



Universidad Autónoma del Estado de México
Facultad de Química



Doctorado en Ciencias Ambientales

*Deslizamientos en México: factores detonantes e impacto
social*

Tesis doctoral que presenta la

**Mtra. Srahyrlandy Rocío Díaz
Sánchez**

Para obtener el título de:

Doctora en Ciencias Ambientales

Tutor académico:
Dr. Salvador Adame

Tutor adjunto
Dr. Edel Cadena Vargas

Diciembre 2021

Índice de contenido

Resumen	9
Introducción	10
Planteamiento del problema	12
Justificación	15
Objetivos	17
Objetivo general	17
Objetivos específicos	17
Hipótesis	17
Capítulo 1. Marco teórico o conceptual	18
1.1 Los riesgos de desastres desde el enfoque sistémico	18
1.2 Corrientes epistemológicas en el estudio de riesgos	22
1.3 El concepto de riesgo y sus factores	27
1.3.1 Amenaza	28
1.3.2 Vulnerabilidad	29
1.3.3 Riesgo de desastres	30
1.4 Los deslizamientos y su clasificación	38
1.5 Precipitaciones como factor detonante de deslizamientos	42
1.6 Concepto de Radar y Radar de Apertura Sintética SAR	43
Capítulo 2. Marco de referencia	49
2.1 Antecedentes a nivel internacional	49
2.2 Antecedentes a nivel nacional	51
2.3 Antecedentes en SAR y desarrollo de técnicas de interferometría	53
Capítulo 3. Materiales y métodos	56
3.1 Historicidad de deslizamientos nacional y estimación de su impacto	57
3.2 Recopilación de información	57

3.3 Estandarización de datos y construcción del inventario	59
3.4 Estimación de población afectada	59
3.5 Selección de zona de estudio	61
3.6 Modelación de zonas de deslizamiento	61
3.6.1 Imágenes satelitales de radar	63
3.6.2 Método de Small Baselines Subset – SBAS	65
3.6.3 Análisis de factores detonantes de deslizamientos	67
Capítulo 4. Resultados	70
4.1 Historicidad de deslizamientos en México	71
4.2 Factores detonantes de deslizamientos	77
4.3 Impacto social de los deslizamientos	71
4.4 Modelación de deslizamientos a escala detallada	84
4.4.1 Factores detonantes	86
4.4.2 Modelación de deslizamientos usando Interferometría.	88
4.4.2.1 Adquisición de imágenes de radar	88
4.4.2.2 Procesamiento interferométrico	92
4.4.2.3 Identificación de deslizamientos	99
Conclusiones	108
Bibliografía	113
Anexos	125

Índice de figuras

Figura 1. Organización del geosistema	19
Figura 2. Ejemplificación de diferencias entre sistemas dinámicos estables e inestables a. Sistema estable b. sistema inestable	21
Figura 3. Tritanio de la relación sociedad-naturaleza-riesgo	33
Figura 4. Esquema de la relación sociedad-naturaleza-riesgo-desastre	34
Figura 5. Esquematación de los posibles tipos de daños y efectos a tener en cuenta ante la cuantificación del riesgo.	38
Figura 6. Interacción de elementos para la generación de deslizamientos	41
Figura 7. Longitudes de onda	45
Figura 8. Funcionamiento del sistema de Apertura Sintética de Radar SAR.	46
Figura 9. Procedimiento para la generación de mapas de velocidad partir del procesamiento de las fases de imágenes de radar y combinación de interferogramas	47
Figura 10. Modelación y localización de desplazamientos verticales en Haití usando interferometría	63
Figura 11. Visualización de imagen Sentinel 1A con cobertura en Motozintla	65
Figura 12. Flujo de proceso para modelación de deslizamientos aplicando el método SBAS	67
Figura 13. Esquema metodológico.	69
Figura 14. Ocurrencia de deslizamientos a nivel mundial	72
Figura 15. Tipos de movimientos en masa ocurridos en México 1905-2017	73
Figura 16. Distribución temporal de deslizamientos en México	74
Figura 17. Áreas con mayor concentración de deslizamientos a nivel nacional	75
Figura 18. Distribución espacial de deslizamientos en México para el periodo 1905-2017 y altitud	76
Figura 19. Factores detonantes de deslizamientos en México	78
Figura 20. Deslizamientos por nivel de marginación a nivel nacional	85
Figura 21. Localización del área de estudio para modelación de deslizamientos	86
Figura 22. Sismos ocurridos en México con magnitud mayor a 8.0	87
Figura 23. Visualización de la imagen en la órbita descendente y el burst donde se ubica el área de estudio.	90
Figura 24. Visualización de la imagen en la órbita descendente y el burst donde se ubica el área de estudio.	90
Figura 25. Despliegue de imágenes tipo radar y extracción de burst para área de estudio	90
Figura 26. Grafo de conexiones órbita descendente con $B_{temp} = 65$ días	91
Figura 27. Grafo de conexión órbita ascendente con $B_{temp} = 60$ día	91
Figura 28. Der. Interferograma en órbita ascendente del par 2017/11/03 - 2017/11/21 en el burst IW3. Izq. Resolución de fase en área de estudio	93

Figura 29. Der. Interferograma en órbita ascendente del par 2017/11/03-2017/11/15 Izq. Resolución de fase en área de estudio	93
Figura 30. Der. Interferograma en órbita ascendente del par 2017/10/04 -2017/10/10. Izq. Resolución de fase en área de estudio	94
Figura 31. Der. Interferograma en órbita ascendente del par 2017/09/28 –2017/10/4 Izq. Resolución de fase en área de estudio	94
Figura 32. Der. Interferograma en órbita descendente del par 2017/09/26 –2017/10/08 Izq. Resolución de fase en área de estudio	95
Figura 33. Der. Interferograma en órbita descendente del par 2017/10/20 –2017/11/01 Izq. Resolución de fase en área de estudio	95
Figura 34. Der. Interferograma en órbita descendente del par 2017/11/01 –2017/11/13 Izq. Resolución de fase en área de estudio	95
Figura 35. Der. Interferograma en órbita descendente del par 2017/11/01 –2017/11/25 Izq. Resolución de fase en área de estudio	96
Figura 36. Der. Interferograma en órbita descendente del par 2017/11/13 –2017/11/25 Izq. Resolución de fase en área de estudio	96
Figura 37. Ejemplo de validación de interferogramas con imágenes de coherencia	97
Figura 38. Velocidad de desplazamientos de terreno en la órbita ascendente	98
Figura 39. Velocidad de desplazamientos de terreno en la órbita descendente	99
Figura 40. Identificación de deslizamientos en Motozintla a partir de la coherencia de pares interferométricos con imágenes SAR en órbita descendente antes y después del sismo	101
Figura 41. Identificación de deslizamientos en Motozintla a partir de la coherencia de pares interferométricos con imágenes SAR en órbita ascendente antes y después del sismo	103
Figura 42. Deslizamientos en Motozintla en órbita ascendente y descendente	105
Figura 43. Velocidades de desplazamientos de terreno en órbita descendente	106
Figura 44. Velocidades de desplazamiento del terreno en órbita ascendente	107

Indice de tablas

Tabla 1. Corrientes de pensamiento en estudios ambientales y de riesgo	25
Tabla 1. Conceptos de vulnerabilidad	29
Tabla 3. Categorización de movimientos de terreno	38
Tabla 4. Movimientos en masa y su relación con la precipitación	42
Tabla 5. Modo de adquisición de imágenes en satélite SENTINEL 1 (ESA)	64
Tabla 6. Numero de deslizamientos por Estado en México para el periodo 1910-2017	77
Tabla 7. Municipios con más de diez deslizamientos en México 1910-2017	77
Tabla 8. Eventos más impactantes reportados en México	78
Tabla 9. Población afectada estimada para el año 2017 en los Estados de México	81
Tabla 10. Municipios con mayor población afectada estimada para el año 2017	81
Tabla 11. Top ten de pérdidas de vidas humanas y tasa de decesos por cada 10.000 habitantes a nivel municipal	84
Tabla 12. Imágenes Sentinel adquiridas para el área de estudio	88

Resumen

En esta investigación se presenta una propuesta metodológica para la identificación detallada de zonas de deslizamientos, como herramienta para el análisis del medio físico, actuación rápida frente a emergencias y toma de decisiones con respecto a la implementación de medidas preventivas por parte de entidades gubernamentales y de protección civil.

El presente proyecto de investigación se centra en la aplicación de métodos de observación de la tierra con sensores remotos, entre los que se destaca el procesamiento y análisis de procesamiento de imágenes satelitales de Radar de Apertura Sintética SAR, usando combinación de técnicas interferométría para identificar y modelar deformaciones de terreno. Así mismo se incorpora el análisis de factores generadores de riesgo y variables ambientales (precipitaciones, suelo, litología) que permitan dimensionar su nivel de incidencia en la generación de peligros de deslizamiento.

Se propone desarrollar la metodología mediante las siguientes fases: a) recopilación de registros de eventos históricos de deslizamientos a nivel nacional y estimaciones de impacto social para la selección de área de estudio b) aplicación de la técnica de teledetección para la interpretación de imágenes de satélite en zona de estudio, c) estimación de umbrales de precipitaciones necesarias para generar un evento y d) modelamiento y representación espacial usando Sistemas de Información Geográfica SIG, con el fin de generar productos cartográficos detallados, de fácil interpretación y uso en la toma de decisiones.

Cabe mencionar que si bien, se propone aplicar la metodología en una zona específica con el fin de probarla, esta podrá ser replicada en cualquier ambiente que cumpla con las mismas condiciones propicias para la generación de movimientos de terreno.

Introducción

La naturaleza se caracteriza por su dinamismo y cambios a lo largo del tiempo, a su vez interactúa constantemente con el ser humano, este es un agente de cambio, ya que incide directamente en sus transformaciones e incluso las acelera. La relación hombre-naturaleza se mira con preocupación, ya que en las últimas décadas han sido evidentes los impactos del ser humano en su medio y los desequilibrios ambientales que sufre el planeta, un ejemplo claro de ello son los desastres.

Los ecosistemas y biosfera están en riesgo de colapsar ya que enfrentan crecientes amenazas con un aumento de vulnerabilidades que, sin duda, potencian el riesgo (UNISDR, 2022), el planeta se encuentra sometido a presiones ambientales donde la intervención antrópica de los espacios juega un papel determinante, de tal manera que; el estudio del riesgo de desastres y de los fenómenos naturales o socionaturales es imperante y fundamental para el desarrollo sostenible de una sociedad, ya que aborda problemas ambientales en el territorio y las condiciones que dan lugar a su materialización.

La presente investigación aborda uno de los fenómenos que causan miles de víctimas e impactos socioeconómicos sustanciales en todo el mundo cada año, como lo son los deslizamientos (Froude y Petley, 2018). En México este es uno de los fenómenos con mayor probabilidad de ocurrencia debido a las características físicas de algunos Estados.

Esta investigación corresponde al análisis espacio-temporal de ocurrencia e impacto social a nivel nacional, así como modelamiento de deslizamientos y la relación con sus factores detonantes a través de la aplicación de la técnica de Interferometría con el uso de imágenes de Radar de Apertura Sintética SAR en el municipio de Motozintla, Estado de Chiapas.

De acuerdo a lo anterior este trabajo de tesis presenta 5 apartados introductorios organizados de la siguiente manera: resumen, el cual expone de manera general la investigación, una introducción donde se presenta un preámbulo del objeto de estudio y estructura del documento, en tercer lugar, se ubica el planteamiento del problema donde se aportan

elementos para explicar el contexto de la investigación y su importancia, en cuarto lugar se presenta la justificación, la cual explica el porqué del desarrollo del estudio, su pertinencia y aporte. Finalmente se ubican los objetivos e hipótesis los cuales denotan la meta de la investigación y premisa a demostrar.

Seguido de los apartados se presentan 4 capítulos, conclusiones, referencias bibliográficas y anexos. El primer capítulo se compone del Marco Teórico Conceptual en el cual se describen las teorías y conceptos en aras de establecer un conocimiento profundo del entendimiento de los riesgos de desastres, su noción, las variables que lo componen y se presenta un aporte en una nueva visión en el concepto del riesgo como sistema dinámico y autopoietico. El segundo capítulo presenta el Marco de Referencia con los antecedentes a nivel nacional e internacional en la temática de la investigación. El tercer capítulo corresponde a los Materiales y Métodos donde se describe la metodología, pasos implementados en conjunto con los datos e información necesaria para su desarrollo. En el capítulo 4 denominado Resultados, se exponen los principales hallazgos de la investigación, seguido de las conclusiones, referencias bibliográficas y anexos, estos últimos contienen evidencias de la producción científica mediante artículos, constancias de participación en eventos académicos y conferencias para la divulgación de la investigación y aprendizaje durante el desarrollo del doctorado.

Planteamiento del problema

El estudio de riesgo de desastres y su impacto en la población es actualmente uno de los temas más estudiados, debido a la ocurrencia de desastres a nivel mundial que ha causado grandes daños como pérdidas económicas, de infraestructura, vidas humanas y alteración del equilibrio del medio ambiente. Los deslizamientos son uno de los eventos más inminentes en asentamientos humanos ubicados en ladera, debido a la influencia de la pendiente en arrastre de materiales y la incidencia de las precipitaciones en el disparo de eventos de este tipo.

Entre los aspectos que contribuyen a la generación de deslizamientos se presentan las condiciones irregulares de localización donde se tiene lugar el desarrollo de asentamientos humanos de desarrollo incompleto, en muchos casos viviendas autoconstruidas por la población, lo cual genera una presión antrópica sobre el medio, un ejemplo claro de ello es la tala de árboles para la construcción de viviendas.

En México, los riesgos que más daño han causado son los de tipo hidrometeorológicos como inundaciones, seguido de los geológicos como sismos, fracturas, deslizamientos de tierra y erupciones volcánicas (Zeballos, s.f). Según Bitrán (2001), en las últimas décadas los fenómenos naturales en México han causado un número importante de víctimas fatales (10,000 vidas humanas aproximadamente) y cuantiosas pérdidas materiales. En 2015 los fenómenos geológicos han sido la segunda causa en la generación de pérdidas económicas, con un costo de 246,9 millones de pesos que corresponden a el 1.4%, de esta cifra, 96.71 % fue por deslizamiento de laderas (García, Méndez, Nava y Vázquez, 2014)

Considerando el impacto que genera la ocurrencia de deslizamientos, se hace una tarea imprescindible por parte de la comunidad científica centrar su mirada en la propuesta de mecanismos que contribuyan a la detección precisa de las áreas que se pueden ver afectadas por la ocurrencia de este tipo de eventos, así como su causa principal, las lluvias. Desde este punto de vista se enmarca la investigación, cuyo objetivo principal es detectar desplazamientos de terreno y determinar el papel que cumplen las precipitaciones en su comportamiento, así como su relación con factores físicos locales del terreno.

Actualmente existen diferentes técnicas para la identificación de las deformaciones superficiales asociadas a cualquier fenómeno físico, entre ellas se encuentra el denominado LIDAR (Light Detection and Ranging) como método para detectar objetos a distancia y determinar su posición tridimensional de una forma rápida y precisa. Los datos captados con LIDAR permiten generar Modelos Digitales de Elevación (MDE), expresión visual y matemática de los datos del relieve, útiles para la modelación altimétrica (mapas de pendientes, secciones, desniveles).

El uso de imágenes de satélite ópticas y de radar, son otra técnica para el reconocimiento de movimientos de terreno, actualmente se destaca el uso de interferometría con Synthetic Aperture Radar SAR. La interferometría es una técnica de teledetección usada para aplicaciones de monitoreo de deformaciones de superficie, que usando frecuencias de microondas ofrece la posibilidad de detectar desplazamientos producidos en la superficie terrestre con una precisión centimétrica (Fernández, s.f).

Esta técnica cubre tres tipos principales de aplicaciones: la detección y estudio de nuevas deformaciones del terreno, el estudio de aquellas deformaciones de las cuales ya tenemos conocimiento, y una tercera, más ambiciosa, la predicción de los futuros efectos provocados por estas deformaciones (Crosetto, Monserrat, Cuevas-González, Devanthéry, y Crippa, 2016). Sin embargo, debido a su complejidad, se hace necesario el desarrollo de adaptaciones y modificaciones en su aplicación.

En el presente proyecto se busca innovar mediante el desarrollo e implementación de metodologías de detección de modo remoto, actualmente poco exploradas en el territorio mexicano, con técnicas de observación de la tierra desde el espacio, así como representación cartográfica en SIG. Con el fin de generar una guía de fácil aplicación para la determinación de zonas de deslizamientos, cuyos resultados sean precisos y comprensibles para las autoridades tomadoras de decisiones.

A su vez, se hace necesario estimar umbrales de precipitaciones que ocasionan el disparo del evento, ya que no basta con saber dónde se presenta el movimiento, si no también bajo qué

características se puede repetir en un futuro, considerando que: “la lluvia es uno de los detonadores naturales más importantes en México” (Vásquez, 2002, p. 1)

La aplicación y desarrollo de esta investigación posee un aspecto innovador, que hace sea una herramienta potente para su posterior implementación en numerosas áreas. Los resultados serán fundamentales en la toma de decisiones en torno al planteamiento de políticas de desarrollo sustentable, planificación y ordenación del territorio.

Justificación

A nivel global factores como el crecimiento acelerado de la población, pobreza y expansión desordenada de asentamientos en el territorio sin políticas de planeación territorial, producen a su vez deterioro ambiental en el paisaje. Se ha estimado que la huella ecológica de la humanidad, es decir, nuestro impacto sobre el planeta, se ha duplicado desde 1966; y excede en la actualidad en casi 50% la capacidad del planeta para regenerarse (WWF, 2012, p. 10).

Considerando lo anterior, es de suma importancia aunar esfuerzos en el estudio de esta temática, cuyos resultados se vean reflejados en la generación de metodologías que permitan identificar las zonas de riesgo natural donde potencialmente se puede presentar la ocurrencia de desastres, los cuales traen consecuencias negativas en el desarrollo en términos ambientales, socioeconómicos, políticos, culturales, ecológicos, entre otros.

En este sentido, es primordial exigirse el generar propuestas que planteen construir nuevas visiones y métodos para el análisis y evaluación de los fenómenos naturales que afectan en gran medida a la población con menor poder adquisitivo. No basta con la aplicación de técnicas, se debe procurar ir más allá y poner al alcance de la población común, resultados eficaces y de fácil interpretación.

Uno de los fenómenos que se presenta comúnmente en el territorio mexicano son los deslizamientos, esto dado por las características del espacio, en su mayoría zonas montañosas con localización de asentamientos, donde la ocurrencia de precipitaciones intensivas juega un papel importante en la detonación de este tipo de eventos. Según Bitrán (2001) en el país los desastres a causa de los fenómenos de tipo geológico han cobrado la muerte de entre 6,000 y 6,500 personas en el periodo de 1980-1999, un aproximado de 500 personas al año.

Las cifras de pérdidas de vidas humanas son abrumadoras, considerando esto, es de gran relevancia proporcionar información confiable con respecto a la localización de zonas de deslizamientos. Esta investigación propone el estudio de este tipo de fenómenos asociado a sus factores detonantes a través de una aproximación metodológica que sea replicable y que sirva para su detección específica mediante el uso de técnicas de modelamiento y observación

de la tierra. Asimismo, se propone la estimación de umbrales de precipitación que permitan identificar la cantidad de lluvias necesarias para detonar un evento, constituyéndose como una herramienta para el monitoreo, prevención de emergencias y toma de decisiones oportunas.

Una contribución fundamental de la investigación a desarrollar, es una metodología para determinar zonas de deslizamiento a partir del uso de imágenes de radar para zonas con vegetación densa, este sería un avance pionero en el diseño de herramientas que brinden localizaciones específicas de las zonas que potencialmente pueden ser afectadas por la ocurrencia de un evento desastroso. Sin duda un aporte para la adecuada planificación por parte de entidades gubernamentales en la localización de asentamientos humanos en México y América Latina.

Objetivos

Objetivo general

- Evaluar los movimientos del terreno y su relación con factores detonantes en el municipio de Motozintla, Chiapas, a través de imágenes de radar para contar con una herramienta que permita diseñar estrategias de resiliencia en la población.

Objetivos específicos

- Analizar los referentes teóricos conceptuales para relacionar los factores detonantes de deslizamientos y su modelamiento por medio del radar de apertura sintética SAR.
- Elaborar un Marco de Referencia considerando investigaciones internacionales, nacionales y estatales sobre riesgos de desastres para conocer el estado actual del conocimiento en la materia y con ello desarrollar el concepto de riesgo como sistema autopoiético.
- Diseñar y aplicar una metodología para evaluar los movimientos del terreno y su relación con factores detonantes en el municipio de Motozintla, Chiapas.
- Estimar el impacto social de los deslizamientos del terreno en México a través de la revisión de literatura y registros históricos en conjunto con la construcción de método de estimación estadístico.
- Establecer la relación espacial de los sismos como factor detonante con desplazamientos del terreno, en el municipio de Motozintla, Chiapas, utilizando la técnica de interferometría con imágenes satelitales de radar de apertura sintética SAR.

Hipótesis

Existe una estrecha relación entre los sismos, precipitación y características locales del terreno con la ocurrencia de deslizamientos.

Capítulo 1. Marco teórico o conceptual

La interacción del hombre con el medio y la complejidad que esta presenta, siempre ha sido punto de interés para la ciencia ambiental. En este sentido, el estudio de riesgo de desastres está altamente ligado no sólo al análisis de los fenómenos naturales que pueden convertirse en un momento dado en un riesgo, sino que también está en la capacidad de analizar los factores que determinan la exposición y vulnerabilidad de las comunidades frente a qué tan preparadas se encuentran para enfrentar un desastre, o bien, cuáles son las dinámicas que pueden llegar a magnificar los efectos de la ocurrencia de un evento para elevarlo a una categoría de catástrofe.

En este punto tiene lugar la evaluación y determinación de zonas potenciales a sufrir daños por la ocurrencia de un fenómeno geológico, siendo un proceso complejo que requiere en primera instancia, una claridad conceptual sobre los elementos que en él se involucran como lo es el fenómeno natural en sí, las variables que interactúan para convertirlo en un peligro y posteriormente un riesgo, así como aquellos términos que hacen referencia a las formas de interacción del sistema físico.

1.1 Los riesgos de desastres desde el enfoque sistémico

Las relaciones del hombre con la naturaleza se enmarcan en un sistema con elementos interactuantes entre sí, existen diversas teorías desarrolladas para comprender los sistemas, se destaca como pionera la Teoría General de Sistemas TGS desarrollada por Bertalanffy en 1969 la cual plantea que: cada elemento aporta al mantenimiento del equilibrio del sistema y cuando algún elemento falla el sistema colapsa.

Bertalanffy (1989) define la TGS como, un complejo de elementos interactuantes que se relacionan entre sí, de acuerdo con tres grandes grupos de variables como lo son el número de elementos constituyentes, las especies involucradas y las relaciones entre los elementos. Esta teoría es capaz en principio de dar definiciones exactas de semejantes conceptos y, en casos apropiados, de someterlos a análisis cuantitativo.

A partir de la aplicación del enfoque sistémico en el territorio surge la Teoría de Geosistemas o sistemas de los elementos naturales desarrollada por el soviético Víctor Sochava, donde se aparta la idea de unidades de paisaje por la comprensión de la naturaleza como un todo donde interactúan diferentes elementos, permitiendo analizar cuestiones ambientales en cualquier espacio de la superficie terrestre (Rodríguez, Vicente da Silva, y Cezar, 2012).

La concepción de geosistema se desarrolló en varios niveles: los geosistemas naturales, los socioeconómicos y los antropoecológicos considerados como sistemas espaciales y temporales que se forman en un determinado espacio, durante el proceso de interacción entre la sociedad y la naturaleza, relación que es atravesada por un flujo e intercambio de materia (Valentí, 1984).

El geosistema se organiza a partir de insumos, los cuales corresponden a elementos de todo tipo que una vez entran en interacción dan lugar a procesos dinámicos transformadores, los cuales generan productos de diferente tipo, dichos resultados están constituidos por la evolución, el equilibrio o desequilibrio ecológico entre las entidades, homeostasis o la continuación del proceso (Figura 1).

Sin embargo, al abordar el tema de riesgos asociados a amenazas de origen natural cobra relevancia la teoría de sistemas sociales y concepto de riesgo desarrollada por Niklas Luhmann (1991). A diferencia de la TGS, Luhmann adopta el análisis de sistemas desde su distinción con el entorno, introduce el término autopoiesis desarrollado inicialmente en Biología, hace referencia a sistemas que son capaces de reproducirse y mantenerse por sí mismos, estableciendo una marcada diferencia entre entorno y sistema, donde; el sistema no se altera directamente por el entorno. Ningún input, por parte del entorno, puede aspirar a convertirse en output del sistema ya que el entorno alerta, sacude, despierta, perturba las potencialidades propias del sistema, pero nunca determina ni influencia directamente (Luhmann, 1991)

Figura 1. Organización del geosistema



Fuente: Elaboración propia

En este sentido este enfoque sistémico contribuye a la comprensión y análisis de la complejidad de las cuestiones ambientales, en el caso de riesgo de desastres brinda una base para comprender que el sistema en sí mismo es dinámico, debido a su constitución intrínseca, refiere sus funciones a sí mismo, donde los elementos del cual hacen parte interactúan entre sí y a su vez producen otros. Un ejemplo claro de ello son los terremotos, su causalidad se debe a la organización propia de un sistema donde las fuerzas interactuantes, placas tectónicas, energía, movimientos, generan el evento, en este caso, la relación que entabla con el entorno se realiza según la medida de su operación.

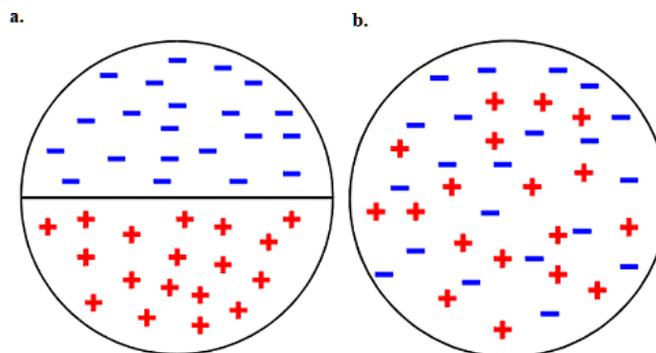
Luhmann ayuda a comprender que un sistema social es dinámico, así mismo lo son los sistemas asociados a riesgo de desastres, son elementos que entre sí interactúan para la generación de un evento y así mismo se recupera por medio de su auto organización para sobreponerse y volver a su estado natural, a diferencia de la TGS donde se plantea que hay un colapso del sistema por un fallo de alguno de sus elementos, lo que aquí se plantea es que es su propia naturaleza y dinámica la que da origen a la ocurrencia de un evento desastroso, y es aquí donde tiene lugar el concepto de sistema dinámico.

Un sistema dinámico se entiende como aquel que presenta cambios con respecto de determinada variable, actualmente el término “dinámica” refiere los cambios de un sistema con respecto a una gran cantidad de variables (temperatura, las distancias en el plano cartesiano, la presión atmosférica, la velocidad a la que viaja un cuerpo, etc.), actualmente su estudio se diferencia en la cantidad de variables que deben tener en cuenta para analizar con propiedad un sistema dinámico (Ramírez y Marco, 2010).

Los sistemas dinámicos se dividen en estables e inestables, el primero de ellos se refiere a aquellos sistemas donde pequeñas modificaciones de las condiciones iniciales producen pequeños efectos. Por su parte un sistema dinámico inestable es aquel donde el más mínimo cambio de sus condiciones iniciales producirá grandes cambios, de tal manera que se presenta una amplificación del cambio, el cual puede llegar a ser irreversible (Prigogine, 1996).

Ilya Prigogini (1996) ejemplifica estas diferencias por medio del movimiento hacia arriba (+) y hacia abajo (-) en dos situaciones, en el primer caso se presenta el sistema estable, cada movimiento se encuentra agrupado y sus vecinos son iguales, es decir, un movimiento (-) se rodea de otro igual (-), si se llegara a eliminar la frontera que los divide no sucederá un cambio extremo, por otra parte en el sistema inestable cada movimiento (+) se rodea de movimientos (-) y recíprocamente, por lo que un cambio mínimo se amplificara (Ver Figura 2).

Figura 2. Ejemplificación de diferencias entre sistemas dinámicos estables e inestables a. Sistema estable b. sistema inestable



Fuente: Prigogine (1996)

“La naturaleza realiza sus estructuras más delicadas y complejas gracias a los procesos irreversibles asociados a la flecha del tiempo, las leyes de la naturaleza se reformulan a partir de la postulación sobre la base de posibilidades” (Prigogine, 1996). Algunos fenómenos naturales que tienen lugar en la superficie terrestre son un ejemplo claro de ello y obedecen a probabilidades de ocurrencia, es decir, no hay certeza que cuándo y dónde pueden ocurrir, la ocurrencia de eventos obedece a la conjugación de factores que genera una inestabilidad, son sistemas inestables.

Al hablar de riesgo de desastres es fundamental comprender que un desastre es producto de la interacción de diferentes factores que generan las condiciones para que se produzca una inestabilidad (el riesgo), lo cual conlleva a la ocurrencia de un evento, donde tanto los seres humanos como la misma naturaleza se ve afectada. Es por esta razón que un desastre se cataloga como respuesta de una inestabilidad en un sistema dinámico, sus efectos son irreversibles, ya que una vez ocurre, el espacio cambia, sus características se modifican y puede recuperarse e incluso ser mejor de lo que fue en el pasado, pero nunca más volverá a su estado inicial.

1.2 Corrientes epistemológicas en el estudio de riesgos

Desde sus inicios, el hombre siempre ha convivido con la naturaleza y los eventos que trae consigo como lo son: huracanes, terremotos, erupciones, inundaciones, sequías y deslizamientos, entre otros, sin embargo, la interacción entre ambos ha presentado cambios a lo largo del tiempo, el hombre ha expandido sus asentamientos y generado actividades económicas y de producción impactando el medio natural, esto conlleva a un desequilibrio ambiental en el que tienen lugar los riesgos de desastres.

Diferentes disciplinas centraron su atención en los riesgos que en inicio se denominaron naturales, su estudio ha sido objeto de aportaciones desde la sociología, economía, ciencias naturales, etc., pero en especial la geografía desarrolló toda una línea de investigación llamada “Ecología humana” donde analiza la interacción del hombre con el medio natural y problemas ambientales producto de la presión antrópica sobre el territorio.

A mediados del siglo XIX surge el determinismo geográfico planteado por Karl Ritter en 1850, donde se partía de la premisa de que el medio determina al hombre, hasta las variaciones que surgieron como los estudios de paisaje donde se rechaza el determinismo causal, la geografía regional cuyos autores como Vidal de la Blache y Hettner proponen que las interrelaciones entre grupos humanos y fenómenos físicos son inseparables, formando un todo y dando posibilidades al ser humano de intervenir en el medio que lo rodea según sus necesidades (Santarelli y Campos, 2002)

Una rama de la geografía que sin duda centro su atención en el estudio de los componentes físicos-naturales, es la llamada Geografía Física. Según Strahler (1994), es el estudio y unificación de un conjunto de las Ciencias de la Tierra, que da una completa visión de la naturaleza del ambiente físico en el que vive el hombre. Por tanto, siempre ha estado en el centro de los estudios medioambientales debido a que se orienta en la interacción del hombre y el medio ambiente.

Por su parte el padre de la geomorfología William Morris Davis en la década de los 90`s desarrolló la teoría del ciclo geográfico en la cual explica la creación y destrucción del paisaje. El éxito de la capacidad predictiva de algunos modelos y potenciales aplicaciones en los campos de planificación urbana, ingeniería civil, estrategias militares, desarrollo costero, entre varios más, da inicio en las últimas décadas a la geomorfología aplicada.

La aplicación de la geomorfología fue muy destacada en la geografía francesa, en especial gracias al Instituto de Geografía Aplicada, fundado por Jean Tricart en 1956. Se centra en la interacción entre acciones humanas y las formas de la tierra, en particular enfocándose en el manejo de riesgos causados por cambios en la superficie de la tierra (naturales o inducidos) conocidos como georiesgos. Estudios de este tipo incluyen movimientos en masa, erosión de playas, mitigación de inundaciones, tsunamis entre otros (Sánchez de la Torre et al., 1977)

La conceptualización de riesgos se ha nutrido de aportes por parte de las humanidades en los estudios de vulnerabilidad, donde se analizó el rol del ser humano en la generación de riesgos y cómo su capacidad de respuesta determina los niveles de impacto de un desastre. En las primeras décadas del siglo XX, tuvo auge investigativo el tema de las relaciones entre el ser

humano y el medio natural, en un contexto ecológico. Con esta perspectiva, apoyada por la disciplina sociológica, se introdujo a través de Harlan Barrows en 1923 la idea de la "Geografía como ecología humana", que fue ampliamente aceptada (Martínez, 2009).

A partir de los planteamientos de Barrows, la investigación de los riesgos de desastres tuvo un nuevo enfoque, referido a la forma como el ser humano se enfrenta con el riesgo y a la incertidumbre que caracteriza la manera de producirse los acontecimientos naturales (Calvo, 1984). Asimismo, autores como Beck y Luhmann han abordado el concepto del riesgo en la sociedad moderna y como esta ha sido una creadora de realidades inciertas.

Gilbert White es llamado el "padre" del enfoque ambientalista del análisis de los riesgos y desastres (Lavell, 1997) junto con figuras como Robert Kates e Ian Burton, pertenecientes al Departamento de Geografía de la Universidad de Chicago, desarrollaron un nuevo paradigma.

En un trabajo del año 1964, Burton y Kates, en lo que se tiene como el paradigma dominante en la investigación geográfica sobre los riesgos naturales (Sauri, 1988), definirán el riesgo natural como el conjunto de elementos del medio físico y biológico nocivos para el hombre y causados por fuerzas ajenas a él. Fruto de toda esta labor, en 1969, la UNESCO y la Comisión sobre el Hombre y su Medio Ambiente de la Unión Geográfica Internacional deciden iniciar, como una de sus dos principales líneas de acción para el trienio siguiente, un programa de colaboración internacional para el estudio de los problemas planteados por los riesgos y peligros del medio ambiente (Ayala-Carcedo y Olcina, 2002).

Desde la Economía Política, la definición de los desastres asociados a fenómenos naturales se explica como una interacción entre la sociedad y la naturaleza, pero pone el acento en la distribución de costos y beneficios ambientales dentro de procesos específicos de desarrollo capitalista (Campos-Vargas et al., 2014). Esta postura se perfiló como un enfoque alternativo a la ecología humana, en respuesta al problema de desastres propone fijar la atención en los estilos de desarrollo y buscar formas de organización social y económica que disminuyan vulnerabilidades físicas y socioeconómicas (Campos-Vargas et al., 2014).

Por su parte la geografía ambiental intenta romper con el dualismo sociedad-naturaleza adoptando una posición de carácter multidimensional de la realidad, aludiendo que aunque los fenómenos son de la naturaleza, también existen una serie de sucesos ordenados y narrados en función de los intereses de aquellos que detentan el poder social (Downing y Baker 2000 en Campos-Vargas et al., 2014)

Las diferentes corrientes epistemológicas han puesto su mirada en las relaciones que se mantienen entre los seres humanos y su naturaleza (Tabla 1), ya que es en este momento donde surgen procesos y problemáticas que son objeto de estudio para la ciencia. La clasificación de contribuciones teóricas sobre el riesgo podría darse en diversas categorías como: explicaciones estructuralistas o cognitivas, constructivista, positivista, posibilismo representaciones interpretativas, modelos lógicos, entre otros.

