



UNIVERSIDAD ESTATAL DE BOLÍVAR

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA SALUD Y DEL SER HUMANO

CARRERA DE INGENIERÍA EN RIESGOS DE DESASTRES

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN RIESGOS DE

DESASTRES

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

TEMA:

ANÁLISIS DE DESLIZAMIENTOS MEDIANTE INTERFEROMETRÍA RADAR EN LA

RED VIAL CHILLANES - SAN PABLO

AUTORES:

STEEVEN JOSEPH MOLINA OSORIO

CRISTINA ELIZABETH PRADO QUINATO A

DIRECTOR:

Ing. Numa Gaibor MSc.

Guaranda – Ecuador

2026

Dedicatoria

Dedico este logro, en primer lugar, a Dios, por guiar cada uno de mis pasos y permitirme cumplir una de las metas más importantes de mi vida. A mis padres, por su amor, esfuerzo y apoyo incondicional, especialmente a mi mamá, quien siempre estuvo pendiente de mí y nunca dejó de animarme. A mis hermanas y a mi hermano, por formar parte de mi vida y acompañarme con su cariño y motivación. Y, de manera muy especial, a mi pareja, quien compartió conmigo este camino universitario. Gracias por creer en mí, por apoyarme en los momentos difíciles y por demostrarme que, trabajando juntos, los sueños pueden hacerse realidad.

Cristina Elizabeth Prado Quinatoa

Dedico de manera primordial el éxito y la culminación de este proyecto de ingeniería a Dios, por constituir el eje fundamental de mi dirección espiritual, dotándome de la resiliencia, la capacidad cognitiva y la templanza necesarias para superar los desafíos técnicos y analíticos presentados en el transcurso de esta etapa académica. De forma central y con el más profundo sentido de responsabilidad, dedico este logro profesional a mi hijo, Eithan Dariel Molina Quilumba, quien representa el principal motor de mi superación, la motivación constante para optimizar mis capacidades y el incentivo diario para consolidar un perfil de excelencia; Asimismo, dedico este trabajo a mis padres y a mi hermano, quienes han conformado la estructura de soporte incondicional y el pilar fundamental sobre el cual se ha edificado mi desarrollo personal y profesional; sus sacrificios, principios éticos y respaldo constante me proporcionaron la estabilidad necesaria para mantener el enfoque en la consecución de este objetivo, haciendo posible que las metas trazadas se transformaran en realidades tangibles y en un peldaño clave para mi proyección en el campo de la ingeniería.

Joseph Steveen Molina Osorio

Agradecimiento

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a Dios por darme la fortaleza, la salud y la sabiduría para culminar esta etapa tan importante de mi vida. A mis padres, por su amor, sus consejos y por creer siempre en mí. En especial a mi mamá, quien estuvo pendiente de mí en todo momento, brindándome su apoyo, ánimo y cariño cuando más lo necesité.

A mis hermanas y a mi hermano, por estar presentes de una u otra manera durante este camino y por motivarme a seguir adelante. A mi pareja, por acompañarme durante toda mi vida universitaria. Juntos compartimos este sueño, enfrentamos retos y nos apoyamos mutuamente para no rendirnos y alcanzar nuestras metas. Finalmente, agradezco a todas las personas que, de una u otra forma, fueron parte de este proceso y contribuyeron a que hoy pueda culminar esta meta tan importante.

Cristina Elizabeth Prado Quinatoa

Expreso mi más sincero agradecimiento a Dios por darme la fortaleza y la sabiduría para culminar esta importante etapa de mi vida, a mi familia, especialmente a mi madre, padre, hermano y a mis sobrinos, por su amor, apoyo incondicional y confianza, que fueron fundamentales durante mi formación profesional. A mis compañeros y amigos Jerson Chuquitarco, Lissette Guevara, German Fuentes, Lesli Flores, Fernando Gómez, Jefferson Saltos, Víctor Sánchez, Kevin Gaglay, Danilo Zurita y Lourdes Aldas por su amistad y apoyo a lo largo de este camino.

Finalmente, agradezco de manera especial a Yuliana Anabel Enríquez Velasco, por el apoyo, la motivación y las enseñanzas que contribuyeron a mi crecimiento personal, sentimental y moral, permitiéndome afrontar con determinación los desafíos hasta alcanzar la culminación de mi carrera profesional. A todos quienes, de una u otra manera, fueron parte de este logro, mi más profundo agradecimiento.

Joseph Steveen Molina Osorio

**CERTIFICADO DE SEGUIMIENTO AL PROCESO
INVESTIGATIVO, EMITIDO POR EL TUTOR.**

Guaranda, 29 de junio de 2026.

El suscrito Ingeniero Numa Gaibor MsC., Director del Proyecto de Investigación de Pre Grado de la carrera de Riesgos de Desastres de la Universidad Estatal de Bolívar, en calidad de Docente – Tutor.

CERTIFICA:

Que el proyecto de investigación titulado: “ANÁLISIS DE DESLIZAMIENTOS MEDIANTE INTEFEROMETRÍA RADAR EN LA RED VIAL CHILLANES-SAN PABLO”; realizado por los señores: **Joseph Steveen Molina Osorio y Cristina Elizabeth Prado Quinatoa** ha sido debidamente revisado e incorporado las observaciones realizadas durante las asesorías; en tal virtud, autorizo su presentación para la aprobación respectiva de acuerdo al reglamento de la Universidad.

Es todo cuanto puedo certificar en honor a verdad.



ING. NUMA GAIBOR.

TUTOR DE TRABAJO DE TITULACIÓN DE PRE GRADO

CERTIFICADO DEL TUTOR.

Guaranda, 10 de septiembre de 2026.

El suscrito Ingeniero **GAIBOR VELASCO NUMA INAIN**, Director del Proyecto de Investigación de Pre Grado de la carrera de Riesgos de Desastres de la Universidad Estatal de Bolívar, en calidad de Docente – Tutor,

CERTIFICA:

Que el proyecto de investigación titulado: **“ANÁLISIS DE DESLIZAMIENTOS MEDIANTE INTERFEROMETRÍA RADAR EN LA RED VIAL CHILLANES - SAN PABLO.”** realizado por los señores: **Joseph Steveen Molina Osorio** y **Cristina Elizabeth Prado Quinatoa** ha sido debidamente revisado y se han cumplido los requisitos académicos y legales establecidos por la Universidad.

Por lo tanto, se encuentra en condiciones de proceder a la publicación correspondiente.

Es todo cuanto puedo certificar en honor a la verdad.



ING. GAIBOR VELASCO NUMA INAIN
DIRECTOR DE TRABAJO DE TITULACIÓN DE PRE
GRADO

DERECHOS DE AUTOR

Yo/nosotros Joseph Steven Molina Osorio y Cristina Elizabeth Prado Quinatoa, portador/res de la Cédula de Identidad No 1850124072 y 0202177713 en calidad de autor/res y titular / es de los derechos morales y patrimoniales del Trabajo de Titulación:

ANÁLISIS DE DESLIZAMIENTOS MEDIANTE INTERFEROMETRÍA RADAR EN LA RED VIAL CHILLANES – SAN PABLO, Modalidad proyecto de investigación, de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN, concedemos a favor de la Universidad Estatal de Bolívar, una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos. Conservamos a mi/nuestro favor todos los derechos de autor sobre la obra, establecidos en la normativa citada.

Así mismo, autorizo/autorizamos a la Universidad Estatal de Bolívar, para que realice la digitalización y publicación de este trabajo de titulación en el Repositorio Digital, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

El (los) autor (es) declara (n) que la obra objeto de la presente autorización es original en su forma de expresión y no infringe el derecho de autor de terceros, asumiendo la responsabilidad por cualquier reclamación que pudiera presentarse por esta causa y liberando a la Universidad de toda responsabilidad.

Joseph Steven Molina Osorio

Cristina Elizabeth Prado Quinatoa

Joseph Molina
1850124072

Cristina Prado
0202177713

Tema

Análisis de deslizamientos mediante interferometría radar en la red vial Chillanes - San Pablo.

Índice General

Dedicatoria	2
Agradecimiento	3
Índice General	7
Índice de imágenes	14
Índice de mapas	15
Índice de tablas.....	15
Introducción	16
Resumen.....	19
Abstract	20
CAPITULO I.....	21
1 PROBLEMA	21
1.1 Planteamiento del Problema	21
1.2 Formulación del Problema.....	23
1.3 Justificación	24
1.4 Limitaciones.....	25
1.5 Objetivos.....	27
1.5.1 Objetivo General	27
1.5.2 Objetivos Específicos	27

1.6	Operacionalización de Variables.....	27
CAPÍTULO II.		30
2	MARCO TEÓRICO	30
2.1	Referencial o Georreferencial	30
2.2	Antecedentes de la Investigación	31
2.3	Científico	38
2.3.1	Interferometría radar.....	38
2.3.2	Tipos de Interferometría.	38
2.3.3	Campo de Aplicación de Interferometría.....	39
2.3.4	Deslizamientos.	40
2.3.5	Partes de los Deslizamientos.....	40
2.3.6	Tipos de Deslizamientos.....	43
2.3.7	Causas de los Deslizamientos.	47
2.4	Legal.....	48
2.5	Conceptual	52
2.5.1	Coherencia interferométrica.....	52
2.5.2	Frecuencia de ocurrencia.	53
2.5.3	Línea de base (Baseline).	53
2.5.4	Litología.....	53
2.5.5	Pendiente del terreno.	53

2.5.6 Precipitación.....	54
CAPÍTULO III.	55
3 METODOLOGÍA	55
3.1 Tipo de Investigación	55
3.2 Enfoque de la investigación.....	55
3.3 Métodos de Investigación	56
3.3.1 Método Analítico.....	56
3.3.2 Método Deductivo	56
3.3.3 Método Documental	56
3.4 Técnicas e Instrumentos de Recopilación de Datos	57
3.4.1 Técnica de análisis para el primer y segundo objetivo:	57
3.4.2 Técnica de análisis para el tercer objetivo:	60
3.5 Población y Muestra	61
3.6 Técnicas de Análisis y Procesamiento de Información.	62
3.6.1 Proceso metodológico para identificar los eventos históricos de deslizamientos en la red vial Chillanes–San Pablo mediante indagación documental, para comprender su recurrencia en el período 2014–2026.	62
3.6.2 Proceso metodológico para determinar las zonas vulnerables a deslizamientos en la red vial Chillanes–San Pablo mediante la técnica interferometría radar (InSAR) con imágenes Sentinel-1.....	63

3.6.3 Proceso metodológico para proponer un modelo predictivo de riesgo de deslizamientos utilizando datos de interferometría radar, orientado a las zonas críticas que requieran intervenciones de mitigación y prevención.	64
CAPITULO IV.....	65
4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	65
4.1 Resultados del objetivo 1: Identificar los eventos históricos de deslizamientos en la red vial Chillanes–San Pablo mediante indagación documental, para comprender su recurrencia en el período 2014–2026.	65
4.2 Resultado objetivo 2: Determinar las zonas vulnerables a deslizamientos mediante la técnica InSAR en la red vial Chillanes - San pablo.....	73
4.2.1 Identificación de Sectores Críticos y Representación Cartográfica	74
4.2.2 Deformación Vertical	76
4.2.3 Serie Temporal (Time-Series).....	78
4.3 Análisis de la Interacción Suelo-Clima por Sectores Críticos	81
4.3.1 Tipología I: Mecanismo de Respuesta Inmediata y Correlación Negativa Significativa	81
4.3.2 Tipología II: Mecanismo de Respuesta Diferida o Retardo Hidrológico (Lag Effect)	82
4.3.3 Tipología III: Anomalía Dinámica y Mecanismo Invertido	83
4.3.4 Análisis del Perfil Longitudinal de Deformación sobre el Eje Vial	84
4.3.5 Evaluación Espacial de los Factores Condicionantes Topográficos	85

4.3.6	Análisis de Relación Cinemática con Factores Condicionantes (Pendiente y Orientación)	87
-------	---	----

4.3.7	Clasificación Cinemática Automatizada del Tipo de Movimiento	89
-------	--	----

4.4	Resultado objetivo 3: Proponer un modelo predictivo de riesgo en deslizamientos utilizando datos de interferometría radar para las principales zonas críticas que requieran intervenciones de mitigación y prevención de deslizamientos.	92
-----	--	----

4.4.1	Algoritmo de Predicción: El Método de la Inversa de la Velocidad	93
-------	--	----

4.4.2	Zonas Prioritarias de Intervención	94
-------	------------------------------------	----

4.4.3	Protocolo para la Toma de Decisiones	94
-------	--------------------------------------	----

4.4.4	Conclusión del Modelo	96
-------	-----------------------	----

4.5	Discusión	96
-----	-----------	----

CAPÍTULO V.		97
-------------	--	----

5	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	97
---	--------------------------------	----

5.1	Conclusiones	97
-----	--------------	----

5.2	Recomendaciones	99
-----	-----------------	----

6	Bibliografía	100
---	--------------	-----

ANEXOS		107
--------	--	-----

Anexo 1.	Mapas de deformación	107
----------	----------------------	-----

Imagen A1.1:	Mapa de velocidad de deformación (mm/año) – sector norte	107
--------------	--	-----

Imagen A1.2:	Serie temporal de desplazamiento en el punto crítico (-1.8216, -79.0680)	108
--------------	--	-----

Anexo 2. Evidencia fotográfica de campo	109
Imagen A2.1 Georreferenciación puntos de control.....	109
Imagen A2.2: Punto de control en sector "La Gasolinera"	109
Imagen A2.3: Grietas de tensión en talud	110
Imagen A2.4: Toma aérea con drone del tramo crítico	110

Índice de imágenes

Imagen 1. Tipos de interferometría según ubicación.....	39
Imagen 2. Aplicación de la interferometría topografica	40
Imagen 3. Partes de un deslizamiento.....	42
Imagen 4. Esquema del flujo de escombros.....	44
Imagen 5. Esquema de desplome	44
Imagen 6. Esquema de un deslizamiento de rocas.	45
Imagen 7. Esquema de un desprendimiento de rocas.	46
Imagen 8. Perfil longitudinal de deformación 2021-2026	84
Imagen 9. Factores condicionantes topográficos	86
Imagen 10. Condiciones topográficas "datos depurados"	88
Imagen 11. Calificación cinemática estándares geotécnicos internacionales	90

Índice de mapas

Mapa 1. Ubicación de la zona de estudio	31
Mapa 2. Escenarios históricos caracterizados en base a la red vial San Pablo – Chillanes	72
Mapa 3. Mapa deformación eje vertical	77
Mapa 4. Mapa Serie Temporal (Time-Series).....	78
Mapa 5. Mapa espacial del riesgo predictivo	95

Índice de tablas

Tabla 1. Operacionalización de Variables.	28
Tabla 2. Antecedentes históricos registrados	67
Tabla 3. Tabla de Métricas de deformación InSAR en la red vial Chillanes–San Pablo .	73
Tabla 4. Nivel de susceptibilidad de desplazamiento.	75
Tabla 5. Cronología de eventos críticos InSAR	81
Tabla 6. Deformación de los puntos de control.....	89
Tabla 7. Umbrales críticos y niveles de riesgo.....	93

Introducción

Ecuador está situado en una región de alta exposición a riesgos naturales. La actividad sísmica y volcánica del país desencadena fallas geológicas, movimientos de masa, colapso de infraestructuras e interrupción de vías. Estos escenarios repercuten significativamente en el bienestar de la población, afectando la economía y la sostenibilidad de familias con recursos limitados que se asientan en zonas de riesgo. (Quinde Martinez & Reinoso Angulo, 2016)

Durante los últimos años, el tramo vial que conecta la parroquia San Pablo con el cantón Chillanes ha presentado un incremento constante de deslizamientos en temporadas invernales. La elevada inclinación del terreno provoca la falla de las laderas y desencadena flujos masivos de material sedimentario, que se deposita en los cortes transversales de los taludes, sobre la vía y en las llanuras. En la actualidad, estos eventos constituyen una problemática vial y suelen ser omitidos al momento de planificar y ejecutar acciones en el territorio.

Informes técnicos registran el constante desplazamiento de tierra a lo largo de varios kilómetros que conectan dos importantes regiones. Históricamente, se ha evidenciado una alta vulnerabilidad de la infraestructura vial frente a procesos de deslizamientos. La deficiencia de estudios sobre estabilidad de taludes y análisis interferométrico en zonas de alta pendiente ha provocado bloqueos completos en diferentes kilómetros de la vía. (Franco, 2022)

El presente estudio tiene como finalidad proponer un modelo predictivo mediante interferometría radar, integrando geoportales y avances tecnológicos de monitoreo, análisis y procesamiento de información. A continuación, se describen los capítulos que conforman la investigación.

Capítulo I Describe el problema de la investigación considerando impactos en la sociedad, además de analizar la situación actual de los deslizamientos suscitados por la saturación o la

deforestación del suelo por el incremento de zonas de pastoreo para la agricultura. Asimismo, se planteó una justificación sólida que genere interés por el trabajo, el objetivo general se planteó con la finalidad de alcanzar dicho resultado, y los objetivos específicos son apartados claves del proceso.

Capítulo II. Se describe la zona de estudio, georreferenciando su delimitación geográfica y tramos en donde se realiza la investigación, para luego sustentarlo mediante investigaciones a nivel internacional, nacional y local las cuales brindan una mejor perspectiva del escenario en condiciones similares al que dispone la vía San Pablo - Chillanes constituyendo parámetros clave como el objetivo, la metodología y los resultados alcanzados también se describen aspectos clave como la definición de términos del marco científico y las bases teóricas que fundamentan la claridad de la investigación.

El capítulo III. describe la metodología y los tipos de investigación considerando los enfoques con los cuales se aplica a la recolección y procesamiento de la información, destaca cómo justifica la investigación a partir de datos cuantitativos y cualitativos.

El capítulo IV. describe los resultados obtenidos a partir de los objetivos específicos partiendo desde la recolección de información el procesamiento de datos y la generación de un modelo predictivo mediante interferometría, que en el futuro permitirá a las instituciones públicas y privadas implementar estrategias de gestión de riesgo en base a la amenaza de deslizamientos que obstaculizan el sistema vial en diferentes partes del Ecuador. Por ende, implementar este tipo de modelo es indispensable, ya que fortalecerá el criterio técnico de las diferentes instituciones las cuales tengan una visión preventiva de los escenarios más importantes.

Capítulo V. Al culminar el proceso de investigación, es indispensable integrar las conclusiones y recomendaciones claves para sintetizar los resultados obtenidos de la investigación

considerando aspectos importantes en los cuales el autor define concretamente a qué ha llegado durante la investigación.

Resumen

La presente investigación titulada Análisis de deslizamientos mediante interferometría radar en la red vial Chillanes–San Pablo, tuvo como objetivo principal analizar los deslizamientos mediante la técnica InSAR para la identificación y modelado de zonas críticas con exposición potencial a movimientos en masa, así como proponer un modelo predictivo para escenarios recurrentes de deslizamientos. La investigación es de tipo descriptiva y se complementa con la investigación aplicada. Se utilizó la interferometría radar para determinar zonas susceptibles a deslizamientos, corroborando mediante la recolección de puntos críticos del primer objetivo específico.

Los resultados identificaron zonas críticas donde la concentración de deslizamientos es recurrente. El uso de interferometría radar y softwares como ArcGIS, SNAP y Python permitió comprender el comportamiento del suelo en un lapso histórico. Se definió una escala de calificación de riesgos que va desde el color azul (menor riesgo) hasta el rojo y naranja (mayor riesgo). En conclusión, la zona de estudio presenta una recurrencia histórica de movimientos en masa, condicionada por su morfología de alta pendiente y la intervención antrópica en los taludes. Se evidencia una subsidencia activa con valores críticos de hasta -39,22 mm de desplazamiento acumulado y una velocidad de deformación de -7,69 mm/año.

Palabras clave: deformación, datos espaciales, InSAR, Python.

Abstract

This research, entitled "Analysis of Landslides Using Radar Interferometry on the Chillanes–San Pablo Road Network," aimed to analyze landslides using the InSAR technique to identify and model critical zones with potential exposure to mass movements, as well as to propose a predictive model for recurring landslide scenarios. The research is descriptive and complemented by applied research. Radar interferometry was used to determine areas susceptible to landslides, corroborating this through the collection of critical points for the first specific objective.

The results identified critical zones where landslides are recurrent. The use of radar interferometry and software such as ArcGIS, SNAP, and Python allowed for an understanding of soil behavior over a historical period. A risk rating scale was defined, ranging from blue (lowest risk) to red and orange (highest risk). In conclusion, the study area exhibits a historical recurrence of mass movements, conditioned by its steep slope morphology and human intervention on the slopes. Active subsidence is evident with critical values of up to -39.22 mm of accumulated displacement and a deformation rate of -7.69 mm/year

Keywords: Deformation, Spatial data, InSAR, Python.

CAPITULO I.

