmente solubles en agua, encontramos al yeso, a las calizas, las dolomitas o la sal (Gilli, *ibíd.*).

La karstificación está asociada a la formación de una red de drenaje subterráneo que disuelve a la estructura rocosa. El fenómeno de la disolución kárstica de rocas como calizas y yesos se da en aproximadamente el 20% del territorio nacional. Se produce por el proceso de disolución de las rocas carbonatadas. La acción química que se genera debido al ácido carbónico genera formas erosivas propias del paisaje kárstico, las cuales pueden formarse debido a colapsos y la combinación con procesos de disolución.

La presencia de karst se vincula a dos tipos de peligros, por un lado, los asociados a fallos estructurales, que se deben a la formación de hundimientos o dolinas y/o a la presencia de un relieve importante en la superficie del terreno, y por otro, el peligro de contaminación de los acuíferos kársticos. En ambos casos, el desconocimiento de los fenómenos kársticos por quienes ocupan y utilizan un terreno con estas características puede exacerbar el peligro e incrementar el riesgo (CENAPRED, 2013).

El territorio de Bahía de Banderas se conforma de una litología en la que predomina la presencia de roca ígnea intrusiva (granito, 36%), y el restante corresponde a ígnea extrusiva, en la que sobresale la presencia de toba ácida (22.5%) y otras resultantes de actividad volcánica. Así mismo, las geoformas del municipio se componen de sierra alta compleja, lomerío típico, llanura y valle. No existe presencia de elementos físicos susceptibles a la karstificación pues no se observan rocas calcáreas o solubles en agua. Debido a ello, resulta remota la posibilidad del desarrollo de fenómenos kársticos en la zona, por lo que se descarta el peligro asociado a este tipo de eventos.

## *II.5 Tsunamis*

Un tsunami es un fenómeno natural que afecta a las zonas litorales debido a la acción de las olas provocadas por movimientos en el fondo del mar, sin embargo, no es una sola ola, sino una secuencia o tren de olas. Estas olas llegan a la costa una tras otra cada 10 a 40 minutos, incluso cada hora durante un lapso de un día o más (CENAPRED, 2014; SNPC, 2016). Se producen por una dislocación súbita de una porción extensa del fondo marino que a su vez perturba a la superficie del mar, desplazando grandes volúmenes de agua varios metros por arriba de su posición de equilibrio (SEMAR, 2016).

Las causas de los tsunamis pueden ser por:

- **Sismos:** La mayor cantidad de tsunamis se genera a partir de sismos ocurridos en zonas de subsidencia entre placas tectónicas oceánicas en contacto con placas continentales (OCUC, 2011). Se puede tomar como criterio que para que un terremoto genere un tsunami, se debe producir un movimiento vertical abrupto del lecho marino, de modo que se perturbe la superficie del océano. Para esto, el sismo debe tener un epicentro en el océano a una profundidad menor a 60 kilómetros o generar una zona de ruptura que se propague bajo el lecho marino, que ocurra en una zona de hundimiento de borde de placas tectónicas, es decir, generar un desplazamiento vertical de la columna de agua y no solamente movimiento lateral, pues provoca movimientos violentos del agua, liberación de suficiente energía en un lapso de tiempo relativamente corto y que ésta se transmita eficientemente (CENAPRED, 2014f; ITIC-UNESCO, 2012; OCUC, 2011).
- **Erupciones volcánicas:** Aunque es poco frecuente, las erupciones volcánicas violentas también pueden generar perturbaciones capaces de desplazar un gran volumen de agua y generar tsunamis, principalmente en zonas próximas a la erupción. En este caso, las ondas son generadas por el desplazamiento repentino del agua a causa de la explosión volcánica o de un deslizamiento en una ladera del terreno (OCUC, 2011).
- **Deslizamientos o derrumbes:** Otra causa no tectónica de generación de tsunamis son los deslizamientos de tierra submarinos o en laderas emergidas en las cercanías de cuerpos de agua. Este tipo de tsunami suele disiparse rápidamente, sin alcanzar a provocar daños en grandes márgenes continentales. Otra posibilidad es el desprendimiento natural de bloques de hielo, tanto en superficie como bajo ella (OCUC, 2011).

Los tsunamis se clasifican en el lugar de arribo a la costa según la distancia (o el tiempo de desplazamiento) desde su lugar de origen:

- **Tsunamis regionales.** El litoral invadido está a no más de 1,000 km o a pocas horas de viaje de la zona de generación (CENAPRED, 2014). Son capaces de causar

destrucción a distancias de 1,000 km de la región de generación en un lapso de más de 2 horas de recorrido desde su origen hacia la costa (SEMAR, 2016; SNPC, 2016).

- Tsunamis locales. Surgen en el momento después del sismo, se originan a lo largo de la costa y penetran grandes distancias tierra adentro en poco tiempo (SNPC, 2016), el lugar de arribo a la costa está muy cercano o dentro de la zona de generación (delimitada por el área de dislocación del fondo marino) del maremoto; por tiempo de desplazamiento: a menos de una hora (CENAPRED, 2014). La inundación queda confinada a lo largo de la costa en el área del terremoto y a distancias de 100 km aledañas al área del terremoto (SEMAR, 2016).
- Tsunamis lejanos. También se les conoce como remotos, transpacíficos o transoceánicos. El sitio de arribo está muy alejado, en el Océano Pacífico, a más de 1,000 km de distancia de la zona de generación, aproximadamente medio día o más de viaje para llegar a las costas (CENAPRED, 2014).

La información histórica registra el arribo de 60 tsunamis a la costa occidental de México en los últimos 250 años. Los tsunamis de origen lejano han tenido olas de 2.5 m de altura y los de origen local han tenido olas de 5 m en promedio y excepcionalmente hasta 10 m de altura, causando pérdidas de vidas y bienes con la consecuente destrucción de comunidades (SEMAR, 2015).

La costa occidental de México en los estados de Nayarit, Jalisco, Colima, Michoacán, Guerrero, Oaxaca y Chiapas está expuesta al arribo de estos tsunamis de origen local, los cuales se consideran de riesgo mayor por no tener tiempo suficiente para la evacuación (CENAPRED, 2014).