Tabla 1. Corrientes de pensamiento en estudios ambientales y de riesgo

Representantes y enfoque			Descripción
Karl Ritter.	1850	Determinismo geográfico. Ambientalista y materialista	Enfoque en la relación hombre-medio, haciendo hincapié en que le medio determina la forma de vida del hombre. Buscar leyes que expliquen la relación del hombre con la naturaleza
David, Willian Morris	(1850-1934).	Geomorfología ambientalista	Desarrollo de la teoría del ciclo geográfico en la cual explica la creación y destrucción del paisaje. Diseñar modelos con carácter predictivo con potenciales aplicaciones en los campos de planificación urbana.
Vidal de la Blache	(1843-1918).	Posibilismo paisajismo	Visión holística del ambiente el cual brinda posibilidades al hombre, quien también actúa como agente modelizador de este.
Alfred Hetnner	(1859-1941)	Posibilismo, paisajismo	Demostrar que el enfoque regional permite la interpretación de los elementos interactuantes en la superficie terrestre

Representantes y enfoque	Descripción
Arthur Strahler (1957-1891). Geografía física	Se introducen los geosistemas como objeto de estudio. Estudios sistemáticos de Geografía Física.
Rowe, 1977. (Modelo de proceso, Riesgos tecnológicos, toxicología)	Plantea cuatro estados: identificación del peligro, estimación de riesgo, evaluación y gestión de riesgo. Realizar tratamiento analítico del riesgo
Kasperson et al. 1988. Teoría de amplificación social del riesgo	Integrar la dimensión técnica, social, cultural y psicológica del riesgo. Esquematizar el riesgo como proceso causal
Harlan Barrows (1903-1960). Positivista, Geografía Humana, Ecológico, Social	Estudio de las relaciones entre el ser humano y el medio natural, en un contexto ecológico, el estudio del impacto humano sobre el entorno. Se introduce el término de Geografía como Ecología Humana.
Gilbert White, Burton I. Kates R (1956-1968). Ambientalista en análisis de los riesgos y desastres. Geografía de los riesgos	Nuevo paradigma referido a la forma como el ser humano se enfrenta con el riesgo y a la incertidumbre que caracteriza la manera de producirse los acontecimientos naturales
Jean Tricart (1962-1982). Geografía aplicada, Geografía física, geomorfología	Introduce el concepto de georriesgos, principios y métodos de la geomorfología. Desarrollo de modelos sociológicos para explicar el medio (Robert E. Park, Ernest W. Burgess y R. D. Mackenzie) siguiendo la Teoría General de Sistemas.
Michel Faucher, (1982). Geografía humana de los riesgos naturales	Propone una metodología de análisis espacial de peligros naturales basada en la combinación de cartas temáticas de áreas con peligros y carta de poblamiento. Desarrollar cartografía de peligros para evaluación de riesgos.
Douglas y Wildasky (1982), Rayner (1992). Estructuralista, contextualista	Se considera el riesgo una función o atributo de las estructuras sociales, Rayner plantea la teoría cultural del riesgo

Representantes y enfoque	Descripción
Covello, von Winterfeldt y Slovic (1987). Modelos analógicos	Explicación de la comunicación del riesgo utilizando la teoría de señales.
Westgate y O’Keefe (1976), Wijkman y Timberlake (1984), Susman et al, (1984), Chambers (1989) Economía política, constructivista	Se defiende la idea que el desastre se construye socialmente desde una perspectiva socioeconómica
Wilches-Chaux (1989). Geografía de los riesgos, gestión ambiental	Introduce el termino de vulnerabilidad global compuesta de varios tipos
Wisner (1993), Cannon (1994), Blaikie et al (1996), Maskrey (1994), Lavell (1996), Cardona (1996), Mansilla (1996). Constructivistas, corte Neo-Marxista, geografía de los riesgos	Hacen énfasis en los procesos sociales de construcción de vulnerabilidad y del riesgo
Ulrich Beck y Anthony Giddens (1980), Niklas Luhman (1991). Sociología, Perspectiva postmodernista	Se plantea el riesgo como un componente inherente al desarrollo humano de la sociedad, donde los procesos de decisión y comunicación tienen lugar bajo la influencia del poder. Beck y Giddens plantean la teoría social del riesgo y Luhman una sociología del riesgo

Fuente: Elaboración propia basado en Santareli (2002) y Galindo (2015)

1.3 El concepto de riesgo y sus factores

El riesgo es una conjugación de factores asociados a debilidades, exposiciones, desequilibrios, alteraciones y demás sinónimos relacionados con la generación de inseguridades acerca de posibles daños. El riesgo no es igual a pérdidas, daños o desastre, sin embargo, si antecede a estos, es una valoración cuantitativa y/o cualitativa de un inminente daño, el riesgo de desastres siempre está presente en los espacios ocupados por el hombre, es una condición latente que se basa en posibilidades de un hecho que puede ocurrir a futuro.

El concepto de riesgo es complejo, no se puede comprender sin antes saber cuáles son los factores que lo generan y su significado. En la literatura desde hace tiempo se reconoce que el riesgo resulta de la combinación de dos variables o dimensiones: la amenaza o peligro y la vulnerabilidad (Natenzon y Ríos, 2016). Amenaza como eventos asociados a fenómenos naturales que pueden ocasionar daños y vulnerabilidad como la capacidad de la población de hacer frente a su ocurrencia.

1.3.1 Amenaza

Generalmente es común usar el término amenaza o peligro como la probabilidad de ocurrencia de un evento físico potencialmente perjudicial en un tiempo y espacio determinado (Baró y Monroy, 2018). Es importante mencionar que un fenómeno natural no implica siempre una amenaza, ya que ésta es considerada como tal cuando existe una población que se encuentra expuesta ante este.

Según Lavell (1997) las amenazas pueden ser concebidas como eventos físicos latentes, o sea probabilidades de ocurrencia de eventos físicos dañinos en el futuro, y pueden clasificarse genéricamente de acuerdo con su origen, como “naturales”, “socio-naturales”, o “antropogénicos”, cada una de ellas hace alusión a diferentes connotaciones y características.

En el caso de las amenazas naturales, son básicamente fenómenos de diversos tipos (atmosféricos, geológicos, hidrológicos, etc.) que, por su ubicación, severidad y frecuencia, están en capacidad de afectar o impactar al ser humano. Dicho en otros términos las amenazas naturales son expresiones propias de las dinámicas de la tierra, se presentan cuando elementos del medio ambiente son peligrosos para el hombre y se generan por causas externas a él, por ende, no se pueden evitar. La naturaleza se transforma en amenaza, debido a las modalidades de ocupación del suelo y las formas de desarrollo de los elementos de la estructura social y económica.

Las antropogénicas derivan por completo de acciones humanas e incluyen explosiones, incendios, derrames de sustancias peligrosas, accidentes tecnológicos y otros. Y, las amenazas socio-naturales derivan de la intersección de prácticas humanas con el ambiente

natural y se ven reflejadas en eventos físicos dañinos tales como inundaciones, deslizamientos, sequías, erosión de suelos y colapsos de tierra generados o acentuados por distintas prácticas humanas, como por ejemplo la deforestación, el corte de manglares, el minado y desestabilización de laderas, y construcción de viviendas en zonas inadecuadas (Lavell, 2003).

1.3.2 Vulnerabilidad

La vulnerabilidad aparece como un concepto que revoluciona el significado del riesgo, ya que en un inicio se dirigía la atención al estudio de los fenómenos naturales olvidando que la sociedad influye directamente en su generación, existe el riesgo cuando hay población que puede verse afectada, de tal manera que es un elemento crucial en la conformación del riesgo.

Han sido diversas las conceptualizaciones de vulnerabilidad (Tabla 2), en la última década el debate sobre los desastres contempla a la vulnerabilidad como un eje determinante y central de la configuración del riesgo en las comunidades (Brenes, 2007). Está quedando claro que la vulnerabilidad es una propiedad desfavorable, que se desarrolla en la interacción entre el ser humano y la naturaleza, y se puede reducir mejorando la preparación y promoviendo el aprendizaje social (Lei et al., 2014).

Tabla 2. Conceptos de vulnerabilidad

Autor (es)	Definiciones
Downing et al. (1997)	Vulnerabilidad significa una sensibilidad ambiental. Hay varios factores relacionados con la vulnerabilidad, como los factores demográficos, económicos, sociales y factores técnicos y las dependencias económicas.
Kasperson y Kasperson (2001, 2005)	La vulnerabilidad es la otra cara de la resiliencia: cuando un sistema social o ecológico pierde capacidad de recuperación, se vuelve vulnerable a los cambios que antes podían ser absorbidos.
IPCC (2001, 2007)	La vulnerabilidad es el grado en que un sistema es susceptible o no puede hacer frente a los efectos adversos del cambio climático extremos, incluida la variabilidad climática.

Autor (es)	Definiciones
Turner et al. (2003)	Vulnerabilidad es el grado o la probabilidad en que un sistema, subsistema o componente del sistema experimente daño debido a la exposición a un peligro, ya sea una perturbación o estrés / estresor.
Cutter et al. (2003)	La vulnerabilidad social es una medida de la sensibilidad de una población a peligros naturales y su capacidad para responder y recuperarse de los impactos de peligros.
Wisner et al. (2004)	Vulnerabilidad significa las características de un grupo o individuo en términos de su capacidad de anticipar, enfrentar, resistir y recuperarse del impacto de un peligro.
Adger (2006)	Los parámetros clave de la vulnerabilidad son el estrés al que está sometido un sistema expuesto, su sensibilidad y su capacidad de adaptación.
Birkmann (2006)	La vulnerabilidad social se refiere a la incapacidad de las personas, organizaciones y sociedades para resistir los impactos adversos de múltiples factores de estrés a los cuales están expuestos.
UNISDR (2009)	Vulnerabilidad, las características y circunstancias de una comunidad, sistema o activo que lo hace susceptible a los efectos dañinos de un peligro.
Zhou et al. (2010)	La vulnerabilidad pone énfasis en la respuesta del sistema al peligro o riesgo potencial, que determina la probabilidad de pérdida por peligros. Exposición y la sensibilidad son dos aspectos de la vulnerabilidad.
Han (2011)	La vulnerabilidad no puede explicarse únicamente por exposición o capacidad de respuesta (incluido el afrontamiento a corto plazo y la adaptación a largo plazo capacidades), pero son el resultado del cambio interactivo de ambos, o la covarianza entre ellos.

Fuente: Lei et al. (2014)

1.3.3 Riesgo de desastres

En un inicio La Organización de las Naciones Unidas de Ayuda para Desastres UNDR0 planteó lo conceptos de riesgo específico (Rs) como como el grado de pérdidas esperadas debido a la ocurrencia de un evento particular y como una función de la amenaza (A) y la vulnerabilidad (V) (UNDR0, 1979), así:

$$R_s = A * V$$

El riesgo total (Rt) como el número de pérdidas humanas, de infraestructura y económicas producto de evento desastroso, es decir la conjugación del Riesgo Específico (Rs) y los elementos bajo riesgo (E) (UNDRO, 1979), deduciéndose la siguiente formula:

$$R_t = (E) (A * V)$$

La noción de riesgo puede ser entendida desde diferentes campos de análisis, según estos el término riesgo puede presentar variaciones, es decir, adquirir diferentes significados. Generalmente implica una condición latente asociada con algún grado de incertidumbre dentro de las probabilidades que representa (Cardona, 1996).

En 1984 Calvo García Tornel definió el riesgo como “la situación concreta en el tiempo de un determinado grupo humano frente a las condiciones de su medio, en cuanto este grupo es capaz de aprovecharlas para su supervivencia, o incapaz de dominarlas a partir de determinados umbrales de variación de estas condiciones”

Al hacer referencia al riesgo asociado a los desastres se puede decir que este se entiende como la probabilidad de daños y pérdidas futuras asociadas con el impacto de un evento físico externo sobre una sociedad vulnerable, donde la magnitud y extensión de estos son tales que exceden la capacidad de la sociedad afectada para recibir el impacto, sus efectos y recuperarse autónomamente de ellos (Lavell, 2003).

Se introduce el término capacidad entendida como un conjunto de condiciones que pueden actuar como contendoras para hacer frente a un evento desastroso, en este sentido, se involucra la capacidad dentro de la ecuación del riesgo. Yodmani (2001) lo resume así:

$$\text{Riesgo} = \frac{\text{Amenaza x Vulnerabilidad}}{\text{Capacidad}}$$

Más adelante se introduciría el término capacidad como un atributo dentro del término resiliencia, la capacidad entra a ser una serie combinaciones de fortalezas y recursos de una

comunidad para reforzar la resiliencia (ONU, 2016). La resiliencia es un concepto esencial ampliamente definido como la capacidad de resistir y recuperarse de las pérdidas por desastres (Zhou, Wang, Wan, y Jia, 2010).

Twigg (2007) sugirió las tres capacidades como sistema o resiliencia de la comunidad: (1) capacidad para absorber estrés o fuerzas destructivas a través de resistencia o adaptación; (2) capacidad para gestionar, o mantener ciertas funciones básicas y estructuras, durante eventos desastrosos; (3) capacidad para recuperarse o recuperarse después un evento (Shaw et al., 2013).

La ecuación de riesgo presenta otra modificación donde se reemplaza la capacidad por la resiliencia, Shaw et al. (2013) propone la siguiente ecuación:

$$\text{Riesgo} = \frac{\text{Amenaza} \times \text{Vulnerabilidad y Exposición}}{\text{Resiliencia}}$$

La Organización de las Naciones Unidas ONU (2016) define el riesgo de desastres como “la posibilidad de que se produzcan muertes, lesiones o destrucción y daños en bienes en un sistema, una sociedad o una comunidad en un período de tiempo concreto, determinados de forma probabilística como una función de la amenaza, la exposición, la vulnerabilidad y la capacidad” y lo divide en dos tipos:

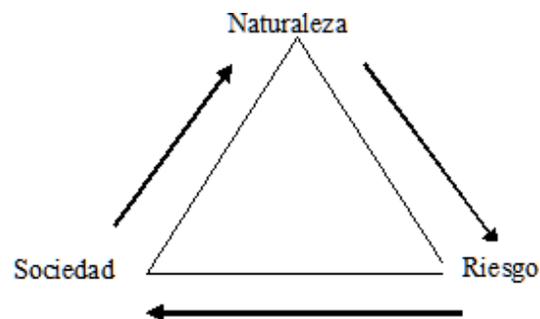
- Riesgo aceptable o riesgo tolerable: su consideración en estos niveles depende de las condiciones sociales, económicas, políticas, culturales, técnicas y ambientales existentes.
- Riesgo residual: es aquel que se mantiene aun cuando se hayan puesto en pie medidas eficaces para la reducción del riesgo de desastres, y respecto del cual deben mantenerse las capacidades de respuesta de emergencia y de recuperación. Supone una necesidad constante de desarrollar y respaldar las capacidades efectivas de los servicios de emergencia, preparación, respuesta y recuperación, junto con políticas socioeconómicas como medidas de protección social y mecanismos de transferencia del riesgo, como parte de un enfoque integral.

La conceptualización del riesgo en la actualidad ha involucrado diversos componentes como la exposición, capacidad, vulnerabilidad y resiliencia de las comunidades. De igual forma se ha fortalecido la premisa de que el riesgo es una construcción social, siendo la sociedad la

fuente generadora y/o amplificadora de riesgo y a su vez la afectada por su materialización en desastre, esta idea rompe con cualquier conceptualización lineal del riesgo y como plantea Edgar Morin (1994) con la idea de recursividad, el final del proceso nutre su principio.

Si se alude al planteamiento de concepto de proceso recursivo como “aquél en el cual los productos y los efectos son, al mismo tiempo, causas y productores de aquello que los produce” (Morin, 1994) y tritanios desarrollados por Morin (1981) se puede decir que la relación sociedad-naturaleza-riesgo corresponde a un bucle (Figura 3), donde; la sociedad interactúa con la naturaleza en la medida que reestructura espacios para bien o para mal, esto es, para generar condiciones de riesgo de desastres o bien para disminuir las existentes y en la medida que se generan estos procesos la naturaleza responderá positiva o negativamente ya sea materializando el riesgo en desastre debido a las alteraciones sufridas o manteniendo un equilibrio, en cualquiera de los casos la sociedad se verá impactada y se dará inicio a la continuidad de la relación.

Figura 3. Esquema de la relación sociedad-naturaleza-riesgo

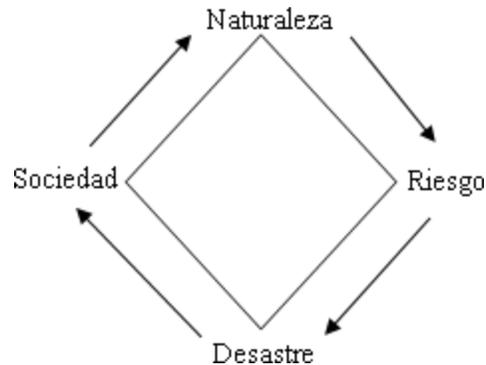


Fuente: elaboración propia

De acuerdo a lo anterior el concepto de riesgo se torna dependiente de la relación sociedad-naturaleza, donde; la sociedad en su interacción con la naturaleza puede ser generadora de condiciones de riesgo pero a su vez la dinámica intrínseca de la naturaleza puede materializar la generación y ocurrencia de fenómenos naturales de manera espontánea, sin que sea el hombre su generador, a su vez, el producto de dicha interacción: el desastre, puede constituir un inicio para el establecimiento de nuevas relaciones de la sociedad con su medio en la

medida que lo identifique como punto de partida para mejorar las condiciones previas de riesgo a su materialización, reduciéndolo o bien que el desastre implique una ruptura del desarrollo que genere retroceso (Figura 4).

Figura 4. Esquema de la relación sociedad-naturaleza-riesgo-desastre



Fuente: elaboración propia

Teniendo en cuenta los diferentes conceptos que ha surgido para definir el riesgo, así como sus componentes y comprensión de interrelaciones que dan lugar a su surgimiento, se hace indispensable desagregar la ecuación del riesgo. En este trabajo se propone concebir el riesgo como el principio y el fin de las interrelaciones, como producto y productor de incertidumbres, posibilidades de afectaciones o daños, los cuales pueden ser directos o indirectos tangibles o intangibles, ya sea en términos de pérdida de vidas, económicas, etc. Entonces el riesgo se expresa como:

$$R = A * V * E_{(Coste)}$$

Dónde: R corresponde al riesgo, A representa la amenaza, V es la vulnerabilidad y E (costo) representa el costo de los elementos expuestos.

La amenaza se entiende como el fenómeno que, dadas sus condiciones de severidad manifestada en la magnitud, intensidad u otro parámetro que represente su fuerza de impacto, pueda causar daño a un elemento, individuo o comunidad expuesto. Su evaluación se realiza

a través de la probabilidad de ocurrencia de dicho evento; razón por la cual la evaluación de la amenaza se entiende como la probabilidad de ocurrencia de un evento capaz de causar daño a elemento expuestos dentro de un tiempo y espacio determinados.

El resultado de la evaluación de la amenaza puede expresarse de manera gráfica o cuantitativa. En el primer caso, corresponde a los mapas de amenaza o zonificación que dependiendo de la unidad geográfica puede darse en escala “macro”, “meso” o “micro”, pero siempre expresando la distribución espacial de un parámetro que represente la condición de la severidad del fenómeno amenazante bajo estudio. En el segundo caso, la amenaza se expresa en términos de la probabilidad de ocurrencia del evento (P), de manera sencilla corresponde al inverso del periodo de retorno (T) o tiempo promedio que debe transcurrir para que un evento de las mismas características de severidad pueda repetirse en un mismo lugar geográfico, se expresa de la siguiente manera:

$$P = \frac{1}{T}$$

Cabe señalar que la función de distribución de probabilidad varía acorde con la naturaleza del fenómeno que se trate; por ejemplo, para terremotos se utiliza la distribución de Poisson; para inundaciones producidas por lluvias son válidas las distribuciones de Gumbel, Pearson, Weibull, etc.

En términos del riesgo y para la toma de decisiones, se acostumbra utilizar el término de probabilidad de no excedencia, para referirse a la seguridad que representa la condición de amenaza; en este caso dicha probabilidad se expresa como:

$$P_{(t)} = 1 - \left[1 - \frac{1}{T} \right]^t$$

Donde $P(t)$ es la probabilidad de no excedencia del parámetro representativo de la amenaza en un tiempo determinado, T es el periodo de retorno de dicho evento y τ es el tiempo de vida útil del elemento expuesto sobre el cual se evalúa la amenaza.

La vulnerabilidad, por un lado, hace referencia a la posición o exposición que tiene un elemento, individuo o comunidad ante un fenómeno amenazante; por el otro, se refiere a la condición de debilidad o resistencia que dicho elemento, individuo o comunidad tiene frente a la fuerza de impacto del fenómeno. En términos matemáticos, se expresa como:

$$V = \epsilon_{(x,t)} * F$$

Donde: $\epsilon_{(x,t)}$ representa la ubicación espacial y temporal o exposición de un elemento frente a la condición de la amenaza; F es la fragilidad, que a su vez se expresa como (OSSO-CVC, 2019):

$$F = \frac{P_{imp}}{S}$$

P_{imp} representa la fuerza o presión que el fenómeno amenazante imprime sobre el elemento, y S corresponde a la seguridad, resistencia que por naturaleza tiene dicho elementos o la capacidad que alguna manera se la dado a dicho elemento.

Por último, por elemento se entiendo todo objeto, actividad, individuo, grupo, etc., actual o potencialmente ubicado en el lugar donde es posible la ocurrencia de un fenómeno capaz de causar daño. Así, los elementos expuestos ante una amenaza, pueden ser corporales (personas o animales), estructurales, funcionales, ambientales, cualquier otro objeto o actividad social y económica.

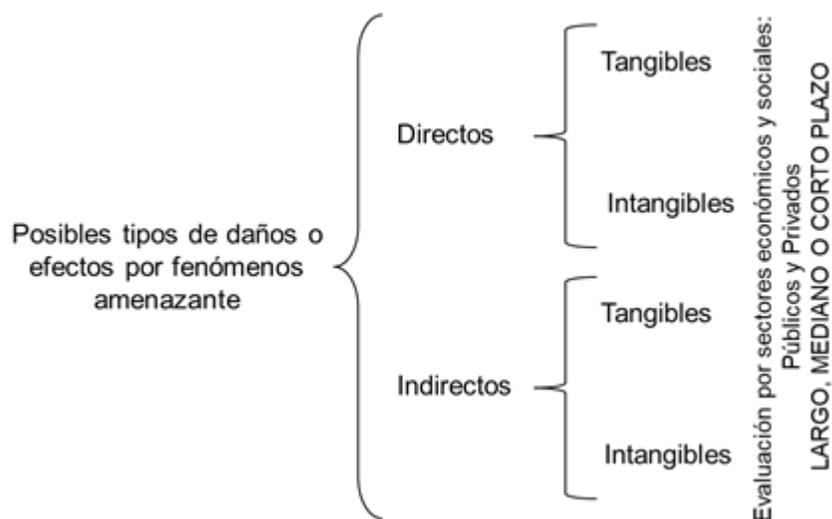
El costo de los elementos expuestos, que, en caso del riesgo, no corresponde a un único elemento, sino a la multiplicidad de ellos, por un lado, se entiendo en términos económicos

como el valor monetario que a cada uno de ellos se le asigna, considerándolos como bienes, servicios o actividades; por otro lado, de manera más amplia, el coste implica el reconocimiento y valoración de factores sociales o ambientales que no necesariamente están sufragados o están excluidos de los costos económicos; por el ejemplo, el patrimonio cultural de una comunidad, la afectación psicológica o cualquier otro tipo de perjuicio derivado de la condición de un riesgo determinado.

Así, la cadena de daños o efectos que se derivan del riesgo pueden ser directos e indirectos y serán valorados conforme se estimen en el tiempo de manera inmediata, a corto, mediano a largo plazo, considerando los diversos sectores económicos y sociales de índole público y pródigo, siendo discriminados como se muestra en la Figura 5.

Actualmente no basta con saber qué es el riesgo sino como enfrentarlo y gestionarlo para reducir su impacto, de tal manera que se ha ampliado la perspectiva pasando de ser netamente técnica y centrada en los fenómenos naturales a la inclusión de la sociedad como eje fundamental incorporando el factor de vulnerabilidad y resiliencia, esta última es objeto de debate actualmente. A su vez, se materializa el análisis de los factores de riesgo en su reducción y gestión mediante la inclusión de medidas y políticas de prevención y mitigación del riesgo en las naciones.

Figura 5. Esquematización de los posibles tipos de daños y efectos a tener en cuenta ante la cuantificación del riesgo.



Fuente: Elaboración propia

1.4 Los deslizamientos y su clasificación

En Latinoamérica, el rápido incremento de la población ha provocado la ocupación de zonas de ladera y áreas naturales protegidas, generando impactos en el medio físico como pérdida de flora y fauna, procesos erosivos, aumento de nivel freático de los suelos, entre otros. Esta es una realidad que cada vez afecta más a la sociedad, la cual puede verse afectada por la ocurrencia de procesos de remoción en masa. En México los desastres de tipo geológico ocupan el segundo puesto en la causa de pérdidas socioeconómicas (Bitrán Bitrán, 2001), en el año 2015, los deslizamientos aportaron cerca del 90% de contribución a la generación de daños (García, Méndez, Nava y Vázquez, 2016).

Los movimientos de terreno se categorizan según características de humedad, velocidad y estilo, entre estos se encuentran los de tipo caído, inclinación, deslizamiento, esparcimiento y flujo (Tabla 3). La clasificación presente en este documento, sigue la distribución hecha por Cruden y Varnes (1996), donde enfatizan en el material involucrado y el tipo de deslizamiento, estos se basaron en la clasificación propuesta por Varnes (1978) adicionalmente los autores introducen términos que consideran factores como: actividad

(estado, distribución, estilo), tasa de movimiento y contenido de agua; además, proponen la combinación de nombres según el orden en que se presentan los movimientos (caída de rocas-flujo de detritos).

Tabla 3. Categorización de movimientos de terreno

Tipo	Secuencia	Actividad	Estilo	Velocidad	Humedad	Material
Caída	Progresivo	Activo	Complejo	Extremadamente	Seco	Roca
Inclinación	Retrogresivo	Reactivado	Compuesto	Rápido	Húmedo	Tierra
Deslizamiento	Ampliándose	Suspendido	Múltiple	Muy rápido	Mojado	residuos
Esparcimiento	Alargándose	Inactivo	Sucesivo	Moderado	Muy mojado	
Flujo	Confinado Disminuyendo Moviéndose	Dormido Abandonado Estabilizado Relicto	Sencillo	Lento Muy lento		

Fuente: Adaptado de Cruden y Varnes, 1966 en Suárez, 1998.

Caída: Separación o desprendimiento de suelo o roca desde una pendiente pronunciada a lo largo de una superficie en la que poco se produce desplazamiento de cizallamiento (desplazamiento). Una vez ocurrido el desprendimiento, el material desciende a través del aire, principalmente en caída libre, rebotando o rodando. El movimiento es muy rápido excepto cuando la masa desplazada ha sido socavada, la caída irá precedida de pequeños movimientos de deslizamiento o caída que separan el material desplazado de la masa no perturbada. (Cruden y Varnes 1996).

Volcamiento: Comprende la rotación hacia delante de una masa de roca o suelo en una ladera, alrededor de un pivote o eje, por debajo del centro de gravedad de la masa que se desplaza, se divide en tres tipos (Cruden y Varnes 1996).

- Volcamiento de bloques de roca
- Volcamientos de bloques aislados
- Volcamiento de detritos

Deslizamiento: Movimiento ladera abajo de una masa de suelo o roca, predominantemente a lo largo de una superficie de ruptura o de zonas relativamente delgadas sometidas a intensos

esfuerzos de corte (ibíd.). Los autores plantean que la superficie de ruptura no se desarrolla de manera simultánea a lo largo de la masa que se desplazará, sino que se inicia por agrietamientos en el terreno en la parte superior de la ladera, donde más tarde se conforma la corona del deslizamiento. Este tipo de movimiento en masa se divide en tres tipos:

- Rotacional,
- Traslacional
- Compuesto

Flujo: Se refiere a movimientos espacialmente continuos con superficies de corte efímeras y estrechamente espaciadas, las cuales por lo general no se preservan. La distribución de velocidades en la masa desplazada es similar a la de un líquido viscoso. Su límite inferior puede ser una superficie a lo largo de la cual se ha presentado un movimiento diferencial apreciable o una zona espesa de cizallamiento distribuido. En realidad, se da una transición de deslizamiento a flujo, dependiendo del contenido de agua, la movilidad y la evolución del movimiento. Los flujos más rápidos corresponden a los flujos canalizados de detritos, en los cuales el material pierde bastante cohesión, admite bastante agua o encuentra laderas con alta pendientes

Propagación lateral: Extensión o dilatación lateral de un suelo cohesivo o masa de roca blanda, combinada con subsidencia general del material fracturado suprayacente en ese material blando, sin que se forme una superficie de falla bien definida. La extensión se manifiesta como la extrusión de material propenso a licuación o flujo plástico. Se pueden presentar dos casos generales

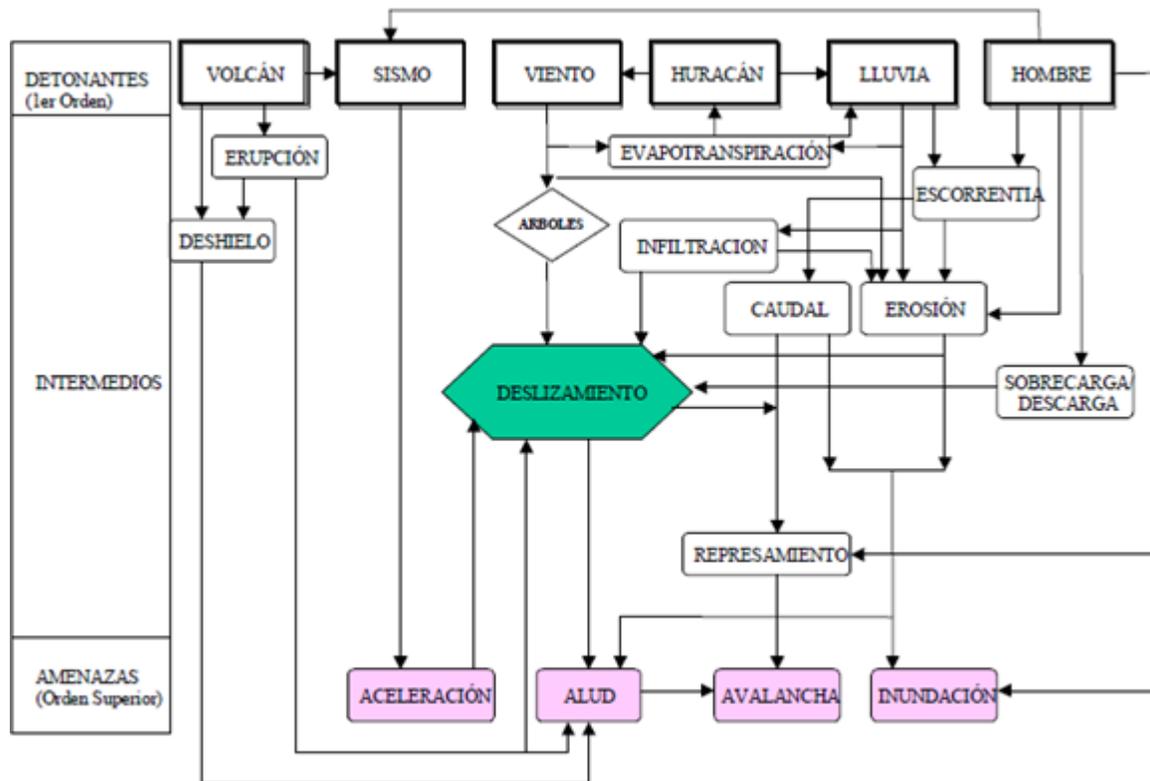
- Propagación lateral en bloque
- Propagación lateral por licuación

Creep: “Deformación del terreno a esfuerzo constante” que involucra el material no consolidado de la parte superior de las laderas. Estos materiales se pueden relacionar con saprolitos y suelos residuales, suelos volcánicos, laderas de rocas lodosas hídricamente degradadas y, con más frecuencia, coluviones arcillosos asociados a rocas lodosas.

Cada tipo de movimiento se genera en condiciones diversas un ejemplo de ello son los deslizamientos, estos se generan a partir de cantidades considerables de humedad en el suelo generadas por precipitaciones intensivas y/o actividad sísmica, de allí se establece su estilo en múltiple ya que según las características del área como, por ejemplo: pendientes, se puede presentar su tipo, al igual que la velocidad.

Vistos desde su causalidad son eventos que se generan a partir de otros, de esta manera pueden ser catalogados como de segundo orden ya que en un primer orden se encuentran aquellos factores naturales detonantes y por consiguiente constituyen sus causas (Figura 6).

Figura 6. Interacción de elementos para la generación de deslizamientos.



Fuente. Ojeda, Castro, Valencia y Fonseca, 2001.

1.5 Precipitaciones como factor detonante de deslizamientos

Una de las principales causas de deslizamientos sin lugar a duda son las precipitaciones, (Ferrer y Ayala 1997, citado por González de Vallejo et al., 2002) afirman que, los movimientos como deslizamientos se producen a causa de la duración de las lluvias y la infiltración de grandes cantidades de agua en los suelos, antes de ocurrir el movimiento, el suelo se encuentra en equilibrio con respecto al nivel freático generado por precipitaciones anteriores, al presentarse nuevas precipitaciones se comienzan a presentar movimientos del agua al interior de los suelos y se activan procesos como flujo superficial.

Los procesos antes mencionados aumentan el nivel freático saturando los materiales que conforman la ladera, la erosión de los suelos, la humedad y el peso de la masa dando lugar a la posible ocurrencia de deslizamientos, en este caso la cantidad de lluvias que se presenta en un espacio y tiempo determinado puede detonar movimientos del terreno. (Tabla 4).

Tabla 4. Movimientos en masa y su relación con la precipitación

Tipo de movimiento	Precipitación Anual (mm)		Precipitación en los 3-4 meses previos(mm)		
	Total en año previo	Media anual de la serie	Total en los meses previos	% en el año previo	%media anual de la serie
Deslizamientos	500 a 1000	500 a 800	300 a 500	50-60%	< 30%
Flujos de tierra	500 a 800	600 a 800	300 a 400	50-80 %	50-60%
Flujos de derrubios	> 1.300	1100 a 1200	350 a 650	30-50%	50-120%
Desprendimientos	250 a 700	220 a 450	100 a 250	<30%	50-130%

Fuente: González de Vallejo et al., 2002.

En México la mayoría de eventos ocurren en temporadas de lluvias, siendo uno de los detonantes, unos ejemplos de ello son: deslizamiento en sierra norte de Puebla en 1999, que cobró más de 200 víctimas, los deslaves y flujos de lodo acontecidos en Chiapas en 1998, o el flujo de escombros en Acapulco en 1997, provocado por el huracán Pauline. En todos estos casos la combinación de lluvias intensivas con procesos antropogénicos como el uso inadecuado suelo y deforestación, han sido el motor principal en la inestabilidad del terreno (Vásquez, 2002).

Las precipitaciones, son entendidas como la forma en que el agua cae desde las nubes a la tierra y se presenta como, lluvia, granizos y nieve. Se generan a partir del proceso de ascendencia del aire, según la causa que origine el ascenso de la masa de aire húmedo se pueden distinguir tres tipos de precipitaciones: convectivas, orográficas, ciclónicas o frentes (Campos, 1998).