1 PROBLEMA

1.1 Planteamiento del Problema

En Ecuador han ocurrido numerosos fenómenos de origen natural, como aluviones, deslizamientos y desprendimientos de masa o roca. Estos eventos son evidentes en zonas de alta pendiente y en aperturas viales con deficiencias en el control y estabilización de taludes, generando pérdidas económicas, daños a infraestructuras, sistemas vitales y agrícolas.

La concurrencia de estos eventos está condicionada por la alta presencia de zonas montañosas en la región interandina. Sin embargo, la estructura del suelo, conformada por diversos tipos de tierra, se ha convertido en zonas vulnerables a los deslizamientos, estimuladas por las condiciones climáticas y la acción sísmica y volcánica del país.

La imponente influencia de los deslizamientos es irrefutable, debido a la intervención continua del recurso hídrico, el cual, es indispensables para la supervivencia de los seres vivos. Sin embargo, también es considerado uno de los detonantes esenciales en la sobre saturación hídrica del suelo produciendo deslizamientos de masa que obstaculizan sistemas viales restringiendo el comercio, turismo y movilización de personas. De acuerdo con la Secretaría Nacional de Gestión de Riesgos (SGR, 2023), los deslizamientos representan una de las amenazas más frecuentes y de mayor impacto en la región interandina, superando incluso los eventos sísmicos.

La red vial Chillanes–San Pablo de la provincia de Bolívar es un medio concurrido, que históricamente su estructura vial se ha visto afectada por los deslizamientos comprometiendo la seguridad y el malestar de los transportistas y viajeros que circulan por estas rutas, ya que, funcionan como trayectos para suministrar de productos a la costa, subtrópico y viceversa. Según

informes del Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTOP, 2024), los taludes inestables y las lluvias intensas han provocado cierres prolongados de la vía, además de daños en la carpeta asfáltica y en estructuras de drenaje. Por lo tanto, el problema no se limita a un evento puntual sino a una recurrencia de fenómenos que evidencian la falta de monitoreo preventivo y la necesidad de soluciones tecnológicas para identificar zonas críticas antes del colapso de la infraestructura vial.

El monitoreo de las pendientes de tiempos posteriores hasta la actualidad se lo desarrolla por medio de instrumentos de GPS, inclinómetros, extensiómetros de cable, deflectómetro entre otros. Sin embargo, en la actualidad es de vital importancia acoplar a los avances de las tecnologías satelitales las cuales han permitido desarrollar métodos interferométricos de radar “InSAR” que ofrecen la posibilidad de detectar deformaciones milimétricas del terreno a gran escala mediante datos geoespaciales. Según (Mayorga Torres & Platzeck, 2014), la aplicación de la interferometría diferencial de radar de apertura sintética (DInSAR) en los Andes ecuatorianos demostró su efectividad para identificar desplazamientos lentos, constituyendo de esta manera una herramienta confiable y de bajo costo para estudios de estabilidad en regiones montañosas. El uso del InSAR se presenta como la alternativa metodológica más pertinente para el monitoreo de la red vial Chillanes–San Pablo y evitar escenarios similares al 5 de abril del 2025, al permitir la cobertura más amplia de los sectores y la obtención de series temporales de desplazamiento con alta precisión.

En la provincia Bolívar, los eventos relacionados con los deslizamientos en las redes viales son evidente sobre todo en las épocas invernales. Esto resulta especialmente relevante en el contexto ecuatoriano, donde las limitaciones presupuestarias y logísticas impiden mantener el seguimiento y monitoreo continuo de las pendientes propensas a sufrir fallos. Por tanto, la adopción de esta técnica no solo aporta un valor científico sino también operativo. El cual permite

integrar los resultados en los sistemas de alerta temprana y planificación de obras de estabilización, reduciendo así la vulnerabilidad vial ante futuros eventos.

La evaluación de la deformación del terreno vinculada a los deslizamientos mediante las técnicas de interferometría radar, es poco conocida por técnicos de los Gobiernos Autónomos Descentralizados “GADs” del cantón Chillanes e incluso a nivel provincial. La inexistencia de este tipo de información limita a entidades públicas tomar decisiones fundamentadas, con relación a la gestión y planificación enfocadas en minimizar la afectación de la infraestructura vial.

Por tal razón, es indispensable llevar a cabo la presente investigación, de tal manera que permita analizar los deslizamientos mediante InSAR e identificar zonas críticas propensas a deslizamientos. Además de proponer medidas efectivas enfocadas a la zona de estudio. Esto promoverá mayor interés en la inserción de estrategias de prevención y mitigación del riesgo mejorando la seguridad vial, además de fortalecer las estructuras y diseños viales de la región.

1.2 Formulación del Problema

¿Cómo el uso de la interferometría radar permite identificar las zonas de amenaza a deslizamiento en la red vial Chillanes - San Pablo?

1.3 Justificación

La presente investigación busca analizar el comportamiento de los deslizamientos mediante interferometría radar en la red vial Chillanes–San Pablo, debido al constante cambio morfológico del relieve causado por la acción humana y atmosférica. Abordar esta temática es fundamental por razones sociales, económicas y políticas que promueven el desarrollo sostenible de las localidades colindantes a la vía, así como de los destinos finales que dependen de esta ruta, la cual es constantemente transitada.

Ante esta circunstancia, la insuficiente disponibilidad de estudios relacionados con el campo de la interferometría, ha causado un impacto significativo en la toma de decisiones por parte del Ministerio de Transporte y Obras Públicas “MTOP”. Al ser una red vial estatal, la competencia exclusiva recae en la institución antes mencionada. Por ende, el principal objetivo de este estudio busca analizar la dinámica de deslizamiento mediante la técnica InSAR para la identificación y modelado de zonas críticas con potencial exposición a dichos movimientos, de tal manera, esta estrategia hará posible identificar las deformaciones, desprendimientos progresivos y las zonas críticas situadas en la zona de estudio, al ser una de las investigaciones pionera en la provincia Bolívar, también beneficiará de forma subsidiaria a instituciones educativas, de investigación y profesionales del área.

Tomando en cuenta la gran importancia que aborda el presente trabajo de investigación ha demostrado ser viable, ya que, los resultados alcanzados indican que la información proporcionada por el geo portal Earth Data Search Vertex de la NASA, pueden ser factibles al ser incorporadas en los análisis interferómetros. Los costos de inversión para realizar estos análisis no son elevados y resultan accesibles para la presente investigación y para futuros estudios, garantizando un nivel de eficiencia y eficacia adecuado.

1.4 Limitaciones

En el presente proceso investigativo se antepusieron ciertas limitaciones que dificultaron el cumplimiento de los objetivos propuestos. A continuación, se mencionan las principales limitantes identificadas, su impacto en el estudio y las estrategias empleadas para mitigarlas.

Limitación 1: Disponibilidad limitada de información técnica en la zona de estudio.

No se dispuso de informes geotécnicos detallados, estudios previos de estabilidad de taludes ni registros sistemáticos de deslizamientos por parte de las entidades competentes (MTOP, GAD Municipal de Chillanes). Esta falta de información histórica dificultó la validación de los resultados InSAR con datos de campo previos. Se realizó un levantamiento de puntos con GPS móvil y se recolectaron testimonios locales para complementar el inventario histórico de deslizamientos.

Limitación 2: Curva de aprendizaje en el procesamiento de interferometría radar.

El conocimiento inicial limitado en la aplicación de la técnica InSAR con datos satelitales, específicamente en el uso de los softwares SNAP y el desarrollo de código Python para series temporales. El procesamiento de datos requirió un tiempo mayor al previsto, y existió el riesgo de errores en la calibración de los interferogramas.

Limitación 3: Limitaciones inherentes a la técnica InSAR.

La interferometría radar presenta limitaciones técnicas que afectan la precisión de los resultados. En la zona de estudio, la presencia de vegetación densa en algunos sectores genera de correlación temporal, reduciendo la coherencia interferométrica en ciertos interferogramas. Además, la interferencia atmosférica (vapor de agua) puede introducir errores en la medición de desplazamientos. Es posible que algunas zonas con deformación activa no hayan sido detectadas

debido a la pérdida de coherencia. Se aplicó un filtro de coherencia (umbral de 0.3) y se promediaron los resultados de múltiples interferogramas para reducir el ruido atmosférico.

Limitación 4: Resolución espacial y temporal de los datos.

Las imágenes Sentinel-1 utilizadas tienen una resolución espacial de aproximadamente 20 m, lo que no permite detectar deformaciones puntuales en infraestructuras pequeñas (alcantarillas, muros de contención). Asimismo, la periodicidad de 6 días (en modo interferométrico) limita la detección de eventos rápidos. Deslizamientos súbitos de pequeña escala pudieron no ser registrados.

Limitación 5: Período de estudio relativamente corto.

El análisis cubre el período 2021-2026 (5 años), insuficiente para identificar tendencias de largo plazo o para diferenciar entre deformación estacional y aceleración progresiva. El modelo predictivo basado en la inversa de la velocidad tiene mayor incertidumbre al proyectarse a plazos superiores a un año. Se recomienda en el capítulo V continuar el monitoreo por al menos 5 años adicionales para consolidar las tendencias.

Limitación 6: Ausencia de validación con GNSS diferencial.

No se contó con puntos de control geodésico de alta precisión (GNSS diferencial) para validar los desplazamientos medidos por InSAR. Los valores de desplazamiento acumulado y velocidad de deformación (-39,22 mm y -7,69 mm/año) no fueron verificados independientemente. Se utilizaron puntos de control con GPS móvil (precisión submétrica) para verificar la ubicación de los sectores críticos, y se recomienda en estudios futuros la instalación de GNSS diferencial.

1.5 Objetivos

1.5.1 *Objetivo General*

Analizar los deslizamientos mediante la técnica InSAR para la identificación y modelado de zonas críticas con potencial exposición a movimientos en masa de la red vial San Pablo – Chillanes.

1.5.2 *Objetivos Específicos*

- Identificar los eventos históricos de deslizamientos en la red vial Chillanes–San Pablo mediante indagación documental, para comprender su recurrencia en el período 2014–2026.
- Determinar las zonas vulnerables a deslizamientos en la red vial Chillanes–San Pablo mediante la técnica interferometría radar (InSAR) con imágenes Sentinel-1.
- Proponer un modelo predictivo de riesgo de deslizamientos utilizando datos de interferometría radar, orientado a las zonas críticas que requieran intervenciones de mitigación y prevención.

1.6 Operacionalización de Variables

Variable independiente

Interferometría Radar

Variable dependiente

Deslizamientos

Tabla 1.*Operacionalización de Variables.*

Variable	Definición	Dimensiones	Indicadores	Escala	Instrumento
Interferometría Radar	Técnica de	Procesamiento de Datos Desplazamiento Superficial	Coherencia	Ordinal /	Imágenes Sentinel-
	teledetección que		interferométrica	Intervalo mayor	1 (ESA), Software
	utiliza la diferencia		Línea de base	a 0.3 o 75	SNAP / StaMPS.
	de fase entre dos o		Velocidad de	Razón	Mapas de velocidad de deformación (LOS - Line of Sight).
	más imágenes radar		deformación	(mm/año).	
	para medir		Desplazamiento	Razón	
	microdeformaciones		acumulado	(cm).	
	en la superficie				
	terrestre.				

Variable	Definición	Dimensiones	Indicadores	Escala	Instrumento
Deslizamientos	Movimiento de una masa de roca detritos o tierra cuesta abajo bajo la influencia directa de la gravedad.	Amenaza Histórica	Inventario de eventos pasados	Nominal	Fichas técnicas, registros del SNGRE, entrevistas locales.
			Frecuencia de ocurrencia	Ordinal	
		Vulnerabilidad Vial	Exposición de la red vial	Nominal km afectados	SIG (ArcGIS/QGIS), Modelos Digitales de Elevación (DEM).
			Pendiente del terreno	Razón % pendiente	
			Antrópicos	Sin intervención	
				Cortes de talud carretera Centros poblados	

Elaborado por: Molina S. & Prado C., 2026

Nota: Los indicadores permiten caracterizar la calidad, velocidad y magnitud de la deformación superficial

CAPÍTULO II.

2 MARCO TEÓRICO

2.1 Referencial o Georreferencial

El área de estudio se localiza en la parte central de la depresión interandina del Ecuador, perteneciente a la Provincia de Bolívar, la cual comprende el tramo vial que conecta el cantón Chillanes con la parroquia San Pablo de Atenas perteneciente al cantón San Miguel, con una extensión aproximada de 21 km de longitudinales, que está clasificada como una carretera de Clase III, considerada red estatal, según las especificaciones del Ministerio de Transporte y Obras Públicas MTOP y el Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial de la provincia de Bolívar. (Gobierno Autónomo Descentralizado de la Provincia Bolívar, 2025)

Características físicas del territorio

La zona de estudio se emplaza en un relieve montañoso de alta pendiente, típico de la [Sierra ecuatoriana](#). Las pendientes predominantes superan el 25% en varios sectores, con valores que alcanzan hasta el 45% en los tramos más críticos cercanos a la parroquia San Pablo. La altitud varía entre los 2.300 msnm en el sector de Chillanes y los 2.400 msnm en el paso montañoso más alto. (CHOP SOLUTIONS, 2024)

Desde el punto de vista geológico, la zona está conformada por depósitos coluviales y suelos volcánicos (cenizas y lahares) del Cuaternario, intercalados con afloramientos de rocas metamórficas. Estas litologías presentan baja cohesión y alta susceptibilidad a la erosión hídrica, especialmente cuando están saturadas. (CHOP SOLUTIONS, 2024)

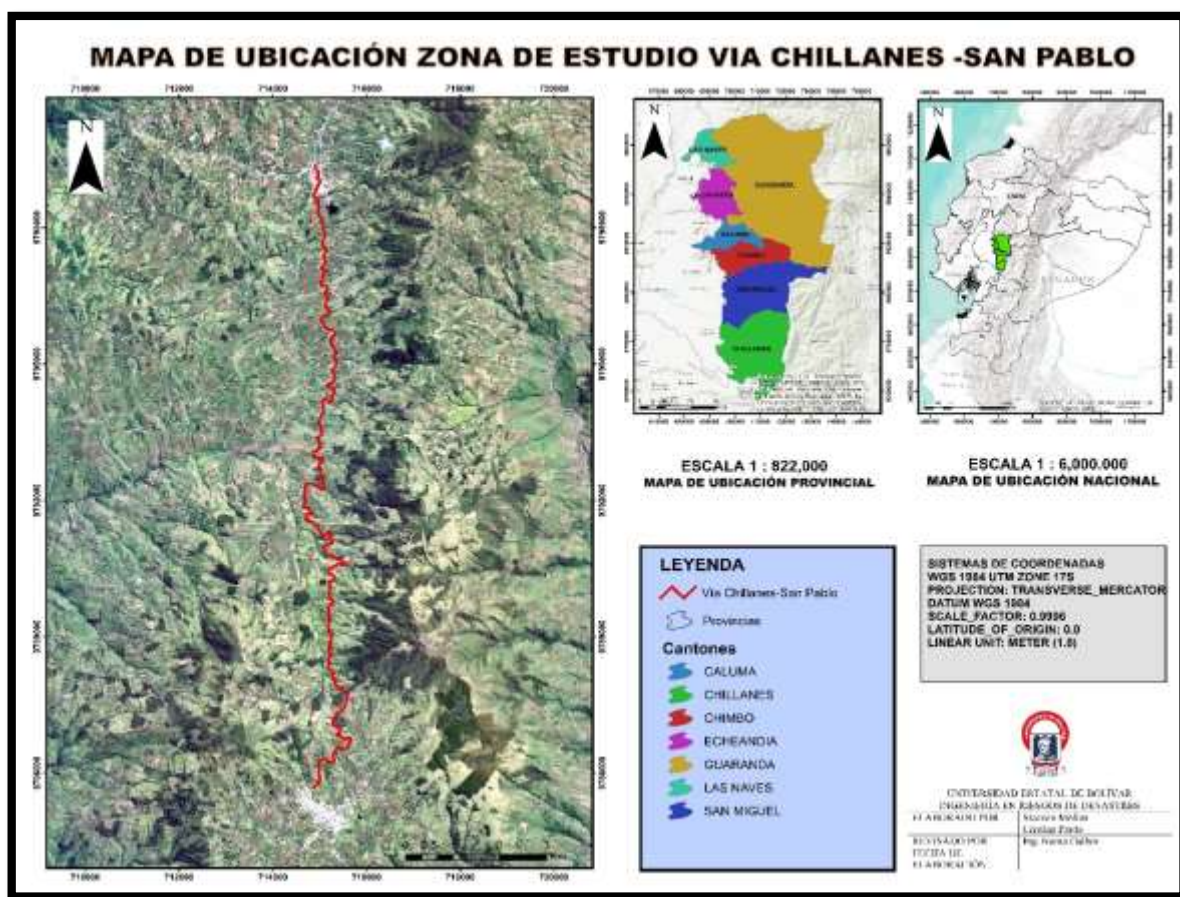
El clima es subtropical húmedo, con una precipitación anual promedio que oscila entre 1.500 y 2.500 mm. Las épocas de lluvias intensas (enero-marzo y octubre-diciembre) coinciden

con la mayor frecuencia de deslizamientos registrados. La temperatura media anual es de 18 °C, con variaciones estacionales moderadas. (CHOP SOLUTIONS, 2024)

El uso de suelo predominante es el pastizal para ganadería, seguido por áreas de cultivo de maíz y frutales, y parches de bosque secundario en las zonas más empinadas. La deforestación para ampliación de la frontera agrícola ha eliminado la vegetación protectora en muchos taludes, incrementando la inestabilidad. (CHOP SOLUTIONS, 2024)

Mapa 1.

Ubicación de la zona de estudio



Elaborado por: Molina S. & Prado C., 2026

2.2 Antecedentes de la Investigación

En relación a la temática de esta investigación, se han considerado casos relevantes que aportarán significativamente con bases sólidas para sustentar el presente trabajo.

- **“Revisión de la interferometría satelital para la detección de deslizamientos de tierra en Italia”**. Elaborado por *Lorenzo Solari, Mateo Del Soldato, Federico Raspini, Ana Barra, Silvia Bianchini, Pierluigi Confuorto, Nicola Casagli y Michele Crosetto* mencionan que:

Los deslizamientos de tierra han impactado recurrentemente el territorio italiano, produciendo enormes pérdidas económicas y víctimas. Debido a esto, existe una gran demanda de herramientas de monitoreo para apoyar las estrategias de gestión de deslizamientos de tierra. Entre la variedad de técnicas de teledetección, el Radar Interferométrico de Apertura Sintética (InSAR) se han convertido en uno de los más ampliamente aplicados para estudios de deslizamientos de tierra. Este trabajo revisa una variedad de aplicaciones relacionadas con InSAR para estudios de deslizamientos de tierra en Italia. InSAR fue utilizado con el fin de analizar el retroceso de deslizamientos de tierra, la caracterización de deslizamientos, entrada para modelos de deslizamientos, el mapeo de deslizamientos y para el monitoreo. El 68% de los autores validó los resultados satelitales con información terrestre u otros datos de teledetección. Si bien existen limitaciones bien conocidas, esta revisión bibliográfica confirma que InSAR es una herramienta consolidada para diversas aplicaciones relacionadas con deslizamientos (Solari, y otros, 2020).

Con base en esta investigación, se evidencia que es indispensable que ampliar el campo de acción en la interferometría, incorporando distintos enfoques metodológicos, mismos que aporten con una comprensión más sólida referente al comportamiento de los deslizamientos. Por lo tanto, en esta investigación se ha evidenciado una fuerte consideración a las condiciones ambientales y la modificación dinámica del terreno, como las alteraciones inducidas por acción humana. Es importante destacar que, al carecer de esta temática, los estudios que abarcan la interferometría se han reducido gradualmente y por ende las autoridades no priorizan la aplicación de dichas técnicas en la gestión de riesgos.

- ***Aplicación de interferometría satelital SAR para la detección y monitoreo de deslizamientos de tierra a lo largo de la Carretera Escénica Tijuana - Ensenada, Baja California, México.*** Cuyos autores son *Olga Sarychikhina, David Gómez Palacios, Luis A. Delgado Argote, Alejandro González Ortega*, mencionan que:

Los deslizamientos de tierra son uno de los principales tipos de fenómenos de desastre en México debido a sus entornos geomorfológicos, climáticos y tectónicos. Los daños que los deslizamientos producen a la Carretera Escénica Tijuana-Ensenada (TESH) y la infraestructura civil circundante causan una pérdida económica constante y considerable. La interferometría satelital SAR se ha utilizado para el monitoreo de desplazamientos de tierra causados por terremotos y subsidencia. Este estudio busca aplicar técnicas DInSAR convencional y el método ADInSAR de Análisis Interferométrico de Objetivos Puntuales (IPTA) para realizar un análisis retroactivo de los desplazamientos superficiales por deslizamientos a lo largo de la costa. Se utilizaron imágenes SAR Avanzado (ASAR) del satélite ambiental ENVISAT, adquiridas entre 2003 y 2010. Los resultados obtenidos permitieron determinar las zonas de deslizamientos activas durante el período de este estudio, que deben ser objeto de investigaciones más detalladas. (Sarichikhina, Gómez Palacios, Delgado Argote, & González Ortega, 2021)

Al analizar amenazas relacionadas con el ámbito natural, los autores destacan antecedentes importantes relacionados con análisis Interferométrico capas de analizas grandes extensiones. Al estar sometidos a esfuerzo de gran cantidad el relieve morfológico de la tierra recibe, modificación y franqueamientos en zonas de alta inclinación. Por lo tanto, indagar dichos procesos mediante las técnicas DInSAR facilita la identificación de zonas con mayor impacto, sin embargo, esta investigación ha permitido destacar zonas activas a los deslizamientos en un plazo intermedio de estudio.