El 22 de junio de 1932, un tsunami se presentó en un contexto sísmico muy activo. La cadena de sismos y tsunamis afectaron una gran extensión de las costas de Nayarit, Jalisco y Colima (Ramírez-Herrera, 2011). El sismo principal se presentó el 3 de junio de 1932, con una magnitud de 8.1 provocando un tsunami con alturas máximas de 3 m y en algunas localidades de la bahía de Manzanillo se registró una altura máxima de 10 m. El segundo sismo se presentó el 18 de junio (7.8); el tercero corresponde al sismo del 22 de junio, de 6.9, el cual produjo un tsunami que generó olas de hasta 10 m en la localidad de Cuyutlán, Colima, en la cual se reportó la muerte de aproximadamente 50 personas, cerca de 1,500 afectados y la destrucción de varios asentamientos costeros; fue este último el que afectó las costas de Nayarit (Ramírez-Herrera, 2011).

Por lo anterior, el Ayuntamiento de Bahía de Banderas y la Secretaría de Desarrollo Urbano (SEDATU) (2018), llevó a cabo el *Estudio de Análisis y Vulnerabilidad de Riesgos por Tsunamis en Bahía de Banderas*, con la finalidad de identificar las zonas de riesgo y elaborar planes de contingencia y mitigar los daños que pueden causarse por tsunamis en el municipio. Este ejercicio de aproximación se elaboró a partir de escenarios hipotéticos de acuerdo con los tsunamis observados en el país, considerando las diferentes alturas que se han presentado

a nivel mundial. Sin embargo, para un mayor acercamiento de las posibles zonas afectadas, es necesaria la implementación de herramientas de mayor detalle, ya sean batimétricas y altimétricas con una representación más precisa del relieve, tanto marino como terrestre, que ayuden a determinar el grado real de susceptibilidad.

Este instrumento se toma en consideración como un elemento más para la adecuada planeación del municipio, por las características, la información obtenida se robustece con otros análisis propios del municipio tales como el Plan Municipal de Desarrollo Urbano y Análisis del Perfil de Resiliencia.

### *Metodología*

Para la estimación de afectación por tsunamis en las costas de Bahía de Banderas fueron utilizados los siguientes insumos:

1. Punto de origen (epicentro) (Universidad Nacional Autónoma de México, 2018)
2. Ráster de batimetría (1 arcmin=1.85 km, celdas/pixel (21600 por 10800)) (NOAA, 2017)
3. Batimetría (trabajo de gabinete)
4. Línea de costa (INEGI, 2018)
5. Modelo digital de elevaciones (escala 15 m) (INEGI, 2018)

Se simuló el desplazamiento del tsunami en el océano, a través de un algoritmo adaptado a la plataforma SIG. Este algoritmo construye un árbol con raíz, partiendo del nodo fuente (epicentro) que abarca los nodos etiquetados con distancias finitas. Obteniendo como resultado donde se genera el cambio de velocidad del tsunami durante su recorrido al territorio, tomando en cuenta la pendiente. Una vez delimitado donde se genera el cambio de velocidades lo siguiente es determinar la velocidad de propagación del tsunami. Esto se realizó a través de la siguiente fórmula:

$$V = \sqrt{dg}$$

Donde  $V$  es la velocidad de propagación del Tsunami,  $d$  es la profundidad del fondo marino,  $g$  es la aceleración de gravedad. Las velocidades de propagación obtenidas se pueden observar en el (Cuadro 9).

Cuadro 9. Velocidad de propagación

Profundidad del fondo marino (m)	Velocidad de propagación (m/s)
10	9.90
100	31.32
500	70.04
1000	99.04
2000	140.07
3000	171.55
5000	221.47

Fuente: Estudio de Análisis y Vulnerabilidad de Riesgos por Tsunamis en Bahía de Banderas (2018).

Posteriormente, fue necesario el cálculo del tiempo de traslado desde el epicentro hasta la línea de costa, esto se llevó a cabo con apoyo de la fórmula:

$$I(\text{min}) = \text{longitud (m)} * 0.06 / \text{Vel (km/h)}$$

donde I (min) es el tiempo estimado en minutos.

La altura de la ola se estimó a partir de lo que establece CENAPRED en las zonas de peligro por tsunamis lejanos y locales, que, al llegar a las costas de Baja California, Sonora y Sinaloa, la ola tendría una altura máxima de 3 m; mientras que en el resto de la costa occidental puede ser hasta de 10 m. Con estos parámetros, se simuló el escenario de una ola de 10 y 6 m para un tsunami local y de una ola de 2 metros para un tsunami lejano (Cuadro 10).

Para estimar las zonas de inundación, se utilizó la metodología desarrollada por Bretschneider y Wybro en 1976, que fue expresada por Sambah y Miura (2014), la cual se expresa de la siguiente manera:

$$\text{Log}X_{\text{max}} = \text{Log}1400 + \frac{3}{4}\text{log} (Y_0/10)$$

donde  $X_{\text{max}}$  es la distancia máxima de recorrido de la ola dentro del territorio y  $Y_0$  es la altura de la ola al momento de tocar la costa. La aplicación de esta ecuación para los tres escenarios utilizados arrojó los siguientes resultados:

Cuadro 10. Distancias de recorrido de las olas

Tamaño de la Ola	Distancia de recorrido
10 metros	1,400 metros
6 metros	954 metros
2 metros	495 metros

*Fuente: Estudio de Análisis y Vulnerabilidad de Riesgos por Tsunamis en Bahía de Banderas (2018).*

Las distancias de recorrido obtenidas son aplicadas como variable junto al modelo de elevación dentro del algoritmo descrito anteriormente.