En la república mexicana se presentan los tres tipos de precipitaciones, las cuales han jugado un papel importante en la ocurrencia de deslizamientos (Vásquez, 2002). Las lluvias ciclónicas están asociados al paso de un ciclón y se presentan el costado del atlántico y pacífico del territorio mexicano ocasionando la presencia de frentes fríos que traen consigo abundantes lluvias.

Las lluvias orográficas suceden cuando vientos cargados de humedad se encuentran con una barrera montañosa, viéndose forzados a descender, enfriándose y originando precipitaciones, en ocasiones son el inicio de las precipitaciones convectivas, las cuales se presentan cuando una masa de aire es inestable y más caliente que el circundante, el aire más caliente sube y se enfría adiabáticamente, alcanzando su punto de nubosidad lo cual genera precipitaciones en forma de aguaceros (Campos, 1998).

Generalmente las precipitaciones convectivas y ciclónicas son las que detonan deslizamientos, debido a su intensidad y corta duración, esto conlleva a la saturación del suelo y reducción de su resistencia, es importante comprender que la inestabilidad de una ladera no se dará por la acción de una tormenta ordinaria, sino que ocurrirá tras una lluvia intensa o bien, después de una lluvia pertinaz por semanas, que saturará el suelo y eventualmente afectará la estabilidad de la ladera (Vásquez, 2002).

1.6 Concepto de Radar y Radar de Apertura Sintética SAR

La observación de fenómenos naturales y socionaturales que se realiza desde plataformas remotas ha significado el surgimiento de una nueva disciplina denominada teledetección o sensores remotos, según el vocablo inglés remote sensing. Básicamente un sensor remoto se

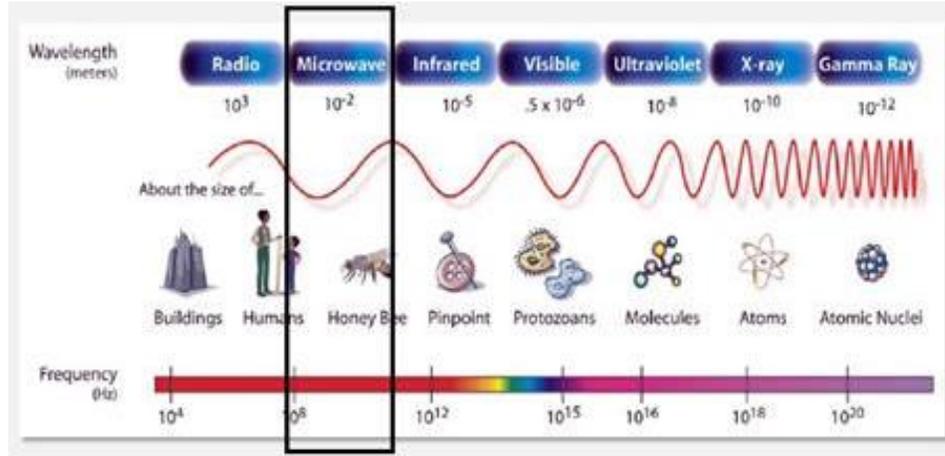
traduce en un instrumento que permite captar información a distancia, existen diferentes mecanismos para la obtención de información como lo son: aeronaves con radar a bordo, LIDAR o los más desarrollados que son los satélites.

A partir de la información que suministran los satélites se han realizado diversos estudios que permiten identificar el comportamiento temporal, distribución espacial y cambios en variables para diferentes fenómenos. Existen sensores pasivos en los cuales las fuentes surgen de energías naturales (sol, tierra, cuerpos calientes) y por otro lado existen los sensores activos en los cuales se genera artificialmente su energía para su iluminación.

En teledetección, un sistema de radar es un sistema de iluminación activo ya que crea su propia energía, el término Radar por sus siglas en inglés significa Radio Detection and Ranging y consiste en una antena instalada sobre una plataforma satelital o aérea la cual emite una señal de ondas electromagnéticas en el rango de las microondas abarcando el espectro que va cubre el espectro electromagnético que va desde 1 mm hasta aproximadamente 1 m (Seppi, 2016) permitiendo obtener información a detalle de centímetros (Figura 7), lo cual permite la detección y medición de distancias por medio de ondas de radio (Euillades y Euillades, 2015) cuya característica principal es su posición de vista de manera lateral.

Los Sistemas de Radar de Apertura Sintética SAR (por sus siglas en inglés Synthetic Aperture Radar) funcionan a partir de una antena sintética que emite y recibe los pulsos, lo cual significó un avance ya que permitió el uso de antenas con dimensiones menores a diferencia de los radares convencionales creados en sus inicios.

Figura 7. Longitudes de onda

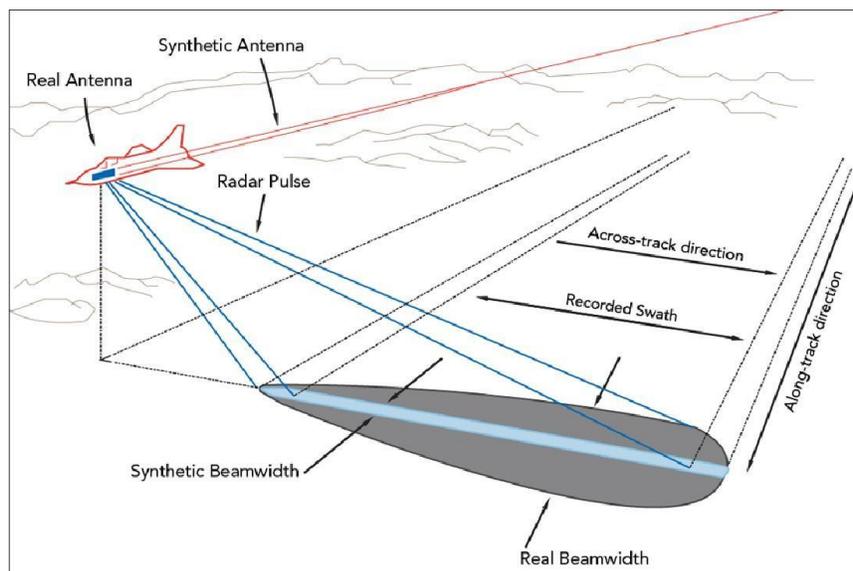


Fuente: Podest, 2018

La energía electromagnética emitida en los sistemas SAR al trabajar en el rango de las microondas permiten que las ondas penetren en las nubes y vegetación obteniendo información en el día y la noche lo que supone un gran aporte para la observación de la tierra en zonas con presencia de nubes, su funcionamiento radica en la emisión controlada en velocidad y tiempo de pulsos electromagnéticos que iluminan un área de la superficie terrestre, estos pulsos son reflejados por los elementos en la superficie y devueltos a la antena SAR que tiene un ángulo de vista perpendicular (ver imagen). Los pulsos que retornan (eco) son medidos por su velocidad y de esta manera se puede detectar la posición de objetos ubicados en su línea de vista (tiempo de tránsito), y utiliza la intensidad de los pulsos reflejados para inferir características acerca de los mismos (tamaño, rugosidad, propiedades eléctricas) (Euillades y Euillades, 2015).

Los sistemas de Radar de Apertura Sintética (SAR) son sistemas de radares coherentes que generan imágenes de alta resolución. Una apertura sintética o antena virtual consiste en un extenso arreglo de señales de radar sucesivas y coherentes que son transmitidas y recibidas por una pequeña antena que se mueve a lo largo de un determinado recorrido de vuelo u órbita (Figura 8). El procesamiento de la señal usa las amplitudes y fases de la señal recibida sobre pulsos sucesivos para crear una imagen (Sarychikhina, Glowacka, Vidal, Mellors, y Hernández, 2011).

Figura 8. Funcionamiento del sistema de Apertura Sintética de Radar SAR.



Fuente: <http://www.mak.com/products/visualize/radarfx-sar-server>

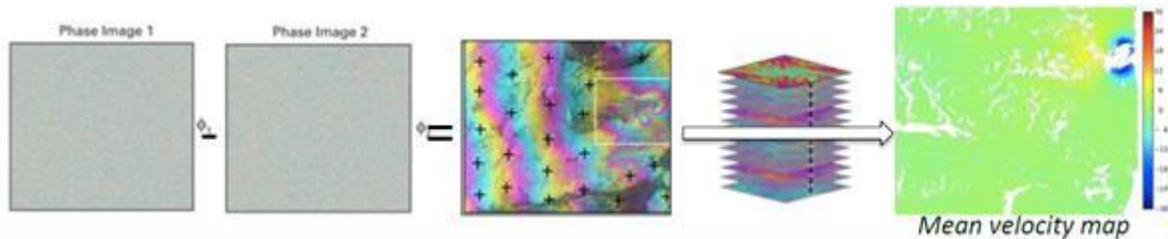
Las imágenes de radar se forman a partir de la transmisión de pulsos hacia la superficie terrestre que viajan a la velocidad de la luz y mide el eco que retorna (retrodispersión) a partir de dos elementos fundamentales: 1) la magnitud que hace referencia a la magnitud del eco reflejado y 2) la fase que indica la posición en la que se encuentra en un momento específico en el ciclo de la onda (Podest, 2018). La fase es fundamental para determinar desplazamientos de terreno a partir de la técnica de interferometría donde se usan dos imágenes que apuntan hacia el mismo punto, pero en diferente tiempo.

En la investigación de deslizamientos, el sensor de microondas (o radar) más utilizado es la apertura sintética Radar (SAR), ya que es un sistema activo capaz de registrar el eco electromagnético retrodispersado de la superficie de la tierra y de disponerla en un mapa de imágenes de valor complejo 2D (amplitud y fase) (Jiménez-Perálvarez, 2011).

La interferometría SAR, InSAR, es una técnica geodésica establecida, basada en la combinación de dos imágenes SAR de la misma escena, adquirida desde puntos ligeramente diferentes (Singleton, Li, Hoey y Muller, 2014). Esta combinación da como resultado una

nueva imagen conocida como interferograma, combinando varios interferogramas se pueden generar mapas con la velocidad media de movimientos en el suelo (Figura 9).

Figura 9. Procedimiento para la generación de mapas de velocidad partir del procesamiento de las fases de imágenes de radar y combinación de interferogramas.



Fuente: Chaussard et al., s.f

Una ventaja al usar imágenes de radar es que muchas se encuentran libres para descargas de sensores como Alos Palsar de Japan Aerospace Exploration Agency JAXA, Sentinel de la European Space Agency ESA, la serie de satélites ERS (European Remote Sensing Satellite), así como el software para la ejecución de procesos como SNAP de la Agencia Espacial Europea. Además, la disponibilidad temporal de las imágenes es alta, lo que permite adquirirlas con periodicidad de tiempos cortos, a su vez permite obtener una alta calidad ya que los sistemas de radar atraviesan nubosidades.

Según Seppi (2016) Algunas de las principales bandas empleadas en radar son: banda P, de alrededor de 65 cm. de longitud, banda L, de alrededor de 23 cm de longitud, banda S, de alrededor de 10 cm de longitud, banda C, de alrededor de 5 cm de longitud, banda X, de alrededor de 3 cm de longitud y banda K, de alrededor de 1.2 cm de longitud.

La banda S se emplea sobre todo en radar meteorológico, telecomunicaciones y rastreo de embarcaciones; la banda K por lo general se reserva a aplicaciones de tipo militar. La banda P es capaz de adquirir información en terrenos difíciles, dada su alta penetrabilidad, pero desde un punto de vista ingenieril es difícil emplearla por las limitaciones que impone al tamaño de la antena (Seppi, 2016).

Las bandas más usadas para teledetección debido a su longitud de onda y adquisición son las bandas X, C, L y P ya que presentan una penetración de la señal adecuada, cabe destacar que la penetración de la señal en vegetación o suelo incrementa en longitudes de onda largas.

2. Marco de referencia

En el presente capítulo se presentan los antecedentes de estudio, a través de un recorrido por diferentes investigaciones científicas que se han realizado a nivel internacional y nacional referentes al impacto social de deslizamientos, su ocurrencia, construcción de inventarios como herramientas de análisis y el uso de Interferometría para modelación de deslizamientos.

2.1 Antecedentes a nivel internacional

Existen investigaciones e iniciativas que han hecho un esfuerzo notable para la confección de inventarios de deslizamientos globales y nacionales, usando diferentes técnicas que van desde la consulta de noticias hasta la identificación de superficie desplazada usando tecnologías de información geográfica.

A nivel internacional organizaciones han dispuesto herramientas para la recopilación de información, el Centro de Datos Socioeconómicos y Aplicaciones SEDAC-NASA (CHRR et al. 2005; Dilley et al. 2005) por sus siglas en inglés desarrolló la compilación y mapeo para la visualización de la distribución espacial de eventos asociados a desastres a nivel global, por su parte el Centre for Research on the Epidemiology of Disasters - CRED (CRED y UCLouvain, 2020) construyó la base internacional de desastres EM-DAT. Entre las iniciativas actuales se presenta el Catalogo Global de Deslizamientos desarrollado por la Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio - NASA (Kirschbaum et al. 2010) el cual se actualiza constantemente, así mismo Kirschbaum et al. (2015) desarrolló un análisis espacial y temporal del mismo estableciendo relaciones en términos de impacto de pérdidas de vidas humanas y su relación con las precipitaciones como factor detonante a escala global y regional.

De igual forma tuvo lugar el desarrollo de los conjuntos de datos globales dieron paso al desarrollo del modelo global de riesgo de deslizamientos de tierra y avalanchas, donde junto con los datos de la población mundial, como datos de entrada se obtuvo la evaluación de riesgos. Encontrando que; las regiones con mayor riesgo se pueden encontrar en Colombia,

Tayikistán, India y Nepal, donde se encontró que el número estimado de personas muertas por año por cada 100 km² era mayor a uno. El modelo hizo una predicción razonable del riesgo de deslizamientos de tierra en 240 de 249 países (Nadim et al. 2006).

A una escala nacional diferentes países le han apostado a la revisión de historicidad y construcción de inventarios para el análisis de la amenaza y riesgo, en Italia, uno de los países donde los deslizamientos representan una de las amenazas que generan afectaciones considerables, desarrolló el Inventario Italiano de Deslizamientos en el año 1999 con el objetivo de cartografiar deslizamientos de tierra, de igual forma su alcance fue puesto a evaluación con índices de calidad que permiten identificar las áreas más críticas (Trigila et al. 2010).

En Nicaragua, el Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales - INETER creó una base de datos digital de deslizamientos para Nicaragua para proporcionar a la comunidad científica y a las autoridades nacionales una herramienta para la evaluación del peligro de deslizamientos, el manejo de emergencias, la planificación del uso del suelo, el desarrollo de sistemas de alerta temprana y la implementación de políticas públicas y privadas (Devoli et al. 2007). En Nueva Zelanda se realizó la construcción de inventario en el Suroeste Montañoso para el análisis del volumen de los deslizamientos logrando identificar las áreas con mayor afectación (Korup 2005).

Por su parte los investigadores Damm y Klose (2015) presentaron estudios con avances en la comprensión de los impactos de los deslizamientos de tierra y su relevancia económica a nivel local y regional en Alemania usando información del inventario nacional. En este país se avanzó en el análisis de los datos de historicidad desde una perspectiva socioeconómica (Klose et al. 2016). En Gran Bretaña el Servicio Geológico Británico (BGS) es responsable de la actualización y registro de eventos de deslizamientos de tierra en la base de datos nacional y su desarrollo ha sido usado para la construcción de un método para complementar registros existentes y mejorar la capacidad para pronosticar eventos futuros en función de los registros de eventos pasados (Taylor et al. 2015; Pennington et al. 2015).

Por otra parte, se han desarrollado metodologías para la identificación de deslizamientos con técnicas para el procesamiento de datos topográficos de alta resolución en áreas amplias para la detección de deslizamientos haciendo uso de modelos digitales de elevación, ortofotos y Sistemas de Información Geográfica (SIG) para la construcción de inventarios con representación cartográfica de áreas (Palenzuela et al. 2015). Sin embargo, la mayoría de inventarios se realizan para áreas específicas y pocos países han desarrollado iniciativas a escala nacional (Kirschbaum et al. 2010).

2.2 Antecedentes a nivel nacional

México es sin duda un país con condiciones físicas propicias para la ocurrencia de movimientos de ladera, es por esta razón que desde hace décadas se desarrollan investigaciones para su estudio y zonificación en diferentes áreas a partir de diferentes métodos, como lo son: topográficos, geodésicos, fotogramétricos, de teledetección e instrumentales.

En México hace menos de dos décadas la información y elaboración de un inventario nacional de Procesos de remoción en Masa PRM, no era de interés (Jaimes et al. 2010) desde el terremoto de 1985, cuyo efecto fue de grandes dimensiones en la Ciudad de México, se inició la consolidación de acciones de protección civil y documentación de desastres, siendo este el más documentado (Ordaz y Zeballos, 2007). Según Alcántara-Ayala (2004) a nivel nacional no existía base de datos completa de registros de deslizamientos. Actualmente se puede mantener esta afirmación ya que no hay articulación entre entidades para compilar información que presentan duplicada o faltante, trabajo realizado en esta investigación.

Existen avances relevantes en su documentación por parte de entidades gubernamentales e investigadores, en el año 1994 se presenta el Prontuario de Contingencias del siglo XX Mexicano desarrollado por la Subsecretaría de Protección Civil y de Prevención y Readaptación Social a partir de fuentes periodísticas. En el año 2001, el Centro Nacional de Prevención de Desastres CENAPRED presentó el Diagnóstico de Peligros e Identificación de Riesgos de Desastres en México, como un primer esfuerzo para consolidar un Atlas

Nacional de Riesgos donde registran los desastres con mayor impacto en el país con algunas estadísticas de daños (CENAPRED-SEGOB, 2001).

Por su parte, Alcántara-Ayala (2008) describió los deslizamientos más desastrosos para el país entre 1935-2006, en este mismo año se publicó una propuesta para la construcción de un inventario nacional con base en observaciones de campo y análisis de imágenes de satélite IKONOS, la cual fue aplicada a una porción de la Sierra Norte de Puebla (I. Alcántara-Ayala y García Murillo, 2008). Posteriormente, Jaimes et al., (2010) desarrolló una base de datos georreferenciada con los deslizamientos más importantes detonados por lluvias y sismos.

A nivel más detallado se han desarrollado investigaciones que presentan información histórica de eventos a causa de factores detonantes como lluvia y sismos, aplicadas a algunas zonas de la república. En el año 2004 la investigadora Irasema Alcántara presentó el desarrollo de un indicador de susceptibilidad en términos de evaluación de amenazas a partir de fotografías aéreas, observaciones de campo y el acoplamiento del análisis de inestabilidad de taludes con un modelo de elevación digital, realizando el análisis de procesos de movimiento en masa ocurridos en el año 1999 en la Sierra Norte del Estado de Puebla, como un caso representativo de deslizamientos inducidos por lluvias en México (Alcantara-Ayala, 2004).

Aceves Quesada, Legorreta Paulín, Lugo Hubp, Umaña Romero, y Legorreta Cuevas (2016) desarrollaron un inventario de deslizamientos multitemporal usando fotografías aéreas y Sistemas de Información Geográfica para la elaboración de cartografía geomorfométrica (altimétrico, pendientes y geomorfología) junto con trabajo de campo, la técnica de análisis y cartografía morfométrica se aplicó para la construcción del inventario en la cuenca del río El Estado, localizada en la ladera sudoeste del volcán Citlaltepctli o Pico de Orizaba.

Por su parte, Gaidzik, Ramírez-Herrera, Bunn y Ben (2017) incorporaron el uso de dos enfoques para la construcción de un inventario de deslizamientos en el Estado de Guerrero, el primero de ellos consistió en mapeo manual de deslizamientos usando imágenes de satélite y el segundo a partir de imágenes LIDAR para la construcción de inventario automatizado a través del desarrollo de un algoritmo denominado Método de Conexión de Contorno (CCM)

que permite la identificación automática de la morfología del deslizamiento de tierra, produciendo un mapa de susceptibilidad a deslizamientos mediante el cálculo de la probabilidad de ocurrencia de deslizamientos de tierra a partir de las relaciones estadísticas de deslizamientos de tierra inventariados detectados con modelos digitales de terreno (DTM) LIDAR y los factores causantes de deslizamientos derivados utilizando el método de regresión logística.

2.3 Antecedentes en SAR y desarrollo de técnicas de interferometría para modelación de deslizamientos

Con respecto a la modelación de deslizamientos utilizando Interferometría para el procesamiento de imágenes de satélite e identificación de desplazamientos de terreno se han desarrollado diferentes estudios a nivel internacional. Las técnicas de sensores remotos representan una herramienta poderosa para la investigación de deslizamientos (Scaioni, Longoni, Melillo y Papini, 2014), entre las que se destaca el uso de LIDAR y la interferometría, que consiste en la interpretación y procesamiento de imágenes de imágenes de radar con resultados a detalle centimétrico.

Según Li, Xu y Li (2021) en el año 1969, Roger e Ingalls tomaron la iniciativa en el uso de la técnica InSAR para extraer con éxito la información de elevación de la superficie de Venus y la Luna, el propósito original de aplicar InSAR era obtener simultáneamente la elevación de la superficie por la diferencia de fase de dos imágenes SAR. Este estudio puso en la mira las ventajas del uso de radar dando paso posteriormente al desarrollo de la técnica conocida con DinSAR propuesta por los investigadores Andrew Gabriel, Richard Golstein y Howard Zebker (1989), quienes presentaron resultados experimentales de la aplicación de metodología con imágenes Seasat en el Valle de California para medir movimientos superficiales pequeños con una resolución de aproximadamente 10 m a través de la separación de señales de deformación y elevación del suelo.

Desde entonces el método DinSAR ha sido ampliamente aplicado en diferentes estudios para la detección y medición de deformaciones causadas por fenómenos como terremotos,

volcanes y glaciares (Li et al., 2021). En países como China e Italia se han presentado avances significativos en el uso de técnicas de interferometría con el procesamiento de imágenes de radar de diferentes misiones de satélites SENTINEL, ALOS PALSAR, COSMO Skymed, entre otros para modelar deslizamientos (Casagli et al., 2016; Dai et al., 2016; Lazecký, Çomut, Hlaváčová, y Gürboğa, 2015; Mondini et al., 2019; Singleton et al., 2014).

En la última década, las técnicas de Radar Interferométrico de Apertura Sintética (InSAR) se han vuelto herramientas ampliamente utilizadas y ampliamente reconocidas para el mapeo y monitoreo de deslizamientos (Solari et al., 2020). Con la aplicación de la técnica DinSAR se evidenció que se presentaban perturbaciones por ruidos atmosféricos y decorrelación espacio-temporal, dando paso a la exploración de nuevas propuestas metodológicas que permitieran obtener resultados de mejor calidad.

En el año 20002, Berardino et al. (2002) presentó SBAS como una técnica de InSAR donde con el desarrollo de un nuevo algoritmo se puede realizar el monitoreo la evolución temporal de las deformaciones en la superficie terrestre, el estudio fue desarrollado en Campi Flegrei y la ciudad de Nápoles, Italia, con el uso de imágenes de misiones satelitales europeas para un periodo de tiempo comprendido entre 1992 y 2000. La técnica se basó en una combinación apropiada de interferogramas diferenciales producidos por pares de datos caracterizados por una pequeña separación orbital (línea de base) para limitar los fenómenos de decorrelación espacial.

La aplicación del método permite mitigar los artefactos atmosféricos y los errores topográficos en interferogramas secuenciales en el tiempo, y así obtener información de deformación de series de tiempo (Lee, Lu, Jung, Won y Dzurisin, 2006), a través de la descomposición de valores singulares permitió establecer pares de imágenes, es decir; "vincular" fácilmente conjuntos de datos de adquisición de SAR independientes, separados por líneas de base grandes, lo que aumenta la tasa de muestreo temporal de observación (Berardino et al., 2002). Se destaca su eficacia para medir deformación de series de tiempo lo que permite identificar deslizamientos a partir de cambios de deformación en el terreno.

En México el uso de técnicas de interferometría SAR tuvo sus inicios en la última década con el uso de imágenes satelitales de radar para la estimación de subsidencias en acuíferos, Carnec y Fabriol (1999) y Hanssen (2001) interpretaron algunas imágenes de Radar de Apertura Sintética (Synthetic Aperture Radar), SAR, de satélites ERS 1/2 adquiridas en 1993–1997 y 1995–1997 para estimar tasas de hundimiento del Cerro Prieto en el Valle de Mexicali (Sarychikhina et al., 2011).

En el año 2010 se realizó el estudio de subsidencia de la Ciudad de México asociado con la extracción de agua subterránea aplicando la técnica de interferometría de dispersión persistente (PSI) con datos adquiridos por el sistema Envisat ASAR entre enero de 2004 y julio de 2006 (Osmanoğlu, Dixon, Wdowinski, Cabral-Cano y Jiang, 2011). Cigna et al. (2012) investigó patrones espaciales y temporales de hundimiento en el Estado de Michoacán, aplicando técnicas de interferometría SAR convencional (InSAR) e interferometría de dispersión persistente (PSI) para el procesamiento de 23 imágenes de radar de apertura sintética (SAR) ENVISAT adquiridas entre 2003 y 2010.

Diferentes autores han realizado estudios similares, sin embargo, su enfoque se dirige más hacia el monitoreo de deformaciones en volcanes y desplazamientos asociados a hundimientos o subsidencia (Estelle Chaussard, Wdowinski, Cabral-Cano y Amelung, 2014; Dávila-Hernández y Madrigal-Uribe, 2015; Lee et al., 2006; Solano Rojas et al., 2015) y pocos son los estudios que han dirigido sus esfuerzos en modelar deslizamientos.

Capítulo 3. Materiales y métodos

Teniendo en cuenta que la investigación está orientada por una visión compleja de la relación sociedad-naturaleza, particularizada en los asentamientos humanos y su localización en zonas de ladera, se puede decir que el estudio es una alternativa fundamental para la comprensión e interpretación de las interacciones y dinámicas que en él se presentan.

Como punto de partida, se desarrolla la recolección de información regida por la utilización de fuentes secundarias representadas en la revisión de libros acerca del tema, con el fin de aclarar y comprender los elementos conceptuales fundamentales para la identificación y conocimiento de los elementos interactuantes que dan origen al riesgo por deslizamiento, como lo son: susceptibilidad, peligro, vulnerabilidad, riesgo, escenarios de riesgo y asentamientos humanos.

Se realiza el marco teórico abordando las líneas de investigación, teorías, autores y estudios que se han desarrollado en la temática, así mismo se establecen los significados de cada uno de los conceptos a abordar en el estudio, esto con el fin de dar claridad de la base teórica a trabajar. Este paso permite adquirir un sustento teórico de los procedimientos y métodos a implementar en el desarrollo del presente proyecto.

Esta propuesta de investigación se desarrolla en cuatro fases: la primera de ellas corresponde a la recolección de información de registros históricos de deslizamientos a nivel nacional con el fin de identificar las zonas más afectadas con este tipo de eventos. Posteriormente se elige la zona de estudio, según la identificación de zonas con mayor ocurrencia de eventos y con mayor impacto social. Una vez definida se procede a la adquisición y procesamiento de información necesaria para realizar la identificación de deslizamientos, por otra parte, se procederá a la recolección y análisis de datos como factores detonantes del evento. Por último, se realiza la correlación de los sismos con las zonas de deslizamientos identificadas y modelamiento en SIG de los resultados obtenidos para la producción de cartografía.

En la presente investigación se plantean dos aspectos fundamentales: a) la identificación de deslizamientos y representación cartográfica, usando técnicas de teledetección y modelación

en ambiente SIG y b) el análisis y procesamiento de datos de precipitación para el cálculo de umbrales de intensidad que permitan estimar los niveles de lluvias necesarias para detonar un evento.

3.1 Historicidad de deslizamientos a nivel nacional y estimación de su impacto

Para documentar la historicidad de eventos de deslizamientos se acudió a la consulta de fuentes hemerográficas, bases de datos históricas de bitácoras de las unidades municipales de protección civil, atlas de riesgos y el Sistema de Inventarios de Desastres a nivel mundial y para América Latina DESINVENTAR desarrollado por la Corporación OSSO (2016).

Según la información disponible y una vez recopilada, es procesada para la estimación de recurrencia de eventos en un periodo determinado, en el cual se cuente con información. Este análisis permite realizar la construcción de un inventario a nivel nacional como herramienta para identificar los lapsos de tiempo y épocas del año en las que ocurren eventos, así como zonas críticas con altas concentración de ocurrencia de deslizamientos.

La construcción del inventario se presenta en 2 fases: i) consulta y recopilación de registros de deslizamientos, ii) estandarización y construcción del inventario. Posteriormente se realiza un análisis de la información con el fin de estimar la población afectada en el año 2017, así como la distribución espacial de los deslizamientos a nivel nacional. Lo anterior brinda elementos de base para la selección de la zona de estudio donde posteriormente se realiza la modelación de este tipo de eventos.

3.2 Recopilación de información

La recopilación de registros históricos de deslizamientos se realizó a partir de la consulta de diferentes bases de datos digitales de libre acceso, organismos de consulta para los eventos ocurridos a nivel mundial, continental y nacional. A nivel global se presentan diferentes bases de datos que compilan deslizamientos, sin duda representan un aporte valioso para el

reconocimiento de deslizamientos, sin embargo, sufren de incompletud (Van Den Eeckhaut et al., 2012).

Para el conocimiento general y posición de México a nivel mundial en la ocurrencia de deslizamientos se consultó el Catálogo Internacional de Deslizamientos desarrollado por la Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio NASA por sus siglas en inglés (NASA, 2015). Además, se tuvieron en cuenta los registros reportados desde el año 1900 por la base internacional de desastres EM-DAT desarrollada por el Centre for Research on the Epidemiology of Disasters CRED (CRED y UCLouvain, 2020). Esta base ofrece la posibilidad de consultar sus causas, fecha, pérdidas de vidas humanas, económicas, así como gráficos con tendencias de ocurrencia por tipo de eventos y mapas con su distribución a nivel mundial. Sin embargo, solo reporta eventos con más de 10 personas muertas y por tanto excluye la mayoría de eventos (Van Den Eeckhaut et al. 2012), razón por la que se alimentó el inventario de información más detallada según reportes regionales y locales.

A nivel regional se consultó el Sistema de Inventario de Efectos de Desastres DESINVENTAR, que presenta una base de datos con eventos desde el año 1970, con información recopilada a través de fuentes hemerográficas que contienen datos de fechas, causas, número de pérdidas de vidas, económicas, daños de infraestructura. Las consultas pueden ser realizadas por país en incluso con filtros por municipio o estado, brindando óptimos volúmenes de información para conocer la recurrencia de desastres según el tipo de fenómeno.

Se consultó la publicación Diagnóstico de Peligros e Identificación de Riesgos de Desastres en México, realizada a través de consultas en fuentes periodísticas, el Prontuario de Contingencias del siglo XX Mexicano (CENAPRED-SEGOB, 2001). Esta última se dedicó a la recopilación y elaboración de información estadística sobre amenazas naturales, alimentada por diferentes instituciones relacionadas. La recolección de eventos históricos se registra hasta el año 2000 (Ordaz y Zeballos, 2007). También se incluyen datos de investigaciones que presentan información histórica de eventos a causa de factores detonantes como lluvia y sismos, aplicadas a algunas zonas de la república (Alcantara-Ayala

2004; Alcántara-Ayala and García Murillo 2008; Jaimes et al. 2010). Además, se incluyeron 8,223 registros a nivel nacional recopilados por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía de México INEGI, los cuales pueden ser consultados en Mapa Digital de México (Instituto Nacional de Estadística y Geografía INEGI, 2016a).

3.3 Estandarización de datos y construcción del inventario

Una vez obtenidos los datos se estandarizaron corrigiendo errores de ortografía y eliminando información duplicada. Se definieron los siguientes campos para la conformación de la base de datos: clave de entidad (Estado), clave del municipio, tipo, detonante, latitud, longitud, fecha, año y mes, con el fin de homogenizar los registros y agruparlos en una sola base. Asimismo, se reclasificaron las variables en los campos que presentan la misma información, pero con diferente terminología. Un ejemplo de ellos es la referencia al factor detonante como lluvias o precipitaciones.

La información del campo “Tipo” fue reclasificada usando las siguientes categorías: deslizamiento, caída, flujo, movimiento complejo según la clasificación de EPOCH (1993). Adicional a esto se conservaron las categorías de avenida torrencial y alud documentadas en algunos registros, debido a que presentan características específicas y son términos comúnmente usados en Latinoamérica. En el campo “Detonante” se usaron las categorías de: precipitaciones, sismos, ciclón tropical, desconocida y actividades antrópicas. En esta última se agrupan todas las acciones realizadas por el hombre reportadas como causas de deslizamiento (construcción inadecuada, localización, negligencia, explosiones). El campo Clave entidad y Clave municipal hace referencia al código numérico para los estados y municipios de la república mexicana según el INEGI (2016b). Cada uno de estos campos presenta su etiqueta con el nombre del estado y el municipio en el cual se presentó el evento.

3.4 Estimación de población afectada

Los informes técnicos y científicos rara vez describen el tipo y la magnitud del daño, así como las consecuencias sobre la sociedad (Devoli, et al. 2007). No obstante, el impacto social

es un elemento crucial para el desarrollo e implementación de medidas preventivas, ya que son la pérdida de vida humanas la que construye riesgos. Por esta razón se analizaron los datos de frecuencia y distribución de deslizamientos con respecto a la población localizada en áreas con mayor ocurrencia de eventos, con el fin de determinar a nivel estatal y municipal el porcentaje de población que podría verse en riesgo.

Por otra parte, se usó la capa de distribución y frecuencia de deslizamientos del Centro de Datos Socioeconómicos y Aplicaciones SEDAC-NASA (CHRR et al. 2005; Dilley et al. 2005) por sus siglas en inglés como insumo para la distribución espacial de eventos ya que presenta la superficie del territorio mexicano con niveles de ocurrencia de eventos, la cual fue validada superponiendo los registros del inventario.

Para la obtención del dato de población se extrajeron mediante selección por localización usando software de Sistemas de Información Geográfica SIG las localidades rurales presentes en zonas con alta concentración de deslizamientos. Una vez obtenidas las localidades con alta ocurrencia de eventos se les asoció el dato más actualizado de población, que en este caso corresponde al censo del 2010 (Instituto Nacional de Estadística y Geografía INEGI, 2010) con esta información se procedió a estimar la población afectada por municipio para el año 2017. Este proceso se realizó i) completando los datos de población en las localidades y ii) estimando la población afectada para el año 2017 mediante la Tasa de Incremento Promedio Anual TIPA.

Para realizar la estimación fue necesario completar los datos de población en las localidades sin dato, usando el software SPSS se aplicó la fórmula para calcular la media de población de las localidades de los municipios donde se ubican y asignando este valor a los datos faltantes. Posteriormente se estimó la población afectada para el año 2017 calculando la TIPA, así:

$$TIPA = ((Cf/Ci (1+t) - 1) * 100$$

Donde: Cf = Población año final, Ci = Población año inicial, t = tiempo expresado en años

La estimación se calculó aplicando la TIPA desde el año 2010 así:

$$Pobx = Pobj * (1+(TIPA / 100))$$

Donde: Pobj = población del año anterior (donde la base es la población del año 2010),
TIPA= valor tasa de incremento promedio anual

Por último, se identificaron los estados y municipios con mayor ocurrencia de eventos, así como las zonas con mayor número de habitantes posiblemente afectados a través del procesamiento de datos en SIG y el uso de información cartográfica oficial de la nación.