- ***“Detección y análisis de deslizamientos utilizando interferometría diferencial (D-Insar) entre los años 2015 y 2017 en las provincias norte y Valderrama del departamento de Boyacá Colombia”***. Cuyos autores son *Peñaloza Lizeth y Tocasuche Natalia del Pilar*, mencionan que:

La susceptibilidad a deslizamientos en Colombia ha venido incrementándose en los últimos años debido al incremento de actividades antropogénicas como la deforestación y los cambios de uso del suelo, las condiciones geológicas y geomorfológicas del territorio y el aumento de la precipitación en algunas zonas del país. Según el IDEAM y el SGC el 18% del territorio nacional se encuentra en zona de amenaza muy alta y alta por remoción en masa, la cual se destaca por su inestabilidad debido al fracturamiento de los materiales, asociado a la presencia de fallas. Teniendo en cuenta esta problemática, se propone aplicar la interferometría diferencial D-InSAR, que utiliza imágenes RADAR SAR para detectar cambios y desplazamientos en la superficie a nivel centimétrico, como una técnica alternativa a las metodologías existentes en Colombia con el objetivo de analizar el comportamiento de los deslizamientos y poder evaluar la técnica para el mejoramiento de la gestión del riesgo en el país. Como resultados se obtuvieron mapas de coherencia entre pares interferométricos, mapas de desplazamiento que muestran a escala detallada los deslizamientos y un análisis temporal de los eventos para identificar el comportamiento de la zona (Peñaloza Molina & Tocasuche Castro, 2018)

Este trabajo de investigación aborda la importancia del uso de imágenes InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar), para la detección de variaciones centimétricas en el terreno, al incorporar de técnicas adicional en este país resulta indispensable de manera que analizó la amenaza desde una perspectiva geoespacial. Al generar, una geo data base robusta y con

fundamentos aumenta la rigurosidad del análisis y la precisión de posibles movimientos en masa en gran magnitud, lo cual, contribuye en la planificación y la toma de medidas estratégicas.

- ***“Series temporales de desplazamiento más allá y por debajo: hacia alertas tempranas basadas en InSAR y análisis de deformación del deslizamiento de tierra de Achoma, Perú”***. Elaborado por *Benedetta Dini, Pascal Lacroix y Marie-Pierre Doin*, mencionan que:

Detectar precursores de desestabilización de taludes con suficiente anticipación y precisión sigue siendo un problema desafiante y sin resolver en la evaluación y predicción del peligro de deslizamientos. La interferometría diferencial por radar (InSAR) ha demostrado ser prometedora en la identificación de deslizamientos desconocidos en grandes áreas y se ha propuesto como una herramienta potencialmente útil para la predicción de fallas. Este estudio analizó el proceso de deformación del deslizamiento de Achoma en Perú y demostraron que la señal InSAR contiene precursores basados en marcadores alternativos, incluso sin series temporales de desplazamiento. Los hallazgos resaltan la importancia potencial de utilizar marcadores de señales InSAR alternativos para observar el proceso de deformación y el fallo progresivo previo al evento, así como para detectar precursores de deslizamientos en áreas extensas, lo que proporciona un valioso margen de tiempo para la intervención y la prevención de desastres. (Dini, Lacroix, & Pierre Doin, 2025)

Países que se ubican en el cinturón del fuego del pacífico constantemente, se han visto afectados por la constante modificación del relieve, debido al movimiento de las placas tectónicas, erupciones volcánicas y eventos sísmicos. Mismos que son desencadenantes de los deslizamientos en zonas de alta pendiente, sin embargo, analizar estos acontecimientos con técnicas especializadas permite destinar estrategias y medidas preventivas hacia la

población, en la cual, apoya directamente a las instituciones de respuesta, respaldando el tiempo de acción socorro y acción a localidades expuestas a los drásticos movimientos en masa.

- ***“Datos SAR de banda X y C para monitorear deformaciones del terreno y deslizamientos lentos durante el terremoto de Manta y Portoviejo de 2016 (Manabí, Ecuador)”***.

Elaborado por *Diego Di Mártire, Pierluigi Confuorto, Annalisa Frezza, Massimo Ramondini, A. Vázquez López y María Pía Del Rosso*, menciona que:

La deformación del suelo debido a catástrofes naturales tiene un gran potencial destructivo tanto para personas como para edificios. En los últimos años, las técnicas de teledetección han demostrado ser muy útiles para detectar y monitorear fenómenos de deformación de la superficie terrestre y del suelo. En particular, la interferometría SAR diferencial se ha implementado ampliamente para tales escenarios. En este trabajo, dicha técnica fue aplicada para observar los efectos del terremoto de 7,8 Mw que azotó la costa de Ecuador el 16 de abril de 2016. Se generaron mapas de desplazamiento a partir de datos de Sentinel-1 y se compararon con los daños reportados en la ciudad de Portoviejo, destacando varias situaciones críticas y mostrando resultados muy relevantes. Este artículo permite subrayar la utilidad de la interferometría SAR diferencial y la teledetección junto con la comparación de datos de verdad de campo. Los resultados obtenidos hasta el momento proporcionan una primera base para futuras evaluaciones, utilizando también imágenes COSMO-SkyMed, que representarán un apoyo válido para las autoridades de gestión territorial (Di Mártire, y otros, 2018)

En el contexto anterior, resalta el uso de la aplicación de la interferometría como herramienta fundamental para observar los efectos generados por el terremoto del 16 de abril del 2016, tanto en las estructuras construidas, relieves naturales y formaciones artificiales, como

resultados manifiestan que al disponer de una primera base de análisis ayuda a destinar los recursos prioritarios a las zonas con mayor cambio o alteración morfológicas resguardando así los recursos de búsqueda y rescate y ayuda humanitaria como fue dicho escenarios histórico.

- ***“Detección de deformaciones del terreno mediante técnicas InSAR en relación con los resultados de subsidencia del terreno (Ciudad de Zaruma, Ecuador)”***. Elaborado por Marcelo Cando Jácome, AM Martínez-Graña, V. Valdés, mencionan que:

En la ciudad de Zaruma, ubicada en la provincia de El Oro, Ecuador, han explotado minas de oro desde antes de la época colonial. Según los cronistas de la época, Estas rocas se han convertido en suelos y saprolitos totalmente alterados, lo que ha provocado la desestabilización de las galerías mineras y el colapso superficial del relieve topográfico. Los indicadores de subsidencia inicial del terreno son pequeños movimientos que se acumulan con el tiempo y que pueden detectarse con tecnología InSAR en grandes áreas, mejorando la detección tradicional realizada con instrumentación geodésica, como estaciones totales y marcas geodésicas. En vista del riesgo existente, este artículo presentó una metodología de pronóstico para el monitoreo constante de la subsidencia del suelo a largo plazo, especialmente en el centro de la ciudad colonial, que es patrimonio cultural nacional y candidato a patrimonio cultural de la humanidad. Como resultado se presentó una propuesta para el uso de interferometría de radar de apertura sintética (InSAR) para el análisis de subsidencia del relieve topográfico en la zona colonial de la ciudad de Zaruma por galerías de minería ilegal (Cando Jácome, Martínez Graña, & Valdés, 2020)

Es importante considerar el uso de la técnica de interferometría radar, la cual, apoya en minimizar la minería ilegal en el Ecuador, caracterizando aspectos clave como alteración del relieve, subducción milimétrica del terreno o interrupción de vetas hídricas. Sin embargo, la ciudad de Zaruma, además de ser una de las ciudades con índices elevados de vulnerabilidad asociados a

los socavamientos y aluviones debe combatir a la minería, Por lo tanto, al vincular procesos InSar permite a las autoridades identificar los cambios anormales en el relieve y proceder con la inspección respectiva con el objetivo de resguardar espacios naturales y minimizar la contaminación ambiental para así impulsar el desarrollo sostenible de la parroquia y sus alrededores.

2.3 Científico

2.3.1 *Interferometría radar.*

La interferometría radar es una innovación tecnológica de teledetección activa que transmite pulsos de radio a lo largo de la línea de visión para detectar y medir el alcance de los objetivos mediante ondas electromagnéticas emitidas por radares y registra la energía reflejada de la superficie de la tierra, tales condiciones indican la modificación, alteración o desplazamiento de cuerpos de gran magnitud. (Wu, y otros, 2023)

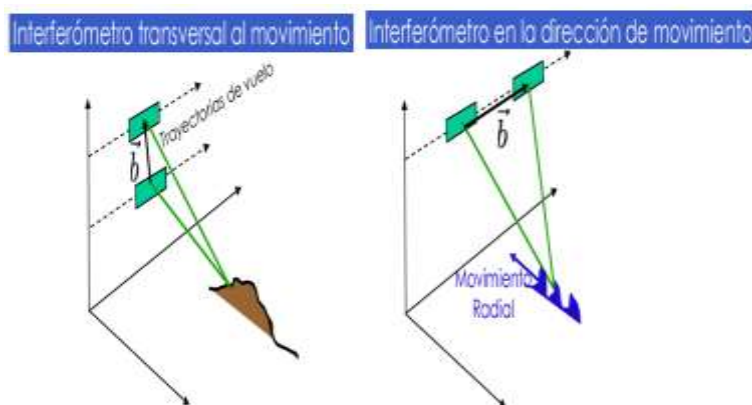
2.3.2 *Tipos de Interferometría.*

La interferometría incluye diversos tipos que se define en base a la configuración geométrica y la ubicación geoespacial para la toma de datos, la cual distingue cierta distancia entre las dos posiciones de la antena emisor – reflejo y receptor.

Los interferómetros se usan para mediciones topográficas, movimiento de la línea visual directa y deformación a largo plazo, cuando las antenas están separadas en la dirección transversal a la trayectoria (Fielding, 2024).

Imagen 1.

Tipos de interferometría según su ubicación



Nota. Inclínación satelital con relación al relieve geográfico de la tierra. **Fuente:** (Fielding, 2024)

2.3.3 Campo de Aplicación de Interferometría.

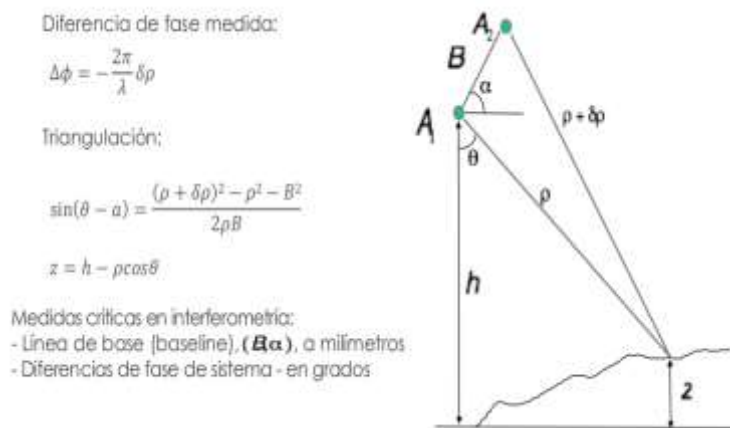
Las aplicaciones geofísicas de la interferometría de radar aumentaron significativamente a principios de la década de 1990, conduciendo al análisis diferencial de fase entre dos imágenes adquiridas por un radar de apertura sintética espacial en dos momentos distintos.

El interferograma genera un mapa de contorno del cambio de distancia entre el suelo y el instrumento de radar. Estos mapas proporcionan una densidad de muestreo espacial insuperable con 100 píxeles por km^2 con una precisión competitiva de 1 cm y una cadencia de observación de una imagen cada mes.

Estos sondeos cronológicos registran cambios en la corteza, perturbaciones en la atmósfera, modificaciones dieléctricas en el suelo y relieve en la topografía. Sin embargo, son sensibles a efectos técnicos, como variaciones relativas en la trayectoria del radar o variaciones en su estándar de frecuencia. Además de usarse en análisis espectral con combinación de bandas y en el análisis de modificaciones medio ambientales, zonificación de anegamiento, saturación del suelo, desplazamiento de cuerpos rígidos, alteración del relieve, monitoreo de plantas mineras, entre otros escenarios de modificación geoespacial.

Imagen 2

Aplicación de la interferometría topográfica



Nota. Cálculo de la fase en relación con la inclinación satelital. **Fuente:** (Fielding, 2024)

2.3.4 Deslizamientos.

Un deslizamiento, también conocido como el movimiento o colapso de una masa de roca, escombros o tierra pendiente abajo por efectos de la gravedad. El término "deslizamiento de tierra" abarca cinco modos de movimiento: caídas, vuelcos, deslizamientos, expansiones y flujos. Estos se subdividen a su vez según el tipo de material geológico.

Los deslizamientos de tierra pueden iniciarse en laderas por intervención de múltiples factores extremos como la lluvia, deforestación, inserción de actividades humanas, aperturas viales, la erosión fluvial, cambios en las aguas subterráneas, terremotos, actividad volcánica o cualquier combinación de estos factores. (Servicio Geológico de Estados Unidos USGS, 2025)

2.3.5 Partes de los Deslizamientos

Para comprender la dinámica de un deslizamiento, es necesario conocer sus partes constituyentes.

2.3.5.1 Cabeza

Parte superior de la masa de material que se mueve. La cabeza del deslizamiento no corresponde necesariamente a la cabeza del talud. Arriba de la cabeza está la corona.

2.3.5.2 Cima.

El punto más alto de la cabeza, en el contacto entre el material perturbado y el escarpe principal.

2.3.5.3 Corona.

El material in situ prácticamente inalterado adyacente a la parte más alta del escarpe principal, por encima de la cabeza.

2.3.5.4 Escarpe principal.

Superficie muy inclinada a lo largo de la periferia posterior del área en movimiento, causada por el desplazamiento del material.

2.3.5.5 Escarpe secundario.

Superficie muy inclinada producida por el desplazamiento diferencial dentro de la masa que se mueve. En un deslizamiento pueden formarse varios escarpes secundarios.

2.3.5.6 Superficie de falla.

Área por debajo del movimiento y que delimita el volumen del material desplazado.

2.3.5.7 Pie de la superficie de falla.

La línea de interceptación entre la parte inferior de la superficie de rotura y la superficie original del terreno, sin embargo, también se consideran los puntos originales del terreno y el punto máximo del deslizamiento.

2.3.5.8 Base.

El área cubierta por el material perturbado abajo del pie de la superficie de falla.

2.3.5.9 Punta o uña.

El punto de la base que se encuentra a más distancia de la cima.

2.3.5.10 Cuerpo principal del deslizamiento.

El material desplazado que se encuentra sobre la superficie de falla. Se pueden presentar varios cuerpos en movimiento o masas aglomeradas que generan formaciones irregulares notables.

2.3.5.11 Superficie original del terreno.

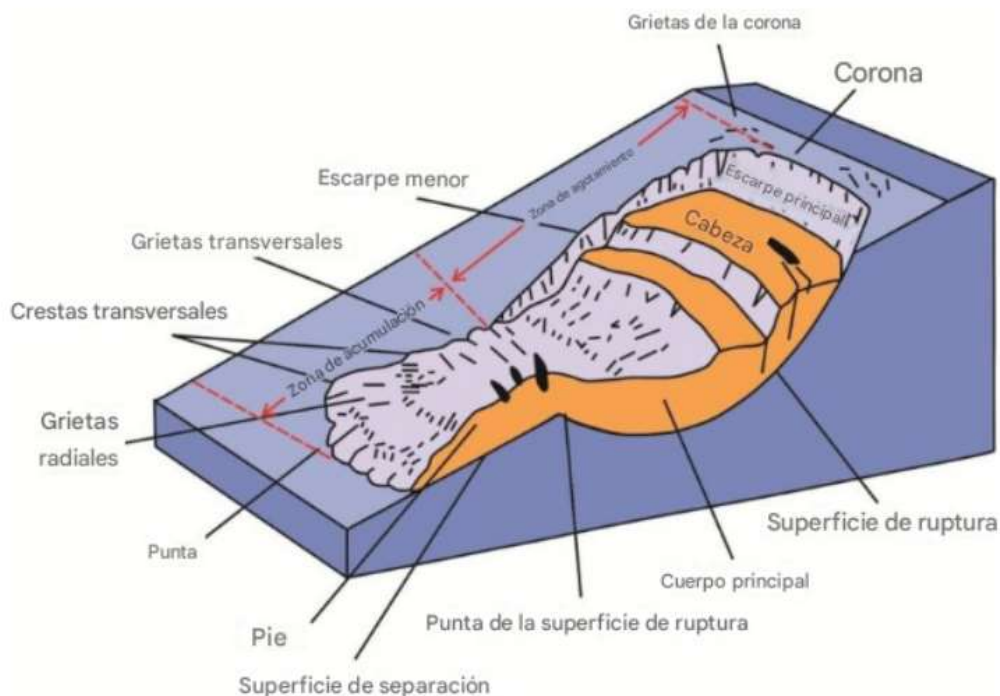
Es la superficie que no presentaba cambio o alteración antes de evidenciar condiciones de deformación del terreno.

2.3.5.12 Costado o flanco.

Es el perfil lateral del movimiento. Se debe diferenciar por la ubicación del flanco derecho y el izquierdo. (Merino Gonzáles)

Imagen 3.

Partes de un deslizamiento



Nota. Partes fundamentales de un deslizamiento de masa producto de alta saturación del suelo

2.3.6 Tipos de Deslizamientos.

2.3.6.1 Deslizamientos rotacionales

Se trata de un deslizamiento en el que la superficie de ruptura tiene una curvatura cóncava hacia arriba y el movimiento de deslizamiento es aproximadamente rotacional alrededor de un eje paralelo a la superficie del suelo y transversal al deslizamiento. (Communications and Publishing (U.S. Geological Survey – USGS), 2023)

2.3.6.2 Deslizamientos traslacionales

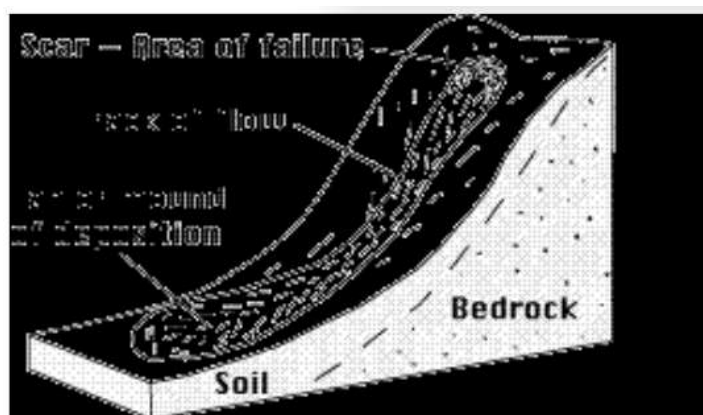
En estos movimientos traslacionales son rápidos a lo largo de un plano de clara debilidad entre el material de deslizamiento superpuesto y el material subyacente más estable. Los toboganes se pueden subdividir en toboganes de roca, toboganes de escombros o deslizamientos de tierra dependiendo del tipo de material involucrado. (Communications and Publishing (U.S. Geological Survey – USGS), 2023)

2.3.6.3 Flujos de escombros.

Es una mezcla de fragmentos de roca, tierra, vegetación, agua y, en algunos casos, aire arrastrado que fluye cuesta abajo como un fluido. Estos mismos elementos pueden variar en consistencia desde condiciones de alta compactación hasta una mezcla sobresaturada de agua (lodo). Los flujos de escombros pueden clasificarse además como flujos de lodo y flujos de tierra, dependiendo de la proporción de agua, tierra y escombros de roca. (Association of Environmental Engineering & Geologists, 2023)

Imagen 4.