## II.5.1 Peligro

### *Resultados*

#### *Escenario 1*

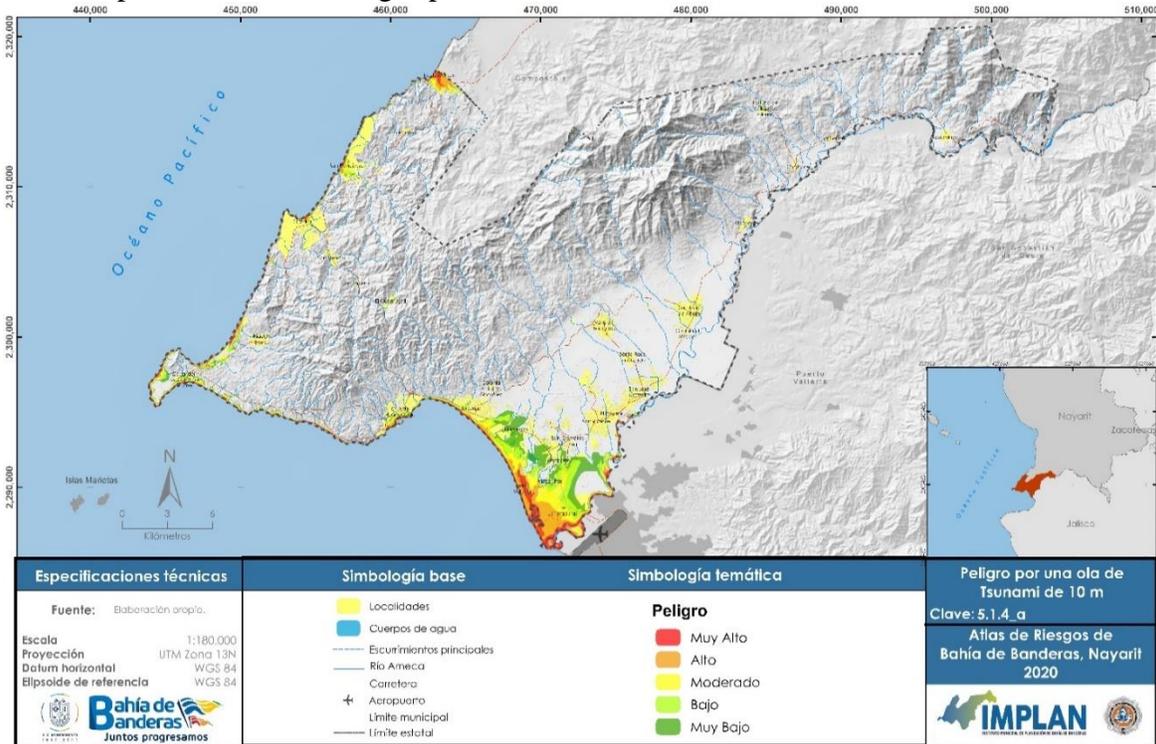
En este escenario, las localidades de mayor peligro son Punta Negra y Lo de Marcos (Cuadro 11), en este caso particular, la localidad Lo de Marcos, aunque cuenta con elevaciones, las pendientes son menores, por lo que, a causa de la acumulación de agua y el trayecto de la ola, sobrepasa las elevaciones presentes. De acuerdo con esto, se muestran en el Mapa 39, las zonas de peligro de acuerdo con la inundación que se presenta en el municipio en el caso de la ocurrencia de una ola de 10 m.

Cuadro 11. Peligro por localidad en escenario 1

Localidad	Población	Peligro
Lo de Marcos	1792	Muy Alto
Punta Negra (Carrilleros)	15	Muy Alto
Cruz De Huanacastle	3171	Alto
Bucerías	2520	Alto
Mezcales	17016	Alto
Nuevo Vallarta	1302	Alto
Las Jarretaderas	6262	Medio
San Francisco	1823	Medio
Sayulita	2262	Medio
Flamingos	431	Medio
Corral Del Risco (Punta De Mita)	2304	Medio
Litibú	13	Medio
Colonia Flores Magón	56	Medio
La Herradura	3	Medio
Olmeca [Vivero]	11	Medio
Ernesto Santana	1	Medio
Playa Los Venados	2	Bajo
La Parota	21	Bajo
Los Sauces	4	Bajo
Buenos Aires De La Esperanza	6	Bajo
El Quelele	4	Bajo
Mezcalitos	836	Muy Bajo
La Esperanza [Granja]	2	Muy Bajo
Jardín Las Reinas [Vivero]	4	Muy Bajo
Rancho Jazmín	2	Muy Bajo
Canta Ranas	3	Muy Bajo
Entrada A La Laguna El Quelele	19	Muy Bajo
El Porvenir	79	Muy Bajo

*Fuente: Estudio de Análisis y Vulnerabilidad de Riesgos por Tsunamis en Bahía de Banderas (2018)*

Mapa 39. Grado de Peligro por lo ocurrencia de una ola de tsunami de 10 metros



Fuente: Estudio de Análisis y Vulnerabilidad de Riesgos por Tsunamis en Bahía de Banderas (2018).

### Escenario 2

La localidad Lo de Marcos se considera con un peligro muy alto por las condiciones mencionadas en el escenario 1, la localidad Punta Negra, baja a peligro alto. Las zonas de peligro se muestran en la

, las zonas de mayor peligro por inundación son las marcadas en rojo y naranja las cuales se encuentran mayormente al sur del territorio municipal. El número de localidades en peligro disminuye a 19 en total, todas ellas se muestran en el (Cuadro 12) según el nivel de peligro por el impacto de una ola de 6 m.

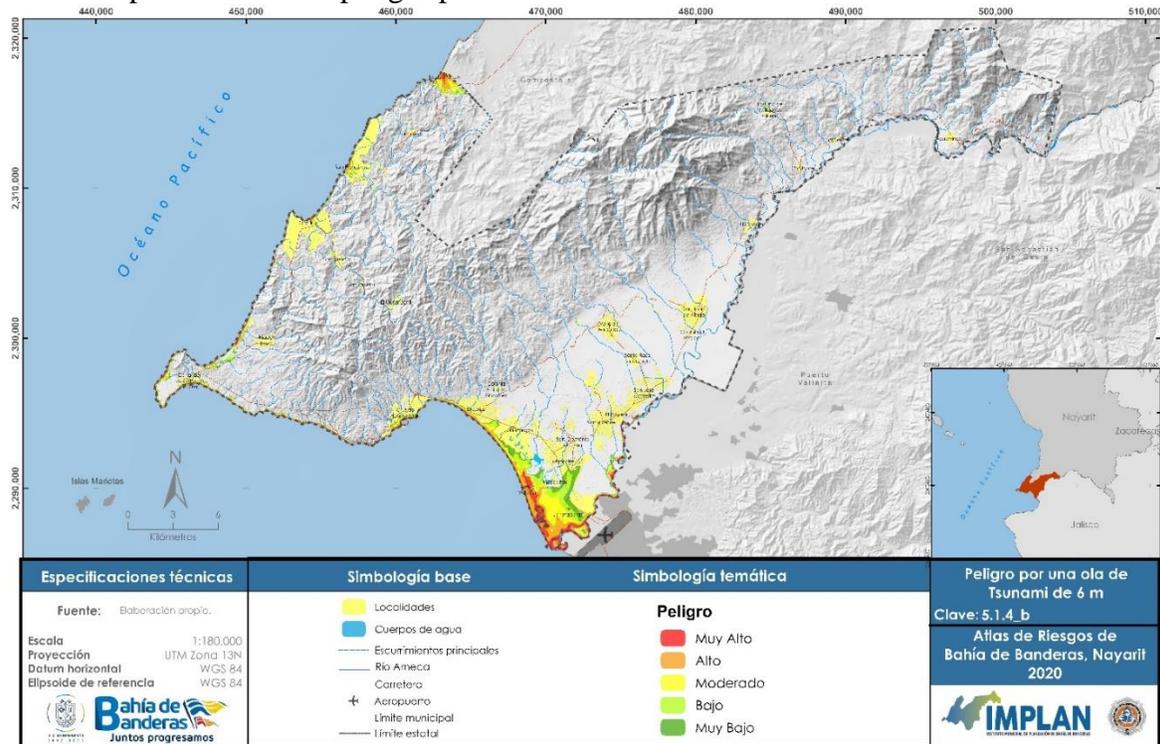
Cuadro 12. Peligro por localidad en escenario 2