3.5 Selección de zona de estudio

Considerando que los deslizamientos son procesos complejos donde interactúan diferentes elementos del sistema físico, la elección de la zona de estudio cobra una importancia de grandes dimensiones, ya que se requiere la identificación de áreas que cumplan con las características específicas para la generación de este tipo de movimientos. Por esta razón fue necesario generar información de ocurrencia de eventos a nivel nacional con el fin de determinar altas concentraciones de eventos. Mediante software de SIG se realizó el despliegue de la base de datos con la localización de los deslizamientos y de acuerdo a la distribución de los eventos se identificó visualmente las áreas con mayor concentración de ocurrencia.

La elección de la zona de estudio se realizó teniendo en cuenta dos factores: 1. Alta ocurrencia de deslizamientos en un periodo de tiempo de 30 años y 2. Alto impacto de estos eventos en la sociedad, de tal manera que la elección se basó en las zonas que ha sufrido los efectos a nivel social de la ocurrencia de deslizamientos.

3.6 Modelación de zonas de deslizamiento

A través de la consulta en el portal de Alaska Facility (<https://search.asf.alaska.edu/#/>) se visualizan las imágenes que tienen cobertura en la zona de estudio del satélite a usar y su nivel de procesamiento, en este caso corresponden a imágenes de radar del satélite Sentinel 1A tipo Single Look Complex SLC, con el mismo path y frame que indica su pase en la

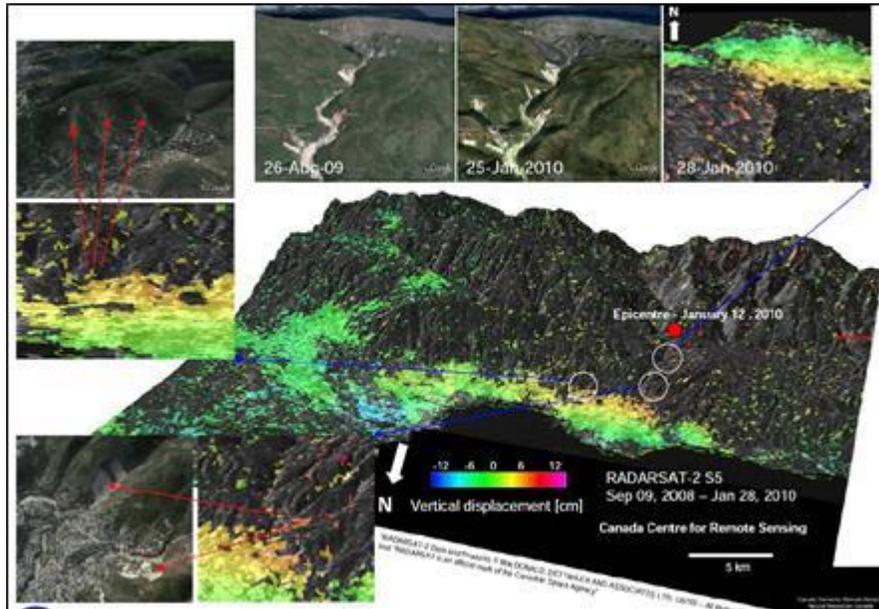
misma órbita, polarización en la misma direcci3n VV y órbitas ascendentes y descendentes, con estos parámetros se descargan las imágenes.

Con el uso de software para procesamiento de imágenes de radar de la Agencia Espacial Europea SNAP versi3n 7.0 y software ENVI versi3n 5.3, herramienta de Sarscape versi3n 5.2.1 se realiza el pre-procesamiento de imágenes con la ejecuci3n de calibraci3n radiométrica y geométrica, cuyo fin es crear una imagen donde el valor de cada píxel esté relacionado directamente con la retro dispersi3n de la escena, eliminado los posibles ruidos que tenga la imagen y garantizando su adecuada posici3n geográfica. Posteriormente a través del procesamiento se generarán interferogramas, y se seleccionarán aquellos que presenten los mejores resultados en el intervalo temporal del estudio para generar la imagen de velocidad de los desplazamientos del terreno.

La imagen de velocidad de deformaci3n se puede superponer a la de la media de amplitud, obteniéndose así una imagen general en la que es posible realizar de forma rápida, una localizaci3n aproximada de las zonas de movimiento (Figura 10), este proceso se realiza usando la herramienta Snaphu (Chen y Zebker, 2001), que no es más que un algoritmo que permite realizar el desenrollado de fase, este código solo se usa si se trabaja con el software SNAP o aplicando el geocoding si se hace uso de Sarscape del software ENVI. La localizaci3n precisa se obtiene superponiendo los resultados con mapas u ortofotos e integrándolo a un SIG, para su posterior interpretaci3n.

Cabe mencionar que el uso de esta técnica depende de la disponibilidad de imágenes, por lo que también se plantea el uso y adquisici3n de datos LIDAR, imágenes ópticas y cartografía existente, esto con el fin de obtener informaci3n base de otras fuentes que garantice el estudio de los factores locales del terreno necesarios para la modelaci3n de movimientos en masa.

Figura 10. Modelación y localización de desplazamientos verticales en Haití usando interferometría.



Fuente: Chaussard et al., s.f

3.6.1 Imágenes satelitales de radar

Las imágenes usadas para la presente investigación corresponden a la misión Sentinel-1 de la Agencia Espacial Europea - ESA que comprende dos satélites en órbita polar con un sensor de radar que opera en banda C a través de cual se generan imágenes las 24 horas del día independiente del clima. Sentinel-1A se lanzó el 3 de abril de 2014 y Sentinel-1B el 25 de abril de 2016. Orbitan 180° y juntos toman imágenes de toda la Tierra cada seis días (<https://asf.alaska.edu/data-sets/sar-data-sets/sentinel-1/sentinel-1-about/>).

Tabla 5. Modo de adquisición de imágenes en satélite SENTINEL 1 (ESA)

Modo	Wave Mode (WM)	Stripmap (SM)	Interferometric Wide Swath (IW)	Extra Wide Swath (EW)
Polarización	Single	Dual	Dual	Dual
Ancho barrido (km x km)	20	80	250	400
Resolución geométrica (rango x azimut)	5x5	5x5	5x20	20X40

Fuente: Seppi, 2016

Las imágenes Sentinel 1A y 1B son de acceso libre y descarga gratuita y se presentan diferentes niveles de procesamiento:

Level-0 (Raw): Imagen SAR comprimida y no focalizada. Solo disponible para los modos SM, IW y EW.

Level-1 (SLC): Corresponde al nivel de procesamiento que se alcanza luego de focalizar un producto L0. Contienen información orbital para su georreferenciación y proyectados en rango oblicuo. Solo disponible para los modos SM, IW y EW.

Level-1 (GRD): Los productos Ground Range Detected se obtienen luego de aplicar multilooking sobre la imagen SLC y de proyectarla a rango horizontal usando un elipsoide de referencia. Solo disponible para los modos SM, IW y EW.

Level-2 (OCN): Las imágenes L2 consisten en productos con información geofísica georreferenciada derivada de los productos L1. Actualmente se generan tres tipos de productos: Ocean Wind Field (OWI), Ocean Swell Spectra (OSW) y Surface Radial Velocity (RVL). La disponibilidad de los mismos depende del modo de adquisición.

De los niveles anteriormente mencionadas las imágenes óptimas para realizar Interferometría corresponden al Nivel 1 SLC, por sus siglas en inglés de Single Look Complex. Para la

modelación a escala detallada se adquirieron imágenes Sentinel 1A en modo IW que corresponden al modo TopSAR ya que debido a su modo de adquisición se pueden obtener dos imágenes de la misma área en diferente fecha, pero con la misma órbita y posición geométrica (Figura 11).

Para el modelamiento de deslizamientos en esta investigación se usan imagen Sentinel 1A en modo Interferometric Wide Swath (IW) con nivel de procesamiento SLC, polarización VV en órbita ascendente y descendente (Figura 11).

Figura 11. Visualización de imagen Sentinel 1A con cobertura en Motozintla



Fuente: ASF DAAC 2017, modificado de Copernicus Sentinel data 2017, procesado por ESA.

3.6.2 Método de Small Baselines Subset – SBAS

Este algoritmo se basa en el uso de imágenes con pequeñas líneas de base donde los interferogramas se superponen en el tiempo para reducir decorrelación espacial. Este procedimiento permite producir mapas de velocidad de deformación media y al mismo tiempo series de tiempo de deformación para cada pixel coherente del área de la imagen.

Para lograr información de series de tiempo de deformación de múltiples interferogramas, el algoritmo SBAS estima la tasa de deformación media y el error topográfico. Los artefactos

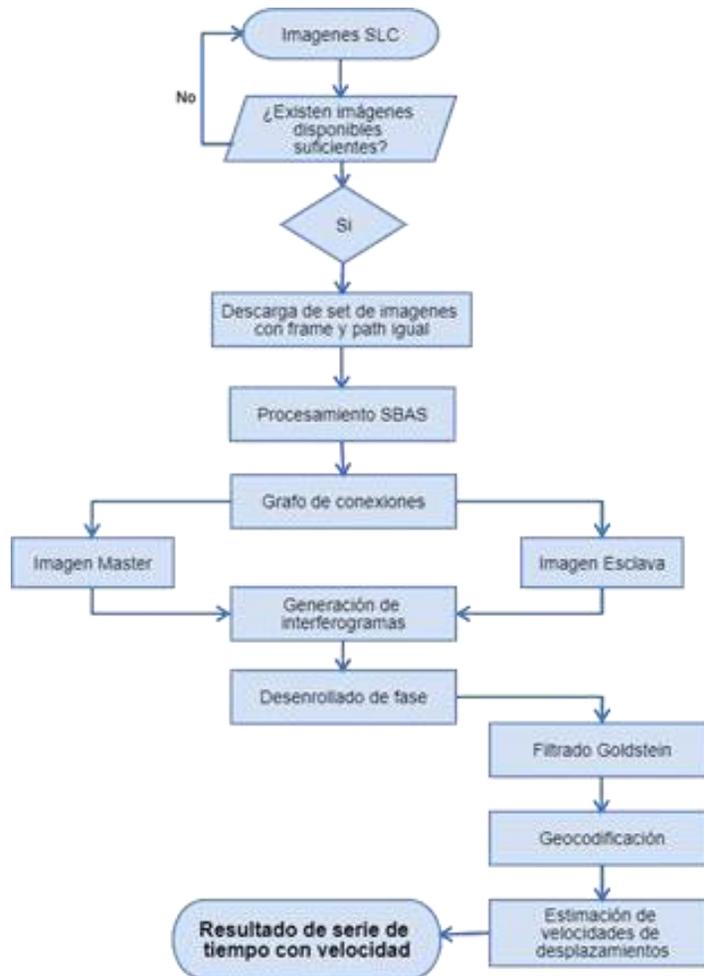
atmosféricos se mitigan mediante el paso alto temporal y filtrado espacial de paso bajo de interferogramas después de la media se eliminan las tasas de deformación. Debido a que los interferogramas no están vinculados de forma adyacente (puede haber enfoque de descomposición de valores (SVD) basado en un criterio de forma mínima de la tasa de deformación para derivar series de tiempo (Lee et al., 2006).

Considerando que esta técnica aborda series temporales para identificar desplazamientos se debe realizar como primer paso la selección de un grupo (stack) de imágenes en diferentes fechas, pero con el mismo pase de orbita, path y frame. Una vez realizada la selección el desarrollo de este método se presenta en los siguientes pasos los cuales se ejecutan en el software ENVI versión 5.3, herramienta de Sarscape versión 5.2.1 (Figura 12):

1. Gráfico de conexión: Definición de líneas de base temporal y espaciales de las imágenes para establecer la relación entre el set de imágenes en la serie de tiempo y el establecimiento de parejas para la realización de interferogramas.
2. Proceso interferométrico: Consiste en la formación de interferogramas con cada uno de los pares de imágenes a través de la corrección, filtrado para remover ruido, formación de coherencias e interferogramas con el cálculo de la fase entre ambas imágenes y posteriormente ejecutar el desenrollado de fase.
3. Refinamiento y re-aplanamiento: en este paso se busca reducir las constantes de fase restantes debido a la fase de tierra plana y así mismo se corrigen posibles errores orbitales. Se realizan puntos de control en interferogramas usando como base imagen satelital garantizando que cada punto de control se ubique dentro de la fase estimada.
4. Primera y segunda inversión: en el proceso de primera inversión se realiza una estimación preliminar de valores de desplazamiento y altura, se realiza un nuevo desenrollado de fase para reducir ruidos atmosféricos y topográficas buscando obtener una fase más limpia, posteriormente en la segunda inversión se procesan los resultados de la primera inversión y se utilizan filtrados para eliminar el ruido atmosférico. Se hace el proceso de convertir datos raster/vector para obtener valores de velocidad y coherencia

5. Geocodificación: se convierte la fase a unidades de desplazamiento y se realiza la georreferenciación de los resultados.

Figura 12. Flujo de proceso para modelación de deslizamientos aplicando el método SBAS



Fuente: Elaboración propia

3.6.3 Análisis de factores detonantes de deslizamientos

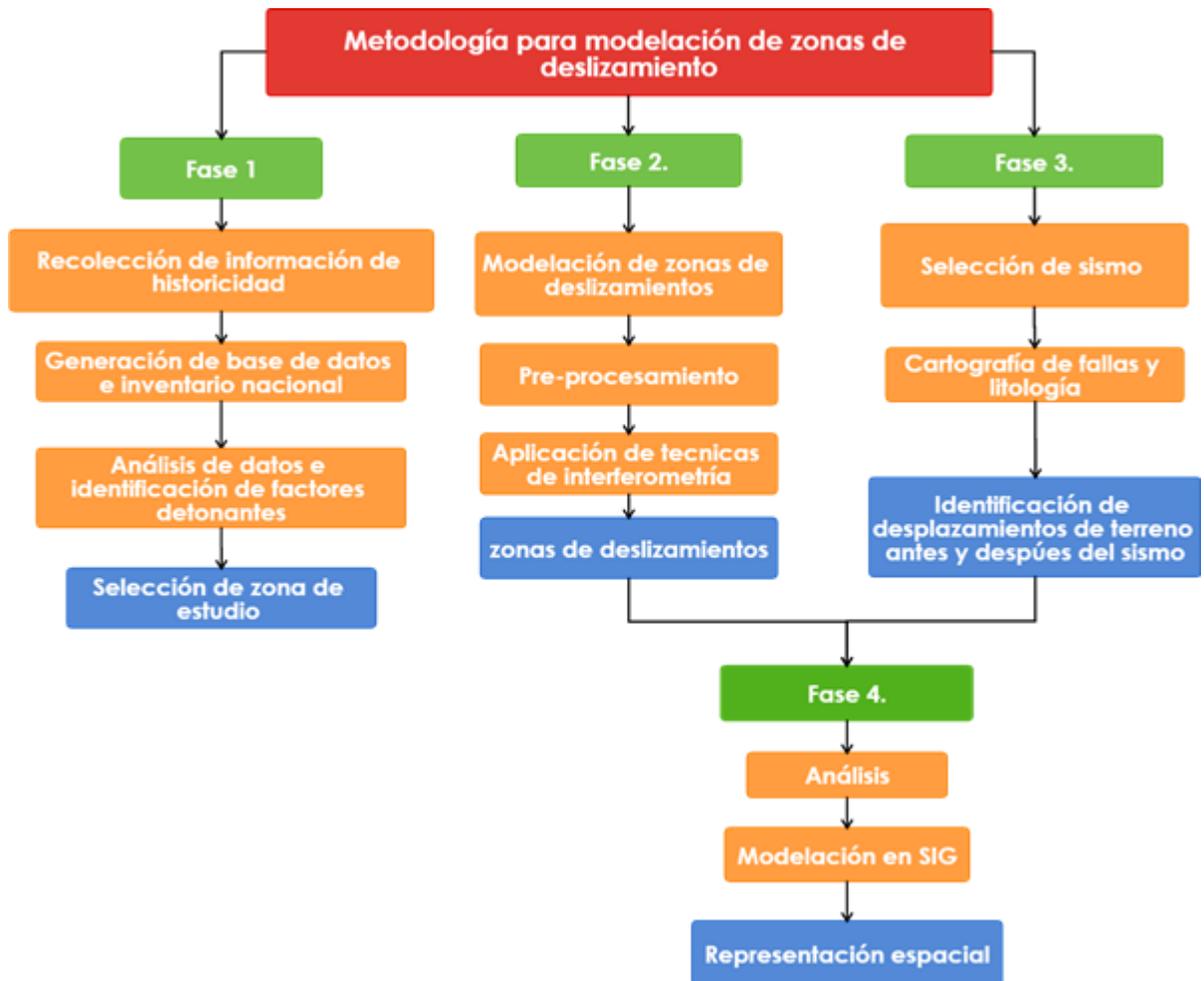
Se considera el factor de precipitación como factor detonante relacionando la causa en el inventario nacional y realizando la correlación con los meses más lluviosos y la frecuencia de deslizamientos en ese rango de tiempo. De igual forma el factor de sismo como detonante se considera analizando la identificación de deslizamientos sobre zonas de falla y el desplazamiento de terreno después del sismo, por lo que se realiza modelación con imágenes

de radar de antes y después del sismo, lo anterior con el fin de establecer la relación de este fenómeno como factor detonante.

Los resultados obtenidos se correlacionan con las velocidades de desplazamiento del terreno y se propone realizar representaciones graficas cruzadas de ambos, con el fin de realizar una aproximación de su incidencia y posible generación de eventos en las nuevas zonas de deslizamiento identificadas, a su vez este proceso permitirá validar su relación con factores detonantes. Cabe destacar que este es un aporte considerable, ya que en México actualmente no se cuenta con ningún tipo de estudio que realiza este esbozo metodológico. Una vez culminadas todas las fases se realiza en un ambiente SIG, la representación de los resultados, determinando de esta manera, las zonas probables de ocurrencia del tipo de deslizamientos identificando sus velocidades sobre fallas geológicas y su actividad antes y después del sismo.

Resulta evidente la necesidad de obtener parámetros que generan deslizamientos para cada zona geográfica y climática específica, de manera que se pueda generar una base para el establecimiento de sistemas de alerta temprana (Ramos Cañon, Trujillo-Vela y Prada-Sarmiento, 2007), razón por la que en esta investigación se busca la integración de metodologías para la detección rápida de desplazamientos y su asociación con factores detonantes como sismos (Figura 13) (UNISDR Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción de Riesgo de Desastres, 2015).

Figura 13. Esquema metodológico.



Fuente: Elaboración propia

Capítulo 4. Resultados

En el presente capítulo se presentan los resultados obtenidos a partir de la revisión de literatura histórica para la construcción del inventario de deslizamientos para México en el periodo 1905-2017, proporcionando una base para el análisis espacial y temporal de este tipo de fenómenos, así como la identificación de la precipitación como el principal factor detonante y sus impactos en términos de pérdidas de vidas humanas. Adicionalmente se realizaron estimaciones para determinar el número de personas que podrían verse afectadas por deslizamientos y su relación con los niveles de marginación a nivel nacional, el cual considera variables como: grado de escolaridad, ingresos económicos y condiciones de las viviendas, entre otros.

La construcción del inventario permitió realizar la selección del municipio de Motozintla, Estado de Chiapas como la zona de estudio, siendo este uno de los que presenta mayor ocurrencia de deslizamientos y con las condiciones físicas propicias para implementar la metodología de modelación de deslizamientos, así como el análisis de su ocurrencia con el sismo como factor detonante, ya que es uno de los Estados con registros de sismos de mayor magnitud.

El desarrollo de la metodología de análisis de desplazamientos de terreno a partir de la aplicación de la técnica de Interferometría con procesamiento de imágenes satelitales tipo Radar de Apertura Sintética SAR permitió la identificación de deslizamientos los cuales fueron relacionados con el sismo como factor detonante mediante la comparación del terreno antes y después de su ocurrencia.

Este estudio revela nuevos hallazgos en términos de distribución espacial de eventos, población afectada, así como evaluación de deslizamientos y su relación con factores

detonantes a partir de la implementación de técnicas innovadoras, con el fin de generar un aporte valioso para el estudio de deslizamientos en México y a nivel global.

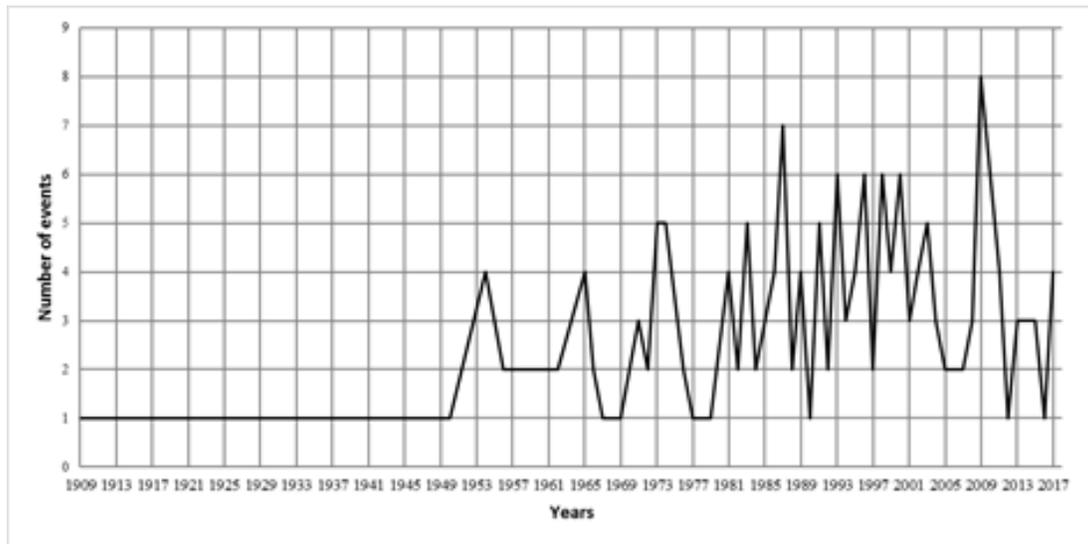
4.1 Historicidad de deslizamientos en México

Es común escuchar la frase “quien no conoce su historia, está condenado a repetirla”. En efecto, conocer la historicidad de ocurrencia de eventos naturales es fundamental no solo para datar fechas de estos sucesos, sino también para determinar sus causas y contexto. Es un primer paso en la estimación de recurrencias, es decir, la posibilidad de presentarse nuevamente bajo condiciones similares, al igual que ubicar zonas con alto riesgo de desastres. El Marco de Acción de Hyogo de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres (UNISDR, 2005) identifica el desarrollo y la mejora de las bases de datos relevantes como una prioridad clave de creación de capacidad (Taylor et al. 2015).

El registro de eventos naturales es fundamental en el análisis de riesgos porque permite identificar su tendencia, cuyo fin es la estimación de periodos de retorno o su recurrencia en un tiempo y espacio determinado, de esta manera es posible realizar aproximaciones con respecto a cuándo se pueden presentar y en dónde. El inventario de deslizamientos es un paso inicial primordial para mejorar la cartografía de susceptibilidad porque resalta la distribución, tipos y patrones de eventos pasados (Gaidzik et al. 2017).

Según cifras del EM-DAT a nivel mundial el número de deslizamientos va en aumento. En el año 1988 se inició un disparo en su ocurrencia, registrando 76 eventos en solo este año, en la década de los años 90 se presentaron 800 eventos de diferentes tipos y para el periodo 2000-2017 las cifras aumentaron a 1,655, es decir un poco más del doble (Figura 14). Cabe destacar que esta base de datos registra eventos con más de 10 muertos, 100 o más afectados, o que resultaron en una declaración de estado de emergencia o llamado de ayuda internacional (Kirschbaum et al. 2015).

Figura 14. Ocurrencia de deslizamientos a nivel mundial



Fuente: Basado en base de datos EM-DAT (www.emdat.be)

México es un país con características topográficas, climáticas, hidrológicas y orográficas peculiares, que por su ubicación sobre placas tectónicas en constante movimiento presenta frecuentemente actividad sísmica y volcánica. Está conformado, en dos terceras partes, por sistemas montañosos donde se conjugan factores geológicos, geomorfológicos, estructurales y climáticos que definen zonas geológicamente inestables (Morales et al. 2016), es un país con alta exposición a la ocurrencia de deslizamientos cuyos efectos pueden resultar desastrosos para la sociedad. De acuerdo al Centro Nacional de Prevención de Desastres CENAPRED, han sido más de 75 los desastres de magnitud significativa ocurridos en los últimos 20 años, los cuales han causado alrededor de 7,000 muertes y decenas de miles de damnificados (Bitrán 2001).

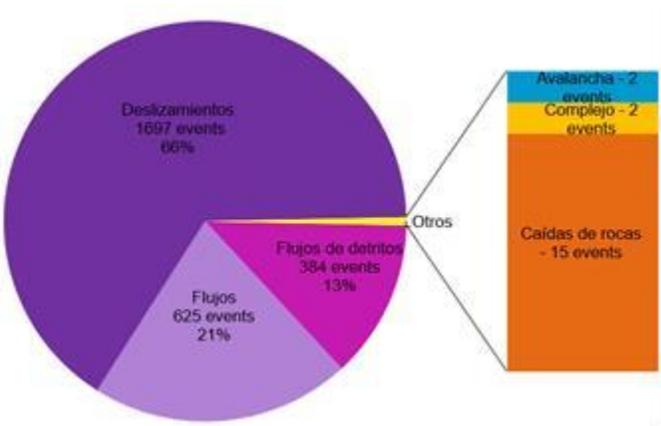
Estos eventos se dan por las características del espacio, en su mayoría zonas montañosas con localización de asentamientos humanos, donde la ocurrencia de precipitaciones intensivas juega un papel importante en su detonación. Según Bitrán (2001) en México los fenómenos de tipo geológico han cobrado la muerte de entre 6,000 y 6,500 personas en el periodo de 1980-1999, un aproximado de 500 personas al año.

Por ello, como parte de esta investigación se da a conocer la magnitud, localización e impacto de los deslizamientos en México, así como la población que podría verse afectada. Para lograrlo, se presenta el inventario de eventos en el periodo 1905-2017, producto de la revisión de reportes de diferentes fuentes, así como la estimación de las municipalidades con mayor ocurrencia y el impacto social que supone. Este análisis brinda elementos de juicio en la toma de decisiones por parte de autoridades gubernamentales para una acertada asignación de recursos necesarios dirigidos a gestión del riesgo de desastres en las regiones más afectadas, así como datos indispensables en la construcción de escenarios de riesgo y estudios por parte de la comunidad.

Este proceso se realiza con el objetivo de avanzar en el conocimiento del contexto nacional y realizar la identificación con mayor ocurrencia de deslizamientos y mayor impacto social en termino de pérdidas de vidas humanas, dicho contexto brinda una referencia de la distribución de los eventos permitiendo la selección de la zona para realizar monitoreo a escala detallada de este tipo de eventos. De acuerdo a lo anterior se presenta como resultado un inventario de deslizamientos a nivel nacional con el impacto social estimado.

Desde el año 1905 hasta el 2017 se han registrado 3,007 eventos, de los cuales 1,979 fueron deslizamientos, 589 flujos de lodo, 15 caídas de rocas, 384 avenidas torrenciales, 36 aluviones, 2 alud y 2 movimientos complejos (Figura 15).

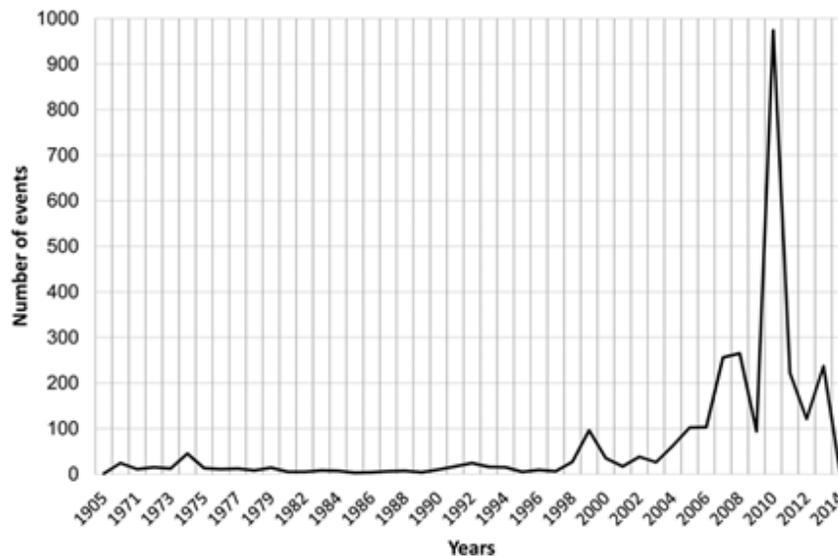
Figura 15. Tipos de movimientos en masa ocurridos en México 1905-2017.



Fuente: Díaz, Cadena, Adame y Dávila, 2019

Su ocurrencia presenta una tendencia de incremento a partir del año 1999, sin embargo, es en el año 2007 cuando se presenta un aumento significativo de eventos por encima de 200 deslizamientos anuales, el año 2010 fue el más crítico con 397 eventos, desde esta fecha el número de deslizamientos no ha descendido de los 94 eventos al año, una cifra preocupante (Figura 16).

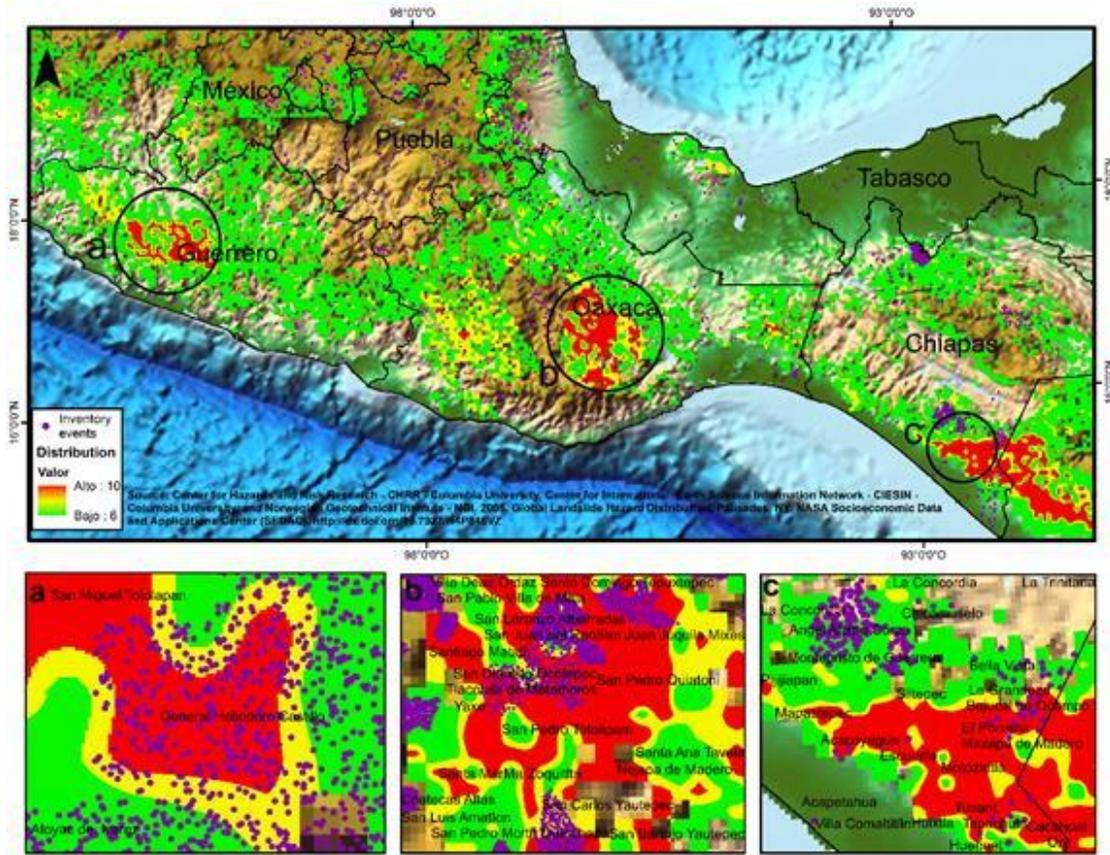
Figura 16. Distribución temporal de deslizamientos en México



Fuente: Díaz et al., 2019

Geográficamente los deslizamientos se localizan a lo largo del sistema montañoso mexicano, desde la Sierra de Baja California, Sierra Madre Oriental, Occidental y del Sur, costas de Guerrero, Oaxaca y Chiapas, con mayor concentración desde el centro del país a lo largo del eje Neovolcánico hasta el sur en la sierra Madre de Chiapas, así como en la zona limítrofe con Guatemala, dicha información recopilada en el inventario fue validada con la capa de distribución y frecuencia de deslizamientos del Centro de Datos Socioeconómicos y Aplicaciones SEDAC-NASA (CHRR et al. 2005; Dilley et al. 2005) por sus siglas en inglés como insumo para la distribución espacial de eventos ya que presenta la superficie del territorio mexicano con niveles de ocurrencia de eventos (Figura 17).

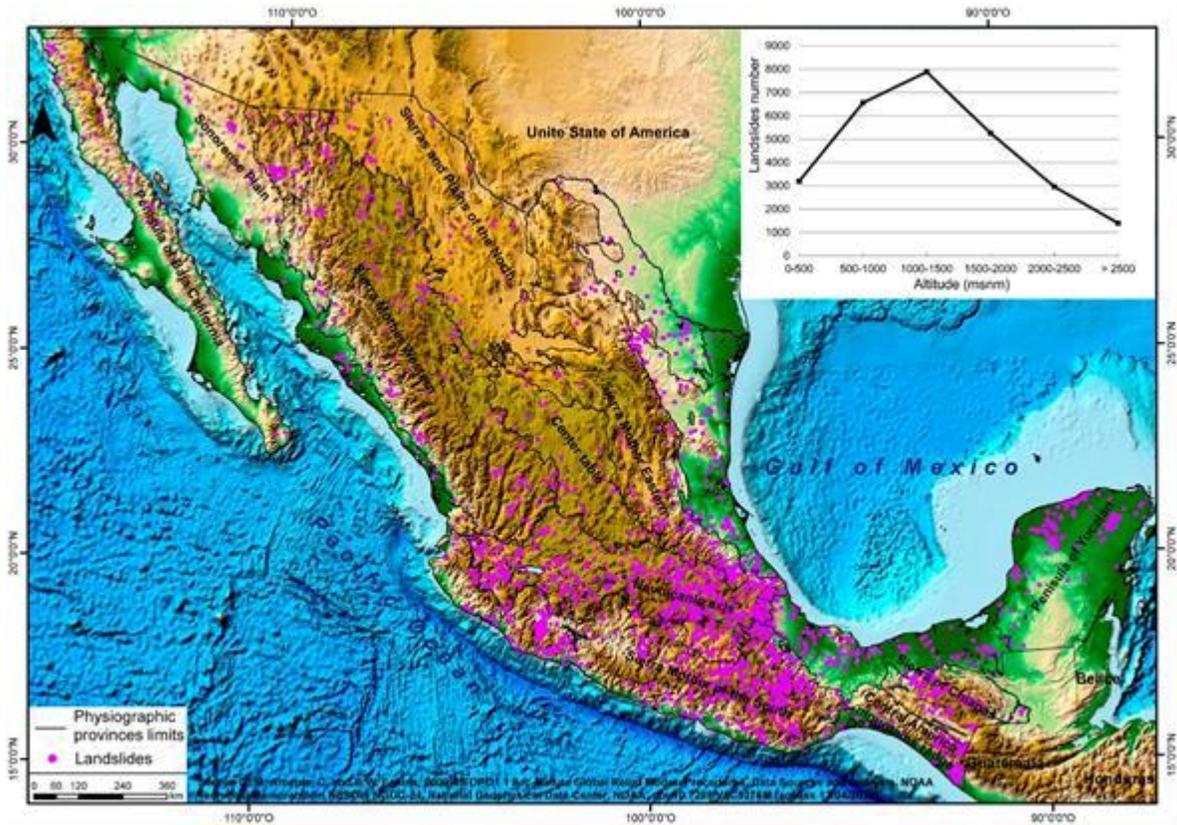
Figura 17. Áreas con mayor concentración de deslizamientos a nivel nacional. a) Localización de concentración de eventos en localidades del Estado de Guerrero. b) localidades con ocurrencia de deslizamientos en el Estado de Oaxaca. c) Distribución de eventos al sur del Estado de Chiapas



Fuente: Díaz et al., 2019 basado en CHRR et al (2005)

Se evidencia mayor concentración en el centro del país, en los estados de Hidalgo, Estado de México, Puebla, Tlaxcala, región central de Veracruz en límites con Puebla y al norte de la Ciudad de México. Es probable que esta concentración esté relacionada con la densidad poblacional, ya que son los Estados con mayor desarrollo de infraestructura en toda la república mexicana. Sin embargo, el Estado de Chiapas presenta la mayor ocurrencia de eventos, pero estos se repiten en lugares específicos, por lo que no se visualiza una alta concentración, cerca de la mitad de localidades que registran deslizamientos se ubican en altitudes que van desde los 1,000 a 2,500 m.s.n.m. (Figura 18).