Esquema del flujo de escombros



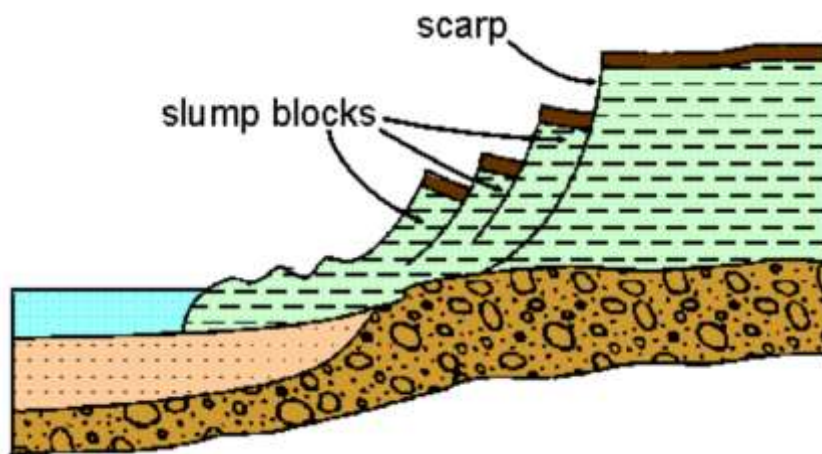
Fuente: La imagen describe el esquema del flujo de escombros en un perfil con alta inclinación.

2.3.6.4 Desplome

Consiste en el desplazamiento de masa pendiente abajo como una unidad, por lo general, a lo largo de un plano curvo de falla. La masa de tierra y roca removida deja un desnivel abrupto en la parte superior del deslizamiento, conocido como escarpe. Estos desplomes repetidos a menudo pueden resultar en terrazas o una serie de escarpes, a medida que se producen fallas secundarias para la estratificación de los deslizamientos. (Association of Environmental Engineering & Geologists, 2023)

Imagen 5.

Esquema de desplome



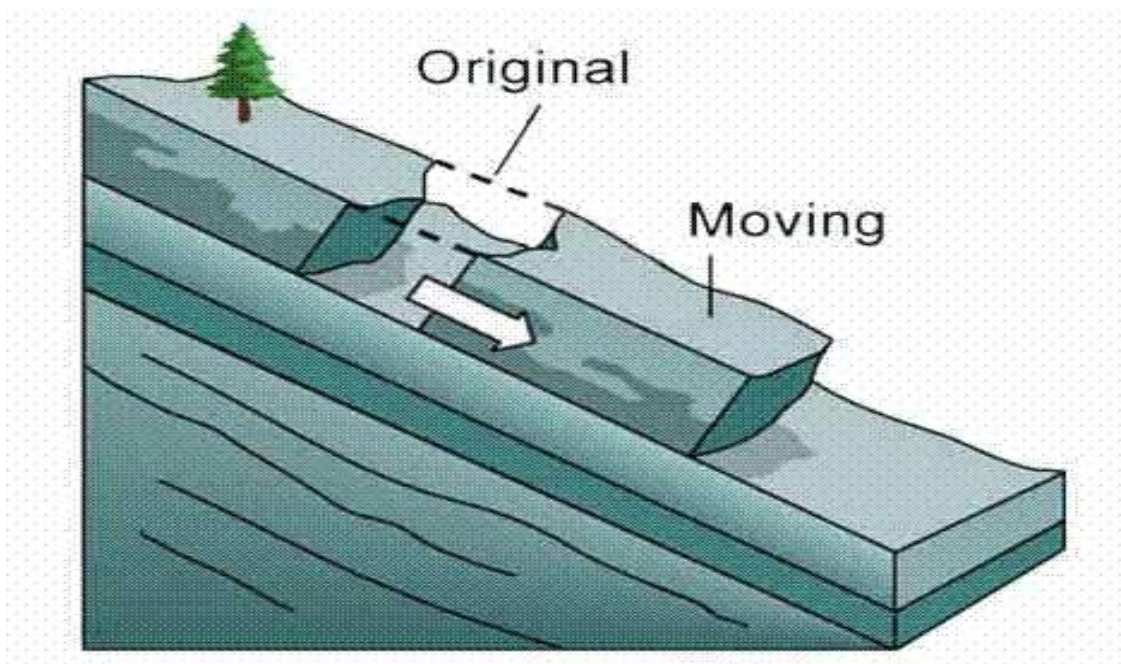
Nota. La imagen muestra el desprendimiento de masa por aglomeración en bloques se puede evidencia con alta presencia en acantilados costeros **Fuente:** (Sepulveda, 2017)

2.3.6.5 Deslizamiento de rocas

Es el movimiento rápido de una gran masa rocosa a lo largo de un plano de debilidad, como un plano de estratificación o una diaclasa. Este tipo de deslizamientos de rocas ocurren en laderas empinadas, pero se han registrado casos en pendientes de hasta 15 grados de inclinación. (Association of Environmental Engineering & Geologists, 2023)

Imagen 6.

Esquema de un deslizamiento de rocas.



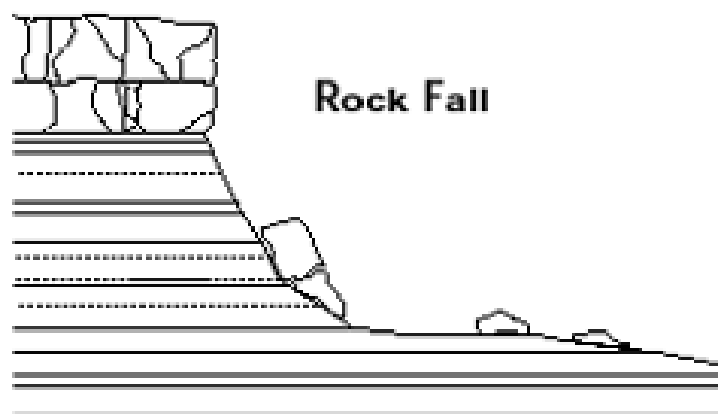
Nota. La imagen describe el proceso de fracturación de roca y el desplazamiento por acción de la gravedad en relieve de alta inclinación. **Fuente:** (Fustos & Ledezma, 2020)

2.3.6.6 Desprendimiento de rocas

Los desprendimientos de rocas suelen ser resultado de la meteorización física, como el acunamiento del hielo en las grietas de los acantilados la roca suele acumularse en la base del acantilado en forma de talud (roca suelta). Por tal razón, los desprendimientos de rocas suelen ser provocados por terremotos. (Association of Environmental Engineering & Geologists, 2023)

Imagen 7.

Esquema de un desprendimiento de rocas.



Nota. La imagen muestra el desprendimiento de rocas que se puede evidenciar en acantilados oceánicos o riscos montañosos. **Fuente:** (Fustos & Ledezma, 2020)

2.3.7 Causas de los Deslizamientos.

- Unos de los escenarios principales de los deslizamientos de masa suelen pertenecer a la sobre saturación del suelo debido a las prolongadas precipitaciones saturan el suelo y la infiltración del agua reduce la cohesión de los materiales, facilitando los deslizamientos.
- La pendiente o bajada de un terreno es un factor crítico. Por ende, las formaciones empinadas son más propensas a fallar, ya que la fuerza gravitatoria supera la resistencia del suelo.
- Las precipitaciones intensas son factores desencadenantes clave. Durante la temporada invernal, la alta pluviosidad puede saturar el suelo y provocar deslizamientos que afectan grandes extensiones de terreno.
- Los movimientos sísmicos, volcánicos o las vibraciones pueden desintegrar estratos, debilitando la masa y provocando colapsos o desprendimientos.
- En la actualidad, los actos de deforestación por intervención humana son evidentes, lo cual genera que la capa natural pierda consistencia y el suelo esté expuesto a factores climáticos, alterándose recurrentemente.

2.4 Legal

Mediante una revisión exhaustiva del marco legal establecido en Constitución de la República del Ecuador, se ha considerado relevante mencionar ciertos artículos, lineamientos y resoluciones que solventen el presente estudio.

- Constitución de la República del Ecuador 2008, en los Artículos 389 y 390 menciona que:

Art. 389 - El Estado protegerá a las personas, las colectividades y la naturaleza frente a los efectos negativos de los desastres de origen natural o antrópico mediante la prevención ante el riesgo, la mitigación de desastres, la recuperación y mejoramiento de las condiciones sociales, económicas y ambientales, con el objetivo de minimizar la condición de vulnerabilidad. El sistema nacional descentralizado de gestión de riesgo está compuesto por las unidades de gestión de riesgo de todas las instituciones públicas y privadas en los ámbitos local, regional y nacional (Constitución de la República del Ecuador, 2008, pág. 118).

El Estado ejercerá la rectoría a través del organismo técnico establecido en la ley. Tendrá como funciones principales, entre otras:

1. Identificar los riesgos existentes y potenciales, internos y externos que afecten al territorio ecuatoriano.
2. Generar, democratizar el acceso y difundir información suficiente y oportuna para gestionar adecuadamente el riesgo.
3. Asegurar que todas las instituciones públicas y privadas incorporen obligatoriamente, y en forma transversal, la gestión de riesgo en su planificación y gestión.
4. Fortalecer en la ciudadanía y en las entidades públicas y privadas capacidades para identificar los riesgos inherentes a sus respectivos ámbitos de acción, informar sobre ellos, e incorporar acciones tendientes a reducirlos.

5. Articular las instituciones para que coordinen acciones a fin de prevenir y mitigar los riesgos, así como para enfrentarlos, recuperar y mejorar las condiciones anteriores a la ocurrencia de una emergencia o desastre.

6. Realizar y coordinar las acciones necesarias para reducir vulnerabilidades y prevenir, mitigar, atender y recuperar eventuales efectos negativos derivados de desastres o emergencias en el territorio nacional.

7. Garantizar financiamiento suficiente y oportuno para el funcionamiento del Sistema, y coordinar la cooperación internacional dirigida a la gestión de riesgo (Constitución de la República del Ecuador, 2008, pág. 118).

Art. 390 - Los riesgos se gestionarán bajo el principio de descentralización subsidiaria, que implicará la responsabilidad directa de las instituciones dentro de su ámbito geográfico. Cuando sus capacidades para la gestión del riesgo sean insuficientes, las instancias de mayor ámbito territorial y mayor capacidad técnica y financiera brindarán el apoyo necesario con respeto a su autoridad en el territorio y sin relevarlos de su responsabilidad (Constitución de la República del Ecuador, 2008, pág. 118).

- Ley Orgánica de Transporte Terrestre Tránsito y Seguridad Vial, en los Artículos 3, 6 y 28 menciona que:

Art. 3 - El Estado garantizará que la prestación del servicio de transporte público se ajuste a los principios de seguridad, eficiencia, responsabilidad, universalidad, accesibilidad, continuidad y calidad, con tarifas socialmente justas. (Ley Orgánica de Transporte Terrestre Tránsito y Seguridad Vial, 2008, pág. 2)

Art. 6 - El Estado es propietario de las vías públicas, administrará y regulará su uso. (Ley Orgánica de Transporte Terrestre Tránsito y Seguridad Vial, 2008, pág. 3)

Art. 28- La Agencia Nacional de Regulación y Control del Transporte Terrestre, Tránsito y Seguridad Vial estará administrada por un director ejecutivo, de libre nombramiento y remoción, quien deberá ser ecuatoriano y reunir requisitos de idoneidad, conocimiento y experiencia en materia del transporte terrestre, tránsito y seguridad vial. Será designado por el Directorio de una terna enviada por el Presidente de la República. (Ley Orgánica de Transporte Terrestre Tránsito y Seguridad Vial, 2008, pág. 9)

- Ley Orgánica de Ordenamiento Territorial, Uso y Gestión de Suelo, en el Artículo 11 menciona que:

Art. 11 - Alcance del componente de ordenamiento territorial. Además de lo previsto en el Código Orgánico de Planificación y Finanzas Públicas y otras disposiciones legales, la planificación del ordenamiento territorial de los Gobiernos Autónomos Descentralizados observarán, en el marco de sus competencias, los siguientes criterios: (Ley Orgánica de Ordenamiento Territorial, Uso y Gestión de Suelo, 2016, pág. 7)

1. Los Gobiernos Autónomos Descentralizados regionales delimitarán los ecosistemas de escala regional; las cuencas hidrográficas y localizarán las infraestructuras hidrológicas, de conformidad con las directrices de la Autoridad Única del Agua; la infraestructura de transporte y tránsito, así como el sistema vial de ámbito regional.

3. Los Gobiernos Autónomos Descentralizados municipales y metropolitanos, de acuerdo con lo determinado en esta Ley, clasificarán todo el suelo cantonal o distrital, en urbano y rural y definirán el uso y la gestión del suelo. Además, identificarán los riesgos naturales y antrópicos de ámbito cantonal o distrital, fomentarán la calidad ambiental, la seguridad, la cohesión social y la accesibilidad del medio urbano y rural, y establecerán las debidas garantías para la movilidad y el

acceso a los servicios básicos y a los espacios públicos de toda la población. (Ley Orgánica de Ordenamiento Territorial, Uso y Gestión de Suelo, 2016, pág. 7)

- Ley Orgánica para la Gestión Integral del Riesgo de Desastres, en el Artículo 66 menciona que:

Art. 66 - Implicaciones de la declaratoria de emergencia y de la declaratoria de desastres.

-La declaratoria de emergencia y la declaratoria de desastre estarán encaminada a responder a los efectos e impactos negativos propios que genera el desastre y a impedir su extensión. La declaratoria tendrá una duración de hasta noventa días, renovable las veces que la atención a la emergencia o desastre lo requiera. (Ley Orgánica para la Gestión Integral del Riesgo de Desastres, 2024, pág. 38)

La declaratoria de emergencia o declaratoria de desastre permitirá;

1. La activación de todas las entidades de los diferentes niveles de gobierno presentes en el territorio o de otros sectores, para la atención y respuesta a la emergencia bajo las directrices del Comité de Operaciones de Emergencia responsable, respetando las competencias de cada entidad.
2. La activación de aquellas entidades del nivel nacional que no tengan presencia en ese territorio o sean parte de ese sector, pero que por sus competencias se requiera su participación para atender y responder a la emergencia o desastre.
3. Facilitar el cumplimiento de las características de concreta, inmediata, imprevista, probada y objetiva de la situación de emergencia que sustente Una declaratoria de emergencia en contratación pública, conforme la ley de la materia, exclusivamente en acontecimientos que estén relacionados con el objeto de la presente ley.

4. Habilitar a todas las entidades del sector público activadas, la formulación y aprobación de las modificaciones presupuestarias dentro y entre grupos de gastos permanentes y no permanentes.

5. Aplicación de medidas de cumplimiento obligatorio como horarios de circulación, horarios de atención en determinadas actividades económicas, sociales, culturales, requisitos para el ingreso en puertos y aeropuertos, medidas de control sanitario, suspensión de eventos, entre otras atendiendo a la naturaleza del desastre.

6. Establecimiento de multas por incumplimiento de medidas de cumplimiento obligatorio.

7. Medidas específicas para grupos de atención prioritaria.

8. Delimitación de las zonas geográficas afectadas.

9. Habilitar al ente encargado de la gestión y administración de los bienes del Estado para que, de conformidad con el Reglamento General de Aplicación de la presente Ley y previo informe del ente rector de la gestión integral del riesgo de desastres, autorice o disponga el uso o destino temporal o definitivo de los bienes bajo su administración para establecimiento de alojamientos temporales, o realización de tareas de prevención, mitigación, remediación, limpieza de cunetas, canales y vías, desasolve de ríos, retiro de escombros, entre otros. La reglamentación observará la naturaleza expedita que requieren los procesos, procedimientos y las autorizaciones respectivas.

10. Otras determinadas en el reglamento general de aplicación de la presente ley (Ley Orgánica para la Gestión Integral del Riesgo de Desastres, 2024, pág. 38).

2.5 Conceptual

2.5.1 Coherencia interferométrica.

Los datos interferométricos son complejos de interpretar visualmente sin procesamiento. Sin embargo, se interpretan mediante combinación multiespectral de imágenes de radar de apertura

sintética (SAR), las cuales se utilizan en el análisis interferométrico. Además, la coherencia interferométrica es una medida de precisión que disminuye con el aumento de la dispersión de volumen y los cambios temporales (Motagh, 2021).

2.5.2 Frecuencia de ocurrencia.

La frecuencia de ocurrencia está relacionada con las características tectónicas y los niveles de susceptibilidad asignados a cada distancia establecida. En deslizamientos, los rangos generales varían entre el 4,9% y el 0,1 %, sin embargo, este rango de recurrencia puede ser afectado por las condiciones geológicas y climáticas (Youssef, Pradhan, Dikshit, & Al-Katheeri, 2022).

2.5.3 Línea de base (Baseline).

La línea de base (baseline) es la distancia geométrica entre dos posiciones de antena (o entre dos pasadas del satélite) utilizada en interferometría. Esta distancia determina la sensibilidad del sistema a las deformaciones del terreno (Berné Valero, Garrido Villén, & Capilla Roma, 2023).

2.5.4 Litología.

El término litología describe las propiedades físicas de un afloramiento, núcleo o muestra de unidades de roca visibles mediante instrumentos microscópicos de bajo aumento. Estas características incluyen la composición, el color, la textura, el tamaño del grano, entre otros (McNair, 2023).

2.5.5 Pendiente del terreno.

Es una de las características más importantes en el caso de terrenos con gran inclinación, generalmente en áreas montañosas. Es importante conocer la dinámica del terreno, así como los procesos de ingeniería que utilizan métodos experimentales para estabilizarlo (Ibañez Asensio, Gisbert Blanquer, & Moreno Ramón).

2.5.6 Precipitación.

Es un componente fundamental en el ciclo global del agua y una variable hidrológica clave para la meteorología, la climatología y las ciencias hidrológicas. El ciclo hidrológico engloba la precipitación como parte del proceso que comienza con la evaporación, continúa con la condensación y finaliza con la precipitación. (Academicpress, 2019)

CAPÍTULO III.

3 METODOLOGÍA

3.1 Tipo de Investigación

Por su alcance, la investigación es de tipo descriptivo, ya que busca caracterizar y describir las zonas vulnerables a deslizamientos en la red vial Chillanes–San Pablo, sin manipular las variables. Por su propósito, es de tipo aplicado, pues sus resultados pueden ser utilizados por las autoridades competentes (MTOP, GADs, SNGR) para la toma de decisiones en la gestión del riesgo vial.

El procedimiento incluyó la delimitación de la zona de estudio, la recolección de información histórica de deslizamientos (con apoyo del GAD Municipal de Chillanes y la SNGR), la descarga de imágenes satelitales del geoportal de la NASA (periodicidad de 6 días), y el procesamiento interferométrico.

3.2 Enfoque de la investigación

La investigación adopta un enfoque predominantemente cuantitativo, basado en el análisis de valores numéricos de deformación del terreno (desplazamiento acumulado en mm, velocidad de deformación en mm/año) obtenidos mediante procesamiento InSAR. Complementariamente, se utilizan elementos cualitativos en la descripción de eventos históricos y en la caracterización geomorfológica de la zona.

Según Rana et al. (2021), el enfoque cuantitativo permite resumir, encontrar patrones y realizar análisis matemáticos y estadísticos, lo cual es adecuado para identificar tendencias de deformación. (Rana, Luna Gutierrez, & Oldroyd, 2021)

3.3 Métodos de Investigación

3.3.1 Método Analítico

El método analítico descompone un fenómeno complejo en sus partes constitutivas. En esta investigación, se utilizó para identificar los factores que influyen en los deslizamientos (pendiente, litología, precipitación, deforestación) y para desglosar el procesamiento InSAR en etapas (descarga, co-registro, filtrado, desenrollado de fase).

Según Sharma, menciona que el método analítico es un proceso genérico que combina el poder del método científico con el uso de un proceso formal que investiga a la variable para resolver cualquier tipo de problema. (Sharma)

3.3.2 Método Deductivo

El método deductivo parte de principios generales para llegar a conclusiones específicas. Se aplicó al contrastar la teoría de la interferometría radar (revisada en el Capítulo II) con los resultados obtenidos en la red vial Chillanes–San Pablo, verificando si los patrones de deformación detectados se corresponden con los modelos teóricos.

El método deductivo parte desde una teoría, proceso de verificación y finalmente contrasta con la validación de datos. La aplicación de este tipo de método en investigaciones de real relevancia brinda la apertura de comprobar si las teorías planteadas cumplen con los objetivos específicos. (Centro de Aprendizaje, 2025)

3.3.3 Método Documental

El método documental facilitó la recolección y selección de información proveniente de fuentes secundarias: informes técnicos del MTOP, registros históricos de la SNGR, artículos científicos y documentos normativos. Según Ahmed (2010), este método analiza las características de materiales escritos, visuales o auditivos que registran información sobre una temática.

Considerado como enfoques sistemáticos utilizados para ubicar, evaluar y analizar registros textuales de fuentes primarias los cuales disponen de información histórica, acciones sociales, políticas y organizacionales. De tal manera que, la información que engloba dichos textos fortalece los criterios teóricos de una investigación. (A-Z Topics, 2026)

3.4 Técnicas e Instrumentos de Recopilación de Datos

3.4.1 Técnica de análisis para el primer y segundo objetivo:

Investigación Documental

Se realizó una búsqueda exhaustiva de informes técnicos, datos geoespaciales y registros disponibles en geoportales relacionados con el seguimiento y monitoreo de la amenaza, con énfasis en los escenarios críticos registrados históricamente en la zona de estudio.