Localidad	Población	Peligro
Lo de Marcos	1792	Muy Alto
Punta Negra (Carrilleros)	15	Alto
Cruz De Huanacastle	3171	Alto
Nuevo Vallarta	1302	Alto
Bucerías	2520	Alto
Mezcales	17016	Alto
Sayulita	2262	Medio
Flamingos	431	Medio
Las Jarretaderas	6262	Medio
San Francisco	1823	Medio

Litibú	13	Medio
Colonia Flores Magón	56	Medio
Corral Del Risco (Punta De Mita)	2304	Bajo
La Herradura	3	Bajo
Olmeca [Vivero]	11	Bajo
Ernesto Santana	1	Bajo
Playa Los Venados	2	Muy Bajo
Buenos Aires De La Esperanza	6	Muy Bajo
El Porvenir	79	Muy Bajo
<i>El Quelele</i>	4	Muy Bajo

Fuente: Estudio de Análisis y Vulnerabilidad de Riesgos por Tsunamis en Bahía de Banderas (2018).

Mapa 40. Grado de peligro por la ocurrencia de una ola de tsunami de 6 metros



Fuente: Estudio de Análisis y Vulnerabilidad de Riesgos por Tsunamis en Bahía de Banderas (2018).

### Escenario 3

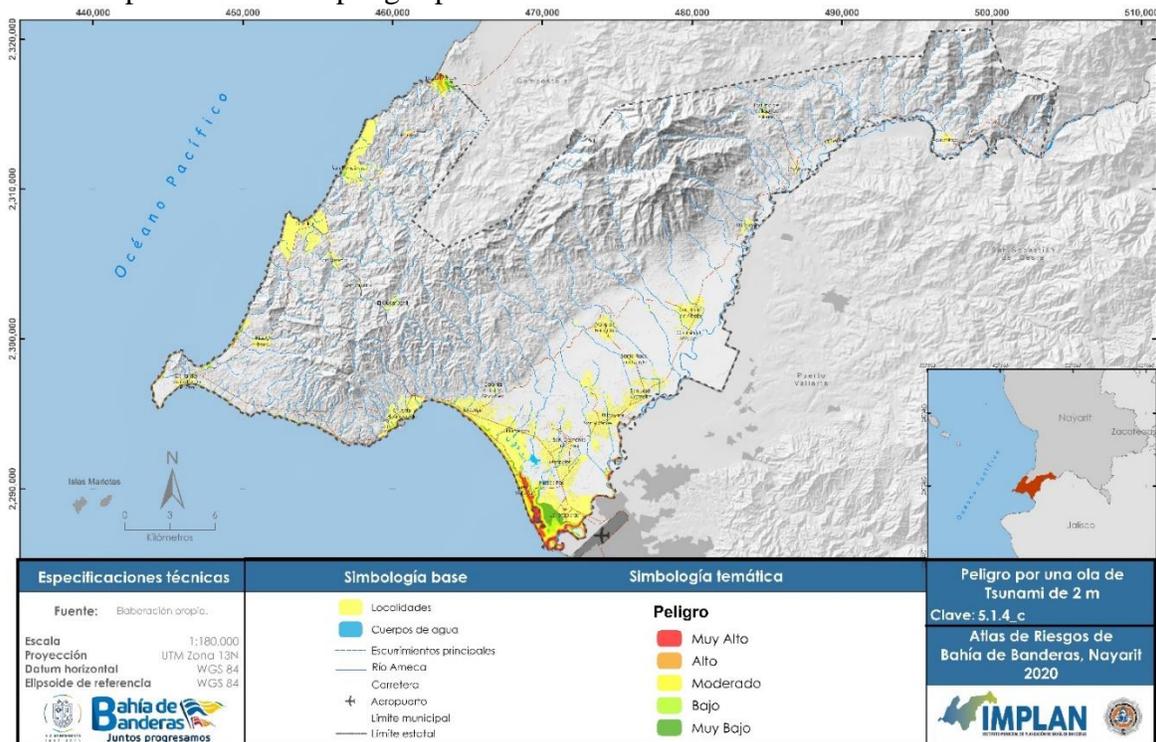
De acuerdo con el tercer escenario donde se presenta una ola de menor alcance (2 m), las localidades en peligro disminuyen a 9 en total. Las zonas de peligro se indican en el Cuadro 13. Peligro por localidad en escenario 3 y las localidades en el Cuadro 13 muestra el peligro en el que se encuentran.

Cuadro 13. Peligro por localidad en escenario 3

Localidad	Población	Peligro
Lo de Marcos	1792	Alto
Punta Negra (Carrilleros)	15	Alto
Bucerías	2520	Medio
Nuevo Vallarta	1302	Medio
Cruz De Huanacastle	3171	Bajo
Sayulita	2262	Bajo
Flamingos	431	Bajo
Las Jarretaderas	6262	Bajo
San Francisco	1823	Bajo
El Porvenir	79	Muy Bajo

Fuente: Estudio de Análisis y Vulnerabilidad de Riesgos por Tsunamis en Bahía de Banderas (2018).