Figura 18. Distribución espacial de deslizamientos en México para el periodo 1905-2017 y altitud



Fuente: Díaz et al., 2019

Los estados con más de 100 eventos ocurridos desde 1905 son Chiapas, Oaxaca, México, Veracruz, Michoacán, Puebla, Jalisco, Sonora, Yucatán, Hidalgo y México (Tabla 6). A nivel municipal se destacan 357 eventos ocurridos en el municipio de Amáten, seguido del municipio Ángel Albino Corzo con 168 ambos en el estado de Chiapas. Un comportamiento peculiar se presenta en el Estado de Tlaxacala con 40 eventos en el municipio de Acuananala. En Michoacán donde el municipio Alguilillas registra un promedio de 38 eventos; Atil en el Estado de Sonora con 23 eventos, seguido de Ensenada con 22 (Tabla 7).

Tabla 6. Numero de deslizamientos por Estado en México para el periodo 1910-2017

Estado	Número de eventos	Estado	Número de eventos	Estado	Número de eventos
Chiapas	726	Tlaxcala	85	Campeche	19
Oaxaca	353	Chihuahua	62	Coahuila	18
Veracruz	260	Nuevo León	52	Durango	17
Michoacán	194	Tamaulipas	51	Morelos	16
Puebla	173	San Luis Potosí	44	Querétaro	16
Jalisco	156	Sinaloa	36	Colima	14
Sonora	127	Zacatecas	30	Nayarit	13
Yucatán	116	Tabasco	28	Aguaascalientes	10
Hidalgo	110	Baja California	26	Quintana Roo	10
México	100	Guanajuato	23	Baja California Sur	2
Guerrero	85	Distrito Federal	22		

Fuente: Elaboración propia basada en Kirschbaum et al. 2010; Corporación OSSO 2016; INEGI 2016

Tabla 7. Municipios con más de diez deslizamientos en México 1910-2017

Municipio	Número de eventos	Municipios	Número de eventos	Municipios	Número de eventos
Amatán	357	Atil	23	Buenavista	13
Angel Albino Corzo	168	Ensenada	22	Amamaxac de Guerrero	13
Altamirano	45	Arteaga	22	Almoloya	12
Acuamanala de Miguel Hidalgo	40	Chemax	21	Cotija	11
Aguililla	39	Dzilam de Bravo	19	Acatlán	11
Aconchi	39	Atitalaquia	17	Bejucal de Ocampo	10
Álvaro Obregón	38	Acaxochitlán	16	Balancán	10
Chahuities	30	Amatenango de la Frontera	14	Dzilam González	10
Tapachula	28	Atemajac de Brizuela	13		

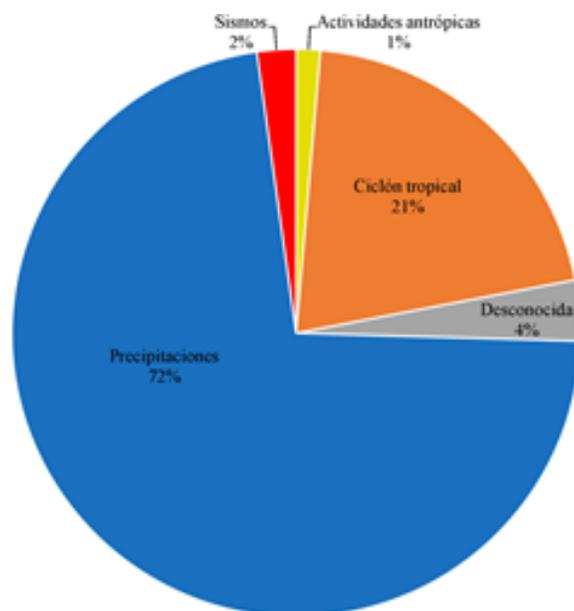
Fuente: Elaboración propia basada en Kirschbaum et al. 2010; Corporación OSSO 2016; INEGI 2016

4.2 Factores detonantes de deslizamientos

Entre las causas se destaca que 93% de los deslizamientos fueron detonados por factores hidrometeorológicos como precipitaciones, tormentas y ciclones, 2% por sismos, 4% no presentan datos de causas y 1% de eventos ocasionado por actividades antrópicas (Figura 18).

Al hacer la relación número de eventos mensuales con los meses más lluviosos, se encontró que ocurren en temporada de lluvias, siendo este el principal detonante. Según la base de datos histórica los eventos más impactantes se han dado a causa de fenómenos como huracanes y tormentas tropicales (Tabla 8).

Figura 19. Factores detonantes de deslizamientos en México



Fuente: Díaz et al., 2019

Tabla 8. Eventos más impactantes reportados en México

Tipo	Lugar	Muertes	Detonante	Fecha	Fuente
Deslizamiento	Baja California Sur, La Paz	1000	Hurricane	01/10/1956	Ayala, 2018
Deslizamiento	Colima, Minatitlan	871	Hurricane	27/10/1959	Ayala, 2018
Deslizamiento	Veracruz, Coyutla	800	Rains	10/11/1999	La Jornada newspaper
Deslizamiento	Totonacapan Puebla, Teziutlán, Sierra Norte	263	Rains	10/04/1999	La Jornada newspaper
Avalancha	Oaxaca y Guerrero	247	Hurricane	8-9/10/1997	CENAPRED, 2004
Deslizamiento	Acapulco				In: Ayala, 2018
Deslizamiento	Michoacán, Tlalpujahua	176	Rains	27/05/1937	Lugo y Flores, 1997 In: Ayala, 2018
Deslizamiento	Chiapas, Motozintla	171	Rains	6-12/10/1998	La Jornada newspaper
Deslizamiento	Distrito Federal, San Pedro Atocpan	150	Rains	04/06/1935	Lugo y Flores, 1997 In: Ayala, 2018

Deslizamiento	Chiapas, Valdivia	150	Rains	6-12/09/1998	La Jornada newspaper. 2018	Ayala,
Deslizamiento	Jalisco, Atentique	100	Rains	16/10/1955	OFDA/CRED Database	
Flujo de lodo	Guerrero, Atoyac de Álvarez, La Pintada	71	Tropical cyclone	09/16/2013		
Deslizamiento	Veracruz, Papanla	60	Rains	10/07/1999		
Deslizamiento	Puebla, Eloxochitlán, Sierra Negra. Km. 8 of the State highway Tacotepec de Porfirio Díaz-Tehuacán.	60	Rains	07/05/2007	La Jornada newspaper	
Deslizamiento	Chiapas, Motozintla, several communities	49	Tropical storm	10/17/2005	La Jornada newspaper	
Deslizamiento	Chiapas, Ángel Albino Corzo, Jaltenango de la Paz	45	La Niña	09/17/1998	La Jornada newspaper	
Deslizamiento	Puebla, Tlaola, Sierra Norte	39	Rains	10/08/1999	La Jornada newspaper	
Deslizamiento	Puebla, Xaltepec and Chichahuaxtla	32	Tropical Storm	08/08/2016	CNN newspaper	
Deslizamiento	Colima, Manzanillo	21	Rains	11/27/1982	El Universal newspaper	
Deslizamiento	Puebla, Teziutlán	21	Rains	11/01/1999	La Jornada newspaper	
Avalancha	Guanajuato, Irapuato	20	Overflow	08/21/1973	Excélsior newspaper	
Deslizamiento	San Luis Potosí, Santa María del Río. Road México-Laredo	20	Hurricane	07/05/2010	El Universal newspaper	
Deslizamiento	Chiapas, Ostuacán, San Juan Grijalva	19	Rains	11/06/2007	La Jornada newspaper	
Aluvión	Michoacán, Anganguero	19	Rains	02/05/2010	La Jornada y El Universal newspaper	
Deslizamiento	Sonora, Hermosillo	18	Rains	08/21/1977	Excélsior newspaper	
Deslizamiento	Puebla, Tenampulco. Border zone between Puebla y Veracruz	18	Rains	10/07/1999	La Jornada newspaper	
Deslizamiento	Puebla, Pantepec	18	Rains	10/08/1999	La Jornada newspaper	
Deslizamiento	Tabasco, Buenavista	18	Rains	10/31/2007	http://www.capetimes.co.za/?fArticleId=4109453 http://technews.tmcnet.com/topics/associated-press/articles/106209-death-toll-southern-mexico-Flujo de lodos-up-32.htm	
Flujo de lodo	Chiapas, Amatlán. Settlement of Reforma y Planada, Nueva Colombia community	16	Tropical cyclone	09/29/2010		

Avalancha	Jalisco, Tequila	16	Tropical storm	07/06/1975	El Universal newspaper
Deslizamiento	Mexico, Tlalmanalco. Paper factory of San Rafael	15	Rains	10/11/1976	Excélsior newspaper
Deslizamiento	San Luis Potosi, Charcas, Iron mine	15	Another cause	10/06/1978	
Deslizamiento	Guerrero, Atoyac de Álvarez	15	Rains	09/02/1988	La Jornada newspaper
Deslizamiento	Hidalgo, San Salvador, San Miguel Acambay	15	Rains	10/05/1999	La Jornada newspaper
Avalancha	Nuevo Leon. 49 municipalities affected	15	Hurricane	07/01/2010	First Governmental report of Nuevo León 2010

Fuente: Elaboración propia basada en Kirschbaum et al. 2010; Corporación OSSO 2016; INEGI 2016

Ejemplo de ello son los deslizamientos y flujos de lodo acontecidos en Chiapas en 1998; flujo de escombros en Acapulco en 1997, provocado por el huracán Pauline (Alcántara-Ayala y Echavarría 2014); flujos de lodo y deslizamientos en Chiapas, Oaxaca y Veracruz con 34 personas muertas en total, a causa del paso del Huracán Karl y tormenta tropical Matthew entre septiembre y agosto en 2010; el Huracán Manuel, en septiembre del año 2013, ocasionó lluvias intensivas desencadenando un flujo de lodo y deslizamiento en la Pintada, Guerrero donde 71 personas perdieron la vida y 13 personas en Manzanatitla, Veracruz. En este mismo mes y año como consecuencia de lluvias ocasionadas por el ciclón tropical Ingrid ocurrieron flujos de lodo en Guerrero junto con deslizamientos en Hidalgo, Puebla y Oaxaca, donde 12 personas fallecieron por un deslizamiento en Altontoga, Veracruz. Tan solo en el año 2016 al menos 40 personas fallecieron por deslizamientos de tierra en los estados de Puebla y Veracruz a causa de fuertes lluvias después de que la tormenta tropical Earl golpeará el este de México (CNN Español, 2016)

Otra de las causas de deslizamientos son los sismos. Recientemente se registraron eventos en las vías del estado de Oaxaca (Televisa, 2017) y alrededores debido al sismo del 7 de septiembre del 2017 clasificado como terremoto con una magnitud de 8.1 (SSN-UNAM, 2017a), así como vías al sur del Estado de México (El Universal, 2017) en los alrededores de Taxco, norte de Ciudad de México y Puebla a causa del sismo de magnitud 7.1 ocurrido el 19 de septiembre en Puebla (SSN-UNAM, 2017b), y con consecuencias significativas en pérdidas humanas y económicas para los estados de México, Morelos y principalmente en la

Ciudad de México la cual fue declarada en estado de emergencia (Jefatura de Gobierno de la Ciudad de México, 2017).

4.3 Impacto social de los deslizamientos

Según los reportes, en 113 años 3,447 personas murieron por la ocurrencia de algún tipo de deslizamiento. Los eventos que dejaron las mayores pérdidas de vidas humanas fueron el deslizamiento del 11 de octubre de 1999 en Coyutla, Veracruz con 800 personas muertas y el deslizamiento de Teziuitlán, Puebla, ocurrido el 4 de octubre del mismo año, donde 263 personas perdieron la vida. Si bien en algunos reportes se datan las personas afectadas y fallecidas por deslizamientos, es notorio un vacío en esta información, ya que solo 22% de los registros en la base de datos se registra este tipo de dato. Por esta razón y debido a la importancia de contar con información actualizada de utilidad para la toma de decisiones es vital estimar el número de personas a nivel estatal y municipal que podría verse afectada según su localización en zonas con concentración de ocurrencia de eventos.

Según estimaciones, en el año 2017 a nivel nacional 1,379,631 personas de 21 estados podrían verse afectadas por deslizamientos. Visto por entidad federativa, los estados de Chiapas, Jalisco, Michoacán, Guerrero y Oaxaca, presentan la mayor cantidad de posibles afectados, agrupando el 67% de la población total, donde 2 de cada 3 personas pueden sufrir algún tipo de daño. El estado de Chiapas encabeza la lista con un poco menos de la mitad de la población total, seguido de Guerrero y Oaxaca (Tabla 9).

Tabla 9. Población afectada estimada para el año 2017 en los Estados de México

Estado	Población afectada	Posición	Población afectada por 10 mil habitantes	Posición
Chiapas	419,555	1	777	1
Guerrero	188,273	2	524	2
Oaxaca	174,370	3	431	3
Veracruz	143,393	4	172	6
Michoacán	110,603	5	236	5
Jalisco	94,925	6	118	7
México	73,617	7	44	10
Puebla	54,795	8	86	8
Nayarit	42,479	9	347	4

Distrito Federal	27,867	10	31	14
Chihuahua	13,330	11	37	12
Hidalgo	12,421	12	42	11
Durango	6,627	13	37	13
Colima	5,517	14	75	9
Tlaxcala	3,322	15	25	15
Morelos	3,145	16	16	16
Tabasco	2,232	17	9	17
Querétaro	1,987	18	9	18
Zacatecas	828	19	5	19
Guanajuato	322	20	1	20
Sinaloa	23	21	0	21

Fuente: Elaboración propia basada en Censo de Población y Vivienda 2010, INEGI 2010

Al analizar los datos en relación a la proporción de población posiblemente afectada por cada 10 mil habitantes, se mantienen los primeros 3 lugares antes mencionados. Sin embargo, estados como Nayarit y Colima presentan mayor proporción de población expuesta. Por otra parte, los estados de Veracruz, México y la Ciudad de México presentan una disminución en la proporción de sus afectados (Tabla 9).

A nivel municipal 995 de 2,454 municipios han presentado eventos, en tan solo 23 municipios 1 de cada 5 habitantes puede sufrir algún daño, es decir el 20% del total de posibles afectados, los diez municipios con mayor número de población afectada son, en orden de importancia, Del Nayar, del Estado de Nayarit con 21,497 personas (8 de los 10 municipios con mayor cantidad de población expuesta ante un deslizamiento pertenecen al Estado de Chiapas). El municipio de Motozintla se ubica en segundo lugar con 21,321 personas en esta condición. Por su parte Milpa Alta de la Ciudad de México se ubica en el puesto 7 con 14,541 habitantes (Tabla 10).

Tabla 10. Municipios con mayor población afectada estimada para el año 2017

Posición	Estado	Municipios	Población afectada	Posición	Estado	Municipios	Población afectada
1	Nayarit	Del Nayar	21,497	11	Chiapas	Pantelón	11,190
2	Chiapas	Motozintla	21,321	12	Guerrero	Coyuca	de 11,108
3	Chiapas	San Juan Cancuc	18,452	13	Guerrero	Catalán General Heliodoro Castillo	10,542

4	Chiapas	Chilón	17,788	14	Guerrero	San Miguel Totolapan	9,850
5	Chiapas	Simojovel	17,708	15	Chiapas	Huitiupán	9,553
6	Chiapas	Chenalhó	14,706	16	Oaxaca	San José Tenango Luvianos	9,372
7	Distrito Federal	Milpa Alta	14,541	17	México	Luvianos	9,310
8	Chiapas	Tapachula	14,387	18	Chiapas	Villa Corzo	9,271
9	Chiapas	La Concordia	13,695	19	Guerrero	Cochoapa el Grande	9,233
10	Chiapas	Ocosingo	11,838	20	Chiapas	Tonalá	9,231

Fuente: Elaboración propia basada en Censo de Población y Vivienda 2010, INEGI 2010

En términos de impacto social por deslizamientos, el municipio de Del Nayar supone un hallazgo para el país, ya que lo sitúa como un espacio diferente de donde generalmente se dirige la atención, principalmente a zonas de Puebla, Guerrero, Oaxaca, Veracruz y Chiapas, donde se han presentado eventos de grandes magnitudes en términos de tamaño y daños. Sin embargo, Nayarit hasta la actualidad, no figuraba como parte de los estados con afectaciones. Posiblemente esto se deba a que los eventos no presentan frecuencia en los mismos sitios, sean de menor magnitud y/o poco registrados.

Analizado a través de pérdidas de vidas humanas, en los municipios de Teziutlán en el Estado de Puebla y Atoyac de Juárez en el Estado de Guerrero, se registra el mayor número de decesos a causa de desastres por deslizamientos, se destaca que entre los 10 municipios con mayores decesos 3 pertenecen al Estado de Chiapas (Tabla 10), sin embargo, al realizar las pérdidas de vidas humanas en relación a la población de cada municipio, la dinámica es otra, ya que por cada 10,000 habitantes la ubicación de los municipios en el ranking del top ten cambia. Se encontró que 3 de los 10 municipios con mayor intensidad de decesos pertenecen al estado de Puebla, por su parte el municipio San Cristóbal de la Barranca del Estado de Jalisco ocupa el segundo puesto con 45 personas fallecidas por cada 10,000 habitantes, Atoyac de Álvarez del estado de Guerrero que se ubica en el segundo lugar con mayor registro de fallecidos pasó al quinto lugar con una tasa de 27 muertos (Tabla 11).

Tabla 11. Pérdidas de vidas humanas y tasa de decesos por cada 10,000 habitantes a nivel municipal, primeros diez puestos

Posición	Estado	Municipio	Muertes	Posición	Estado	Municipio	Muertes/ 10.000 hab
1	Puebla	Teziutlán	285	1	Puebla	Eloxochitlán	48.01
2	Guerrero	Atoyac de Álvarez	163	2	Jalisco	San Cristóbal de la Barranca	45.25
3	Puebla	Eloxochitlán	60	3	Oaxaca	San Juan Coatzacoaspam	31.66
4	Chiapas	Motozintla	54	4	Puebla	Teziutlán	28.55
5	Chiapas	Ángel Albino Corzo	51	5	Guerrero	Atoyac de Álvarez	27.16
6	Chiapas	Amatenango de la Frontera	46	6	México	Zacazonapan	26.37
7	Puebla	Tlaola	45	7	Oaxaca	Santo Domingo Tepuxtepec	23.55
8	México	Naucalpan de Juárez	44	8	Michoacán	Angangueo	23.08
9	Veracruz	Coscomatepec	44	9	Puebla	Tlaola	22.45
10	Distrito Federal	Álvaro Obregón	38	10	Chiapas	Ángel Albino Corzo	17.71

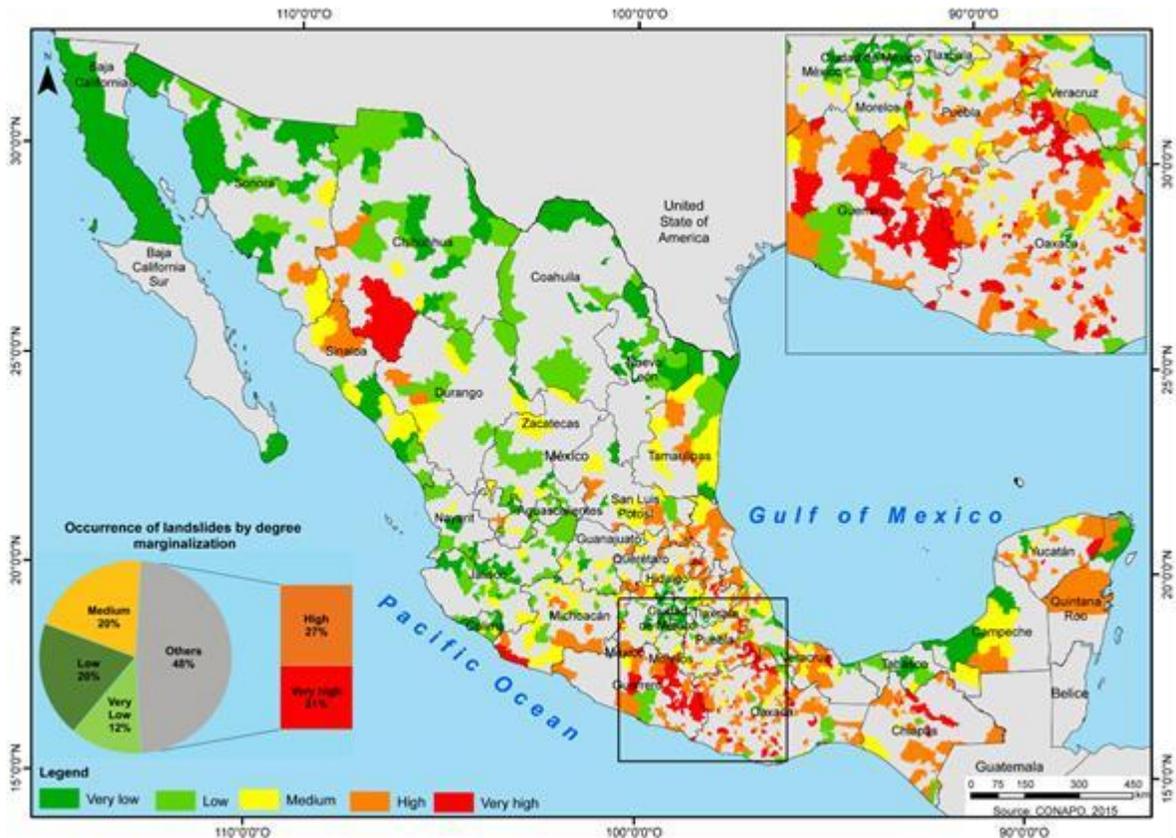
Fuente: Elaboración propia basada en Censo de Población y Vivienda 2010, INEGI 2010

Al realizar la correlación con el grado de marginación de las zonas que han presentado deslizamientos, se encontró que 48% ocurren en municipios con un grado muy alto y alto de marginación (Figura 20), 2 de cada 3 personas viven en grado de marginación muy alto. Una tercera parte de la población expuesta se ubica en un grado de marginación medio (24.1%) y en el nivel alto cerca de 20%. Por su parte los niveles bajo y muy bajo concentran 10% de los posibles afectados. La alta concentración de posibles afectados en altos niveles de marginación indica que las poblaciones más marginadas son las más propensas a sufrir los efectos de algún tipo de deslizamiento.

4.4 Modelación de deslizamientos a escala detallada

Los deslizamientos se caracterizan por ser fenómenos donde interactúan diferentes variables por lo que su modelación es de alta complejidad y cada espacio con determinadas condiciones varía, de tal manera que se hace necesario acudir a diferentes métodos que permitan una modelación local de deslizamientos de acuerdo a cada uno de los factores locales del terreno y factores condicionantes.

Figura 20. Deslizamientos por nivel de marginación a nivel nacional



Fuente: Díaz et al., 2019

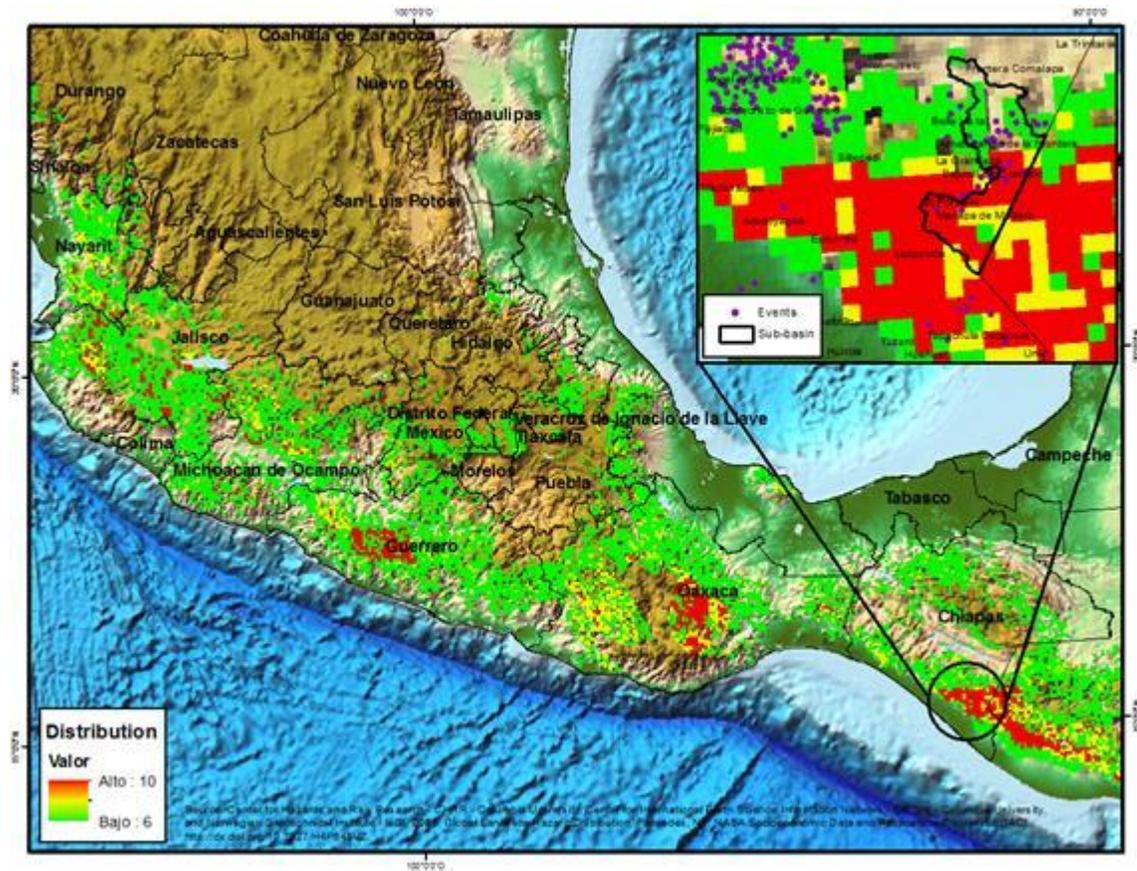
A partir del análisis de historicidad de eventos y su ocurrencia a nivel nacional fue posible determinar las zonas que han presentado una recurrencia de deslizamientos, esto con el fin de establecer la zona de estudio para realizar modelación a escala más detallada.

Considerando los resultados obtenidos del inventario nacional construido en el marco de este trabajo se puede afirmar que los Estado de Guerrero, Oaxaca, Puebla y Chiapas (Figura 18) son aquellos que presentan mayor ocurrencia de deslizamientos, de los cuales, el municipio de Motozintla presenta la mayor exposición de población que posiblemente pueda verse afectada por la materialización de estos eventos con 21.321 personas (Tabla 10).

Debido a la relación de alta ocurrencia con alta población afectada, se determinó como zona de estudio para la modelación de deslizamientos el municipio de Motozintla, ya que a lo largo

de su historia ha presentado ocurrencia de deslizamientos con una alta posibilidad de afectaciones e impacto social en la población.

Figura 21. Localización del área de estudio para modelación de deslizamientos



Fuente: Elaboración propia

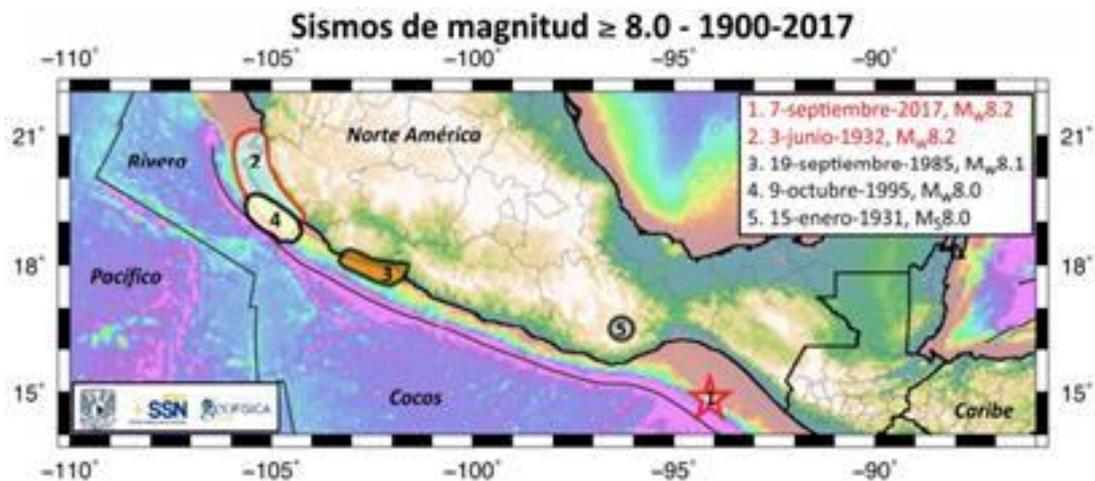
4.4.1 Factores detonantes

México es un país con alta sismicidad debido a la presencia de cinco placas tectónicas que convergen entre sí, siendo uno de los países de mayor actividad sísmica en el mundo (Godínez-Domínguez et al., 2021). De acuerdo con el Servicio Geológico Nacional de México (SSN-UNAM, 2017c) Chiapas y Oaxaca son los Estados con mayor sismicidad a nivel nacional debido a la interacción de dos placas tectónicas donde; la Placa de Cocos subduce a la Placa Norteamericana.

Con el fin de determinar la incidencia de los sismos como factor detonante de deslizamientos se consideró el sismo del 7 de septiembre de 2017 ocurrido a las 23:49:18 hora local con una magnitud de 8.2, localizado en el Golfo de Tehuantepec, a 133 km al suroeste de Pijijiapan, Chiapas con una profundidad de 45.9 km y sentido en el centro y sur del país (SSN-UNAM, 2017c).

Cabe destacar que este evento es uno de los de mayor magnitud registrada históricamente, fue considerando como Terremoto ya que entre 1900 y 2017 se han presentado 5 sismos con una magnitud mayor a 8.0 en el territorio nacional, siendo este el de mayor intensidad registrada en el Golfo de Tehuantepec desde el del 15 de enero de 1931 donde se registró uno de igual magnitud en Oaxaca (Figura 22).

Figura 22. Sismos ocurridos en México con magnitud mayor a 8.0



Fuente: SSN-UNAM, 2017a

El sismo fue sentido en el sur y centro del país, entre los estados principalmente afectados fueron Chiapas, Oaxaca y Tabasco (Godínez-Domínguez et al., 2021) y afectó poblaciones como Juchitán, Ixtepec, Tehuantepec y Salina Cruz, entre otras (SSN-UNAM, 2017c). De acuerdo con lo anterior se determinó realizar la modelación de desplazamientos de terreno después de este evento con el fin de relacionar el nivel de incidencia de sismos como factor detonante en el municipio de Motozintla y áreas cercanas.

4.4.2 Modelación de deslizamientos usando Interferometría.

Los deslizamientos se generan por la interacción de factores locales del terreno y factores detonantes externos o sismos que contribuyen con el desplazamiento de terreno en una ladera. En este caso se realiza una modelación a partir de imágenes de radar para identificar desplazamientos del terreno.

Cabe mencionar que, la modelación remota supone una aproximación con el uso de criterios específicos, en esta investigación uno de los criterios principales es la consideración temporal para el uso de las imágenes antes y después de un sismo. Se usaron imágenes del satélite SENTINEL 1 en un periodo de tiempo de 7 meses entre septiembre y noviembre de 2017, el sismo ocurrió el 17 de septiembre por lo que se consideran series de tiempo con imágenes de antes y después del sismo con el fin de detectar posibles cambios en el terreno.

La misión Sentinel-1 perteneciente a la ESA (Agencia Espacial Europea) consta de dos satélites de órbita polar a una altura aproximada de 700 km. El primero de ellos, Sentinel-1A fue lanzado en abril de 2014, y el segundo (Sentinel-1B) el 28 de abril de 2016 y aún no se encuentra completamente operativo. El principal instrumento presente en estas plataformas es un sensor radar en banda C que permite la adquisición en diversos modos.

4.4.2.1 Adquisición de imágenes de radar

Las imágenes Sentinel-1A utilizadas en el presente estudio corresponden al modo IW del nivel Single Look Complex SLC, el cual tiene un nivel de procesamiento con información que permite su georreferenciación, siendo las más óptimas para el desarrollo de la técnica de Interferometría. Este tipo de productos se generan adquiriendo en modalidad TopSAR. Cada imagen IW consta de 3 barridos o swaths, con un ángulo de mirada que es fijo para cada adquisición y varía según el swath considerado.

Para el área de estudio se realizó la adquisición de 8 imágenes en órbita ascendente y 5 en órbita descendente (Tabla 12), la selección se basó en la identificación de imágenes con el

mismo pase de orbita con la misma posición con el fin de reducir al máximo la posibilidad de obtener de correlaciones geométricas en los resultados.

Tabla 12. Imágenes Sentinel adquiridas para el área de estudio

Nivel	Modo	Swath	Polarización	Órbita	Fecha
SLC	IW	4	VV	Ascendente	2017/09/28
SLC	IW	4	VV	Ascendente	2017/10/04
SLC	IW	4	VV	Ascendente	2017/10/10
SLC	IW	4	VV	Ascendente	2017/10/16
SLC	IW	4	VV	Ascendente	2017/10/22
SLC	IW	4	VV	Ascendente	2017/11/03
SLC	IW	4	VV	Ascendente	2017/11/15
SLC	IW	4	VV	Ascendente	2017/11/21
SLC	IW	3	VV	Descendente	2017/09/26
SLC	IW	3	VV	Descendente	2017/10/08
SLC	IW	3	VV	Descendente	2017/10/20
SLC	IW	3	VV	Descendente	2017/11/01
SLC	IW	3	VV	Descendente	2017/11/13

Fuente: Elaboración propia

La selección de las imágenes se considera teniendo en cuenta los siguientes criterios:

1. Cobertura de la imagen en el área de estudio
2. Series de tiempos acorde a la línea temporal de la investigación
3. Imágenes con la misma orbita, path y frame. Esto permite que las imágenes presenten la misma posición, criterio fundamental para realizar interferometría.