Exploración de datos de campo y reuniones con equipo técnico

En este apartado se realizó el acercamiento correspondiente al territorio mediante la verificación de rastros históricos y el agrietamiento evidenciado en la vial, además se mantuvo reuniones con el equipo técnicos GAD Municipal de Chillanes. A continuación, se describe el proceso mediante al cual se desarrolló la recolección de información.

Recopilación de la información

A partir de la recolección de información se obtuvieron datos geoespaciales de ubicaciones geográficas indagadas en la Secretaria Gestión de Riesgos, Técnicos de la unidad de gestión de riesgos de la Gobierno Autónomo de Chillanes, plataforma EVIN desarrollada bajo la rectoría de la Secretaria Nacional de Gestión de Riesgos “SNGR” y los datos geoespaciales definidos por la el Instituto Geográfico Militar “IGM”. Además de obtener dicha información se validó mediante el acercamiento a los escenarios registrados a través de la historia, con fin de validar la información recabada.

Además de los recolectar, filtrar y validar las coordenadas geoespaciales se recolecto la red vial y los perfiles territoriales, mediante aquello se definió la zona de estudio tenido en consideración una escala a detalle.

Para cumplir con el segundo objetivo se descargó un conjunto de 50 imágenes del satélite Sentinel-1, obtenidas mediante el geoportal de la NASA (Earth Data Search) de los Estados Unidos denominada por sus siglas National Aeronautics and Space Administration (Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio). La descarga de imágenes se realizó considerando la periodicidad de 6 días, comprendida entre los años 2021 y 2026, Con el fin de conformar una serie temporal continua, misma que permita evaluar la deformación de taludes circundante a la red vial.

Posteriormente, se realizó una exhaustiva búsqueda de metodologías utilizadas para el análisis interferométrico con imágenes radar. Se consideró, enfoques tradicionales ampliamente investigados en los escenarios científicos los cuales resultados de vital importancia al momento de detectar y monitorear la deformación de la superficie los puntos exacto. Sin embargo, el avance tecnológico y la inserción de los métodos satelitales incrementa la disponibilidad de imágenes de libres accesos.

El medio empleado para el procesamiento interferométrico, fue la programación mediante el código Payton Plataforma generado por la división de investigación LLC Limited Liability Company, gracias a la capacidad de automatizar el procesamiento técnico minimiza el tiempo de intervención humana en varias etapas de análisis.

Fundamentación Técnica y Explicación del Código

1. Entorno y Parámetros Técnicos

El entorno procesa datos interferométricos Sentinel-1 en el corredor vial Chillanes–San Pablo. Se configuran variables geodésicas fundamentales para la transformación de datos ráster a valores físicos de deformación terrestre:

- Buffer de influencia (50 m): Define la franja de análisis a ambos lados de la calzada para capturar fallas en taludes adyacentes.
- Umbral de coherencia escalado (75): Filtra el ruido de correlacionado. Corresponde a una coherencia interferométrica 0.3 en una escala normalizada de 0 a 250.
- Longitud de onda = 55.46: Constante física de la banda C del satélite Sentinel-1.
- Ángulo de incidencia = 39.6412: Ángulo de visión del sensor respecto a la vertical local.

2. Procesamiento Espacial y Filtro Interferométrico

La función `analizar_barrido_vial` (y sus variantes) ejecuta una secuencia estricta de análisis geoespacial:

Reproyección del vector: Convierte la vía de coordenadas geográficas (WGS84 / EPSG:4326) a un sistema proyectado métrico (UTM Zona 17S / EPSG:32717) mediante `to_crs()`. Esto permite crear el colchón espacial (buffer) exacto de 50 metros.

Máscara ráster (Masking): Regresa la geometría unificada del buffer a EPSG:4326 y recorta las capas ráster de fase desenvuelta (.unw.tif) y coherencia (.cc.tif).

Selección de píxeles válidos: Extrae la matriz donde la coherencia es igual o superior al umbral establecido y la fase no corresponde a datos nulos (nodata).

3. Conversión de Fase Interferométrica a Desplazamiento Vertical

Para convertir el cambio de fase medido por el satélite ($\Delta\phi$) a un desplazamiento en la línea de vista del sensor d_{LOS} y posteriormente a la componente vertical pura d_{ver} , el código aplica las siguientes fórmulas físicas:

$$d_{LOS} = \frac{Fase * \lambda}{4 \cdot \pi}$$

$$d_{ver} = \frac{d_{Los}}{\cos(39.6412)}$$

d_{los} : Expresa el desplazamiento a lo largo de la trayectoria del haz de radar.

d_{ver} : Aplica la corrección geométrica proyectando el vector sobre el eje Z . Se asume que el movimiento dominante en este sector de la vía corresponde a subsidencia o asentamiento vertical.

4. Proyección de Tendencia e Inversa de la Velocidad

El bloque final del script realiza dos evaluaciones cinemáticas clave sobre las series temporales extraídas:

Regresión Lineal (LinearRegression): Toma las fechas convertidas a días acumulados para calcular la pendiente de deformación mm/text y mm/text. Con este modelo se proyecta el comportamiento del terreno hacia el futuro.

Método de la Inversa de la Velocidad: Técnica empírica utilizada en geotecnia para predecir el momento de colapso o inestabilidad en deslizamientos activos. Calcula la tasa de deformación incremental:

$$v = \frac{\Delta d}{\Delta t} \Rightarrow \frac{1}{v} = \frac{\Delta t}{\Delta d}$$

A medida que el terreno acelera hacia una falla, el valor de 1 tiende a cero, permitiendo monitorear zonas de alto riesgo estructural.

3.4.2 Técnica de análisis para el tercer objetivo:

Un apartado muy fundamental es la recolección de datos geo espaciales característica del relieve e inclinación de la zona de estudio proporcionado por la plataforma de la NASA. A partir de información se propuso evidenciar un modelo predictivo para analizar mediante datos geo espaciales escenarios críticos, utiliza la cinemática del terreno obtenida mediante el proceso de

interferometría con el objetivo de anticipar colapsos estructurales en la red vial Chillanes - San Pablo. Investigaciones posteriores revelan que los modelos de predicción utilizan variables básicas, En cambio al efectuar el presente modelo se ha considerado los cambios milimétricos que sufre el terreno los cuales son imperceptibles al ojo humano, pero son detectados los por el lente óptico del satélite. Entre las variables que se analizara se encuentra la tasa de hundimiento anual, aceleración de la serie temporal, los cambios en la pendiente y análisis de datos de precipitaciones de la zona de estudio de tal manera dicho proceso permita definir los umbrales críticos y niveles de riesgo.

Gráfico 1.

Fuentes de recolección de información



3.5 Población y Muestra

La población de estudio está constituida por la totalidad de la red vial que conecta el cantón Chillanes con la parroquia San Pablo de Atenas, con una extensión de 21 km lineales. La muestra se define como los sectores críticos identificados a partir del inventario histórico de deslizamientos y del análisis InSAR, específicamente 6 tramos de alta vulnerabilidad (Tramos 01 a 06, según

Tabla 5) en los que se concentran los valores máximos de deformación (>30 mm acumulados). Adicionalmente, se procesaron 50 imágenes satelitales Sentinel-1 correspondientes al período 2021-2026, con una periodicidad de 8 días.

3.6 Técnicas de Análisis y Procesamiento de Información.

3.6.1 Proceso metodológico para identificar los eventos históricos de deslizamientos en la red vial Chillanes–San Pablo mediante indagación documental, para comprender su recurrencia en el período 2014–2026.

Para el primer objetivo (identificación histórica de deslizamientos), se realizó mediante una investigación documental de carácter descriptivo e histórico, provenientes de fuentes oficiales de informes técnicos del MTOP, registros de la SNGR y del GAD Municipal de Chillanes. A partir de la base de datos, se procedió con filtraje de escenario suscitados dentro a la zona de estudio geo referenciando los distintos entornos del perfil vial, los cuales son comprendidos entre los años 2014-2026, Tales escenarios indican acontecimientos de vital importancia en la obstaculización de la dinámica vial, la cual comprende la vía San pablo Chillanes. Conforme a la información obtenida se estructuro la matriz de la **Tabla 2**, denominada “Antecedentes históricos registrados”, dicha información está respaldada con la proyección cartográfica del **Mapa 2** “Escenarios históricos caracterizados en base a la red vial San Pablo – Chillanes”. Para complementar se efectuó un levantamiento de puntos mediante GPS móvil, registrando coordenadas de los sectores con evidencias de deslizamientos pasados.

3.6.2 Proceso metodológico para determinar las zonas vulnerables a deslizamientos en la red vial Chillanes–San Pablo mediante la técnica interferometría radar (InSAR) con imágenes Sentinel-1.

Para el segundo objetivo determinación de zonas vulnerables mediante la técnica InSAR, se descargaron 50 imágenes del satélite Sentinel-1 a través del geoportal de la NASA (Earth Data Search), con una periodicidad de 6 días entre los años 2021 y 2026. Estas imágenes fueron procesadas en el software SNAP (ESA), donde se generaron interferogramas y mapas de coherencia. En la cual, se estableció un umbral de coherencia mínima de 0.3, descartando los píxeles con menor correlación de tal manera se garantizó la factibilidad de los resultados.

Mediando la obtención de puntos y los resultados de coherencia se desarrolló un código en Python para automatizar el cálculo de series temporales de desplazamiento y la generación de mapas de deformación (mm/año), diagramas de serie temporal mismos que indican la evolución de los desplazamientos a lo largo del tiempo indicando características de incoherencia y patrones anormales en el comportamiento del suelo. La ubicación geoespacial de tramos críticos dio apertura a sectorizar zonas que presentamos deformación del talud que se analizó mediante los desplazamientos del terreno, el análisis de correlación de deformación de perfiles corrobora los escenarios definidos en la deformación de los perfiles. El análisis de la interacción suelo-clima, en el presente estudio tubo vital importancia en vincular la información procesada con el código de Payton donde la influencia de las variables climáticas “precipitaciones, temperatura y humedad” los resultados se visualizaron y analizaron en ArcGIS y convalidaron mediante Global Mapper.

3.6.3 *Proceso metodológico para proponer un modelo predictivo de riesgo de deslizamientos utilizando datos de interferometría radar, orientado a las zonas críticas que requieran intervenciones de mitigación y prevención.*

Para el tercer objetivo modelo predictivo, se utilizaron los resultados de desplazamiento acumulado y velocidad de deformación obtenidos en el objetivo anterior. Con base en estos valores, se definieron umbrales críticos (verde <3 mm/año, amarillo 3-6 mm/año, naranja 6-10 mm/año, rojo >10 mm/año) y se aplicó el método de la inversa de la velocidad ($1/v$) para proyectar la fecha probable de falla. Los cálculos se realizaron en Global Mapper y ArcGIS, complementados con código en Python para el análisis de tendencias.

CAPÍTULO IV.

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Resultados del objetivo 1: Identificar los eventos históricos de deslizamientos en la red vial Chillanes–San Pablo mediante indagación documental, para comprender su recurrencia en el período 2014–2026.

Delimitar las zonas expuestas a deslizamientos en la red vial que conecta el cantón Chillanes con la parroquia de San Pablo de Atenas, se fundamenta en la búsqueda exhaustiva de información obtenidos mediante informes técnicos, fuentes bibliográficas y el registro de acontecimientos relevantes. El análisis y sistematización de esta información brinda la apertura a un marco analítico, el cual, permite conocer la dinámica de los procesos de desplazamientos de masa en las zonas de alta pendiente. Dicho análisis, considera la afectación, obstaculización y los daños de predios e infraestructura vial, producto de la pérdida de vegetación y desprendimiento de tierra que afecta la estabilidad de un talud y el cuerpo montañoso.

4.1.1.1 Antecedentes históricos registrados

El análisis de deslizamientos en el tramo de la red vial estatal que conecta parroquia San Pablo de Atenas con el cantón Chillanes, constituye un importante eje al considerar amenazas inducidas por la presencia de los deslizamientos en las épocas invernales que afectan la estabilidad del suelo, el sistema vial, seguridad de viajeros y transportistas. Caracterizar estos escenarios es clave para la implementación de medidas estratégicas de gestión de riesgos además de considerar la inserción de un sistema técnico de monitoreo adecuado para evitar futuros altercados.

A continuación, en la **Tabla 2**, se presenta los acontecimientos históricos caracterizados mediante los diferentes años suscitados en la red vial.

El análisis histórico de los eventos de deslizamientos registrados en la red vial que conecta la parroquia San Pablo con el cantón Chillanes en el área de estudio permitió determinar patrones de recurrencia que resultan fundamentales para la gestión del riesgo y la planificación territorial. Se inició una busca de los escenarios registrados técnicamente desde el año 2014 hasta el 2026, identificando múltiples episodios de distribución temporal en la cual, la persistencia y recurrencia del fenómeno han generado riesgos considerables que afecta a la vía continuamente.

A partir del 2014 se documentó el primer deslizamiento dentro del área de estudio. Posteriormente, en el 2015 y 2016 se registraron dos eventos cada año, lo que refleja una considerable intensificación de deslizamientos en periodos cortos. En el 2017 se tuvo registro de un único deslizamiento, mientras que, en el 2019, produjo un evento de considerable magnitud. A partir del 2020, la recurrencia se estabiliza en dos deslizamientos por año, manteniendo esta tendencia en los periodos 2020, 2021, 2022, 2023, 2024, 2025 e inicios del 2026.

Mediante el análisis temporal de los deslizamientos registrados por entidades de monitoreo se ha definido las variaciones existenciales y los periodos de retorno que se materializan en la vía, existe una clara tendencia hacia la repetición sistemática del fenómeno en los últimos siete años, debido a la presencia recurrente un clima húmedo y el desequilibrio que produce los movimientos tectónicos y la incisión de actividades humanas que afecta la estratificación del suelo. Tal recurrencia constituye un indicador de vulnerabilidad estructural de la red vial y de las zonas colindantes.

Tabla 2.*Antecedentes históricos registrados*

SECTOR	COORDENADAS X	COORDENADAS Y	EVENTO	AÑOS DE EVENTO
MINA DE PIEDRA (VÍA SAN PABLO CHILLANES)	715105	9790828	DESLIZAMIENTO	2014
LA MINA VÍA SAN PABLO CHILLANES.	715524	9788404	DESLIZAMIENTO	2015
VÍA SAN PABLO- CHILLANES (PEREZAN)	715511	9790609	DESLIZAMIENTO	2015
BARRIO LA DOLOROSA	714860	9799072	DESLIZAMIENTO	2016
SICOTO VÍA A LAS PALMERAS	714672	9799259	DESLIZAMIENTO	2016
(LA PESQUERÍA) VÍA SAN PABLO A CHILLANES (E495).	715051	9797463	DESLIZAMIENTO	2017

VÍA SAN PABLO- CHILLANES	714694	9791839	DESLIZAMIENTO	2020
LA GASOLINERA “LA MERCED” VIA CHILLANES- SAN PABLO DE ATENAS Y CERRO CUCHICAHUA	714689	9792706	DESLIZAMIENTO	2020
LA GASOLINERA “LA MERCED” VIA CHILLANES- SAN PABLO DE ATENAS	715318	9786290	DESLIZAMIENTO	2020
LA GASOLINERA “LA MERCED” VIA CHILLANES- SAN PABLO DE ATENAS Y CERRO CUCHICAHUA	714808	9792710	DESLIZAMIENTO	2021
	715250	9794393	DESLIZAMIENTO	2021

BARRIO SAN JUAN PAMBA				
CANTÓN CHILLANES	715161	9796688	DESLIZAMIENTO	2021
PROVINCIA BOLÍVAR				
LA GASOLINERA “LA				
MERCED” VIA CHILLANES-				
SAN PABLO DE ATENAS Y	714689	9792706	DESLIZAMIENTO	2022
CERRO CUCHICAHUA				
BARRIO SAN JUAN PAMBA				
CANTÓN CHILLANES	714673	9792044	DESLIZAMIENTO	2022
PROVINCIA BOLÍVAR				
BARRIO SAN JUAN PAMBA				
CANTÓN CHILLANES	714807	9792784	DESLIZAMIENTO	2023
PROVINCIA BOLÍVAR				
A 2KM DE LA MINA DE				
PEREZAN	715191	9789921	DESLIZAMIENTO	2023

“LA MERCED” VIA				
CHILLANES- SAN PABLO DE	715480	9790552	DESLIZAMIENTO	2024
ATENAS				
“LA MERCED” VIA				
CHILLANES- SAN PABLO DE	715046	9793930	DESLIZAMIENTO	2024
ATENAS				
“LA MERCED” VIA				
CHILLANES- SAN PABLO DE	715272	9794697	DESLIZAMIENTO	2025
ATENAS				
LA MINA VÍA SAN PABLO	715272	9794973	DESLIZAMIENTO	2026
CHILLANES.				
VÍA SAN PABLO-	715272	9794697	DESLIZAMIENTO	2026
CHILLANES				

Elaborado por: Molina S. & Prado C., 2026

Nota: Presentación de los principales acontecimientos históricos con relación a los deslizamientos 2014-2026. (Secretaría Nacional de Gestion de Riesgos , 2026); (Instituto Geográfico Militar , 2018); (EVIN - Secretaría de Gestión de Riesgos (SGR)., 2026)

La coordinación institucional entre el Ministerio de Transporte y obras Públicas “MTOP”, Secretaria de Gestión de Riesgos “SGR” y la Unidad de Gestión de Riesgos del “GADMCH”, posibilitan la inserción de medidas estratégicas que reduzcan dichos escenarios.

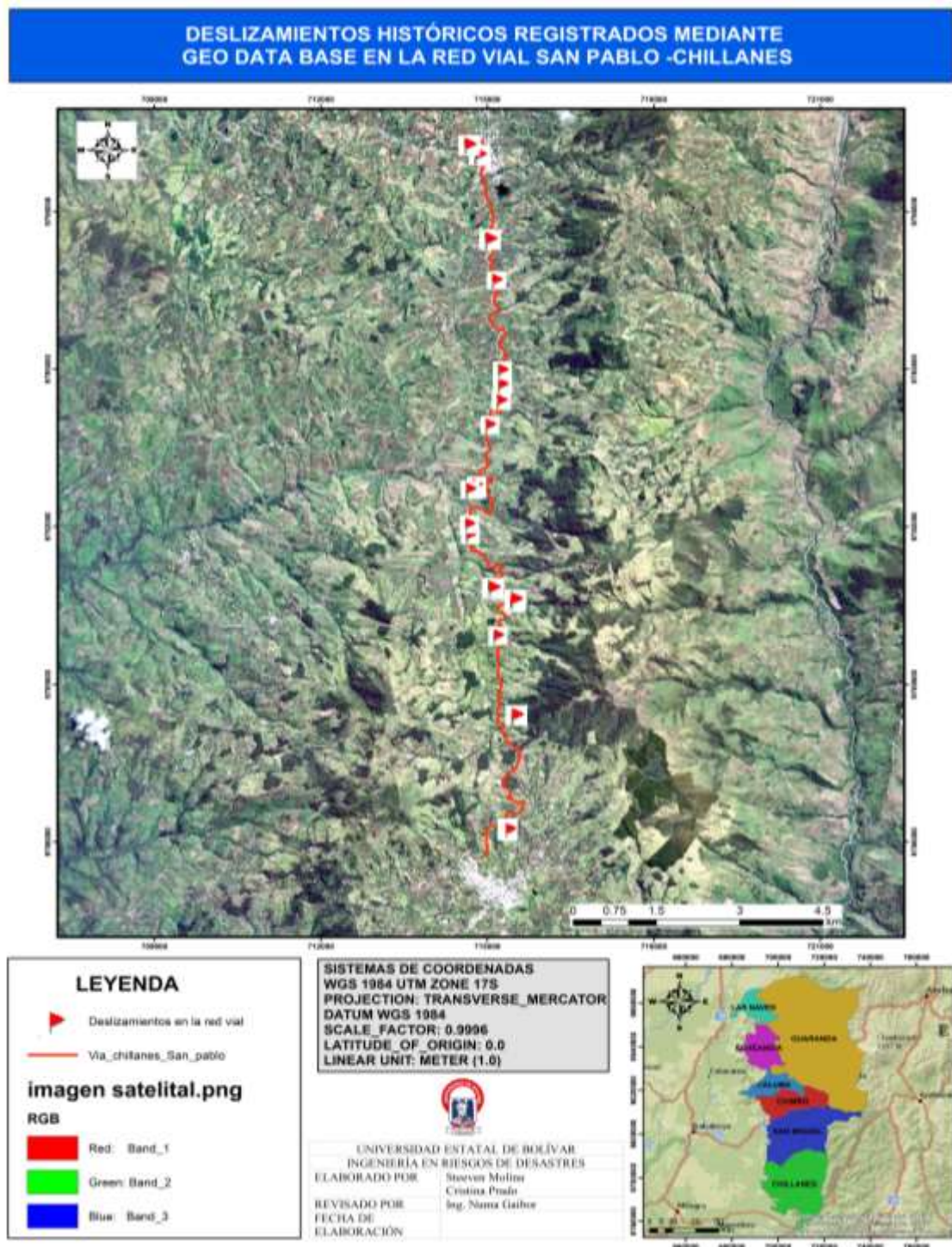
De acuerdo con los escenarios analizados en base a la red vial que conecta el cantón Chillanes con la parroquia San Pablo de Atenas, se ha evidenciado ciertas áreas críticas que se han vuelto recurrentes a la presencia de deslizamientos en especial durante épocas de altas precipitaciones como se ha mencionado en el análisis histórico.