Mapa 41. Grado de peligro por la ocurrencia de una ola de tsunami de 2 metros



Fuente: Estudio de Análisis y Vulnerabilidad de Riesgos por Tsunamis en Bahía de Banderas (2018).

## II.5.2 Riesgo

Como se mencionó anteriormente, el riesgo es el resultado de la interacción del peligro y la vulnerabilidad ante un fenómeno natural. Esta interacción determina la generación de daños o pérdidas en ciertos sectores de la sociedad. Por lo tanto, se muestran los diferentes escenarios de riesgo ante una ola de Tsunami a diferentes alturas.

### *Metodología para modelación de Tsunamis*

Para la estimación de afectación por tsunamis en las costas de Bahía de Banderas fueron utilizados los siguientes insumos:

1. Punto de origen (epicentro) (Universidad Nacional Autonoma de México, 2018)
2. Ráster de batimetría (1 arcmin=1.85 km, celdas/pixel (21600 por 10800)) (NOAA, 2017)
3. Batimetría (trabajo de gabinete)
4. Línea de costa (INEGI, 2018)
5. Modelo digital de elevaciones (escala 15m) (INEGI, 2018)

Se simuló el desplazamiento del tsunami en el océano, a través de un algoritmo adaptado a la plataforma SIG. Este algoritmo construye un árbol con raíz, partiendo del nodo fuente (epicentro) que abarca los todos etiquetados con distancias finitas. Obteniendo como resultado donde se genera el cambio de velocidad del tsunami durante su recorrido al territorio, tomando en cuenta la pendiente. Una vez delimitado donde se genera el cambio de velocidades lo siguiente es determinar la velocidad de propagación del tsunami. Esto se realizó a través de la siguiente formula:

$$V=\sqrt{dg}.$$

Donde V es la velocidad de propagación del Tsunami, d es la profundidad del fondo marino, g es la aceleración de gravedad. Las velocidades de propagación obtenidas se pueden observar en el (Cuadro 14)

Cuadro 14. Velocidad de propagación

Profundidad del fondo marino (m)	Velocidad de propagación (m/s)
10	9.90
100	31.32
500	70.04
1000	99.04
2000	140.07
3000	171.55
5000	221.47

*Fuente: Estudio de Análisis y Vulnerabilidad de Riesgos por Tsunamis en Bahía de Banderas*

Posteriormente, fue necesario el cálculo del tiempo de traslado desde el epicentro hasta la línea de costa, esto se llevó a cabo con apoyo de la fórmula:

$$I(\text{min}) = \text{longitud (m)} * 0.06 / \text{Vel (km/h)}$$

dónde: I (min) es el tiempo estimado en minutos.

La altura de la ola se estimó a partir de lo que establece CENAPRED en las zonas de peligro por tsunamis lejanos y locales, que, al llegar a las costas de Baja California, Sonora y Sinaloa, la ola tendría una altura máxima de 3 m; mientras que en el resto de la costa occidental puede ser hasta de 10 m. Con estos parámetros, se simuló el escenario de una ola de 10 y 6 m para un tsunami local y de una ola de 2.5 metros para un tsunami lejano (Cuadro 15).

Para estimar las zonas de inundación, se utilizó la metodología desarrollada por Bretschneider y Wybro en 1976, que fue expresada por Sambah y Miura (2014), la cual se expresa de la siguiente manera:

$$\text{Log}X_{\text{max}} = \text{Log}1400 + \frac{3}{4}\text{log}(Y_o/10)$$

Dónde:

$X_{\text{max}}$ : es la distancia máxima de recorrido de la ola dentro del territorio.

$Y_o$ : es la altura de la ola al momento de tocar la costa. La aplicación de esta ecuación para los tres escenarios utilizados arrojó los siguientes resultados:

Cuadro 15. Distancias de recorrido de las olas

Tamaño de la Ola	Distancia de recorrido
10 metros	1,400 metros
6 metros	954 metros
2.5 metros	495 metros

Fuente: Estudio de Análisis y Vulnerabilidad de Riesgos por Tsunamis en Bahía de Banderas

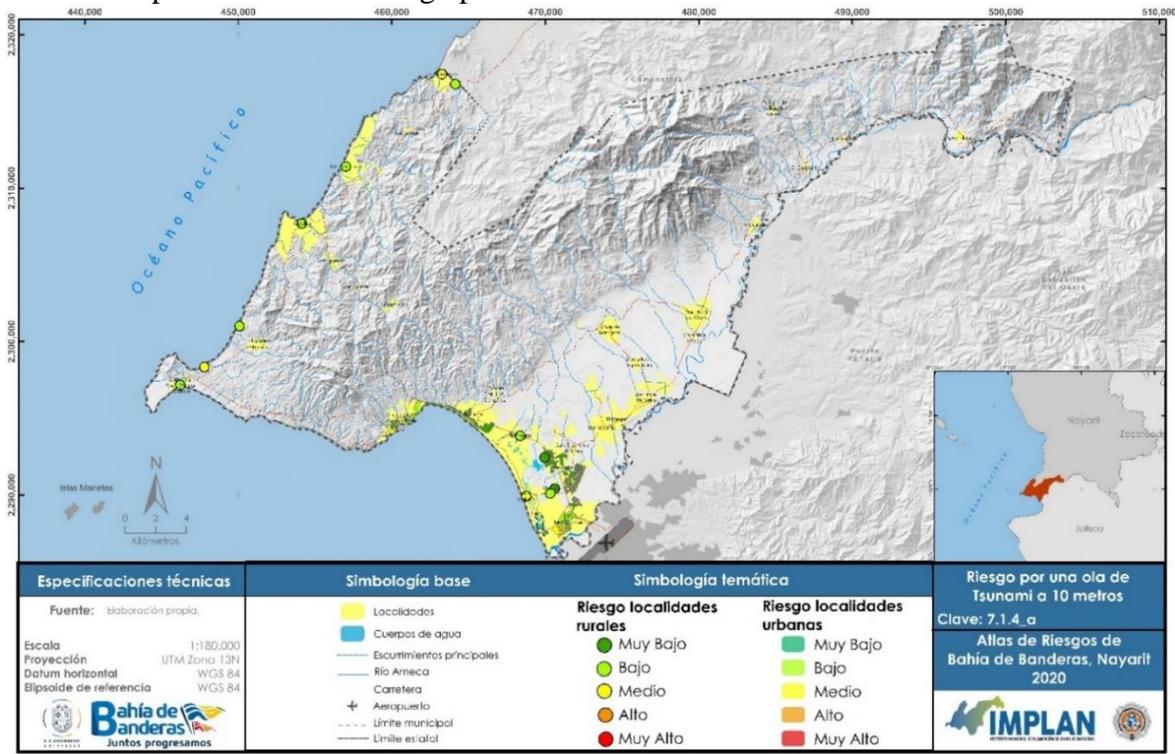
Las distancias de recorrido obtenidas son aplicadas como variable junto al modelo de elevación dentro del algoritmo descrito anteriormente.