Una vez obtenidas las imágenes se realiza la visualización de las imágenes mediante su despliegue en Google Earth con el fin de reconocer su posición, así como partes de la imagen en las que se ubica Motozintla (Figura 23 y 24), esta referencia permite identificar el burst que cubre el área de estudio, en este caso se ubica en un solo burst para ambas orbitas, en la órbita descendente el área de estudio se ubica en el burst IW1-3 y en la órbita ascendente en el burst IW3-4, una vez identificados se realiza su extracción en la imagen para ejecutar el procesamiento interferométrico (Figura 25).

Figura 23. Visualización de la imagen en la órbita descendente y el burst donde se ubica el área de estudio



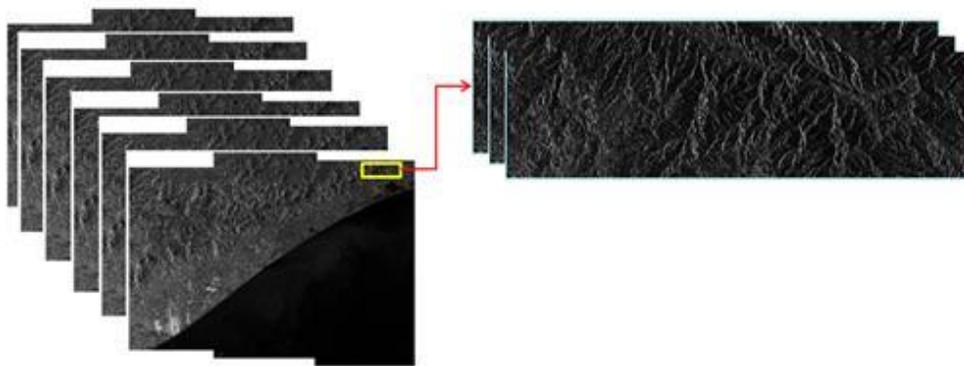
Fuente: Google Earth, ASF DAAC 2017, modificado de Copernicus Sentinel data 2017, procesado por ESA.

Figura 24. Visualización de la imagen en la órbita ascendente y el burst donde se ubica el área de estudio



Fuente: Google Earth, ASF DAAC 2017, modificado de Copernicus Sentinel data 2017, procesado por ESA.

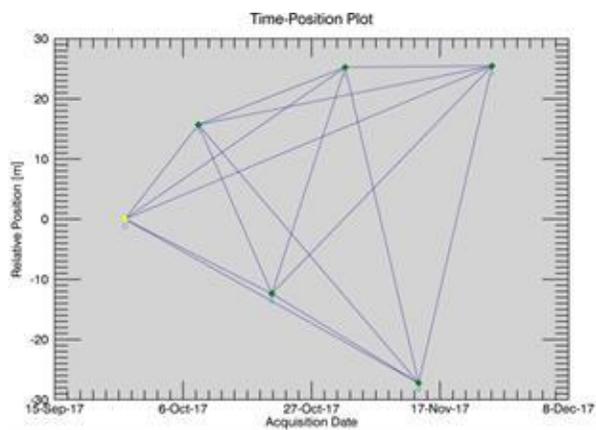
Figura 25. Despliegue de imágenes tipo radar y extracción de burst para área de estudio



Fuente: Elaboración propia.

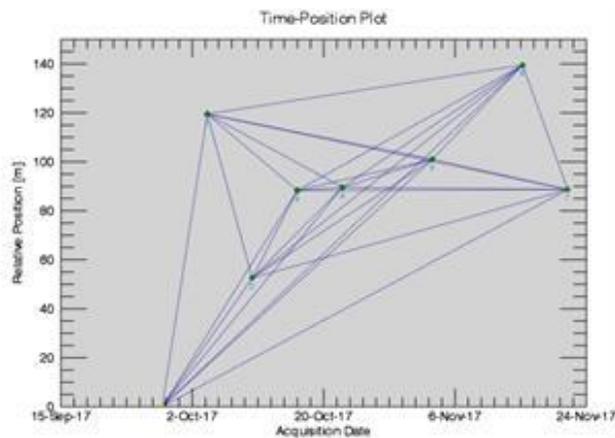
Una vez exportado el burst del área de estudio se realizó la identificación de la imagen Master en ambas órbitas, esta es la imagen de ancla con la cual se realiza la conexión de los diferentes pares, la cual corresponde a la imagen del 15 de septiembre para la órbita descendente y la imagen del 28 de septiembre para la órbita ascendente, posteriormente se generó el gráfico de conexiones que permite identificar los pares que se pueden generar entre todas las imágenes una línea de base temporal (Btemp) de un poco más de los días que abarca el rango temporal de las imágenes descargadas con el fin de obtener una buena coherencia entre los interferogramas a calcular entre los pares de cada imagen (Figura 26 y 27)

Figura 26. Gráfico de conexiones órbita descendente con Btemp = 65 días



Fuente: Elaboración propia a partir de Sarscape

Figura 27. Gráfico de conexión órbita ascendente con Btemp = 60 días



Fuente: Elaboración propia a partir de Sarscape

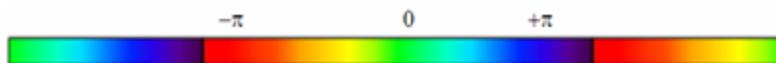
4.4.2.2 Procesamiento interferométrico

Esta fase consiste en la combinación de dos imágenes SAR de la misma área adquiridas en diferente tiempo y puntos espaciales ligeramente diferentes lo cual permite identificar la diferencia entre ambas señales. La imagen de referencia en el proceso interferométrico se denomina “master” (anterior en el tiempo) y a las consecutivas “esclavo” (posterior en el tiempo), con la técnica SBAS se realizan múltiples combinaciones de la master con diferentes esclavos identificando la diferencia de fase en ambos, esto es lo que se conoce como interferograma, de tal manera que cada par de imágenes que se usan para identificar dicha diferencia se denomina “par interferométrico”

Cabe destacar que en este caso se aplica la técnica de Interferometría diferencial DinSAR ya que se generan imágenes restando la topografía y geometría de adquisición, es decir, tendremos la diferencia de fase (interferograma) entre ambas imágenes lo que permite detectar cambios en la superficie del terreno y por ende desplazamientos a lo largo de la línea de visión de vista del radar (LOS). La topografía se suprime utilizando un modelo digital de elevación que en este caso corresponde al SRTM DEM, con el fin de obtener el desplazamiento entre dos puntos en imágenes de diferentes fechas.

Como producto de este proceso se obtuvieron 28 interferogramas con diferentes combinaciones de partes interferométricos para imágenes en órbita ascendente y 15 en órbita descendente, los cuales fueron revisados para seleccionar los interferogramas que mejor resolvieron la fase teniendo en cuenta los siguientes criterios:

- Que al menos la mitad del interferogramas presente fases resueltas ciclos de color donde se marque la fase, se deben visualizar límites de fase claros donde no se presenten saltos o cambios abruptos de color marcados.

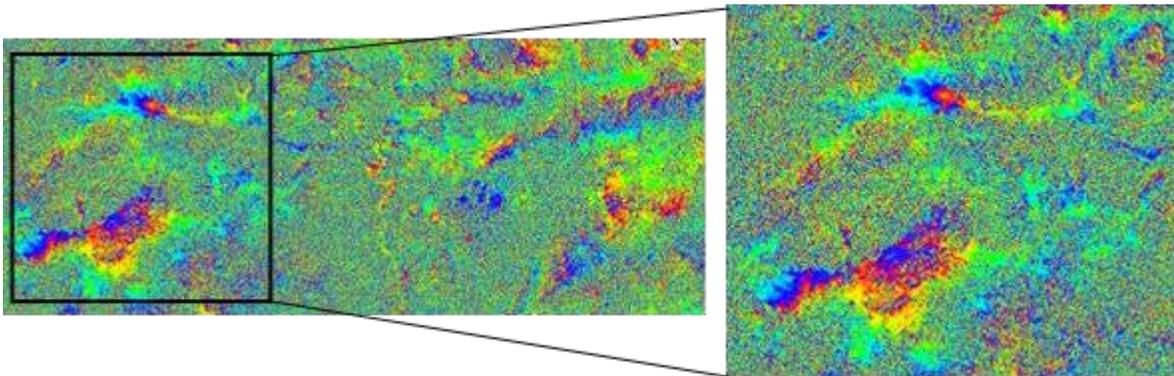


- Los interferogramas debe ser coherentes entre sí, es decir que se identifiquen las mismas áreas con resolución de la fase.

- Interferogramas pixelados con colores aleatorios deben ser eliminados ya que nos indican que no se identificó un cambio de fase y se obtuvo un resultado con alto ruido.

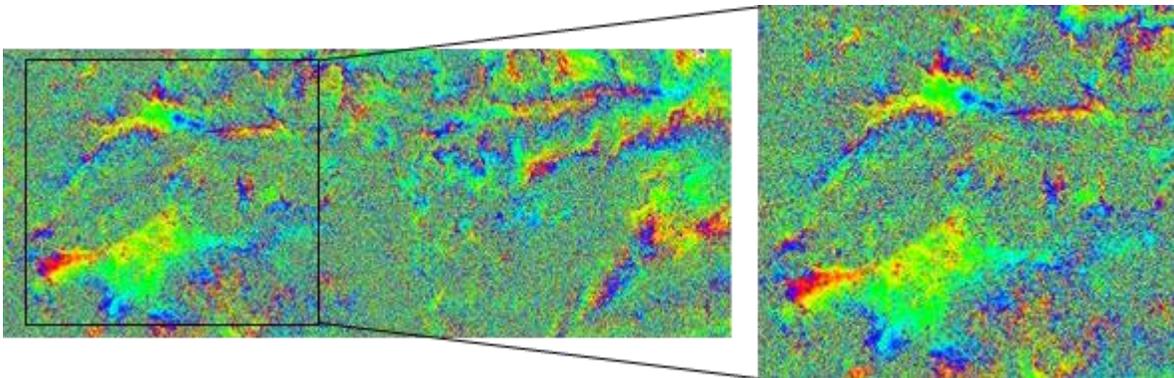
En la órbita ascendente 9 pares interferométricos presentaron una resolución de fase óptima, de los cuales 4 fueron seleccionados se destacaron para el proceso de cálculo de coherencias posterior el cual permitirá realizar el inventario de deslizamientos (Figura 28, 29, 30 y 31)

Figura 28. Der. Interferograma en órbita ascendente del par 2017/11/03 - 2017/11/21 en el burst IW3. Izq. Resolución de fase en área de estudio



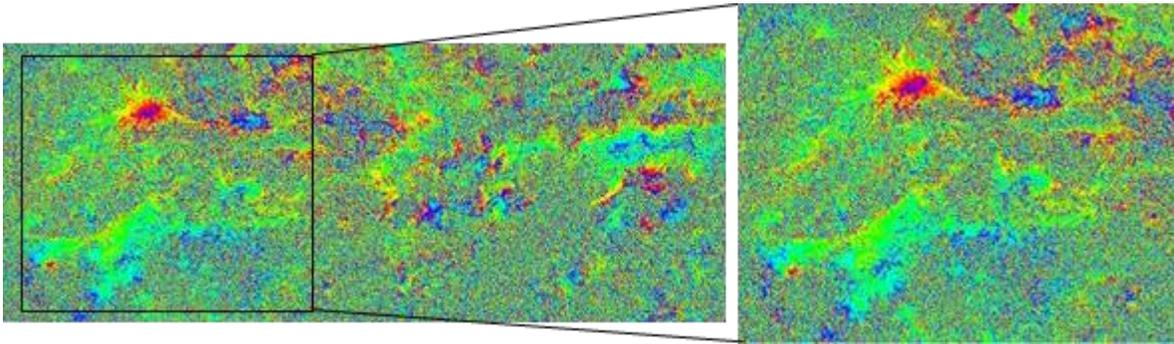
Fuente: Elaboración propia

Figura 29. Der. Interferograma en órbita ascendente del par 2017/11/03-2017/11/15 Izq. Resolución de fase en área de estudio



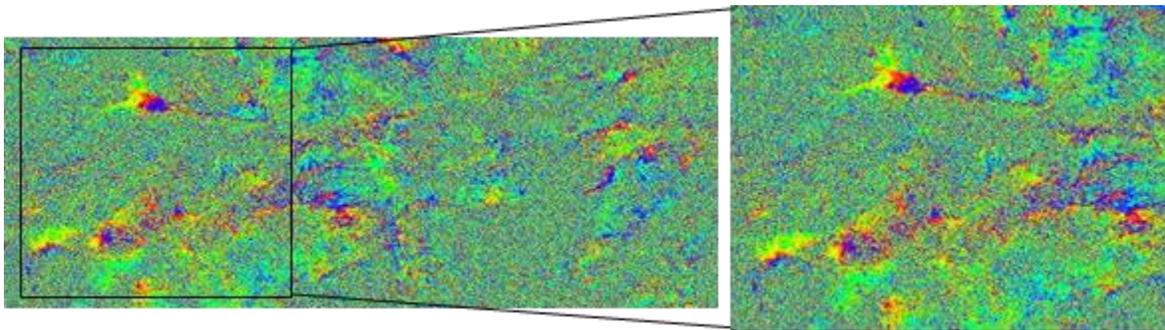
Fuente: Elaboración propia

Figura 30. Der. Interferograma en órbita ascendente del par 2017/10/04 -2017/10/10. Izq. Resolución de fase en área de estudio



Fuente: Elaboración propia

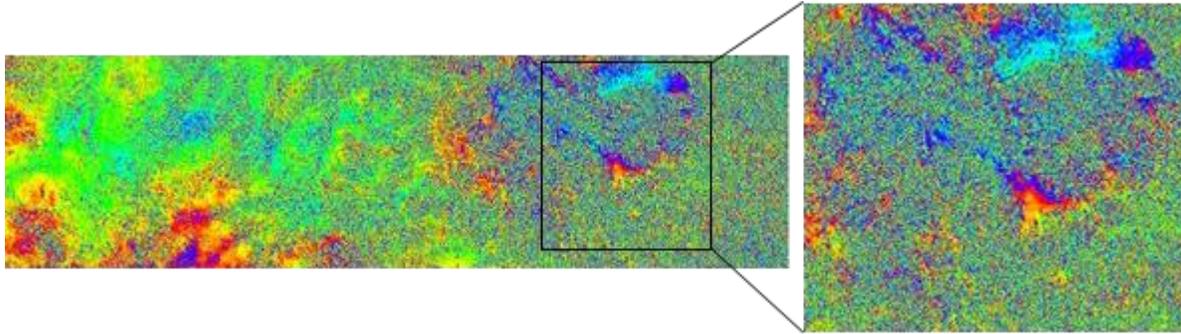
Figura 31. Der. Interferograma en órbita ascendente del par 2017/09/28 – 2017/10/4 Izq. Resolución de fase en área de estudio



Fuente: Elaboración propia

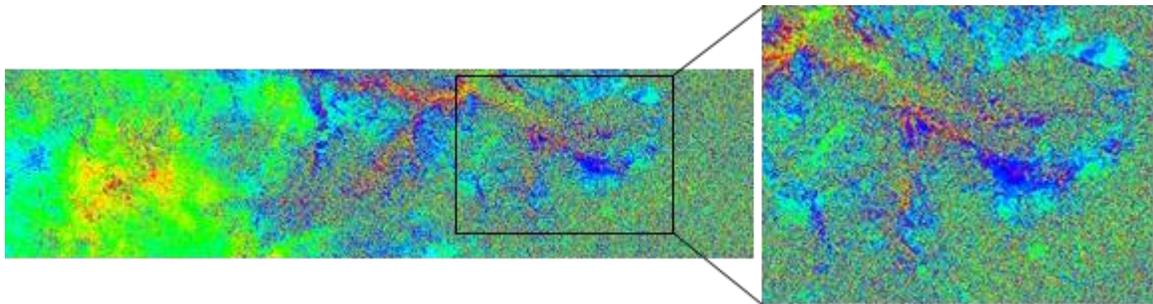
En la órbita ascendente 8 pares interferométricos presentaron una resolución de fase óptima, de los cuales 5 fueron se destacaron (Figura 32, 33, 34, 35 y 36).

Figura 32. Der. Interferograma en órbita descendente del par 2017/09/26 – 2017/10/08 Izq.
Resolución de fase en área de estudio.



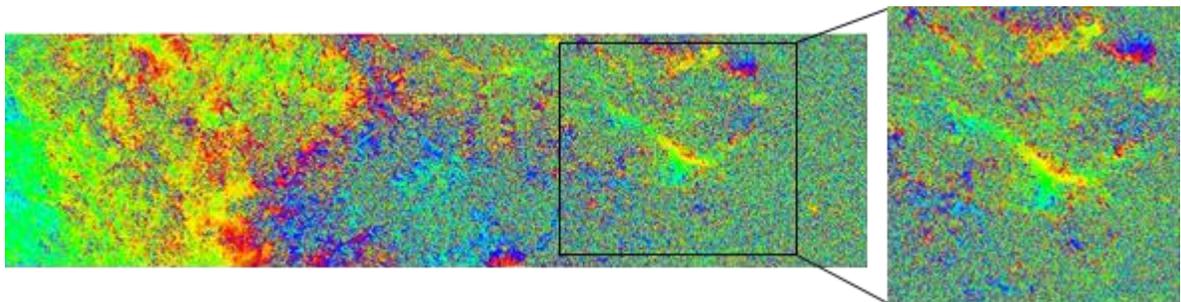
Fuente: Elaboración propia

Figura 33. Der. Interferograma en órbita descendente del par 2017/10/20 – 2017/11/01 Izq.
Resolución de fase en área de estudio



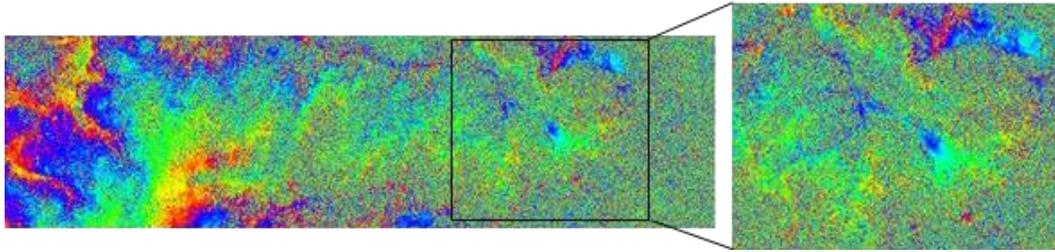
Fuente: Elaboración propia

Figura 34. Der. Interferograma en órbita descendente del par 2017/11/01 – 2017/11/13 Izq.
Resolución de fase en área de estudio



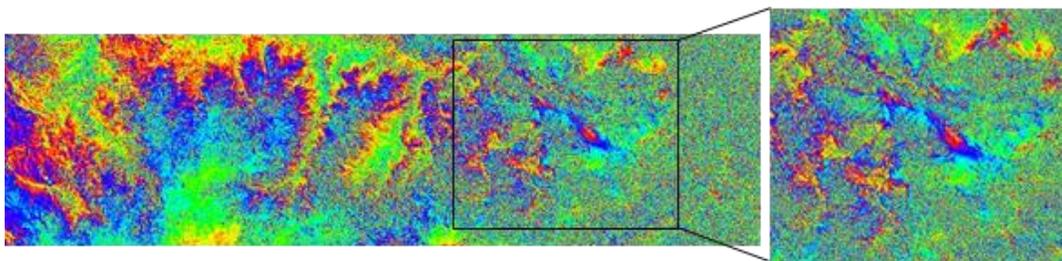
Fuente: Elaboración propia

Figura 35. Der. Interferograma en órbita descendente del par 2017/11/01 – 2017/11/25 Izq.
Resolución de fase en área de estudio



Fuente: Elaboración propia

Figura 36. Der. Interferograma en órbita descendente del par 2017/11/13 – 2017/11/25 Izq.
Resolución de fase en área de estudio



Fuente: Elaboración propia

A los interferogramas ya formados se les realizó el cálculo de la coherencia para cada uno y se les aplicó un filtrado adaptativo de Goldstein, se revisó que se obtuvieran valores de coherencia mayores a 0.5, aquellos pares con valores inferiores fueron extraídos con el fin de disminuir imprecisiones en los resultados por alteración de ruido atmosférico, geométrico, entre otros.

Este proceso va acompañado de la revisión de las imágenes con el desenrollado de fase y coherencia, esta última es un parámetro que permite medir la similitud entre ambas observaciones realizando un promedio sobre los datos originales en la dirección range y azimuth. De esta manera, se mide la calidad de la fase interferométrica, donde; mediciones de fase realizados bajo las mismas condiciones arrojaran el mismo resultado a la capa de coherencia.

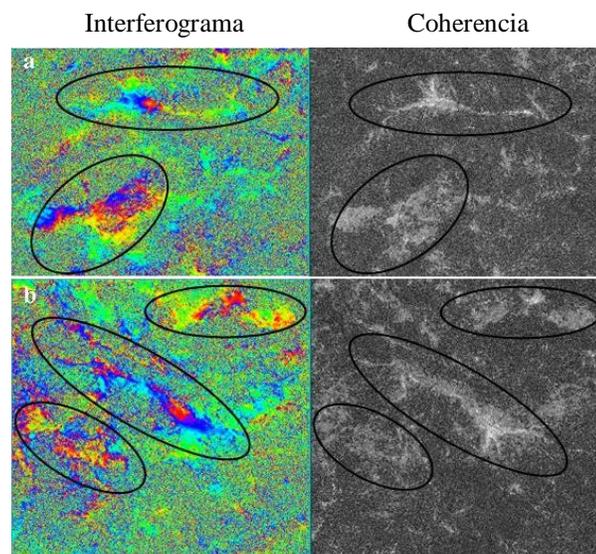
De acuerdo con lo anterior se revisó si las áreas donde el interferograma resolvió mejor la fase coincide con valores altos de coherencia, esto es mayores a 0.5, los cuales se visualizan como zonas brillantes o blancas (Figura 37) . Si en la imagen de coherencia se ve gran parte con tonos oscuros que indican valores bajos de coherencia, menores a 0.5 se deben desechar.

Algunos autores recomiendan valores de coherencia ente 0.5 y 0.7 para hacer interferometría, las imágenes de coherencia se pueden usar de acuerdo al rango de valores que presenten donde 0 es baja coherencia y mayor a 0.5 coherencia aceptable, así:

- No se pueden usar: coherencia con valores menores < 0.5 = tonos negros u oscuros
- Deseable: Coherencia con valores entre 0.5 y 0.7 = Tonos grises
- Optimo: coherencia mayor a 0.7 = Tonos grises a blancos.

Considerando los paramentos antes mencionados se realizó la comparación con los interferogramas y el desenrollado de fase, siendo esta la última etapa para la validación de los pares a usar. Los pares que presentaban pixeles aleatorios, interferogramas poco desarrollados con pixeles aleatorios y baja coherencia fueron descartados con el objetivo de disminuir al máximo decorrelación que altere los resultados o genere modelaciones erróneas.

Figura 37. Ejemplo de validación de interferogramas con imágenes de coherencia a) par interferométrico ascendente 2017/11/03 – 2017/11/21, b) par interferométrico descendente 2017/11/03 – 2017/11/25

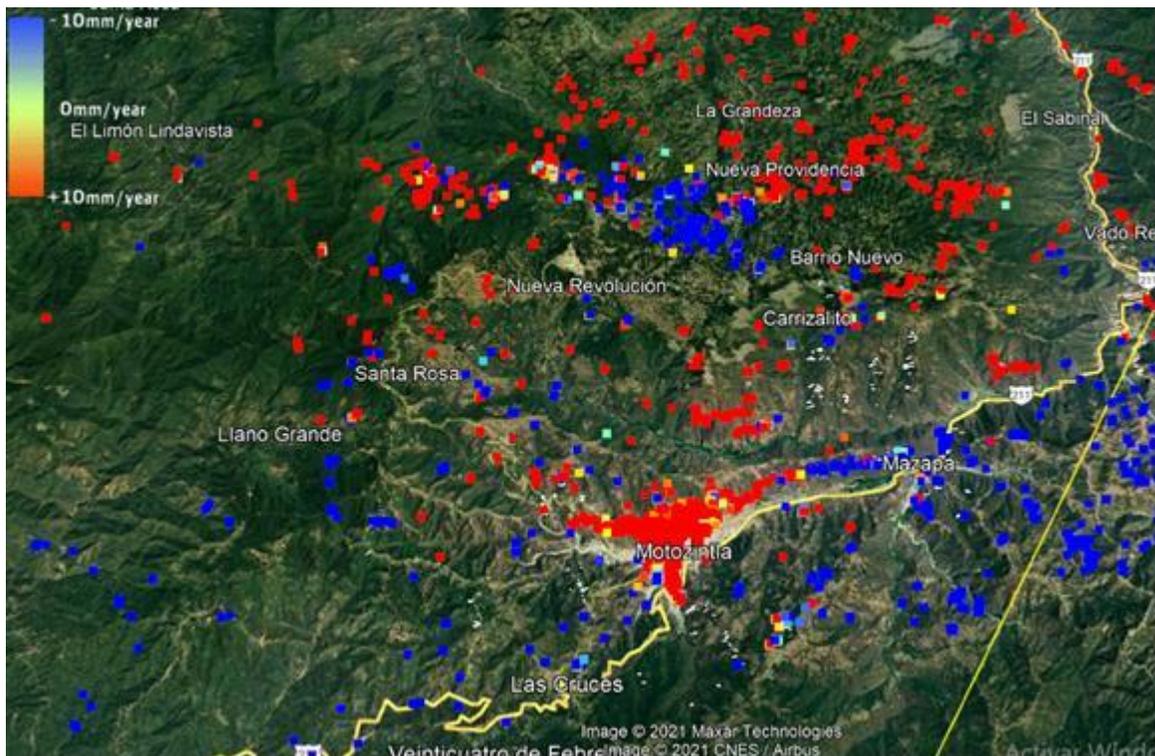


Fuente: Elaboración propia

Una vez realizado este paso, se procedió a implementar los procesos de inversión en el cual se utiliza un modelo de desplazamiento y aceleración para generar la capa con velocidades de desplazamiento. Cabe mencionar que se ejecutaron la primera y segunda inversión con una precisión de coherencia de 0.35. Posteriormente se aplicó geocodificación para obtener resultados georreferenciados, obteniendo como resultado final la salida en vector de las velocidades de desplazamiento del terreno en órbita ascendente y descendente (Figura 38 y 39).

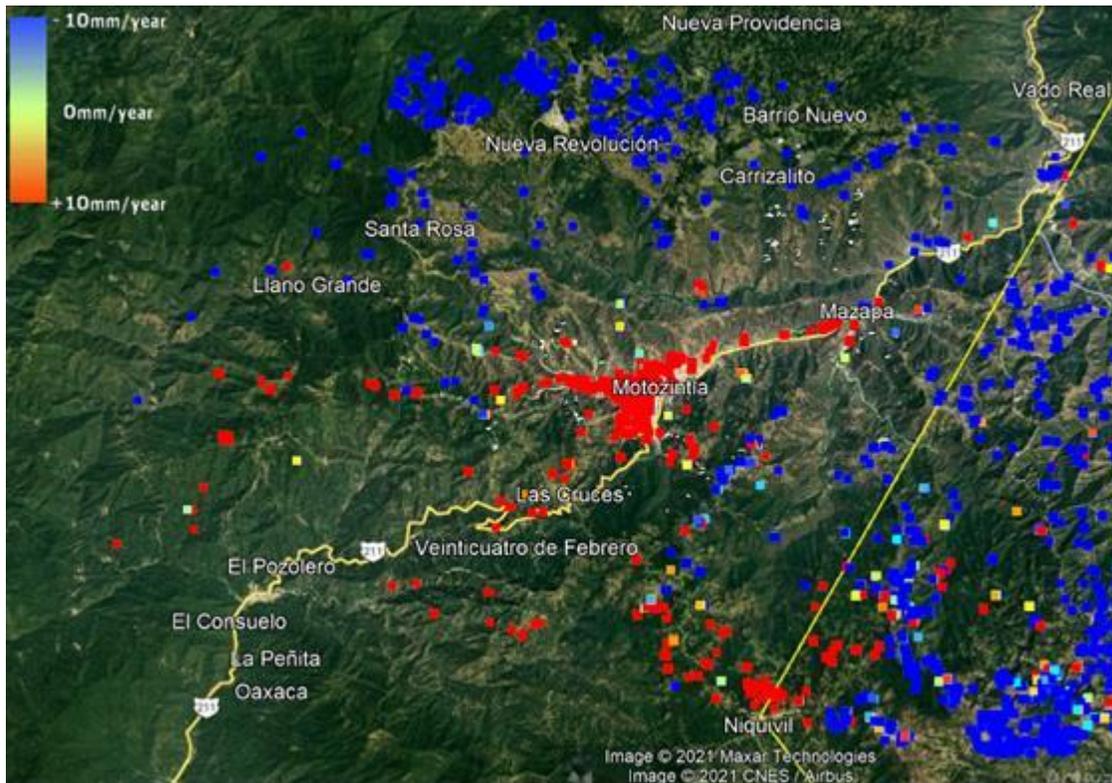
Las figuras 38 y 39 revelan velocidades de desplazamiento en un rango de 10 mm por año, donde; positivo (color rojo) significa elevación en desplazamiento y negativo (color azul) hundimiento o posibles desplazamientos de tierra. La cabecera del municipio de Motozintla se discrimina ya que al presentar edificaciones la respuesta hacia el radar presenta ruido por lo que se aplicó una máscara.

Figura 38. Velocidad de desplazamientos de terreno en la órbita ascendente



Fuente: Elaboración propia

Figura 39. Velocidad de desplazamientos de terreno en la órbita descendente



Fuente: Elaboración propia

4.4.2.3 Identificación de deslizamientos.

En esta investigación se realizó la identificación de deslizamientos la interpretación de coherencias generadas con los pares de imágenes mejor resueltos y seleccionados en el procesado interferométrico. Se tomó como base los puntos de velocidad de desplazamiento las cuales se superpusieron con la capa de coherencias y se comparó con imágenes ópticas, la detección se basó en la agrupación de píxeles coherentes.

El enfoque de fotointerpretación permite identificar deslizamientos de tierra en las imágenes que muestran las medidas de cambios en la coherencia, donde el mapeo generalmente se basa en el reconocimiento de una firma morfológica y radiométrica (Mondini et al., 2019).

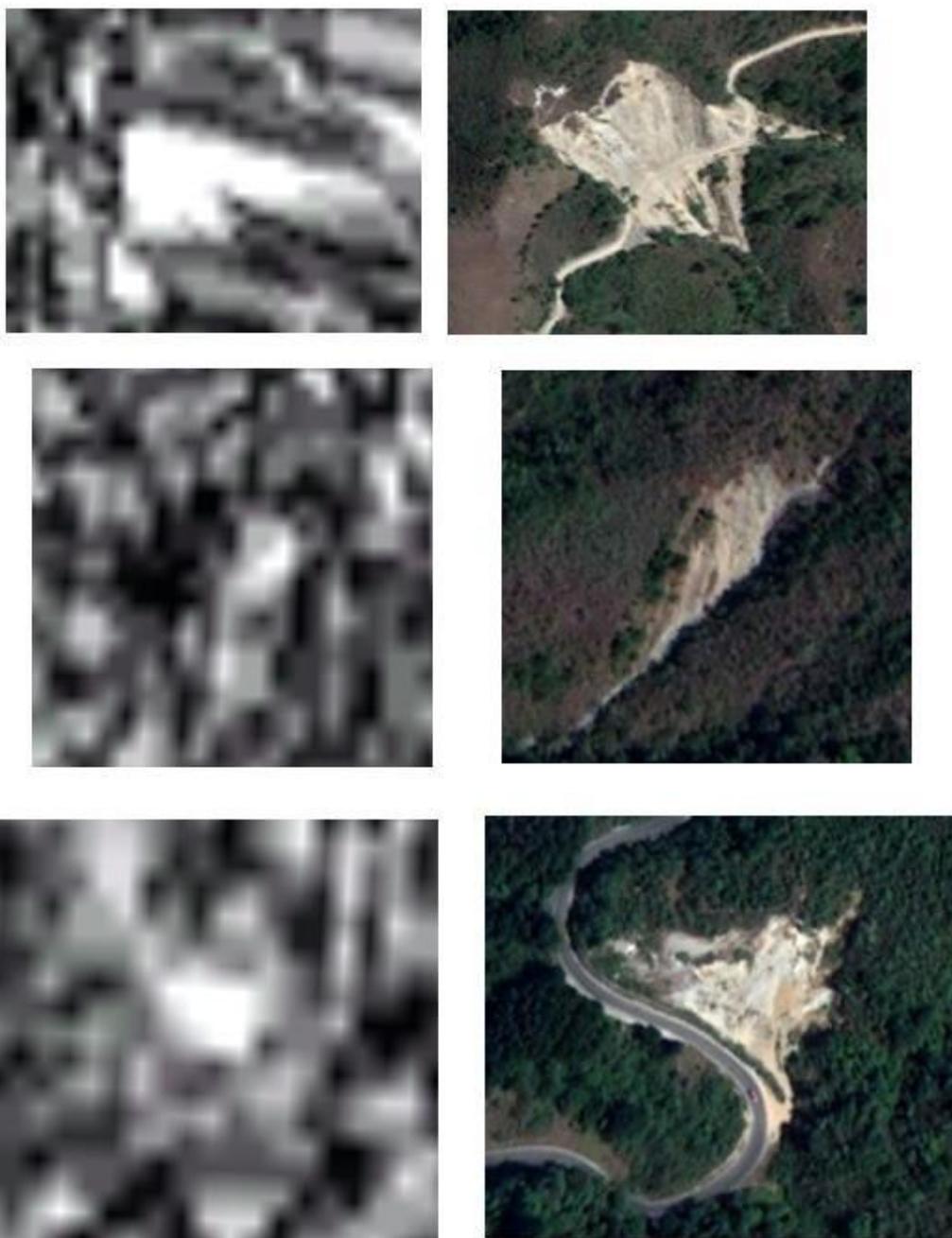
La firma morfológica es el grupo de todas las características morfométricas que caracterizan a un determinado movimiento, incluyendo pendiente, aspecto, curvatura transversal y longitudinal (que permite identificar pendientes de perfil cóncavo-convexo), rugosidad, entre otros (Mondini et al., 2019). El uso de imágenes de radar para este ejercicio facilita la detección de cambios ya que mediante la coherencia se puede detectar los cambios en la amplitud en SAR entre los pares de imágenes, por medio de la retrodispersión de la energía emitida hacia el radar, independientemente de las condiciones climatológicas.

A través de la superposición de los resultados obtenidos en velocidad del desplazamiento del terreno con la capa de coherencia se realizó interpretación de áreas donde se agruparán píxeles coherentes con valores similares de cambios, esto es; áreas oscuras o claras que se diferencien claramente del efecto sal y pimienta en la imagen que provienen de la incoherencia. Este procedimiento se realizó en la órbita ascendente y descendente con el fin de identificar cambios en ambos costados de las pendientes incluyendo ambas miradas del radar.

La coherencia es el parámetro que determina la calidad de los píxeles de cada interferograma, es decir, cuan estable es la señal radar que rebota en un mismo punto del terreno en las fechas en las que se adquieren las imágenes SAR. Si un mismo punto del terreno tiene valores de coherencia altos para todos los pares de imágenes SAR que componen los interferogramas, ese pixel es seleccionado para estimar la deformación, ya que el rebote de la señal radar se mantiene estable a lo largo del tiempo (Herrera et al., 2009).