La pérdida de suelo ha constatado la erosión y la degradación del terreno, constituyendo factores detonantes que dan origen a estos acontecimientos, en el **Mapa 2**, se presenta el resultado de identificar la amenaza de deslizamientos la red vial Chillanes - San pablo, mediante indagación histórica.

El análisis temporal de los escenarios permitió sustentar el comportamiento geodésico de la tierra y sus alteraciones mediante la representación gráfica de los escenarios identificados históricamente. En la cual, la infraestructura de mayor afectación por concurrentes desplazamientos de masa es la gasolinera situada al borde vía, y es vulnerable a sufrir deformación del terreno debido a la constante circulación de vehículos pesados. Por ende, los grandes cuerpos voluminosos de tierra han recibido una alteración en su relieve mediante el desplazamiento o los factores externos que actúan como detonantes hacia la alteración y afectación de la red vial y viviendas que se encuentran circundantes en estos territorios las misma que proporciona de sostenibilidad para el resto de localidades, familias, entre otros, que realiza actividades comerciales por esta vía.

Mapa 2.

Escenarios históricos caracterizados en base a la red vial San Pablo – Chillanes



Elaborado por: Molina S. & Prado C., 2026

4.2 Resultado objetivo 2: Determinar las zonas vulnerables a deslizamientos mediante la técnica InSAR en la red vial Chillanes - San pablo.

La determinación de las zonas vulnerables se fundamentó en el procesamiento de series temporales de imágenes radar Sentinel-1, mediante la técnica de Interferometría Diferencial de Apertura Sintética (DInSAR). Este análisis permitió identificar micro-deformaciones milimétricas en la superficie, las cuales actúan como indicadores precursores de inestabilidad en la infraestructura vial.

Para garantizar la validez de los resultados, se realizó un filtrado masivo de píxeles basado en la coherencia interferométrica (γ). Se seleccionaron únicamente aquellos dispersores persistentes con un valor promedio de 0.86 (86%), lo que asegura que las mediciones obtenidas corresponden a movimientos reales del suelo y no a decorrelación por vegetación o ruido atmosférico.

A partir del procesamiento de datos contenido en el registro de barrido masivo, se calcularon dos indicadores fundamentales para la gestión de riesgos: el Desplazamiento Acumulado y la Velocidad de Deformación.

Tabla 3.

Tabla de Métricas de deformación InSAR en la red vial Chillanes–San Pablo

Métrica InSAR	Valor Mínimo Detectado	Valor (Crítico)	Máximo Promedio de la Red Vial
Desplazamiento	-15.37 mm	-39.22 mm	-21.45 mm
Velocidad	-3.01 mm/año	-7.69 mm/año	-4.20 mm/año
Desplazamiento	-1.53 cm	-3.92 cm	-2.14 cm

Elaborado por: (Molina & Prado, 2026)

El análisis revela que el punto de mayor criticidad se localiza en las coordenadas geográficas (-1.8216, -79.0680). En este sector, el terreno ha experimentado una subsidencia neta de **3.92 cm** en el periodo analizado, con una velocidad de hundimiento constante de **7.69 mm/año**. Según los estándares de geomática aplicada, una velocidad superior a los **5 mm/año** en terrenos con pendientes pronunciadas clasifica a la zona en un estado de Vulnerabilidad Muy Alta.

El análisis espacial de secciones críticas **Grafico 1** de la red vial Chillanes–San Pablo revela un patrón claro de subsidencia neta que compromete la estabilidad estructural del corredor. Desde el punto de partida (-1.8936111, -79.0625556), se registra una subsidencia de **6.81 cm**, marcando el valor más alto y reflejando un foco de deformación acumulada. En la sección 2 (-1.8816111, -79.0705556), la subsidencia se minimiza, aunque todavía supera los **6.71 cm**, manteniendo un alto nivel de riesgo. La sección 3 (-1.8971111, -79.0645556) muestra **6.67 cm**, confirmando la persistencia de deformaciones significativas. La sección 4 (-1.8851111, -79.0690556) alcanza los **6.55 cm**, mostrando una tendencia descendente pero aún crítica. En la sección 5 (-1.8911111, -79.0665556), se observó un hundimiento de **6.50 cm**, lo que confirma el impacto continuo en la zona central de la carretera. Finalmente, la sección 6 (-1.8216111, -79.0675556) registró **6.06 cm**, el valor más bajo de la serie, aunque suficiente para demostrar que el hundimiento es un fenómeno generalizado y persistente. En conjunto, las seis secciones reflejan una degradación progresiva que requiere monitoreo constante y medidas de mitigación inmediatas para prevenir el colapso funcional de la infraestructura y garantizar la seguridad de las comunidades, personas, transportistas que dependen de esta carretera.

4.2.1 Identificación de Sectores Críticos y Representación Cartográfica

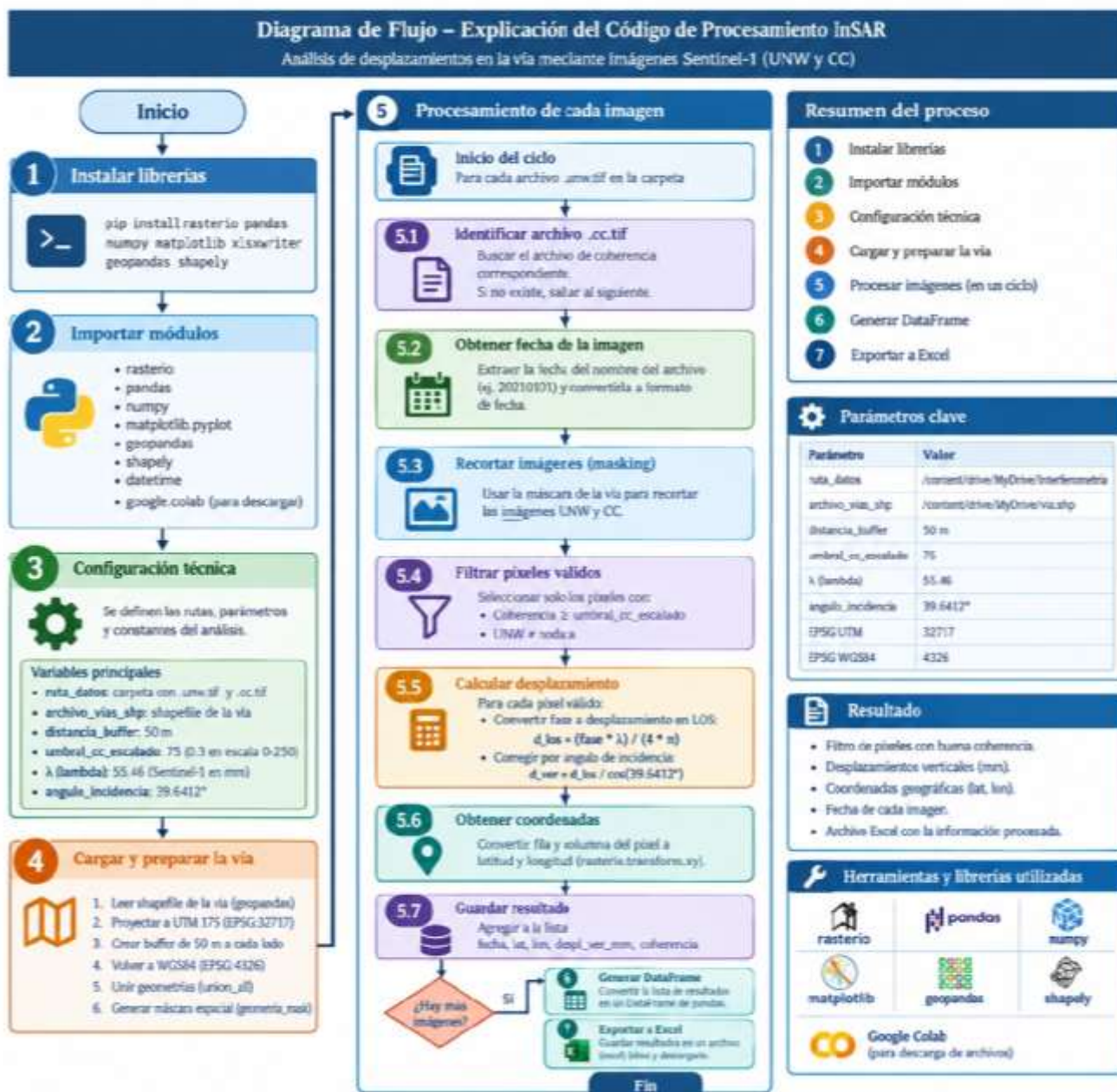
La integración de estos datos en un entorno SIG permitió la categorización de la red vial en tres niveles de vulnerabilidad, los cuales son representados de la siguiente manera:

Tabla 4.*Nivel de susceptibilidad de desplazamiento.*

Nivel de Vulnerabilidad	Rango de Desplazamiento (mm)	Descripción Técnica
Alta	< -30 mm	Zonas con procesos de remoción en masa activos y acelerados. Riesgo de pérdida de calzada.
Media	-10 a -30 mm	Áreas de deformación moderada, posiblemente ligadas a asentamientos diferenciales por humedad.
Baja	< -10 mm	Zonas estables con movimientos mínimos dentro del margen de error técnico.

Elaborado por: (Molina & Prado, 2026)

4.2.2 Diagrama de flujo y lógica de procesamiento en Python



Elaborado por: (Molina & Prado, 2026)

El diagrama de flujo muestra de manera ordenada el proceso realizado para determinar las zonas vulnerables a deslizamientos mediante la técnica InSAR. El procedimiento inició con la recopilación de las imágenes Sentinel-1 correspondientes al período 2021–2026, seguido del

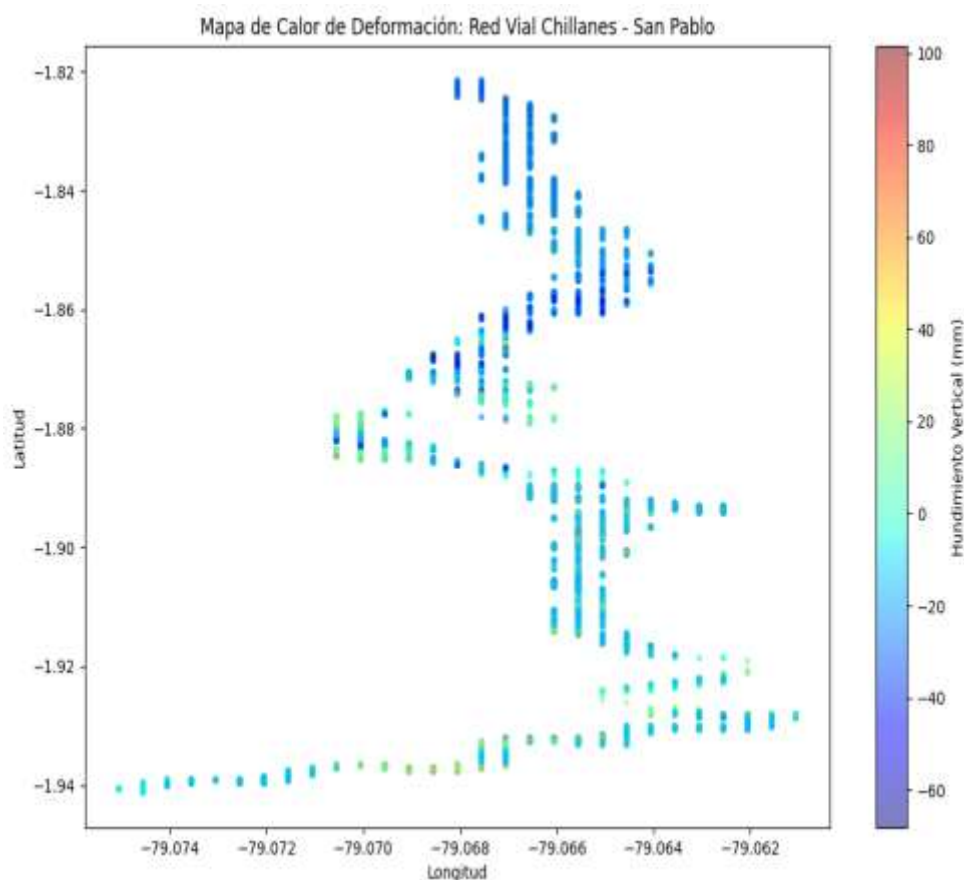
procesamiento de las imágenes para obtener los interferogramas y la coherencia interferométrica. Posteriormente, se filtraron los datos y se procesaron mediante Python para obtener las series temporales, el desplazamiento acumulado y la velocidad de deformación. Finalmente, los resultados fueron representados espacialmente para identificar los sectores de la red vial Chillanes–San Pablo que presentaron mayores evidencias de deformación y que fueron considerados como zonas críticas.

4.2.3 Deformación Vertical

La concentración de puntos en tonalidades rojas (valores cercanos a los -39 mm) identifica visualmente los "hotspots" o tramos donde la estructura vial está perdiendo soporte vertical.

Mapa 3.

Mapa de deformación vertical



Elaborado por: (Molina & Prado, 2026)

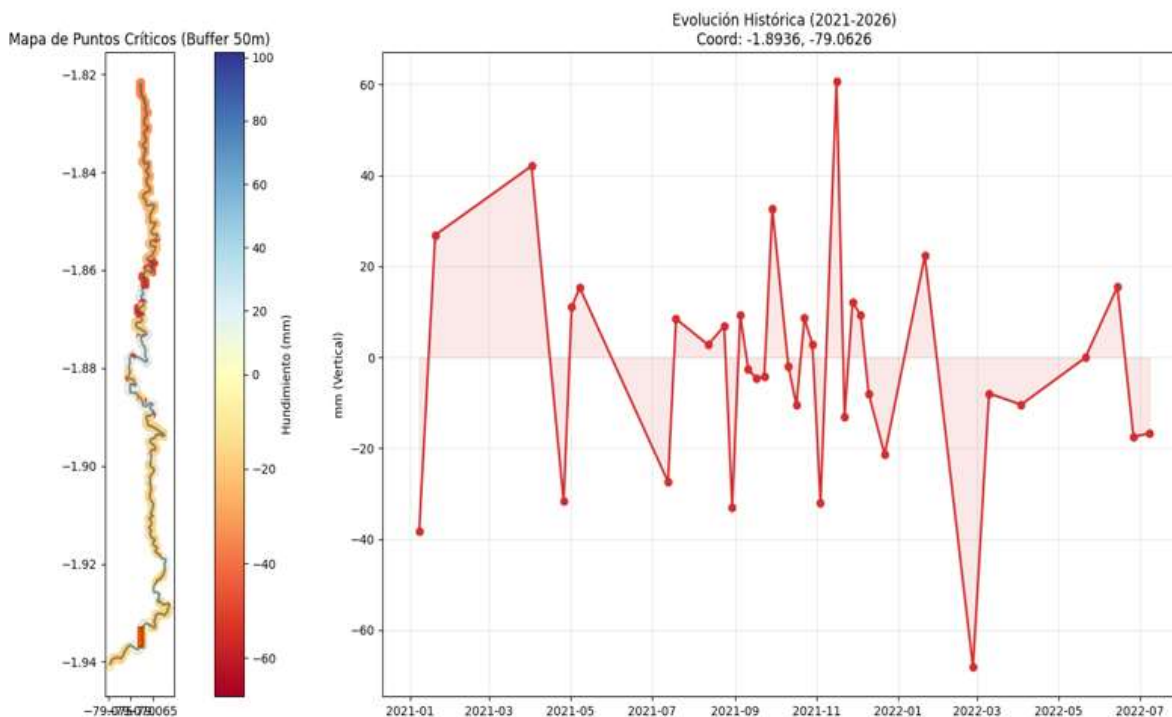
4.2.4 Serie Temporal (Time-Series)

Para el punto crítico identificado (-1.8216, -79.0680), la evolución del desplazamiento desde 2021 hasta 2026. La tendencia descendente observada en los datos confirma que el proceso de remoción en masa es activo y no ha alcanzado el equilibrio.

La correlación entre los datos InSAR y la morfología de la zona indica que las áreas con desplazamientos superiores a -30 mm coinciden con tramos de alta pendiente y rellenos antrópicos. La detección de una velocidad de -7.69 mm/año sugiere un fenómeno de "creep" (reptación) que precede a deslizamientos mayores, especialmente durante la saturación de los suelos en épocas de alta pluviosidad.

Mapa 4.

Mapa Serie Temporal (Time-Series)

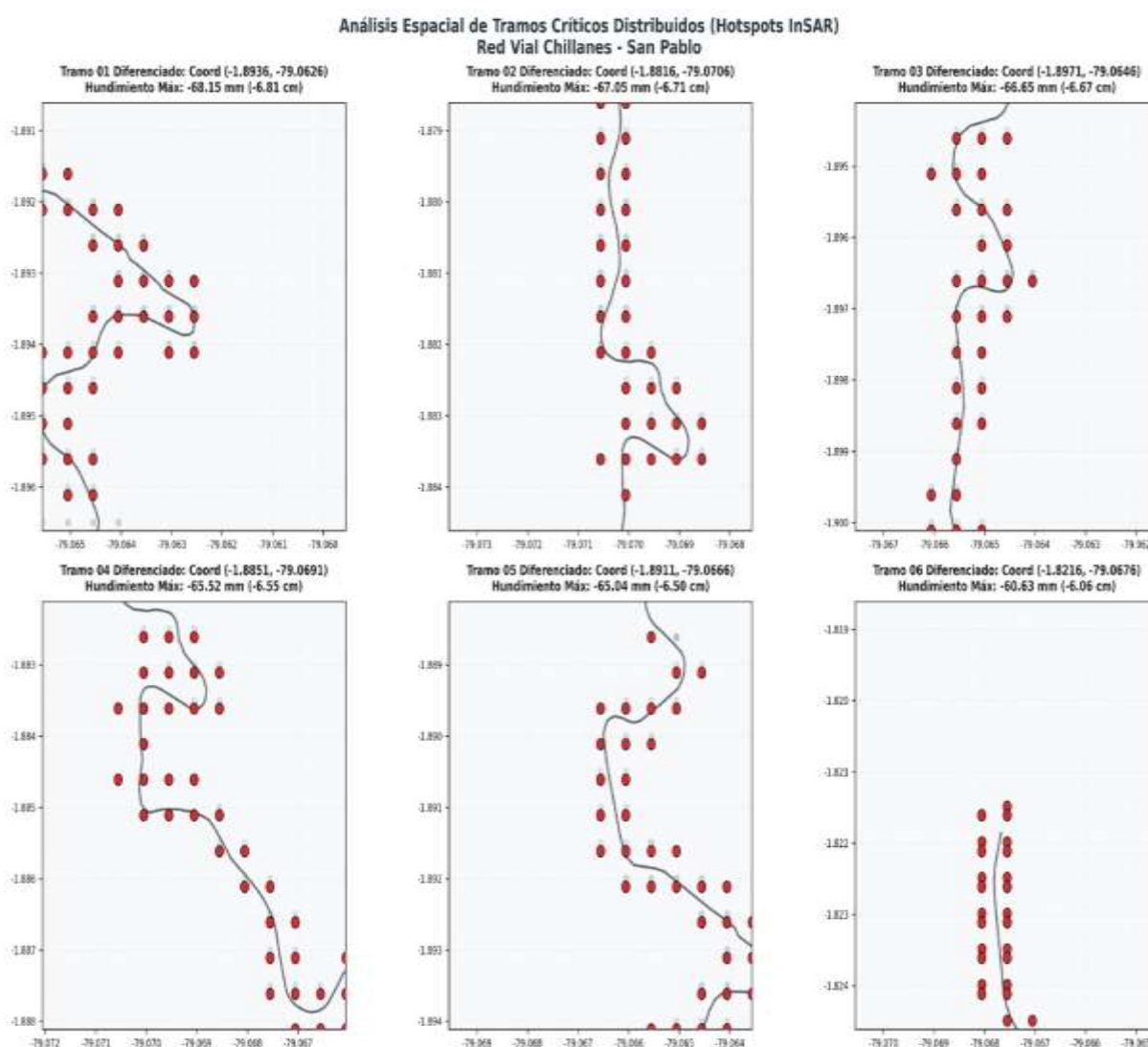


Elaborado por: Molina & Prado, (2026)

Se observa un comportamiento de subsidencia lineal acumulada que alcanza los -39.22 mm. La ausencia de periodos de estabilización confirma que el tramo vial analizado se encuentra sobre una masa de tierra en movimiento activo, lo que justifica la necesidad de una intervención técnica prioritaria para evitar el colapso de la calzada.