#### II.5.2.1 Escenario 1 de riesgo ante una ola de Tsunami de 10 m

Para el escenario 1 con una ola de 10 m, el riesgo resultó en 3 categorías: muy bajo, bajo y medio; aunque la vulnerabilidad física del municipio si tiene grados altos y muy alto, la vulnerabilidad social se encuentra clasificada en muy bajo y bajo, gracias a la buena preparación del municipio.

Los riesgos estimados para este escenario son bajos, el mayor de los presentados (riesgo moderado), corresponde a Punta Negra, Nuevo Vallarta y Lo de Marcos, estas dos últimas debido al grado de peligro al que están expuestas (Mapa 42).

Mapa 42. Grado de Riesgo por la ocurrencia de una ola de Tsunami de 10m

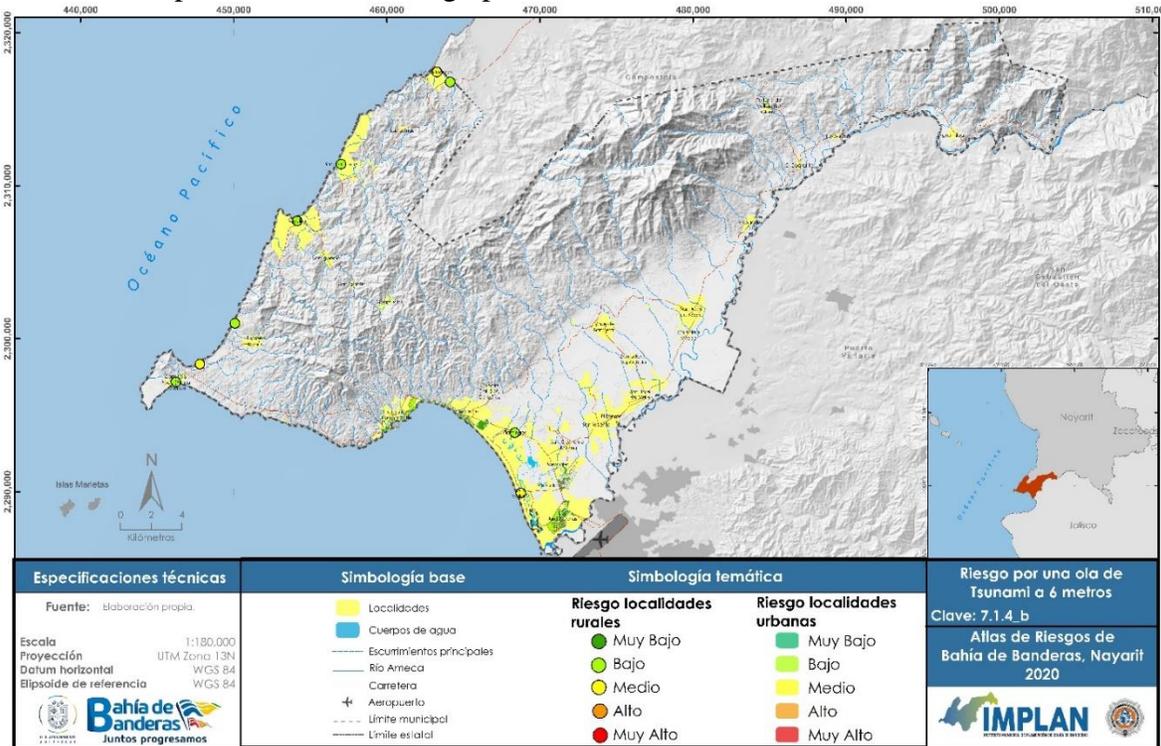


Fuente: Elaboración propia del Instituto Municipal de Planeación

### II.5.2.2 Escenario 2 de riesgo ante una ola de Tsunami de 6 m

En las trazas urbanas como localidades rurales el riesgo se sigue manteniendo en solo 2 categorías: bajo y medio; el comportamiento de los riesgos en el municipio es parecido que, en el escenario anterior, los de riesgo más alto (riesgo moderado), vuelven a ser Punta Negra, Lo de Marcos y Nuevo Vallarta. En la siguiente Mapa 43, se muestran localidades rurales y urbanas con los riesgos respectivos al que están expuestas.