Con el objetivo de validar los patrones identificados en algunas áreas de la capa de coherencia asociadas a posibles deslizamientos se realizó su comparación con imágenes ópticas del mismo año en ambas órbitas lo que permitió la detección rápida de deslizamientos pequeños y medianos, incluso en algunas zonas que registran nubosidad en las imágenes ópticas, el radar pudo detectar movimientos (Figura 40 y 41). Una vez validados se procedió a su digitalización en polígonos.

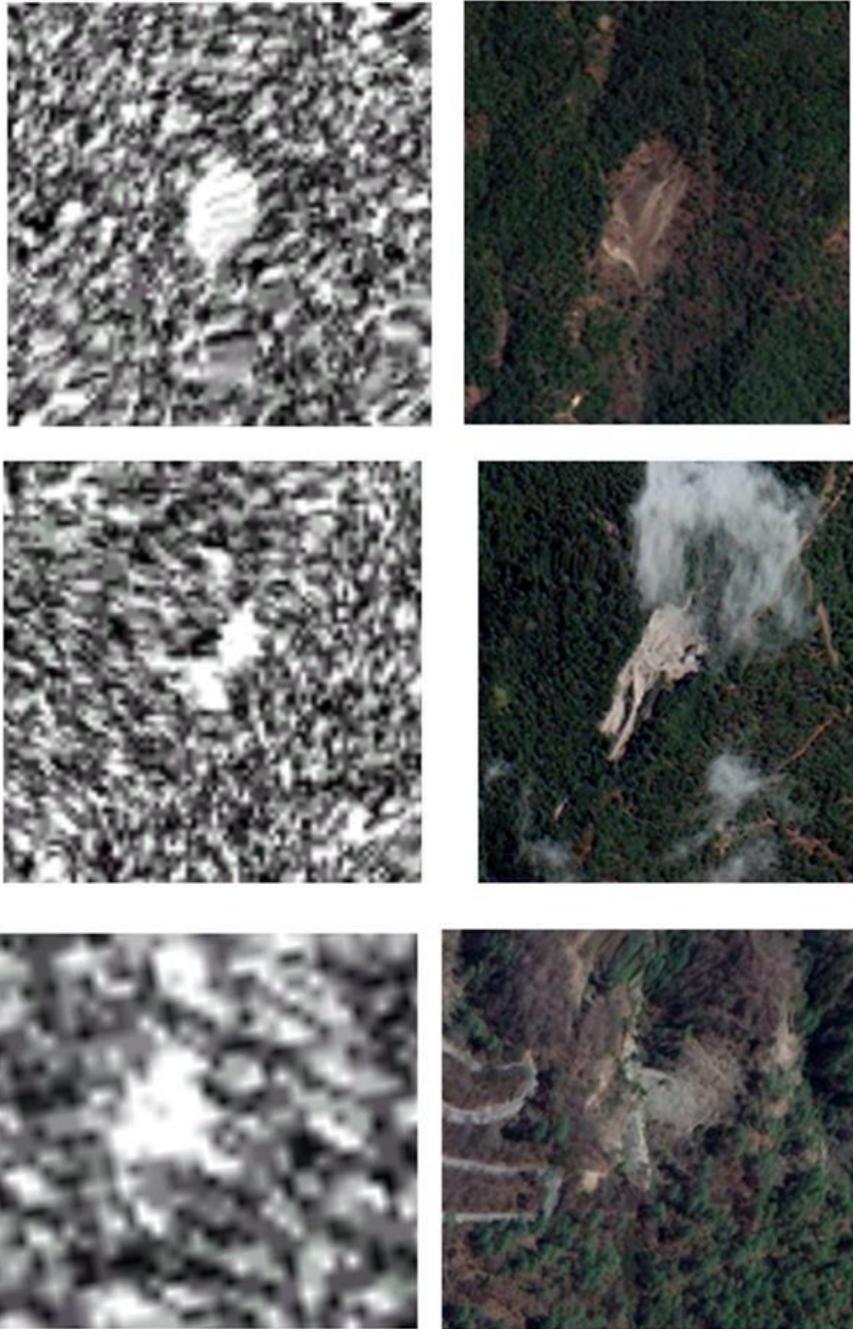
Figura 40. Identificación de deslizamientos en Motozintla a partir de la coherencia de pares interferométricos con imágenes SAR en órbita descendente antes y después del sismo.

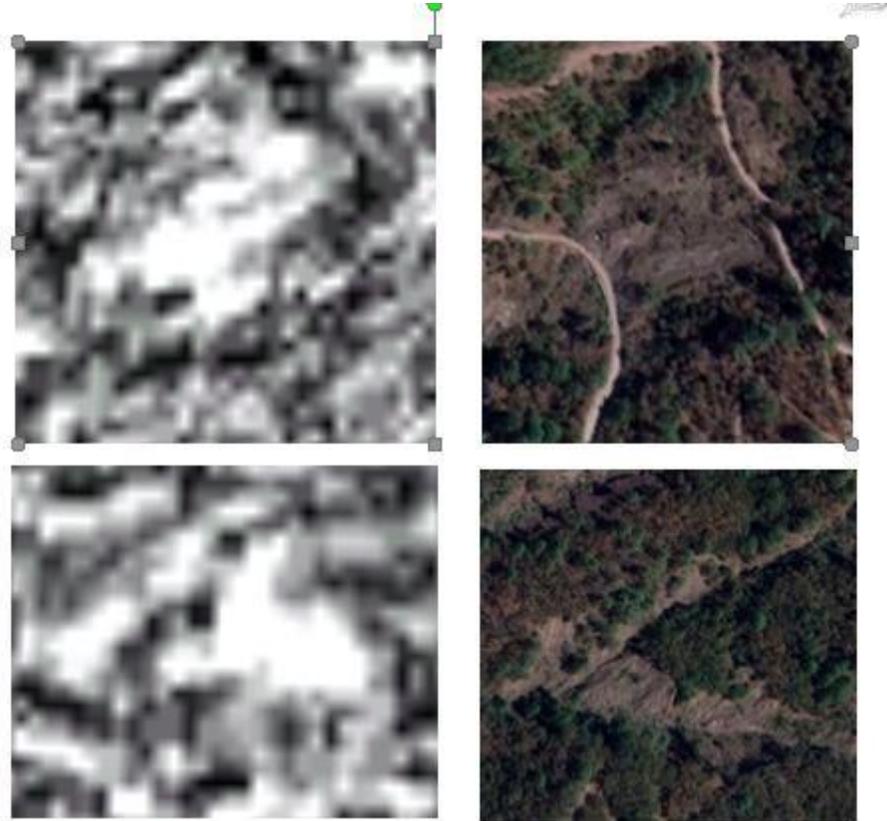




Fuente: Elaboración propia

Figura 41. Identificación de deslizamientos en Motozintla a partir de la coherencia de pares interferométricos con imágenes SAR en órbita ascendente antes y después del sismo.



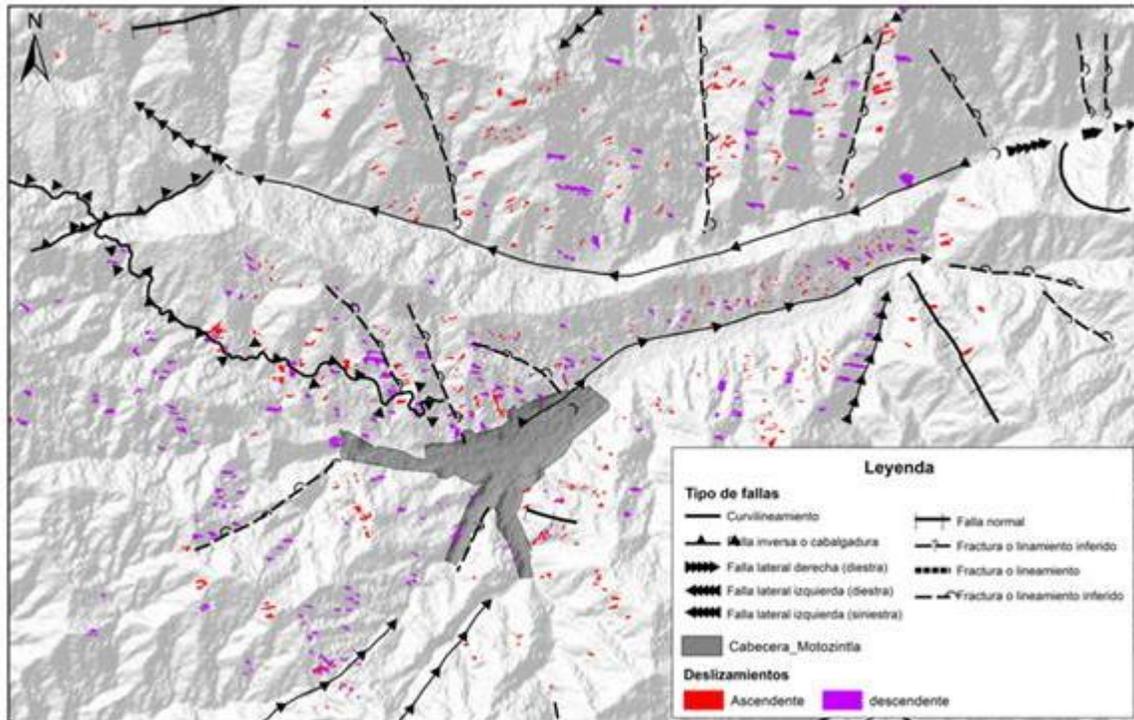


Fuente: Elaboración propia

En el proceso se pudo determinar que se presentan diferentes escenarios en los cambios de coherencia donde; a) se identifica un conglomerado claro de pixeles sobre el resto de pixeles el cual coincide en forma con el deslizamiento de la imagen óptica; b) se presentan conglomerados que evidencia cambios y resaltan del efecto sal y pimienta de la imagen de coherencia, aunque coinciden en la localización de deslizamientos de la imagen óptica presentan diferencias en la forma de movimiento con respecto a la imagen óptica, posiblemente obedecen a presencia de nubosidad en las imágenes ópticas y la fecha de adquisición. 3) Clúster plenamente identificados en zonas con vegetación densa y 4) Conglomerados de pixeles con desplazamientos que no se registran en la imagen óptica.

Como resultado se identificaron 375 deslizamientos en la órbita ascendente en la cara oeste de la ladera y 284 en la órbita descendente la cual permitió identificar movimientos en el lado este de la ladera, los cuales fueron registrados y mapeados (Figura 42).

Figura 42. Deslizamientos en Motozintla en órbita ascendente y descendente

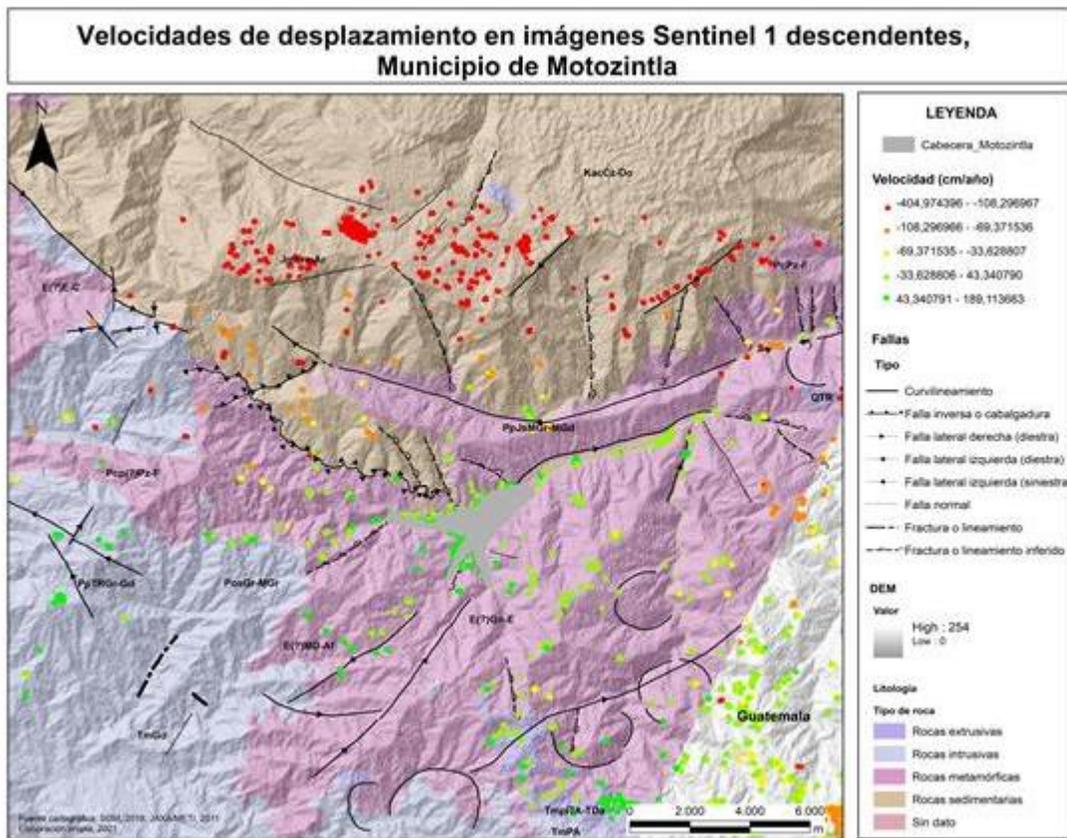


Fuente: Elaboración propia

Con el fin de analizar los deslizamientos mapeados y su relación con el sismo como factor detonante se realizó su superposición con las fallas geológicas presentes en la zona, encontrando que; se presentó una concentración de deslizamientos al noroccidente de la cabecera del Municipio de Motozintla sobre una falla inversa y sobre la ladera al costado noreste donde se presenta falla lateral derecha (Figura 42). Los desplazamientos de terreno concentrados en áreas de falla indica una relación directa con la ocurrencia del sismo.

Sumado a lo anterior, se realizó la digitalización de la litología a escala 1:50,000 (Servicio geológico mexicano) y pendientes generadas a partir del modelo digital ALOS PALSAR con resolución de 12 metros, con el objetivo de considerar las características físicas del terreno y su asociación con velocidades de desplazamiento y el inventario mapeado para ambas orbitas (Figura 43).

Figura 43. Velocidades de desplazamientos de terreno en órbita descendente

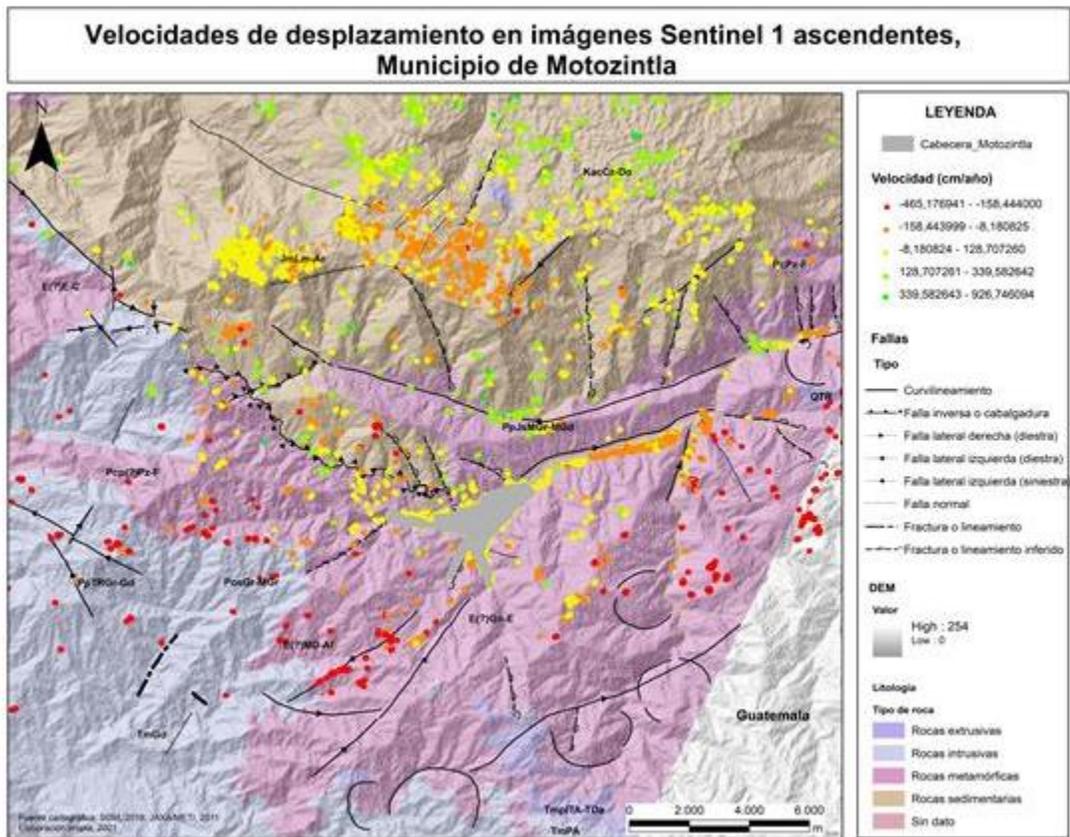


Fuente: Elaboración propia

En la figura 43 se puede observar que en la órbita descendente las áreas donde se presentan rocas metamórficas pertenecientes a la Unidad Jocote presentan las velocidades negativas más altas distribuidas cerca de las fallas, esto indica un descenso que se asocia a hundimientos (subsistencia) y cuando son localizados a deslizamientos. Hacia el norte predominan velocidades negativas medias sobre rocas sedimentarias con limolita y arenisca con fallas normales y un leve patrón de velocidades concentradas sobre falla lateral.

En la órbita ascendente se registran acumulados de velocidades medias de desplazamiento hacia el norte de la cabecera en rocas sedimentarias lo que indica que es altamente activa, al sur de la cabecera se presenta concentración de velocidades negativas posiblemente asociadas a desprendimientos sobre fallamientos (Figura 44).

Figura 44. Velocidades de desplazamiento del terreno en órbita ascendente



Fuente: Elaboración propia

En la órbita descendente la respuesta fue menor que en la ascendente con una mayor incidencia en valores de velocidad negativos al norte de la cabecera del municipio con patrón sobre falla lateral.

Considerando los resultados de velocidades en ambas orbitas y la identificación de deslizamientos a partir de la capa de coherencia se determina que la zona norte y sur de la cabecera presentan alta actividad de ligada a la presencia de fallamientos laterales con presencia de rocas sedimentarias y metamórficas. Al costado noreste el procesamiento con interferometría permitió la identificación de deslizamientos localizados en alta densidad de vegetación donde se localiza falla inversa y rocas metamórficas.

Conclusiones

Este trabajo responde a un esfuerzo por obtener una visión desde lo general a lo particular integrando la identificación de zonas con mayor ocurrencia de deslizamientos a nivel nacional a partir de la construcción de un inventario con el valor agregado de determinar por primera vez, las zonas con mayor impacto social por su ocurrencia en términos de pérdidas de vidas humanas y su relación con los grados de marginación. Lo anterior aporta desde lo general para ir a lo particular en la modelación a escala local, permitiendo seleccionar un área de estudio adecuada en la aplicación de la metodología.

Cabe destacar que, los datos históricos y su localización resultan ser una herramienta fundamental en la evaluación de riesgo de deslizamientos, contribuyen a mejorar y dar validez al mapeo de peligros, tanto así; que su relevancia ha sido reconocida a nivel internacional por las Naciones Unidas en el marco de acción de Hyogo y posteriormente en el Marco de Sendai.

Esta investigación presenta una nueva base de datos de deslizamientos para México, como una contribución para el aumento de capacidad del país en la investigación de estos procesos, sus causas e impacto. Los resultados obtenidos van más allá del aspecto básico de agrupación y almacenamiento de registros históricos. Este estudio ofrece un análisis de datos desde una perspectiva geográfica y social más amplia, que revela la distribución espacio temporal de los eventos en 113 años y su impacto en términos de población afectada.

A partir de los resultados obtenidos a escala nacional se puede concluir lo siguiente:

- Los deslizamientos presentan una tendencia de incremento desde los años 90 hasta la actualidad, siendo el año 2010 el que presenta mayor ocurrencia. Su frecuencia aumentó desde el año 2007 superando los 200 deslizamientos anuales, cifra que no ha descendido desde entonces.
- Las lluvias son el principal detonante ya que la mayoría de los eventos se presentan por lluvias intensivas, algunas asociadas al paso de huracanes y tormentas tropicales. Por su

parte, los sismos tienen menor incidencia en la generación de este tipo de procesos, posiblemente debido a que un sismo es menos recurrente que las lluvias, las cuales obedecen a cierta periodicidad.

- La distribución espacial permitió encontrar zonas para la atención oportuna en gestión de riesgo, ya que estados históricamente reconocidos como los más afectados por este tipo de eventos se mantienen, como el caso de Chiapas, Oaxaca, Veracruz, Michoacán y Puebla. Sin embargo, se revelaron nuevos espacios de ocurrencia como Yucatán, Sonora y Jalisco. A nivel municipal se destaca Del Nayar perteneciente al Estado de Nayarit, como el municipio con mayor número de personas que pueden verse afectadas ante la ocurrencia de un evento.
- 3,447 personas murieron en México por la ocurrencia de algún tipo de deslizamiento en un periodo de 113 años.
- Según estimaciones para el año 2017, el estado de Chiapas presenta la mayor cantidad de personas que pueden verse afectadas por la ocurrencia de deslizamientos, albergando 419,555 de 1,379,631 personas de 21 estados, esto es; cerca de la mitad de la población total a nivel nacional que puede sufrir algún tipo de daño. De igual forma encabeza la lista en términos de proporcionalidad por cada 10.000 habitantes.
- Las personas que se encuentran ubicadas en zonas con alta ocurrencia de deslizamientos, agrupadas en los estados de Chiapas, Guerrero, Oaxaca, Veracruz y Michoacán, normalmente habitan en localidades rurales pequeñas en zonas de altas pendientes.
- Se evidenció una relación directa entre el grado de marginación de la población y la cantidad de personas afectadas por este tipo de eventos, donde a mayor marginación, mayor el número de posibles afectados. Lo anterior debido a que hay una distribución inequitativa que tiende a segregar a las personas menos afortunadas en espacios más vulnerables, y por ende aumentando el impacto a sufrir, debido a su baja capacidad de respuesta ante algún tipo de deslizamiento.

- A nivel municipal 995 de 2,454 municipios han presentado eventos, en tan solo 23 municipios 1 de cada 5 habitantes puede sufrir algún daño, es decir el 20% del total de posibles afectados, donde Motozintla registra 21,321 personas en esta condición y a su vez presenta un nivel alto de marginación social.

El análisis de datos desde una visión nacional que integran tanto su ocurrencia, distribución espacial, tendencia temporal, así como el impacto social, permitió la selección del municipio de Motozintla para la modelación de deslizamientos, sumando a esto sus condiciones físicas y ubicación cercana al sismo ocurrido en Tehuantepec permitió asociar la identificación de desplazamientos de terreno considerando su relación con los sismos como factor detonante.

La modelación de deslizamientos se realizó mediante la aplicación de metodologías modernas de teledetección para el mapeo de deformación y desplazamientos de terreno a partir del uso de imágenes de radar SAR las cuales permiten obtener información independientemente de las condiciones meteorológicas, obteniendo resultados con precisiones centimétricas de exactitud de desplazamiento relativo de 0,1 a 1 centímetro.

A partir de la implementación de la técnica de Interferometría diferencial (DinSAR) se estima el desplazamiento por la diferencia de fase entre dos imágenes radar tomadas en diferentes tiempos. En esta investigación se siguió este principio, pero desarrollando un método de interferometría diferencial avanzado multitemporal SBAS, donde a partir del uso de imágenes Sentinel 1 en un rango de tiempo antes y después del sismo se pudieron obtener resultados de velocidades de desplazamiento, demostrando el potencial que presentan las imágenes Sentinel-1A para identificar deslizamientos.

Sumado a lo anterior el procesamiento interferométrico de SBAS en esta investigación incorporó el uso de técnicas de fotointerpretación de la coherencia lo cual permitió detectar y mapear deslizamientos en medidas de cambios de amplitud en imágenes Sentinel-1 previas y posteriores al evento del sismo ocurrido el. A partir de los resultados obtenidos se puede concluir lo siguiente:

- Las imágenes SAR Sentinel-1 y la fotointerpretación a partir de la coherencia son una combinación confiable para la detección rápida de deslizamientos.
- El análisis de coherencia multitemporal constituye una herramienta poderosa para la identificación de deslizamientos en zonas boscosas ya que la validación sugirió que la agrupación de píxeles con altos valores de coherencia (brillantes) referían un cambio o deformación del terreno. Sin embargo, en zonas agrícolas pueden producir una falsa alarma.
- Dada la coherencia que se obtuvo con las imágenes Sentinel 1 las cuales tienen longitud de onda C, se esperaría que usando imágenes que trabajen en banda L como el satélite ALOS PALSAR se obtengan mejores resultados. Cabe destacar que, estos conjuntos de imágenes no presentan la ventaja de las Sentinel de ser de libre distribución.
- El municipio de Motozintla presenta una alta actividad en cuanto desplazamientos del terreno y a deformaciones se refiere ya que los resultados en velocidades de desplazamiento dan cuenta de un posible proceso de subsidencia al norte de la cabecera y desplazamientos de terreno sobre fallas geológicas.
- Se presenta una relación entre velocidades negativas que dan cuenta de hundimientos o desplazamientos en rocas sedimentarias y metamórficas, con patrones demarcados en deslizamientos sobre fallas geológicas, esto indica una incidencia del sismo de Tehuantepec sobre los movimientos de terreno en el municipio de Motozintla.
- El método permitió la identificación de patrones espaciales en la superficie asociados a desplazamientos verticales en dirección del radar y deslizamientos pequeños en ambos costados de la ladera del Municipio de Motozintla a partir del uso de orbitas ascendentes y descendentes, con un total de 659 deslizamientos.
- El análisis de coherencia multitemporal mejora considerablemente el rendimiento de detección de deslizamientos de tierra, la aplicación de este método puede ser útil para los sistemas de alertas tempranas ya que permite una detección rápida de cambios en el terreno.

Finalmente se destaca el aporte de esta investigación en términos de avance en la construcción de un inventario a nivel nacional, así como el diseño y aplicación de estimaciones para determinar el número de personas que podría verse afectada ante algún tipo deslizamiento, siendo este el primer estudio que arroja datos de posibles afectados y su grado de marginación a nivel nacional. De igual forma la integración de técnicas con imágenes de radar SAR para la modelación de deslizamientos a escala detallada constituye un avance para la detección rápida de cambios de terreno en partir de sismos como factor detonante, insumo para futuras investigaciones y su aplicación en zonas boscosas donde generalmente la identificación de deslizamientos es un reto.

Bibliografía

- Aceves Quesada, J. F., Legorreta Paulín, G., Lugo Hubp, J., Umaña Romero, J., & Legorreta Cuevas, H. A. (2016). Sistemas de información geográfica y cartografía geomorfológica aplicados al inventario de deslizamientos y cartografía de susceptibilidad en la cuenca del río El Estado, Pico de Orizaba, México. *Investigaciones Geograficas*, 2016(91), 43–55. <https://doi.org/10.14350/rig.46503>
- Alcantara-Ayala, I. (2004). Hazard assessment of rainfall-induced landsliding in Mexico. *Geomorphology*, 61(1–2), 19–40. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2003.11.004>
- Alcántara-Ayala, I. (2008). On the historical account of disastrous landslides in Mexico: the challenge of risk management and disaster prevention. *Advances in Geosciences*, 14, 159–164. <https://doi.org/10.5194/adgeo-14-159-2008>
- Alcántara-Ayala, I., & García Murillo, F. . (2008). Procesos de remoción en masa en México : hacia una propuesta de elaboración de un inventario nacional, 47–64. Recuperado de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46112008000200004&lng=es&tlng=pt.
- Alcántara-Ayala, Irasema, & Echavarría, A. (2014). Cartilla de Diagnóstico Preliminar de Inestabilidad de Laderas. México, D.F. Recuperado de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/89637/Cartilla_Diagnostico_Preliminar.pdf
- Ayala-Carcedo, F. J., & Olcina Cantos, J. (2002). *Riesgos Naturales*. Barcelona.
- Baró, J. E., & Monroy, F. (2018). *Enfrentando los riesgos siconaturales*. Ciudad de México. Recuperado de <http://hdl.handle.net/20.500.11799/95387>
- Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R., & Sansosti, E. (2002). A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(11), 2375–2383. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2002.803792>
- Bertalanffy, L. (1989). Teoría general de los sistemas. Fundamentos, desarrollo, aplicaciones. *Teoría general de los sistemas*, 311. Recuperado de http://cienciasyparadigmas.files.wordpress.com/2012/06/teoria-general-de-los-sistemas-_fundamentos-desarrollo-aplicacionesludwig-von-bertalanffy.pdf
- Bitrán Bitrán, D. (2001). Características del impacto socioeconómico de los principales desastres. (Violeta Ramos Radill, Ed.) (1a). México D.F: Centro Nacional de Prevención de Desastres CENAPRED. Recuperado de www.cenapred.unam.mx

- Brenes Torres, A. (2007). Elementos conceptuales y desarrollo histórico de la noción de gestión del riesgo y los desastres. *Reflexiones*, 86(2), 75–91. Recuperado de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=72920537006>
- Calvo García-Tornel, F. (1984). La geografía de los riesgos. *Cuadernos críticos de geografía humana*, IX(54).
- Campos-Vargas, M., Toscana-aparicio, A., & Campos Alanís, J. (2014). Riesgos sicionaturales: vulnerabilidad socioeconómica , justicia ambiental y justicia espacial. *Cuadernos de geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 24(2), 53–69. <https://doi.org/10.15446/rcdg.v24n2.50207>
- Campos Aranda, D. F. (1998). *Procesos del Ciclo Hidrológico* (Editorial). San Luis Potosí, México: Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Cardona, O. D. (1996). Manejo ambiental y prevención de desastres: dos temas asociados. En M. A. Fernández (Ed.), *Ciudades en riesgo. Degradación ambiental, Riesgos Urbanos y Desastres* (p. 142). Red de Estudios Sociales de Prevención de Desastres en América Latina.
- Carneç, C., & Fabriol, H. (1999). Monitoring and modeling land subsidence at the Cerro Prieto geothermal field, Baja California, Mexico, using SAR interferometry. *Geophysical Research Letters*, 26(9), 1211–1214. <https://doi.org/10.1029/1999GL900062>
- Casagli, N., Cigna, F., Bianchini, S., Hölbling, D., Füreder, P., Righini, G., ... Bianchi, M. (2016). Landslide mapping and monitoring by using radar and optical remote sensing: Examples from the EC-FP7 project SAFER. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 4, 92–108. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2016.07.001>
- CENAPRED-SEGOB. (2001). Diagnóstico de peligros e identificación de riesgos de desastres en México. (O. Zepeda Ramos & S. González Martínez, Eds.), *Atlas Nacional de Riesgos de la República Mexicana* (Primera Ed, Vol. 1). México, D.F. Recuperado de <https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/Libros2013/CD004433.PDF>
- Chaussard, E, Bürgmann, R., Cohen-Waeber, J., & Delbridge, B. (s/f). *Landslide monitoring with InSAR*. Berkeley: Universidad de Berkeley.
- Chaussard, Estelle, Wdowinski, S., Cabral-Cano, E., & Amelung, F. (2014). Land subsidence in central Mexico detected by ALOS InSAR time-series. *Remote Sensing of Environment*, 140, 94–106. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.038>

- Chen, C. W., & Zebker, H. A. (2001). Network approaches to two-dimensional phase unwrapping: intractability and two new algorithms: erratum. *Journal of the Optical Society of America A*, 18(5), 1192. <https://doi.org/10.1364/josaa.18.001192>
- CHRR, C. for H. and R. R. C. U., CIESIN, C. for I. E. S. I. N. C. U., & NGI, N. G. I. (2005). *Global Landslide Hazard Distribution*. Palisades, NY: NASA Socioeconomic Data and Applications Center (SEDAC). Recuperado de <http://dx.doi.org/10.7927/H4P848VZ>
- Cigna, F., Osmanoglu, B., Cabral-Cano, E., Dixon, T. H., Ávila-Olivera, J. A., Garduño-Monroy, V. H., ... Wdowinski, S. (2012). Monitoring land subsidence and its induced geological hazard with Synthetic Aperture Radar Interferometry: A case study in Morelia, Mexico. *Remote Sensing of Environment*, 117, 146–161. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.09.005>
- CNN Español. (2016, agosto). Al menos 40 muertos por deslaves en México. Recuperado el 20 de agosto de 2017, de <https://cnnespanol.cnn.com/2016/08/07/deslaves-provocados-por-earl-en-mexico-dejan-al-menos-10-muertos/>
- Corporación OSSO. (2016). *DESINVENTAR*. Cali. Recuperado de <https://www.desinventar.org/es/>
- CRED, & UCLouvain. (2020). EM-DAT, the International Disaster Database. Recuperado el 3 de marzo de 2018, de www.emdat.be
- Crosetto, M., Monserrat, O., Cuevas-gonzález, M., Devanthery, N., & Crippa, B. (2016). Persistent Scatterer Interferometry: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 115, 78–89. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.10.011>
- Cruden, D. M., & Varnes, D. J. (1996). Landslides Types and Processes. En National Academy of Sciences (Ed.), *Landslides: Investigation and mitigation* (pp. 36–75). Washington: Transportation Research Board. Recuperado de <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/sr/sr247/sr247-003.pdf>
- Dai, K., Li, Z., Tomás, R., Liu, G., Yu, B., Wang, X., ... Stockamp, J. (2016). Monitoring activity at the Daguangbao mega-landslide (China) using Sentinel-1 TOPS time series interferometry. *Remote Sensing of Environment*, 186, 501–513. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.09.009>
- Damm, B., & Klose, M. (2015). The landslide database for Germany: Closing the gap at national level. *Geomorphology*, 249, 82–93. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.03.021>

- Dávila-Hernández, N., & Madrigal-Uribe, D. (2015). Aplicación de Interferometría Radar en el estudio de subsidencias en el Valle de Toluca, México. *Revista Ciencias Espaciales*, 1, 294–309. <https://doi.org/10.5377/ce.v8i1.2054>
- Devoli, G., Morales, A., & Høeg, K. (2007). Historical landslides in Nicaragua-collection and analysis of data. *Landslides*, 4(1), 5–18. <https://doi.org/10.1007/s10346-006-0048-x>
- Devoli, G., Strauch, W., Chávez, G., & Høeg, K. (2007). A landslide database for Nicaragua: A tool for landslide-hazard management. *Landslides*, 4(2), 163–176. <https://doi.org/10.1007/s10346-006-0074-8>
- Díaz, S. R., Cadena, E., Adame, S., & Dávila, N. (2019). Landslides in Mexico : their occurrence and social im- pact since 1935. *Landslides*, (February). <https://doi.org/10.1007/s10346-019-01285-6>
- Dilley, M., Chen, R. S., Deichmann, U., Lerner-Lam, A. L., Arnold, M., Arnold, M., ... Yetman, G. (2005). *Natural Disaster Hotspots: A Global Risk Analysis*. Disaster Risk Management Series (Vol. 5). Washington, D.C.: The World Bank. Recuperado de <http://go.worldbank.org/PT8XJZW3K0>
- El Universal. (2017). Metropoli. Recuperado el 18 de octubre de 2017, de <http://www.eluniversal.com.mx/metropoli/edomex/deslaves-y-sismos-colapsaron-carreteras-al-sur-del-edomex>
- EPOCH, E. C. P. (1993). The temporal occurrence and forecasting of landslides in the European community. (Flageollet & J. C, Eds.).
- Euillades, P., & Euillades, L. (2015). *Fundamentos de detección remota con sensor de radar de apertura sintética*.
- Fernández Torres, J. T. (s/f). *Desarrollo de nuevas técnicas de control de deslizamientos*. Recuperado el 1 de marzo de 2017, de <http://www.mat.ucm.es/jft/proyectos/desarrollo-de-nuevas-tecnicas-de-control-de-deslizamientos-mediante-la-integracion-de-de-observaciones-terrestres-y-espaciales-eoslide/>
- Froude, M. J., & Petley, D. N. (2018). Global fatal landslide occurrence from 2004 to 2016. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18(8), 2161–2181. <https://doi.org/10.5194/nhess-18-2161-2018>
- Gabriel, A. K., Goldstein, R. M., & Zebker, H. A. (1989). Mapping small elevation changes over large areas: differential radar interferometry. *Journal of Geophysical Research*, 94(B7), 9183–9191. <https://doi.org/10.1029/JB094iB07p09183>