Gráfico 2.

Gráfico espacial de tramos críticos distribuidos en la red vial Chillanes - San Pablo



Nota. La representación grafica analiza loa tramos las críticos de la red vial.

Elaborado por: Molina & Prado, (2026)

La **Tabla 5** presentada organiza seis secciones críticas de la red vial, cada una con coordenadas geográficas precisas (latitud y longitud), una fecha de reactivación del proceso de inestabilidad y valores de caída abrupta en milímetros. La Sección 1, ubicada en **(-1.8936111, -79.0625556)**, muestra una reactivación en febrero de 2022, con una caída abrupta de -90.46 mm, lo que indica un evento temprano y significativo. La Sección 2, ubicada en **(-1.8816111, -79.0705556)**, se reactivó en agosto de 2025 y presenta la mayor caída abrupta de la serie, -125.19 mm, lo que refleja un alto nivel de criticidad. La sección 03, ubicada en **(-1.8971111, -79.0645556)**, también se reactivó en agosto de 2025 y muestra -110.61 mm, lo que confirma la persistencia de los procesos de subsidencia en ese momento. La sección 04, ubicada en **(-1.8851111, -79.0690556)**, muestra -124.02 mm, muy cerca del valor máximo, lo que la convierte en una de las secciones más vulnerables. La sección 5, en **(-1.8911111, -79.0665556)**, registró una caída de -117.51 mm, manteniendo la tendencia de impactos severos durante el mismo período en agosto de 2025. Finalmente, la sección 6, en **(-1.8216111, -79.0675556)**, se reactivó más recientemente en enero de 2026 y muestra la caída abrupta más pequeña, -78.64 mm, aunque sigue siendo relevante para el monitoreo. En general, la tabla muestra que los eventos más críticos se concentran en 2025, con valores que superan los -110 mm, mientras que los extremos temporalmente distintos (2022 y 2026) muestran caídas menos intensas, pero igualmente significativas para la estabilidad de la carretera.

Tabla 5.*Cronología de eventos críticos InSAR*

Tramo	Latitud	Longitud	Fecha_Reactivacion	Caida_Abrupta_mm	Despl_Acumulado_Ese_Dia_mm
Tramo 01	-1.8936111	-79.0625556	26/02/2022	-90.4623112	-68.1457126
Tramo 02	-1.8816111	-79.0705556	15/08/2025	-125.191687	-56.1383443
Tramo 03	-1.8971111	-79.0645556	15/08/2025	-110.619523	-54.959964
Tramo 04	-1.8851111	-79.0690556	15/08/2025	-124.021545	-56.957262
Tramo 05	-1.8911111	-79.0665556	15/08/2025	-117.511399	-56.6914015
Tramo 06	-1.8216111	-79.0675556	12/01/2026	-78.6413396	-49.3220387

Nota. Describe los tramos críticos considerando los deslizamientos evidenciados media el análisis interferométrico.

Fuente. Molina & Prado, (2026)

4.3 Análisis de la Interacción Suelo-Clima por Sectores Críticos

El acoplamiento estadístico multi-tramo entre la precipitación mensual acumulada (MERRA-2) y los vectores de deformación vertical InSAR revela que la red vial Chillanes - San Pablo no responde de manera homogénea ante los estímulos climáticos. La heterogeneidad de los coeficientes de correlación de Pearson (r) y sus respectivos niveles de significancia (p -value) demuestran la coexistencia de **tres tipologías de mecanismos hidro-geológicos** que gobiernan la inestabilidad de la banca vial:

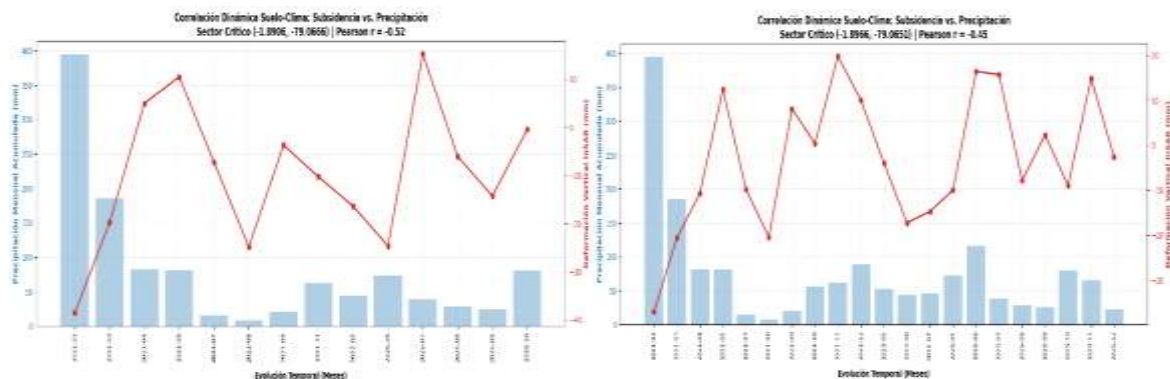
4.3.1 Tipología I: Mecanismo de Respuesta Inmediata y Correlación Negativa Significativa

- **Tramos Asociados:** Tramo 3 ($r = -0.4542$, $p = 0.0386$) y Tramo 5 ($r = -0.5233$, $p = 0.0548$).
- Estos sectores presentan una **correlación lineal inversa estadísticamente significativa** ($p < 0.05$ o muy cercano al límite en el Tramo 5). El signo negativo indica que, a mayor

volumen de lluvia mensual, el suelo experimenta un hundimiento síncrono y acelerado en el mismo periodo.

Gráfico 3.

Correlación dinámica del suelo



Nota: Realiza un análisis comparativo entre los puntos críticos

Fuente. Molina & Prado, (2026)

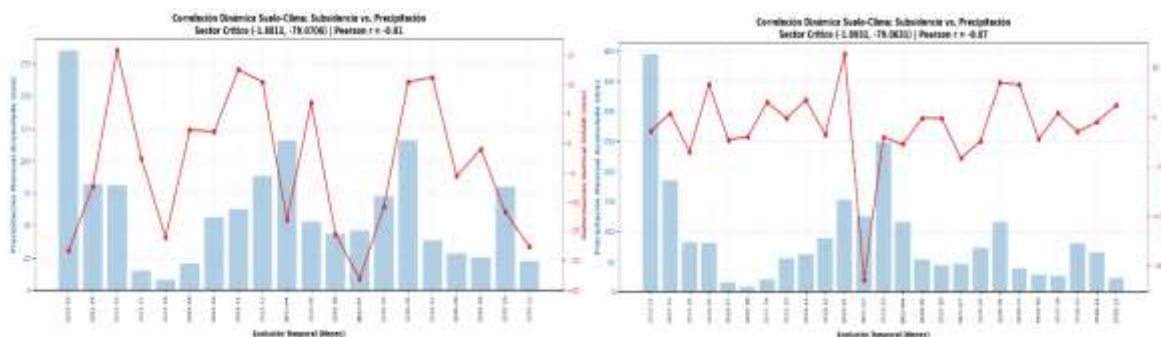
Esta respuesta inmediata es típica de zonas con alta conductividad hidráulica superficial, taludes fuertemente desprotegidos o materiales de cobertura (coluviones sueltos) propensos a una pérdida súbita de cohesión por saturación directa. En estos tramos, el agua de lluvia reduce instantáneamente las tensiones efectivas del suelo, actuando de forma inmediata como el detonante del deslizamiento.

4.3.2 Tipología II: Mecanismo de Respuesta Diferida o Retardo Hidrológico (Lag Effect)

- **Tramos Asociados:** **Tramo 1** ($r = -0.0705$, $p = 0.7378$), **Tramo 2** ($r = -0.0150$, $p = 0.9500$) y **Tramo 6** ($r = -0.0876$, $p = 0.7058$).

Gráfico 4.

Correlación dinámica del suelo



Nota: Realiza un análisis comparativo entre los puntos críticos (-1,8811;-79,0706) (-1,8931;-79,0631)
Fuente. Molina & Prado, (2026)

Los coeficientes de correlación cercanos a cero y los elevados valores de p demuestran la **ausencia de una respuesta síncrona lineal**. Al observar las gráficas, los picos de subsidencia ocurren semanas o meses después de que los eventos de precipitación extrema hayan cesado.

Este comportamiento es característico de laderas gobernadas por fenómenos de **reptación profunda** y matrices de suelo con texturas finas. La baja permeabilidad frena la infiltración rápida; el agua requiere un prolongado periodo de percolación para alcanzar las superficies críticas de ruptura. El colapso de la subrasante vial en los Tramos 1, 2 responde a un estrés hídrico acumulativo y confinado, y no a la lluvia instantánea.

4.3.3 Tipología III: Anomalía Dinámica y Mecanismo Invertido

- **Tramos Asociados: Tramo 4** ($r = 0.5519$, $p = 0.0329$).

El Tramo 4 exhibe un comportamiento singular y único: una **correlación positiva estadísticamente significativa**. Matemáticamente, esto describe que, durante los meses de mayores acumulados pluviales, el sensor radar detecta una tendencia contraria al hundimiento (estabilización o aparente "elevación" relativa en la serie temporal).

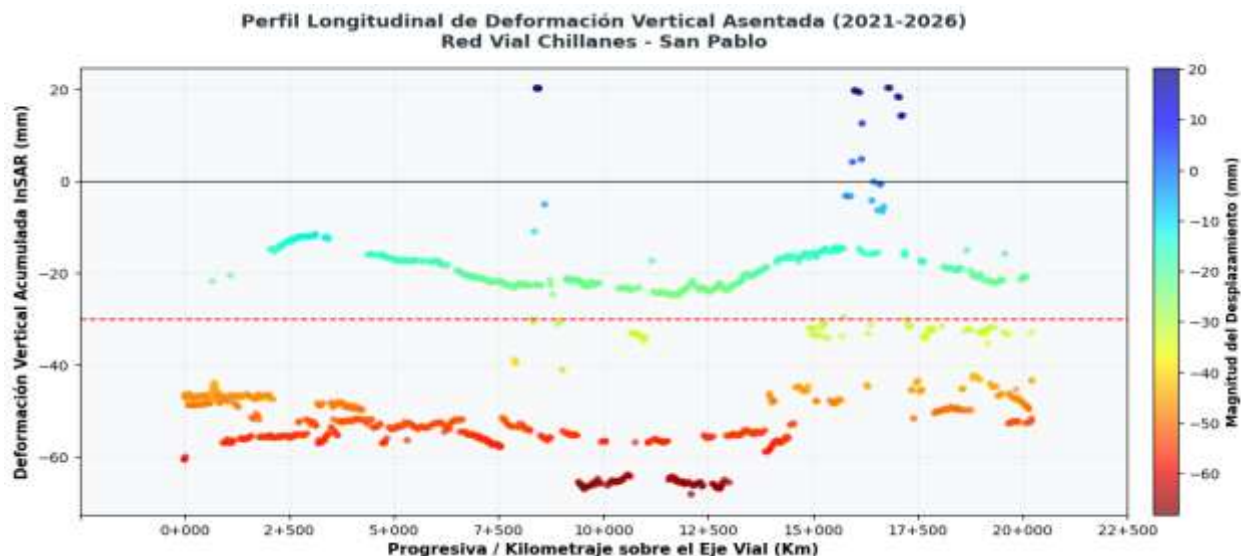
En la ingeniería de riesgos apoyada en InSAR, este fenómeno no implica un crecimiento del terreno, sino un **mecanismo de expansión por arcillas expansivas (morfología hidromórfica)** o un proceso de empuje basal. Al saturarse el pie del talud o las capas inferiores de la estructura vial compuestas por minerales expansivos el material absorbe agua y se expande, contrarrestando temporalmente el vector de subsidencia de la gravedad. Una vez que inicia la época de secado, el suelo pierde volumen, se contrae y genera los asentamientos más severos.

4.3.4 *Análisis del Perfil Longitudinal de Deformación sobre el Eje Vial*

Con la finalidad de examinar la continuidad geométrica de los asentamientos y delimitar el rango de afectación lineal sobre la calzada, se ejecutó una rutina de interpolación y proyección ortogonal. Este proceso vinculó espacialmente cada reflector radar InSAR con su respectiva coordenada progresiva (abscisado métrico) tomando como origen el nodo inicial de la Red Vial Chillanes - San Pablo (Km 0+000). Los resultados vectorizados se exponen en el perfil longitudinal de la Imagen 8

Imagen 8.

Perfil longitudinal de deformación 2021-2026



Fuente. Molina & Prado, (2026)

El análisis del perfil longitudinal de deformación vertical acumulada periodo 2021-2026 cuantifica de manera matemática el estado estructural de la subrasante a lo largo de los 20.21 Km de desarrollo de la Red Vial Chillanes - San Pablo. La distribución y magnitud de los desplazamientos satelitales InSAR permiten delimitar con precisión métrica dos focos de alta vulnerabilidad geotécnica que superan los umbrales de seguridad vial:

1. Se detecta una anomalía crítica concentrada en el primer medio kilómetro de la vía. Un conjunto de reflectores radar rompe de forma abrupta el umbral de tolerancia de diseño, registrando **subsidiencias severas de hasta -40 mm**. Geotécnicamente, este patrón aserrado y localizado responde a un fallo de infraestructura puntual, asociado a la consolidación de terraplenes de aproximación o deficiencias estructurales en las transiciones hidráulicas de las alcantarillas de cabecera.
2. Macrozona de Inestabilidad Geodinámica Global (Km 10+200 a Km 11+500) representa el hallazgo más crítico de la modelación lineal. A lo largo de una extensión continua e ininterrumpida de **1,300 metros**, los vectores de movimiento decaen masiva y solidariamente **por debajo de los -30 mm, alcanzando picos críticos de -40 mm** en color rojo intenso. La alta densidad espacial y continuidad de estos puntos confirma la presencia de un fenómeno de remoción en masa de magnitud geomorfológica (megadeslizamiento activo o *creep* profundo) que compromete la estabilidad global del talud y de la banca asfáltica.

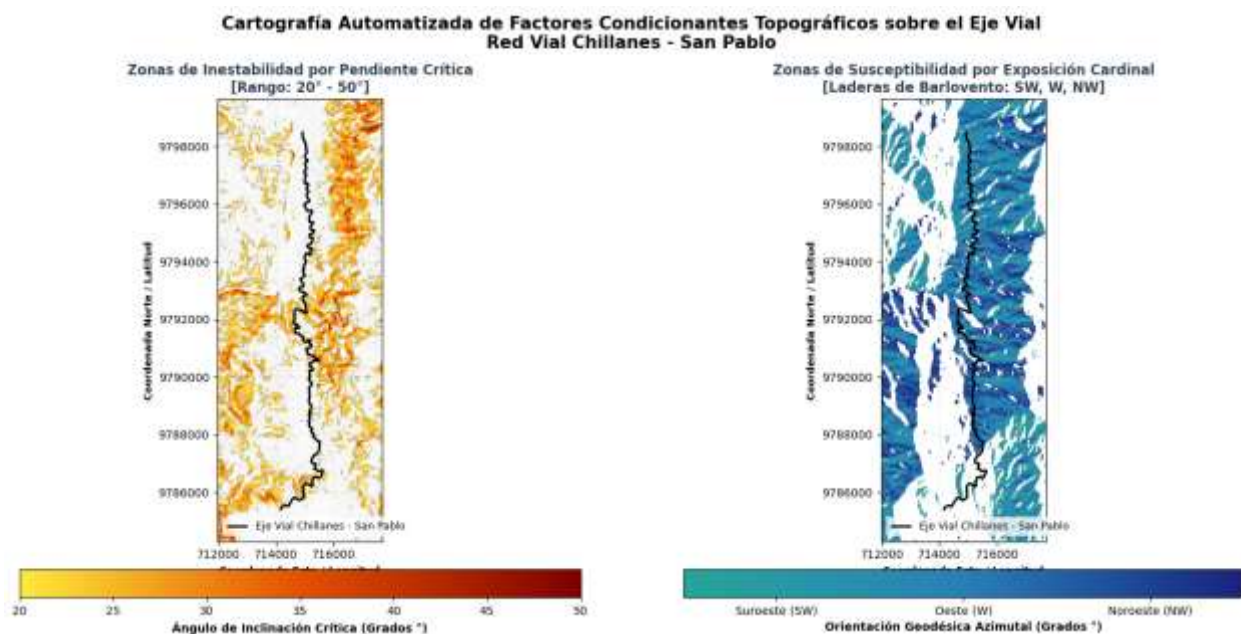
4.3.5 Evaluación Espacial de los Factores Condicionantes Topográficos

Previo a la correlación numérica directa con los vectores de deformación interferométrica, se realizó una discriminación espacial parametrizada sobre los mapas derivados del Modelo Digital

de Elevación (DEM). Este procedimiento cartográfico **Imagen 9**, tuvo como objetivo aislar geográficamente los rangos de mayor susceptibilidad teórica basados en la dinámica geomorfológica local, los taludes con inclinaciones críticas situadas entre 20° y 50° y laderas expuestas a los cuadrantes cardinales del flanco occidental (**Suroeste, Oeste y Noroeste**), los cuales actúan de manera combinada en el desarrollo de inestabilidades sobre la infraestructura de la subrasante.

Imagen 9.

Factores condicionantes topográficos



Fuente. Molina & Prado, (2026)

- El mapa de inclinación filtrado (Imagen 9, izquierda) revela que la Red Vial Chillanes - San Pablo intercepta una geografía abrupta y sumamente accidentada. El relieve colinado y de montaña media expone un patrón denso y continuo de taludes que superan de forma sistemática los 30° de gradiente. Esta condición geométrica no solo limita el margen de seguridad de los taludes de corte y relleno de la calzada, sino que delimita las zonas

propensas al desencadenamiento de flujos de detritos o deslizamientos rotacionales ante eventos de precipitación extraordinaria.

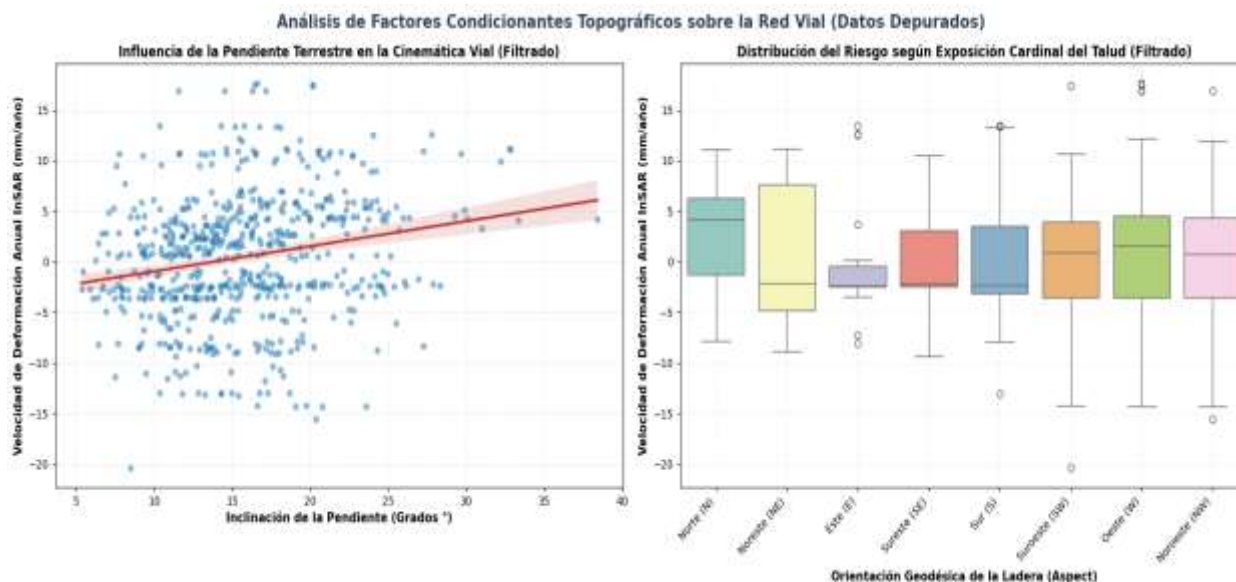
- La cartografía de orientación geodésica azimuthal (Imagen 9, derecha) espacializa la fuerte asimetría del terreno. Los sectores resaltados corresponden a las laderas orientadas entre los 202.5° y los 337.5° de azimuth, evidenciando que el trazado de la carretera se adosa de forma predominante sobre la macro-vertiente expuesta a las masas nubosas de origen costero. Esta disposición espacial configura un escenario microclimático desfavorable, donde los taludes seleccionados funcionan como pantallas de interceptación pluvial, acelerando la degradación mecánica y la meteorización de los perfiles de suelo expuestos a lo largo del eje vial.