Mapa 43. Grado de Riesgo por la ocurrencia de una ola de Tsunami 6m

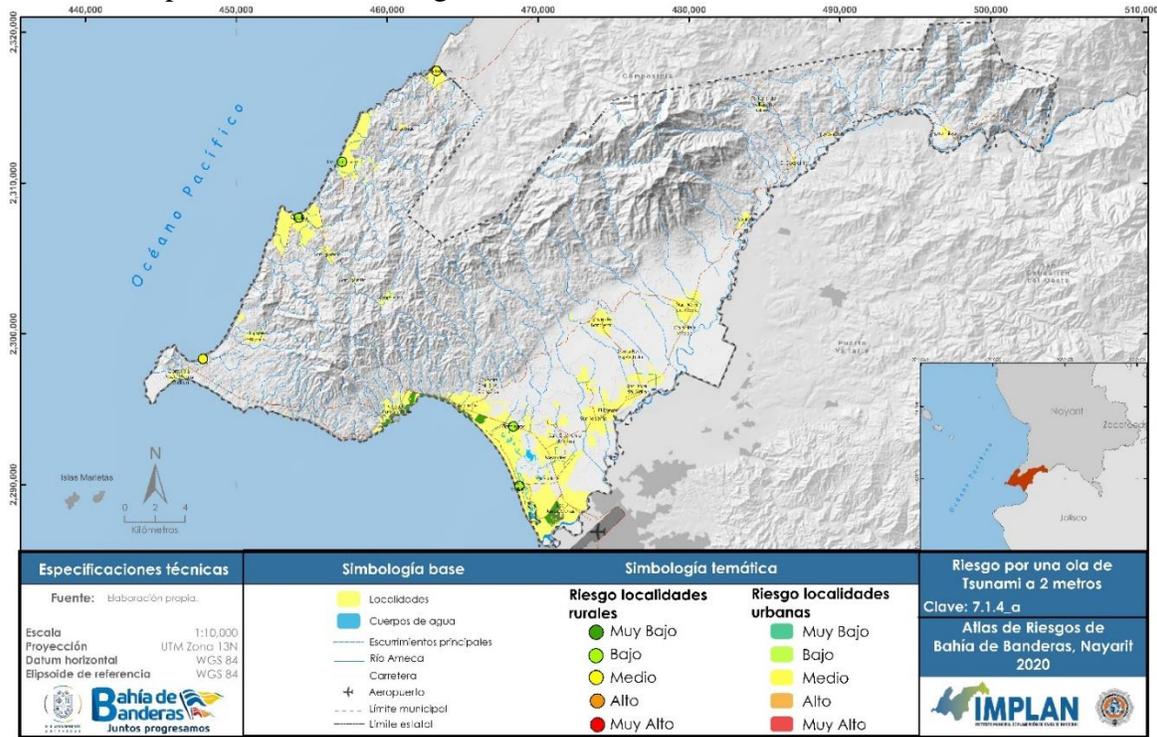


Fuente: Elaboración propia del Instituto Municipal de Planeación

### II.5.2.3 Escenario 3 de riesgo ante una ola de Tsunami de 2 m

Para el escenario 3, las localidades rurales y urbanas siguen manteniéndose con riesgos bajo y medio; el comportamiento de los riesgos es parecido, sin embargo, para este escenario el número de localidades en riesgo disminuye, sobre todo, en las localidades rurales. Las localidades bajo riesgo solo son 6. Para este escenario el riesgo en Nuevo Vallarta disminuye a bajo al igual que el resto de las localidades (Mapa 44).

Mapa 44. Grado de Riesgo ante la ocurrencia de una ola de Tsunami 2m



Fuente: Elaboración propia del Instituto Municipal de Planeación

## Literatura citada

- Agua, C. N. (01 de diciembre de 2016). Atlas del agua en México (regiones hidrológicas). Obtenido de <https://agua.org.mx/biblioteca/atlas-del-agua-en-mexico-2015-regiones-hidrologicas/>
- Ambiental, F. p. (2018). Agua.org.mx. Recuperado de <https://agua.org.mx/categoria/infraestructura-hidraulica/>
- ARN. (2012). Atlas de riesgos Naturales del municipio de Bahía de Banderas. Nayarit.
- Caballero, C. (2017). Sedimentología y Estratigrafía Sedimentología y Estratigrafía. (F. d. Tierra, Editor) Recuperado de Geofísica UNAM: <http://usuarios.geofisica.unam.mx/cecilia/CT-SeEs/12RsVolcanoclast4X.pdf>
- CENAPRED (2006). Conceptos básicos sobre peligros, riesgos y su representación geográfica (1 ed.). México.
- Comisión Federal de Electricidad. (CFE). (2019). Recuperado de <https://www.cfe.mx/inversionistas/InformacionJuridica/Pages/Manuales.aspx>.
- Comisión Nacional de Agua. (CONAGUA). (2015). Actualización de la disponibilidad media anual en el acuífero valle de banderas. México.
- Comisión Nacional de Agua. (CONAGUA). (2015). Actualización de la disponibilidad media anual del agua en el acuífero de Punta de Mita. Nayarit: publicada en el Diario Oficial de la federación.
- Comisión Nacional de Agua. (CONAGUA). (2018). Estadística del Agua en México. México.
- Comisión Nacional de Agua. (CONAGUA). (2015). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Zacualpan - las Varas. México.
- Comisión Nacional de Agua. (CONAGUA). (2015). Actualización de la disponibilidad media anual del agua en el acuífero puerto Vallarta. México.
- Comisión Nacional de Agua. (CONAGUA). (2018). Estadísticas del Agua en México. Recuperado de [http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM\\_2018.pdf](http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2018.pdf)
- Comisión Nacional de Agua. (CONAGUA). (2015). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Zacualpan Las Varas. Nayarit, México.
- CONAGUA-INEGI-INE. (2017). Delimitación de las Cuencas Hidrográficas. México: Priego A.G.

- Diario Oficial de la Federación (DOF), (2016). ACUERDO por el que se emite la guía de contenido mínimo para la elaboración del Atlas Nacional de Riesgos. México: Gobierno Constitucional Tomo DCCLIX No. 15.
- Enriqueta, G. E. (2004). Modificación al sistema de clasificación climática de Köppen. Instituto de Geografía, UNAM, México.
- García, O., Ramírez, H., Alcalá, J., Meulenert, A. y García, M. (2007). Climatología de las tormentas eléctricas locales severos (TELS) en la Zona Metropolitana de Guadalajara. Boletín del Instituto de Geografía. Investigaciones Geográficas: UNAM, México. pp. 7-16.
- GSR. (2019). Gerencia de Aguas Superficiales e Ingeniera de Rios (GASIR). CIUDAD DE MEXICO.
- Guillén, J. (2006). Geología de la zona litoral. (I. d. Mar, Ed.) Ciencias del Mar. Recuperado de <https://gma.icm.csic.es/sites/default/files/pdf/Geologia-del-litoral.pdf>
- Ibáñez, J. J., & Manríquez C, F. J. (28 de feb de 2012). Un Universo invisible bajo nuestros pies: los suelos y la vida. Obtenido de Fundación para el conocimiento Madrid: <http://www.madrimasd.org/blogs/universo/2012/02/28/141085>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (1998). Diccionario de Datos Geológicos Escala 1:250 000. Recuperado de [http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/recnat/geologia/doc/dd\\_contnaceol\\_250k.pdf](http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/recnat/geologia/doc/dd_contnaceol_250k.pdf)
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2000). Síntesis de Información geográfica del estado de Nayarit. Recuperado el 08 de 08 de 2018, de [http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod\\_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/historicos/2104/702825223458/702825223458\\_3.pdf](http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/historicos/2104/702825223458/702825223458_3.pdf)
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2001). Diccionario de Datos Fisiográficos (Vectorial) Escala 1:1 000 000. Recuperado el 07 de 08 de 2018, de Instituto Nacional de Estadística y Geografía: [http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/Productos/prod\\_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/historicos/2104/702825223892/702825223892\\_1.pdf](http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/Productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/historicos/2104/702825223892/702825223892_1.pdf)
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2008). Características edafológicas, fisiográficas, climáticas e hidrográficas de México. Recuperado el 08 de 08 de 2018, de [http://www.inegi.org.mx/inegi/spc/doc/INTERNET/1-GEOGRAFIADEMEXICO/MANUAL\\_CARAC\\_EDA\\_FIS\\_VS\\_ENERO\\_29\\_2008.pdf](http://www.inegi.org.mx/inegi/spc/doc/INTERNET/1-GEOGRAFIADEMEXICO/MANUAL_CARAC_EDA_FIS_VS_ENERO_29_2008.pdf)
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2010). Censo de Población y Vivienda. México: INEGI.
- (2015). Encuesta Intercensal 2015. México: INEGI.

- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2017). Anuario estadístico y geográfico de Nayarit 2017.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2018). Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM). Recuperado el 2018, de: <http://www.beta.inegi.org.mx/app/geo2/elevacionesmex/>
- Instituto Promotor de Vivienda de Nayarit (IPROVINAY). (2014). Programa Estatal de Vivienda, Desarrollo Urbano y Ordenamiento Territorial 2011-2017. Sumario Periódico oficial del Estado de Nayarit, pág. 197. Recuperado de [https://www.nayarit.gob.mx/transparenciafiscal/des/3\\_marco\\_programatico\\_presupuestal/programa\\_vivienda\\_desurb\\_2011-2017.pdf](https://www.nayarit.gob.mx/transparenciafiscal/des/3_marco_programatico_presupuestal/programa_vivienda_desurb_2011-2017.pdf)
- Jin Ciao, M. M. (2015). Matriz de Transición del Trafico en Redes Urbanas Basada en el Estado de Estacionamiento. Investigación de transporte Procedia, 149 -169.
- Management, N. M. (2017). Atlas de Expansión Urbana Colombia. Recuperado de: [http://atlasexpansionurbanacolombia.org/file-manager/userfiles/data\\_page/Methodology/WEB\\_Como\\_Comprender\\_y\\_Medir\\_la\\_Expansion\\_Urbana.pdf](http://atlasexpansionurbanacolombia.org/file-manager/userfiles/data_page/Methodology/WEB_Como_Comprender_y_Medir_la_Expansion_Urbana.pdf).
- Mostafa, T., Abd el-aziz Khairy, A. -A., & Gad- Elkareem, A. (2016). Ambient noise for determination of site dynamic properties At Hurghada and Safaga cities, Red sea, Egypt. Acta Geodyn. Geomater, 13., 227-240.
- Murcia, H. F. (2013). Depósitos volcanoclásticos: términos y conceptos para una clasificación en español. (U. d. Rica, Ed.) Revista Geológica de América Central. Recuperado de <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/geologica/article/viewFile/12211/11488>
- Nakamura, Y. (1989). A Method for Dynamic Characteristics Estimation of Subsurface using Microtremor on the Ground Surface. Quaterly Report of Railway Tech Res Institute, 30, 23-33.
- National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). (2017). Grid Extract. Recuperado el 2018, de National Oceanic and Atmospheric Administration:
- Nelson, S. (1986) Geología del volcán Ceboruco, Nayarit, con una estimación de riesgos de erupciones futuras. *Revista del Instituto de Geología*, vol 6, núm. 2, p. 243.258. UNAM.
- Puchet Anyul, C., & Bolaños, S. (2013). Las plagas agrícolas, una historia interminable. Recuperado de: [http://www.comoves.unam.mx/assets/revista/176/guiadelmaestro\\_176.pdf](http://www.comoves.unam.mx/assets/revista/176/guiadelmaestro_176.pdf)

- Ramírez-Herrera, M. (2011). Evidencias ambientales de cambios de nivel de la costa del Pacífico de México: terremotos y tsunamis. *Revista de Geografía Norte Grande* (49), 99-124.
- Ruiz Jaimes, E. (2016). CONTROL DE PLAGAS, UN RETO PARA MÉXICO Y EL MUNDO. Recuperado de: <http://www.comunicacion.amc.edu.mx/comunicados/control-de-plagas-un-reto-para-mexico-y-el-mundo>
- SEDESOL. (2010). Diagnóstico nacional de los asentamientos humanos ante el riesgo de desastres. Obtenido de [http://www.sedesol.gob.mx/work/models/SEDESOL/Sedesol/sppe/dgap/diagnostico/Diagnostico\\_PRAH.pdf](http://www.sedesol.gob.mx/work/models/SEDESOL/Sedesol/sppe/dgap/diagnostico/Diagnostico_PRAH.pdf)
- Secretaría de Gobernación. (SEGOB). (2016). Diario Oficial de la Federación. Recuperado de ACUERDO por el que se da a conocer el resultado de los estudios técnicos de las aguas nacionales subterráneas del acuífero Valle de Banderas, clave 1807, en el Estado de Nayarit, Región Hidrológico-Administrativa Lerma-Santiago-Pacífico.: [http://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5455511&fecha=04/10/2016](http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5455511&fecha=04/10/2016)
- Unión., C. d. (2018). LEY GENERAL DE CULTURA FÍSICA Y DEPORTE. Ciudad de México: Diario Oficial de la Federación.
- Universidad Nacional Autónoma de México. (2018). Epicentros. Recuperado el 2018, de Servicio Sismológico Nacional: <http://www2.ssn.unam.mx:8080/catalogo/>
- Vargas, J. R., & Castañeda, A. R. (2005). Morfología de la ciudad y movilidad interurbana: Guadalajara al borde de la parálisis. Scripta Nova.
- Sambah, A. B., & Miura, F. (2014). Integration of Spatial Analysis for Tsunami Inundation and Impact Assessment. *Journal of Geographic Information System*, 6, 11–22. <https://doi.org/10.4236/jgis.2014.61002>



H. X AYUNTAMIENTO  
2017 - 2021

**Bahía de Banderas**   
Juntos progresamos