- Gaidzik, K., Ramírez-herrera, M. T., Bunn, M., & Ben, A. (2017). Landslide manual and automated inventories, and susceptibility mapping using LIDAR in the forested mountains of Guerrero, Mexico. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 0(0), 1–26. <https://doi.org/10.1080/19475705.2017.1292560>
- Galindo, J. (2015). El concepto de riesgo en las teorías de Ulrich Beck y Niklas Luhmann. *Acta Sociológica*, 67, 141–164. <https://doi.org/10.1016/j.acso.2015.03.005>
- García, N. M. M., Méndez, K. M. M., Nava, S., & Vázquez, F. (2014). Resumen Ejecutivo: Impacto Socioeconómico de los Desastres en México durante 2015. Centro Nacional de Prevención de Desastres. Ciudad de México. Recuperado de <http://www.cenapred.org.mx>
- García, N. M., Méndez, K. M., Nava, S., & Vázquez, F. (2016). Resumen Ejecutivo: Impacto Socioeconómico de los Desastres en México durante 2015. Centro Nacional de Prevención de Desastres. Ciudad de México. Recuperado de <http://www.cenapred.gob.mx/es/Publicaciones/archivos/340-NO.17-RESUMENEJECUTIVOIMPACTO2015.PDF>
- Godínez-Domínguez, E. A., Tena-Colunga, A., Pérez-Rocha, L. E., Archundia-Aranda, H. I., Gómez-Bernal, A., Ruiz-Torres, R. P., & Escamilla-Cruz, J. L. (2021). The September 7, 2017 Tehuantepec, Mexico, earthquake: Damage assessment in masonry structures for housing. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 56, 102123. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2021.102123>
- González de Vallejo, L. I., Ferrer, M., Ortuño, L., & Oteo, C. (2002). *Ingeniería Geológica*. Madrid, España: Pearson Prentice Hall.
- Hanssen F, R. (2001). *Radar Interferometry Data Interpretation and Error Analysis*. New York: Kluwer Academic Publishers. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/0-306-47633-9>
- Herrera, G., Tomás, R., López Sánchez, J., Monserrat, O., Cooksley, G., & Mulas de la Peña, J. (2009). Sistemas radar aplicados a la investigación de subsidencia y movimientos de ladera. *Enseñanza de las ciencias de la tierra*, 17(3), 316–324.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía INEGI. (2010). *Censo de Población y Vivienda 2010*. México: INEGI. Recuperado de <http://www.beta.inegi.org.mx/proyectos/ccpv/2010/>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía INEGI. (2016a). *Mapa Digital de México V6*. Recuperado el 29 de noviembre de 2016, de <http://gaia.inegi.org.mx/mdm6/?v=bGF00jIzLjMyMDA4LGxvbjotMTAyLjE0NTY1LHo6MSxsOmMxMTFzZXJ2aWNpb3N8dGMxMTFzZXJ2aWNpb3M=>

- Instituto Nacional de Estadística y Geografía INEGI. (2016b). Marco Geoestadístico. Recuperado el 13 de febrero de 2017, de <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/geoestadistica/>
- Jaimés, M. A., Niño, M., Reinoso, E., & Carlos, R. (2010). XXV Reunión Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica. En N. P. L. Acosta (Ed.), Base de datos de deslizamientos inducidos por sismo y lluvia en México para calibrar un modelo de análisis de talud infinito (Vol. 3, pp. 895–901). D.F: Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica, A.C. <https://doi.org/10.1007/BF00006442>
- Jefatura de Gobierno de la Ciudad de México. (2017). Declaratoria de Emergencia con motivo del fenómeno sísmico ocurrido el día diecinueve de septiembre de dos mil diecisiete en la Ciudad de México. Gaceta Oficial de la Ciudad de México. México: Gaceta Oficial de la Ciudad de México. Recuperado de http://data.consejeria.cdmx.gob.mx/portal_old/uploads/gacetas/9f49ae03379f5a7b40fa03d1a94b12bb.pdf
- Jiménez-Perálvarez, J. (2011). Anexo 3 Interferometría radar diferencial (DInSAR).
- Kirschbaum, D. B., Adler, R., Hong, Y., Hill, S., & Lerner-Lam, A. (2010). A global landslide catalog for hazard applications: Method, results, and limitations. *Natural Hazards*, 52(3), 561–575. <https://doi.org/10.1007/s11069-009-9401-4>
- Kirschbaum, D., Stanley, T., & Zhou, Y. (2015). Geomorphology Spatial and temporal analysis of a global landslide catalog. *Geomorphology*, 12. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.03.016>
- Klose, M., Maurischat, P., & Damm, B. (2016). Landslide impacts in Germany: A historical and socioeconomic perspective. *Landslides*, 13(1), 183–199. <https://doi.org/10.1007/s10346-015-0643-9>
- Korup, O. (2005). Distribution of landslides in southwest New Zealand. *Landslides*, 2(1), 43–51. <https://doi.org/10.1007/s10346-004-0042-0>
- Lavell, A. (1997). Viviendo en riesgo. Comunidades vulnerables y prevención de desastres en América Latina. Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina. Recuperado de <http://www.desenredando.org>
- Lavell, A. (2003). La gestión local del riesgo. Nociones y precisiones en torno al concepto y la práctica. (CEPREDENAC & PNUD, Eds.).
- Lazeký, M., Çomut, F. C., Hlaváčová, I., & Gürboğa, Ş. (2015). Practical Application of Satellite-Based SAR Interferometry for the Detection of Landslide Activity. *Procedia Earth and Planetary Science*, 15, 613–618. <https://doi.org/10.1016/j.proeps.2015.08.113>

- Lee, B. C., Lu, Z., Jung, H., Won, J., & Dzurisin, D. (2006). Surface Deformation of Augustine Volcano , 1992 – 2005 , from Multiple-Interferogram Processing Using a Refined Small Baseline Subset (SBAS) Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) Approach Historical Eruption of Augustine. The 2006 Eruption of Augustine Volcano. Recuperado de [http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Surface+Deformation+of+Augustine+Volcano,+1992-2005,+from+Multiple-Interferogram+Processing+Using+a+Refined+Small+Baseline+Subset+\(SBAS\)+Interferometric+Synthetic+Aperture+Radar+\(InSAR\)+Approac](http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Surface+Deformation+of+Augustine+Volcano,+1992-2005,+from+Multiple-Interferogram+Processing+Using+a+Refined+Small+Baseline+Subset+(SBAS)+Interferometric+Synthetic+Aperture+Radar+(InSAR)+Approac)
- Lei, Y., Wang, J., Yue, Y., Zhou, H., & Yin, W. (2014). Rethinking the relationships of vulnerability, resilience, and adaptation from a disaster risk perspective. *Natural Hazards*, 70. <https://doi.org/10.1007/s11069-013-0831-7>
- Li, S., Xu, W., & Li, Z. (2021). Review of the SBAS InSAR Time-series algorithms, applications, and challenges. *Geodesy and Geodynamics*, (xxxx). <https://doi.org/10.1016/j.geog.2021.09.007>
- Luhmann, N. (1991). *Sociología del riesgo*. Berlín. Recuperado de <https:// analisisinstitucionaluba.files.wordpress.com/2013/08/sociologia-del-riesgo-niklas-luhmann.pdf>
- Martínez Rubiano, M. T. (2009). Los geógrafos y la teoría de riesgos y desastres ambientales. *Perspectiva Geográfica*, 14, 241–263. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/3644793.pdf>
- Mondini, A. C., Santangelo, M., Rocchetti, M., Rossetto, E., Manconi, A., & Monserrat, O. (2019). Sentinel-1 SAR amplitude imagery for rapid landslide detection. *Remote Sensing*, 11(7), 1–25. <https://doi.org/10.3390/rs11070760>
- Morales Domínguez, L., Castañeda Martínez, A., & Gonzáles Huesca, A. E. (2016). Análisis de umbrales de lluvia que detonan deslizamientos y sus posibles aplicaciones en un sistemas de alerta temprana por inestabilidad de laderas. Recuperado de <https://outlook.office.com/owa/?path=/attachmentlightbox>
- Morin, E. (1981). *El Método I*. Madrid. Recuperado de <https://edgarmorinmultiversidad.org/index.php/descarga-el-metodo-i-edgar-morin.html>
- Morin, E. (1994). *Introducción al pensamiento complejo*.
- Nadim, F., Kjekstad, O., Peduzzi, P., Herold, C., & Jaedicke, C. (2006). Global landslide and avalanche hotspots. *Landslides*, 3(2), 159–173. <https://doi.org/10.1007/s10346-006-0036-1>

- NASA, N. A. and S. A. (2015). Global Landslide Catalog. Recuperado el 20 de junio de 2017, de data.nasa.gov/Earth-Science/Global-Landslide-Catalog/h9d8-neg4
- Natenzon, C. E., & Ríos, D. (2016). Riesgos , catástrofes y vulnerabilidades. Buenos Aires.
- Ojeda, J., Castro, E., Valencia, A., & Fonseca, S. (2001). Guía metodología para la zonificación de amenazas por fenómenos de remoción en masa - método univariado. y escenarios de riesgo por avenidas torrenciales. Bogotá: Instituto de Investigación e Información Geocientífica, Minero Ambiental y Nuclear - INGEOMINAS. Recuperado de https://catalogo.sgc.gov.co/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=48301&shelfbrowse_itemnumber=47648
- ONU Naciones Unidas. (2016). Informe del grupo de trabajo intergubernamental de expertos de composición abierta sobre los indicadores y la terminología relacionados con la reducción del riesgo de desastres (Vol. 21184). Recuperado de https://www.preventionweb.net/files/50683_oiwegreports spanish.pdf
- Ordaz, M., & Zeballos, A. (2007). Información para la gestión de riesgo de desastres estudio de caso de cinco países: México. Ciudad de México. Recuperado de <https://www.cepal.org/publicaciones/xml/9/33659/Mexicoliviano.pdf>
- Osmanoğlu, B., Dixon, T. H., Wdowinski, S., Cabral-Cano, E., & Jiang, Y. (2011). Mexico City subsidence observed with persistent scatterer InSAR. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 13(1), 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2010.05.009>
- Palenzuela, J. A., Marsella, M., Nardinocchi, C., Pérez, J. L., Fernández, T., Chacón, J., & Irigaray, C. (2015). Landslide detection and inventory by integrating LiDAR data in a GIS environment. *Landslides*, 12(6), 1035–1050. <https://doi.org/10.1007/s10346-014-0534-5>
- Pennington, C., Freeborough, K., Dashwood, C., Dijkstra, T., & Lawrie, K. (2015). The National Landslide Database of Great Britain: Acquisition, communication and the role of social media. *Geomorphology*, 249, 44–51. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.03.013>
- Podest, E. (2018). Conceptos Básicos del Radar de Apertura Sintética. *La Teledetección por Radar y sus Aplicaciones para la Tierra, el Agua y Desastres*, 51. Recuperado de <https://arset.gsfc.nasa.gov/sites/default/files/disasters/SAR-17/Session1-SAR-Spanish.pdf>
- Prigogine, I. (1996). El fin de las certidumbres. Recuperado de <http://medicinayarte.com/img/el-fin-de-las-certidumbres.pdf>

- Ramírez, T., & Marco, P. (2010). Teoría del Caos: una visión de su historia y actualidad. *Revista del Centro de Investigación. Universidad La Salle*, 9(34), 41–47. Recuperado de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=34215492004>
- Ramos Cañon, A. M., Trujillo-Vela, M. G., & Prada-Sarmiento, L. F. (2007). Rainfall thresholds for the initiation of landslides. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 25(2), 61–80. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.18359/rcin.1432>
- Rodríguez, J. M. M., Vicente da Silva, E., & Cezar Leal, A. (2012). Paisaje y geosistema: apuntes para una discusión teórica. *Geonorte*, 4, 239–251. Recuperado de periodicos.ufam.edu.br/index.php/revista-geonorte/article/download/1808/1691
- Sánchez de la Torre, L., Agueda-Villar, J. A., Comenero, J. R., & Manjón, M. (1977). La Serie Permotriásica en la región de Villaviciosa (Asturias). *Cuadernos Geología Ibérica*, 4, 329–338.
- Santarelli, S., & Campos, M. (2002). Corrientes Epistemológicas, metodología y prácticas en geografía. *Propuestas de estudio del espacio local. Universidad Nacional del Sur. Mahía Blanca, Argentina.*
- Sarychikhina, O., Glowacka, E., Vidal, F. S., Mellors, R., & Hernández, J. R. (2011). Aplicación de DInSAR a los estudios de subsidencia en el Valle de Mexicali. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 63(1), 1–13.
- Sauri Pujol, D. (1988). Cambio y continuidad en la geografía de los riesgos naturales: La aportación de la geografía radical. *Estudios Geográficos*, 49(191), 257–270. Recuperado de <https://www.proquest.com/openview/091ce988b7abc1fd464f4600e8cedec5/1?pq-origsite=gscholar&cbl=1818083>
- Scaioni, M., Longoni, L., Melillo, V., & Papini, M. (2014). Remote Sensing for Landslide Investigations: An Overview of Recent Achievements and Perspectives. *Remote Sens*, 1–53. <https://doi.org/10.3390/rs60x000x>
- Seppi, S. (2016). Uso de Interferometría Diferencial para monitorear deformaciones de terreno en la comuna de Corvara, Provincia de Bolzano, Italia., 110.
- Shaw, R., Islam, A., & Mallick, F. (2013). Disaster, Risk and Evolution of the Concept. En *Disaster RISK Reduction*. <https://doi.org/10.1007/978-4-431-54252-0>
- Singleton, A., Li, Z., Hoey, T., & Muller, J. P. (2014). Evaluating sub-pixel offset techniques as an alternative to D-InSAR for monitoring episodic landslide movements in vegetated terrain. *Remote Sensing of Environment*, 147, 133–144. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.03.003>

- Solano Rojas, D., Cabral Cano, E., Hernández Espriú, A., Wdowinski, S., DeMets, C., Salazar Tlaczani, L., ... Bohane, A. (2015). La relación de subsidencia del terreno InSAR-GPS y el abatimiento del nivel estático en pozos de la zona Metropolitana de la Ciudad de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 67(2), 273–283. <https://doi.org/10.18268/bsgm2015v67n2a10>
- Solari, L., Del Soldato, M., Raspini, F., Barra, A., Bianchini, S., Confuorto, P., ... Crosetto, M. (2020). Review of satellite interferometry for landslide detection in Italy. *Remote Sensing*, 12(8), 1–29. <https://doi.org/10.3390/RS12081351>
- SSN-UNAM. (2017a). Reporte especial. Sismo de Tehuantepec. Ciudad de México. Recuperado de http://www.ssn.unam.mx/sismicidad/reportes-especiales/2017/SSNMX_rep_esp_20170907_Tehuantepec_M82.pdf
- SSN-UNAM. (2017b). Reporte Especial. Sismo del día 19 de septiembre de 2017, Puebla-Morelos (M 7.1). Ciudad de México. Recuperado de http://www.ssn.unam.mx/sismicidad/reportes-especiales/2017/SSNMX_rep_esp_20170919_Puebla-Morelos_M71.pdf
- SSN-UNAM. (2017c). Reporte especial Tehuantepec (2017-09-07 23:49 MW 8.2). Ciudad de México. Recuperado de http://www.ssn.unam.mx/sismicidad/reportes-especiales/2017/SSNMX_rep_esp_20170907_Tehuantepec_M82.pdf
- Strahler, A. N., & Strahler, A. H. (1994). *Geografía Física*. Geografía Física. Barcelona, España: Ediciones Omega, S.A. Recuperado de <https://onedrive.live.com/?id=D16A95435AE6D6C6!135&cid=D16A95435AE6D6C6>
- Suarez, J. (1998). Y estabilidad de taludes en zonas tropicales. (I. de S. Ltda., Ed.), Julio (Vol. 1). Bucaramanga, Colombia: Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos. Recuperado de <http://desastres.usac.edu.gt/documentos/docgt/pdf/spa/doc0101/doc0101.pdf>
- Taylor, F. E., Malamud, B. D., Freeborough, K., & Demeritt, D. (2015). Enriching Great Britain's National Landslide Database by searching newspaper archives. *Geomorphology*, 249, 52–68. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.05.019>
- Televisa. (2017). Inmuebles destruidos y deslaves en carreteras por sismo en Oaxaca. México: Televisa.News. Recuperado de <https://noticieros.televisa.com/videos/inmuebles-destruidos-y-deslaves-carreteras-sismo-oaxaca/>
- Trigila, A., Iadanza, C., & Spizzichino, D. (2010). Quality assessment of the Italian Landslide Inventory using GIS processing. *Landslides*, 7(4), 455–470. <https://doi.org/10.1007/s10346-010-0213-0>

- Twig, J. (2007). Characteristics of a Disaster-resilient Community (Version 1 for Field Testing) (Vol. 1). Londres. Recuperado de https://www.preventionweb.net/files/2310_Characteristicsdisasterhighres.pdf
- UNDRO Office of the United Nations Disaster Relief Co-ordinator UNDRO. (1979). Natural Disasters and Vulnerability Analysis. Geneva. Recuperado de <http://www.archive.org/details/naturaldisasters00offi>
- UNISDR Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción de Riesgo de Desastres. (2005). Marco de Acción de Hyogo para 2005-2015. Conferencia Mundial sobre la Reducción de los Desastres, 25. Recuperado de www.unisdr.org
- UNISDR Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción de Riesgo de Desastres. (2015). El GAR de bolsillo 2015. Hacia el desarrollo sostenible: El futuro de la gestión de riesgo de desastres. Ginebra. Recuperado de http://www.preventionweb.net/english/hyogo/gar/2015/en/gar-pdf/GAR15_Pocket_ES.pdf
- UNISDR Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción de Riesgo de Desastres. (2022). Informe de Evaluación Global sobre la Reducción del Riesgo de Desastres 2022: Nuestro mundo en peligro: Transformar la gobernanza para un futuro resiliente, 32. Recuperado de <https://www.undrr.org/gar2022-our-world-risk#container-downloads>
- Valentí, J. V. (1984). Las distintas visiones geográficas de las relaciones entre Naturaleza y Hombre, XVIII, 5–17.
- Van Den Eeckhaut, M., Hervás, J., Jaedicke, C., Malet, J. P., Montanarella, L., & Nadim, F. (2012). Statistical modelling of Europe-wide landslide susceptibility using limited landslide inventory data. *Landslides*, 9(3), 357–369. <https://doi.org/10.1007/s10346-011-0299-z>
- Varnes, D. (1978). Slope Movement Types and Processes, *Landslides: Analysis and control*, transportation research board. Special report, 176, 11–33. Recuperado de https://scholar.googleusercontent.com/scholar?q=cache:L3Gfb57SbncJ:scholar.google.com/+slope+movements,+types+and+processes%22,+landslides:+analysis+and+contro+transportation+rasearch+board+varnes,+1978&hl=es&as_sdt=0,5&as_vis=1
- Vásquez Conde, M. T. (2002). El clima en la Inestabilidad de laderas. La época de lluvias. Estrategia Nacional de Mitigación del Riesgo por Inestabilidad de Ladera MILADERA. México, D.F.
- WWF. (2012). Planeta Vivo Informe 2010. Biodiversidad, biocapacidad y desarrollo. Recuperado de assets.panda.org/downloads/informe_planeta_vivo_2010.pdf

Yodmani, S. (2001). Disaster Risk Management and Vulnerability Reduction : Protecting the Poor, (February), 5–9.

Zeballos, A. (s/f). Análisis del riesgo (p. 34). México.

Zhou, H., Wang, J., Wan, J., & Jia, H. (2010). Resilience to natural hazards : A geographic perspective. *Natural Hazards*, (53), 21–41. <https://doi.org/10.1007/s11069-009-9407-y>

Anexos

Producción académica: artículos científicos

Artículo publicado



Original Paper

Landslides
DOI 10.1007/s10346-019-01285-6
Received: 5 February 2019
Accepted: 13 September 2019
© Springer-Verlag GmbH Germany
part of Springer Nature 2019

Srahyrlandy Rocío Díaz · Edel Cadena · Salvador Adame · Norma Dávila

Landslides in Mexico: their occurrence and social impact since 1935

Abstract Landslide inventories are extremely important. They are vital for hazard analysis. This article presents an inventory of landslides in Mexico from 1935 to 2017. Although landslide monitoring studies exist in specific areas of the country, so far, no historical catalog has been published that provides a basis for spatial-temporal analysis and determining impact in terms of the loss of human lives. The reported events were categorized as the following types of displacements: fall, landslide, and complex movement and flow; data were standardized and stored using SPSS software. In addition, estimates were produced to ascertain the number of people who may have been affected by landslides in 2019 based on their relationship with marginalization levels at the national level, as elaborated by the National Population Council (CONAPO). Marginalization degrees represent the exclusion of a population from development through socio-economic inequalities that manifest themselves as low income and the lack of education, health, infrastructure, and access to basic services. It was found that localities with high and very high marginalization levels account for almost half of the landslides over 82 years. This study reveals new findings in terms of the spatial distribution of events and the affected population that are considered a valuable contribution to the study of landslides in Mexico.

Keywords Landslides · Inventory · Risk · Historicity · Population

Introduction

It is common to hear the phrase, “Those who do not know their history are condemned to repeat it.” Indeed, being aware of the historicity of natural events is fundamental not only to date such events but also to determine their causes and effects. It is a first step in the estimation of recurrence, that is, the possibility of the events occurring again under similar conditions, as well as the localization of areas with high risk of disaster. The Hyogo Framework for Action for disaster risk reduction of the United Nations (UN 2005) identifies the development and improvement of relevant databases as a key priority for the capacity building of developing countries (Taylor et al. 2015).

There are research initiatives that have made notable efforts to produce global and national landslide inventories using different techniques that range from the consultation of news items to the identification of displaced areas using geographic information systems (GIS) (Duncan and Klose 2015; Devoli et al. 2007a; Devoli et al. 2007b; Kirachbasan et al. 2010; Kirachbasan et al. 2011; Klose et al. 2014; Kozup 2005; Nadim et al. 2004; Palomares et al. 2015; Pennington et al. 2015; Taylor et al. 2015; Triglia et al. 2014). However, most inventories are made for specific areas, and few countries have developed initiatives at the national scale (Kirachbasan et al. 2010).

Mexico is a country with unique topographic, climatic, hydrological, and orographic characteristics that, owing to its location on tectonic plates in constant movement, frequently presents

seismic and volcanic activity. Two-thirds of the country is constituted by mountainous systems whose geological, geomorphological, structural, and climatic factors combine to define geologically unstable zones (Mondés Domínguez et al. 2016). It is a country with high exposure to the occurrence of landslides with disastrous effects for society. According to Mexico's National Center for Prevention of Disasters (CENAPRED), there have been more than 75 disasters of significant magnitude over the last 20 years that have caused approximately 7000 deaths and tens of thousands of victims (Betrán Betrán 2008). These events usually take place in mountainous areas with the presence of human settlements, where the occurrence of heavy rainfall plays an important role in their occurrence. According to Betrán Betrán (2001), in Mexico, geological events have caused the deaths of between 6000 and 6500 people from 1980 to 1999, approximately 500 people per year.

Therefore, the objective of this paper is to offer an overview of the magnitude, location, and impact of landslides in Mexico, as well as the population that could be affected in the future. To achieve this, an inventory of events from 1935 to 2017 is presented as a result of the review of reports from different free-access digital databases, agencies, and other sources, as well as the determination of the municipalities with the highest frequency, and the social impact of these events. The present analysis provides decision-making governmental authorities with information to accurately allocate the necessary resources for disaster risk management in the most affected regions; furthermore, it also presents essential data for the construction of risk scenarios and for studies by the scientific community.

Methods

The construction of the inventory is presented in 2 phases: (i) consultation and collection of landslide records and (ii) standardization and construction of the inventory. Subsequently, an analysis of the information was carried out to estimate the affected population in 2019 as well as the spatial distribution of the landslides at the national scale for the entire period.

Information gathering

The collection of historical records of landslides was carried out based on the consultation of different free-access digital databases, agencies, and other sources for events that took place at the global, continental, and national levels. At the global level, various databases that compile landslides are presented. Although they represent a valuable contribution to the recognition of landslides, they are not complete (Van Den Beckhuys et al. 2012).

Regarding Mexico's generalities and global rank in the occurrence of landslides, the Global Landslide Catalog by the National Aeronautics and Space Administration (NASA) was consulted (NASA 2015). In addition, the records reported since 1900 by the International Disaster Database (EM-DAT) developed by the Center for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED) (Guba-

Landslides |

Published online: 18 October 2019

Artículo aceptado:



REVISTA ENTORNO GEOGRÁFICO
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFÍA
ISSN 1692 – 0074. ISSN medio electrónico 2382-3518
www.entornogeografico.com

Santiago de Cali, 02 de junio de 2022

CONSTANCIA DE PUBLICACIÓN

La revista Entorno Geográfico medio de divulgación académica y científica del Departamento de Geografía de la Universidad del Valle, Cali - Colombia, constata que el artículo denominado: "Riesgo de desastres como sistema autopoietico: una revisión teórica y conceptual" de autoría de **SRAHYRLANDY ROCÍO DÍAZ SÁNCHEZ, SALVADOR ADAME MARTÍNEZ, EDEL CADENA VARGAS y ELKIN DE JESÚS SALCEDO HURTADO**, será publicado en el Número 24 correspondiente al segundo semestre del año 2022.

La revista Entorno Geográfico somete los artículos propuestos por los autores a un proceso editorial que consta de una primera valoración de pertinencia hecha por el Editor, para luego realizar la evaluación anónima de dos pares académicos externos, nacionales o internacionales, quienes deciden sobre la calidad de sus contenidos. La publicación se supedita a la decisión unánime de los evaluadores.

Se firma el dos (02) de junio de 2022.

Cordialmente,

Prof. OSCAR BUITRAGO BERMÚDEZ, Dr.
Editor Revista Entorno Geográfico
Universidad del Valle, Departamento de Geografía
oscar.buitrago@correounivalle.edu.co

Actividades académicas

Estancia académica de investigación



Elkin de Jesús Salcedo Hurtado, Profesor Titular del Departamento de Geografía y Director del Observatorio Sismológico y Geofísico del Suroccidente Colombiano (OSSO) de la Universidad del Valle en Cali, Colombia,

HACE CONSTAR:

Que **SRAHYRLANDY ROCÍO DÍAZ SÁNCHEZ**, estudiante de Doctorado en Ciencias Ambientales en la Universidad Autónoma del Estado de México, ha realizado una estancia académica doctoral en este Observatorio, como aporte al desarrollo de su trabajo de investigación dentro de la tesis doctoral "Deslizamientos en México: sus factores detonantes e impacto social", en el periodo comprendido entre 1 de agosto de 2019 hasta el 31 de mayo de 2020.

Las principales actividades desarrolladas fueron las siguientes:

- Apoyo en la construcción de metodología para modelación de susceptibilidad a deslizamientos,
- Generación de cartografía para el desarrollo de la investigación,
- Documentación de resultados y redacción de conclusiones,
- Redacción de un artículo científico, que ha sido cometido a las Revista de Geografía Norte Grande de la Pontificia Universidad Católica de Chile,
- Apoyo en actividades de investigación e intercambio de conocimientos a través del tutor de estancia.

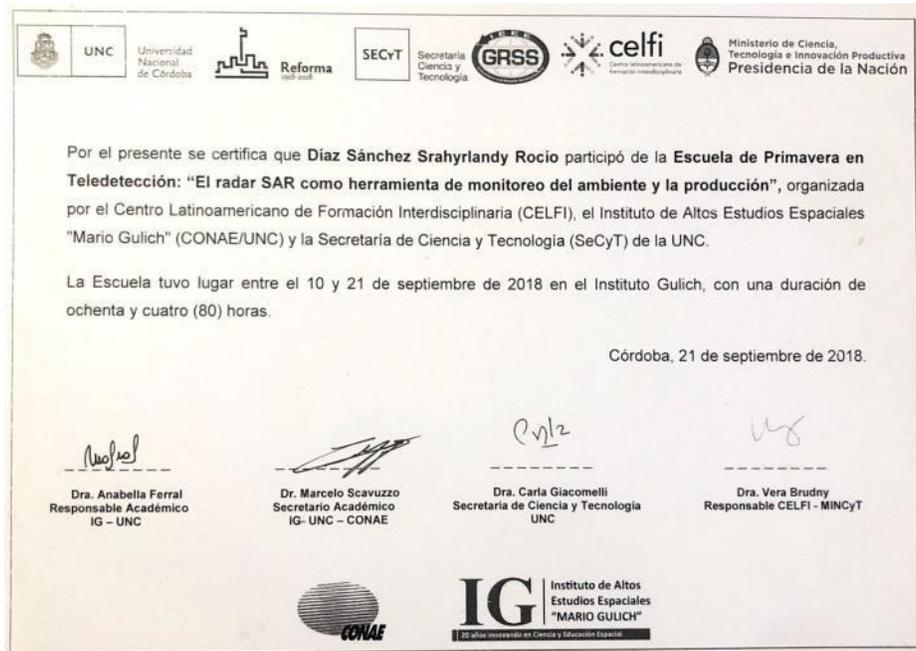
Dado su cumplimiento satisfactorio, doy el aval de que **SRAHYRLANDY ROCÍO DÍAZ SÁNCHEZ** culminó satisfactoriamente con su estancia, dando fe de su excelente responsabilidad, profesionalismo y compañerismo, aspectos demostrados en cada una de las actividades realizadas.

Para mayor constancia se firma en la ciudad Santiago de Cali el 28 de marzo de 2021.

Elkin de Jesús Salcedo Hurtado, Ph. D.
Director
Observatorio Sismológico del Suroccidente Colombiano
Departamento de Geografía
Universidad del Valle

Universidad del Valle
Departamento de Geografía
Edificio 384, 4º Piso
Ciudad Universitaria, Meléndez, Cali
Teléfonos +57 2 3301661- 3156520
PBX.: +57 2 3212134. Fax +57 2 3313418.
E-mail: osso@univale.edu.co
Cali, Colombia

Escuela de Primavera en Teledetección. Comisión Nacional de Actividades Espaciales
CONAE, Argentina



Participación como ponente ó asistente a congresos, conferencias y talleres de investigación a nivel nacional e internacional relacionadas al riesgo de desastres, teledetección, técnicas para análisis de datos y modelación de deslizamientos.



El Departamento de Geografía y el Observatorio Sismológico y Geofísico del Suroccidente Colombiano

Certifican en calidad de PONENTE a:

SRAHYRLANDY ROCÍO DÍAZ

C.C 1.130.622.754

En la segunda versión del Taller "La Sinergia en La Gestión del Riesgo", realizado en el municipio de Santiago de Cali del 12 al 15 de noviembre del 2019, con la ponencia "OCURRENCIA DE DESLIZAMIENTOS Y SU IMPACTO SOCIAL"

[Firma]
ELIJÉ DE JESÚS SALGADO HUÍFADO
Director OSO

Profesor titular del Departamento de Geografía



Constancia

Universidad Autónoma del Estado de México

A través de la Facultad de Geografía y la Facultad de Planeación Urbana y Regional entregan la siguiente

al: **Srahyrlandy Rocío Díaz Sánchez**

como PONENTE del trabajo titulado:
Riesgos por procesos de remoción en masa y ordenación del territorio: Inventario de eventos en México como instrumento para hacer ciudades resilientes

del **XXI SIMPOSIO MEXICANO - POLACO**
"Transformaciones territoriales: vulnerabilidad, resiliencia y ordenación territorial"

que se llevó a cabo en la Facultad de Geografía, UAEMex, en Toluca, Estado de México, los días 03, 04 y 05 de septiembre de 2018

ATENTAMENTE
PATRIA, CIENCIA Y TRABAJO
"2017, Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos"

DR. EN C. A. FRANCISCO ZEPEDA MONDRAGÓN
DIRECTOR FACULTAD DE GEOGRAFÍA

DR. EN U. JUAN ROBERTO ANDRÉS MORALES MAYA
DIRECTOR FACULTAD DE PLANEACIÓN URBANA Y REGIONAL

Colegio Mexicano de Profesionales en Gestión de Riesgos y Protección Civil A.C.

UJAT
UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTÓNOMA DE TABASCO

Otorgan la presente

Constancia

a **Mtra. Srahyrlandy Rocío Díaz Sánchez**

Por su participación en el Tercer Congreso Internacional *Territorios más seguros y más humanos ante el riesgo de desastres "Retos de la Gestión de Riesgos en México"*, con el tema "Uso de Tecnologías de Información Geográfica para la estimación de zonas de riesgo por deslizamientos. Caso de estudio: Valle de Bravo, Estado de México."

Realizado en la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, en Villahermosa, Tab., del 21 al 23 de noviembre de 2018.

Dr. José Manuel Piña Gutiérrez
Rector de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco

Arq. Jorge Luis Paz Díaz
Prestatario del Contrato Directivo del Colegio Mexicano de Profesionales en Gestión de Riesgos y Protección Civil A.C.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO
Secretaría de Investigación y Estudios Avanzados
Centro de Investigación y Estudios Avanzados de la Población
Cuerpo Académico: Procesos Demográficos y Política Social

Otorgan la presente

CONSTANCIA

A: **Srahyrlandy Rocío Díaz Sánchez**

Por su asistencia al

Segundo Seminario de Actualización en Análisis de Bases de Datos Sociodemográficos con el Uso de R

Llevado a cabo en el Centro de Investigación y Estudios Avanzados de la Población (CIEAP) los días 6 al 8 de noviembre del 2017 con una duración de 9 horas en Ciudad Universitaria, Toluca, Estado de México.

"PATRIA, CIENCIA Y TRABAJO"
"2017, Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos"

Dr. Bernardino Jaciel Montoya Arce
Coordinador Académico del CIEAP

Dr. Sergio Cuauhtémoc Gaxiola Robles Linares
Coordinador Académico del Curso de R

Universidad Autónoma del Estado de México

Se otorga la presente

Constancia

a: **Srahyrlandy Rocío Díaz Sánchez**

por su ASISTENCIA al Taller *Percepción remota en la exploración Geológica*, en el marco del 3er. Congreso Nacional de Estudiantes de Geomática, Geodesia y Geoinformática 2018, que se llevó a cabo en la Facultad de Geografía, de la UAEMéx, Toluca, Edo. México, en los días 16, 17 y 18 de mayo del 2018.

Dr. Francisco Zepeda Mondragón
Director de la Facultad de Geografía

CNEGGG 2018

FGCU

PLAN JARILLÓN DE CALI

Certifica que:

SRAHYRLANDY ROCÍO DÍAZ SÁNCHEZ

Asistió al Simposio Internacional: "Los desafíos del reasentamiento humano y desarrollo sostenible en escenarios de cambio climático. La experiencia del Jarillón del río Cauca" realizado en Santiago de Cali los días 18 y 19 de noviembre de 2019.

Juan Diego Saá Tafurt
Gerente del Plan Jarillón de Cali