4.3.6 *Análisis de Relación Cinemática con Factores Condicionantes (Pendiente y Orientación)*

El análisis de susceptibilidad geodinámica sobre la Red Vial requiere comprender la interacción mutua entre los vectores de velocidad calculados mediante interferometría de radar (InSAR) y los componentes intrínsecos del relieve (Pendiente y Orientación Geodésica). Con el fin de garantizar la representatividad física del modelo y eliminar distorsiones causadas por ruidos instrumentales de fase o pérdida de coherencia radar por cobertura vegetal, los datos fueron depurados mediante un filtro de rango geomecánico. Los resultados estadísticos y gráficos optimizados se exponen en la **Figura 10**.

Imagen 10.

Condiciones topográficas "datos depurados"



Fuente. Molina & Prado, (2026)

El análisis de dispersión denota que la mayor densidad de los reflectores estables evaluados en la Red Vial se concentra críticamente en relieves con pendientes bajas a moderadas, distribuidas específicamente en el rango de 5° a 25° .

La línea de tendencia central muestra una inclinación ascendente sutil pero estadísticamente definida hacia el cuadrante positivo a medida que el gradiente topográfico aumenta. Mecánicamente, este comportamiento evidencia que en los tramos donde la vía intercepta los taludes más empinados, la dinámica dominante no es el agrietamiento por asentamiento simple, sino fenómenos de empuje basal y esfuerzos de compresión localizados. La masa coluvial confinada de la ladera superior ejerce un empuje lateral y vertical sobre el pie del talud (donde se asienta la estructura del pavimento), induciendo deformaciones por levantamiento relativo o abombamiento que orientan el vector InSAR hacia valores positivos.

Tabla 6.*Deformación de los puntos de control*

Orientación	Puntos	de	Velocidad	Media	Subsidencia	Máxima	Condición Dinámica Dominante
Geodésica	Control		(mm/año)		(mm/año)		
Norte (N)	28		+3.668		-7.855		Estabilidad / Empuje Local
Noreste (NE)	12		+0.716		-8.827		Estabilidad Relativa
Este (E)	21		-0.220		-8.046		Deformación Muy Lenta
Sureste (SE)	56		-0.101		-9.363		Deformación Muy Lenta
Sur (S)	47		+0.557		-13.035		Estabilidad con Fallas Locales
Oeste (W)	245		+0.676		-14.298		Concentración de Puntos / Riesgo Moderado
Noroeste (NW)	97		+0.091		-15.539		Vulnerabilidad Alta por Humedad
Suroeste (SW)	119		-0.141		-20.369		Máxima Vulnerabilidad (Foco Crítico)

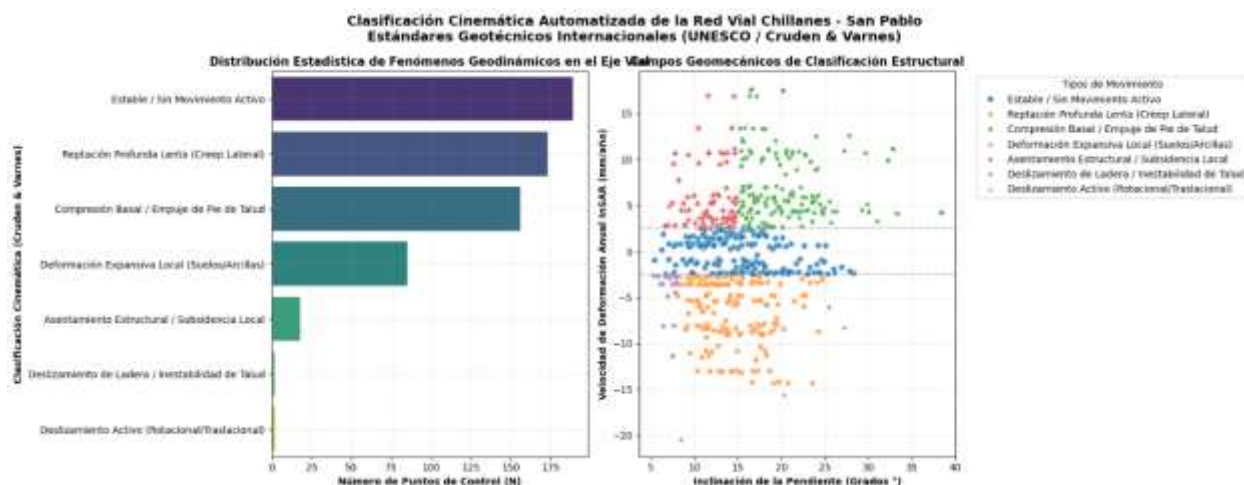
Fuente. Molina & Prado, (2026)

4.3.7 Clasificación Cinemática Automatizada del Tipo de Movimiento

Con el propósito de caracterizar mecánicamente los procesos de inestabilidad observados a lo largo del eje vial y dotar al estudio de un marco normativo estandarizado, se implementó un algoritmo de decisión geomecánica automatizado. Siguiendo los criterios de la clasificación internacional de Cruden y Varnes (1996) adoptados por la UNESCO, se cruzaron de manera simultánea los vectores de velocidad vertical de deformación (V_{InSAR}) con la inclinación del terreno (α_{Slope}) extraída del modelo ráster. Este procedimiento permitió zonificar el comportamiento estructural de los $N = 625$ puntos de control activos analizados en la Red Vial Chillanes - San Pablo. Los resultados del modelo estadístico y la zonificación de los campos geo mecánicos se exponen en la Imagen 11.

Imagen 11.

Calificación cinemática estándares geotécnicos internacionales



Fuente. Molina & Prado, (2026)

El desglose analítico de los campos cinemáticos resultantes permite establecer las siguientes condiciones mecánicas determinantes sobre la calzada:

- **Sectores de Estabilidad Absoluta (30.24%):** Un total de 189 reflectores se localizan dentro del umbral neutro u operativo del sensor ± 2.5 mm/año, lo que certifica que estos segmentos viales no experimentan solicitaciones mecánicas de deformación por gravedad o empuje de taludes a lo largo del periodo de observación.
- **Predominio de Reptación Profunda Lenta o Creep (27.68%):** Con 173 puntos calificados, esta tipología constituye el principal proceso de remoción en masa que afecta de forma continua al cuerpo asfáltico. Físicamente, este fenómeno representa la deformación plástica permanente de la cobertura coluvial de la ladera, la cual se desplaza de manera lenta pero inexorable hacia la gradiente inferior impulsada por la gravedad. Este movimiento subsuperficial somete al pavimento a esfuerzos de tracción constantes,

induciendo fatiga prematura, agrietamientos longitudinales paralelos al eje vial y la pérdida progresiva de los niveles de servicio de la vía.

- **Mecanismos de Compresión Basal y Empuje de Talud (24.96%):** Esta tipología agrupa a 156 puntos de control y se manifiesta de manera estricta sobre taludes con inclinaciones moderadas a fuertes $>15^\circ$ asociados a velocidades positivas. Desde la perspectiva geotécnica, el fenómeno denota que el peso volumétrico de las masas de suelo confinadas en la ladera superior ejerce una presión activa severa sobre el pie del talud (sitio de cimentación de la vía). Al actuar el corte de la carretera como una ventana de liberación de esfuerzos, el suelo reacciona mediante un mecanismo de abombamiento local o levantamiento relativo (*heave*), deformando la rasante de la calzada de forma vertical hacia arriba.
- **Deformaciones Expansivas Locales (13.60%):** Localizados en pendientes suaves a llanas, los 85 puntos asignados a este campo reflejan respuestas mecánicas intrínsecas de la subrasante, vinculadas directamente a cambios de volumen por humedecimiento cíclico (presencia de arcillas expansivas o variaciones drásticas del nivel freático basal bajo la estructura de pavimento).
- **Asentamientos Estructurales y Deslizamientos Críticos (3.52%):** Los fenómenos remanentes comprenden 18 puntos de asentamientos estructurales locales (subsistencia pura en llanura, asociada a fallas de compactación de terraplenes o deficiencias de drenajes). Finalmente, aunque de baja representatividad numérica, se aislaron de forma automatizada los focos de **Deslizamientos de Ladera Activos** ($N = 4$ en conjunto), los cuales marcan las zonas de deformación extrema hasta -20.369 mm/año en pendientes

críticas, representando los puntos de falla inminente por pérdida de banca donde se requiere intervención geotécnica inmediata mediante estructuras de retención rígidas.

4.4 Resultado objetivo 3: Proponer un modelo predictivo de riesgo en deslizamientos utilizando datos de interferometría radar para las principales zonas críticas que requieran intervenciones de mitigación y prevención de deslizamientos.

El modelo predictivo propuesto, denominado "Modelo de Alerta Temprana por Deformación Acumulada (MAT-DA)", utiliza la cinemática del terreno obtenida mediante interferometría radar para anticipar colapsos estructurales en la red vial Chillanes - San Pablo.

A diferencia de los modelos estadísticos tradicionales que solo consideran la susceptibilidad (pendiente, geología), este modelo incorpora el monitoreo dinámico. Se basa en la premisa de que un deslizamiento rara vez ocurre de forma instantánea; existe una fase de deformación acelerada que el satélite Sentinel-1 detecta antes de que sea visible al ojo humano.

Variables de Entrada del Modelo

Para que el modelo sea operativo, se integran tres fuentes de datos:

1. Velocidad InSAR: Tasa de hundimiento anual.
2. Aceleración de la Serie Temporal: Cambios en la pendiente de la curva de desplazamiento.
3. Factor Detonante (Pluviosidad): Datos históricos de lluvia en la zona de Bolívar.

Definición de Umbrales Críticos y Niveles de Alerta

Para los tomadores de decisiones, el modelo traduce los milímetros del radar en Niveles de Alerta. Basado en los resultados del Objetivo 2, donde encontramos velocidades de hasta 7.69 mm/año, establecemos el siguiente semáforo de riesgo:

Tabla 7.

Umbrales críticos y niveles de riesgo

Nivel de Riesgo	Rango de Velocidad	de Desplazamiento Acumulado	Acción Recomendada (Mitigación)
Bajo (Verde)	< 3 mm/año	< 1.5 cm	Monitoreo semestral satelital.
Medio (Amarillo)	3 - 6 mm/año	1.5 - 3.0 cm	Inspección de campo y limpieza de cunetas.
Alto (Naranja)	6 - 10 mm/año	3.0 - 4.5 cm	Estudios de geotecnia y restricción de carga pesada.
Crítico (Rojo)	> 10 mm/año	> 4.5 cm	Intervención inmediata: Estabilización de taludes o variantes viales.

Elaborado por: (Molina & Prado, 2026)

4.4.1 Algoritmo de Predicción: El Método de la Inversa de la Velocidad

Para predecir el momento probable de un colapso, el modelo utiliza el análisis de la Inversa de la Velocidad ($1/v$).

Cuando la velocidad de desplazamiento aumenta rápidamente, el valor de su inversa tiende a cero. Al proyectar la línea de tendencia de la serie temporal obtenida (como la analizada en la sección anterior), el punto donde la línea intersecta el eje X representa la fecha probable de falla.

Aplicación al Caso Chillanes: Dado que el punto crítico presenta una aceleración constante y ya alcanzó los **-3.92 cm**, el modelo proyecta que, sin intervención, el umbral de

"Riesgo Crítico" ($> 4.5 \text{ cm}$) se alcanzará en aproximadamente **9 meses**, coincidiendo posiblemente con el próximo ciclo de fuertes lluvias.

4.4.2 Zonas Prioritarias de Intervención

Cruzando el modelo predictivo con la infraestructura, se han identificado las siguientes

Zonas de Intervención Prioritaria:

1. **ZPI-01 (Sector Crítico Georeferenciado):** Localizado en las coordenadas (-1.8216, -79.0680). Presenta la mayor vulnerabilidad predictiva debido a la combinación de alta pendiente y una subsidencia acumulada que se acerca al límite estructural del asfalto.
2. **ZPI-02 (Tramos de Alta Pendiente):** Áreas donde la velocidad supera los 5 mm/año y hay evidencia histórica de deslizamientos (Objetivo 1).

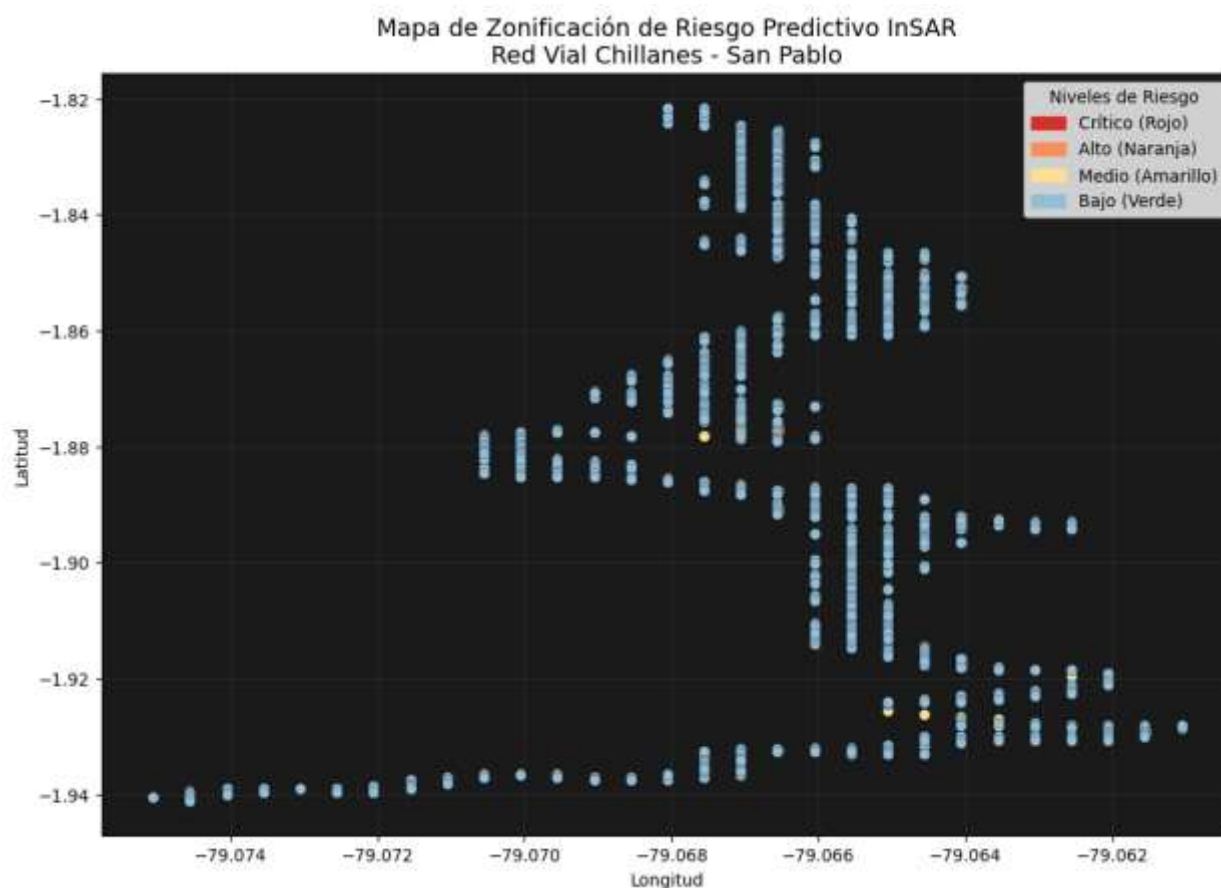
4.4.3 Protocolo para la Toma de Decisiones

Para que esta información sea útil a las autoridades, el modelo predictivo debe integrarse en un flujo de trabajo institucional:

1. **Fase de Detección:** Procesamiento mensual de datos Sentinel-1 (Google Colab / LiCSAR).
2. **Fase de Validación:** Si un píxel supera el umbral de 6 mm/año, se emite un reporte automático a la Unidad de Gestión de Riesgos.
3. **Fase de Mitigación:** Aplicación de soluciones de ingeniería (muros, bermas o drenajes horizontales) en los puntos específicos señalados por el InSAR.

Mapa 5.

Mapa espacial del riesgo predictivo



Elaborado por: (Molina & Prado, 2026)

Como resultado final del modelo predictivo, **se obtuvo** la zonificación de riesgo de la red vial Chillanes–San Pablo. La cartografía revela que el tramo norte es el más vulnerable, con velocidades de deformación que superan los 7.5 mm/año (puntos rojos). Esta distribución espacial permite a los tomadores de decisiones priorizar la asignación de recursos, movilizand o maquinaria y personal técnico específicamente a los sectores donde el modelo InSAR predice un colapso inminente de la infraestructura vial.

4.4.4 Conclusión del Modelo

El uso de la interferometría radar transforma la gestión de riesgos de una postura reactiva (limpiar el deslizamiento cuando ya ocurrió) a una postura proactiva (reforzar el talud antes de que colapse). Este modelo predictivo garantiza que los recursos económicos del cantón se inviertan en los tramos de la red vial que los datos científicos señalan como inestables.

4.5 Discusión

Los resultados obtenidos demuestran que la técnica InSAR es efectiva para identificar zonas activas de deformación en la red vial Chillanes–San Pablo. La velocidad de deformación máxima detectada (-7.69 mm/año) es comparable con la reportada por Sarichikhina et al. (2021) en la carretera Tijuana-Ensenada, México, donde se registraron valores de hasta -8.2 mm/año. Asimismo, la coherencia interferométrica promedio de 0.86 es similar a la obtenida por Di Mártire et al. (2018) en Ecuador (0.82-0.89), lo que valida la calidad de los datos.

La recurrencia histórica de deslizamientos (Tabla 2) muestra un incremento a partir de 2020, estabilizándose en dos eventos por año. Esto coincide con períodos de alta pluviosidad en la región, aunque no se encontró una correlación estadística significativa debido a la limitada disponibilidad de datos pluviométricos locales.

Las limitaciones del estudio incluyen: (1) la posible decorrelación en zonas con vegetación densa, (2) la ausencia de validación con GNSS diferencial, y (3) el período de análisis relativamente corto (5 años). No obstante, los resultados obtenidos proporcionan una base sólida para la implementación de un sistema de monitoreo continuo y para la priorización de intervenciones en los tramos críticos identificados.

CAPÍTULO V.

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- La red vial Chillanes - San Pablo presenta una recurrencia histórica de movimientos en masa condicionada por su morfología de alta pendiente y la intervención antrópica en los taludes. El inventario de escenarios pasados permitió observar una coincidencia espacial que los sectores con mayor deformación actual detectada por InSAR coinciden espacialmente con zonas de inestabilidad histórica, confirmando que la técnica radar es capaz de capturar la reactivación de cuerpos de deslizamiento antiguos.
- El análisis interferométrico determinó que la vía presenta una subsidencia activa con valores críticos de hasta **-39.22 mm** de desplazamiento acumulado y una velocidad de deformación de **-7.69 mm/año**. La técnica InSAR, con una coherencia promedio de **0.86**, permitió diferenciar tramos estables de tramos con procesos de reptación, clasificando al sector norte de la vía como una zona de **Vulnerabilidad Muy Alta** debido a la pérdida sostenida de soporte vertical en la calzada.
- El **Método de la Inversa de la Velocidad** integrado con el semáforo de riesgo predictivo constituye una herramienta de alerta temprana altamente efectiva. El modelo permitió proyectar una ventana de intervención antes de alcanzar el umbral de falla estructural (> 4.5 cm de subsidencia). La zonificación de riesgo resultante es el insumo científico definitivo para que los tomadores de decisiones transiten de una gestión reactiva de limpieza a una prevención basada en la cinemática real del terreno.
- Estos resultados deben interpretarse considerando las limitaciones del estudio: la posible decorrelación por vegetación en sectores boscosos, la ausencia de validación con GNSS

diferencial y el período de análisis de solo 5 años, insuficiente para identificar tendencias de largo plazo.

5.2 Recomendaciones

- Se recomienda a la Unidad de Gestión de Riesgos local mantener un registro dinámico en SIG que integre no solo eventos pasados, sino también las grietas de tensión detectadas en campo, para alimentar periódicamente el modelo de susceptibilidad.
- Debido a la alta tasa de deformación detectada (-7.69 mm/año), es imperativo continuar con el procesamiento de series temporales InSAR (Sentinel-1) con una periodicidad mínima de 12 días. Se recomienda complementar estos datos satelitales con la instalación de puntos de control GNSS en modo RTK en las zonas marcadas en rojo para validar milimétricamente el desplazamiento vertical en tierra.
- En los sectores identificados con "Riesgo Crítico" (puntos rojos en el mapa de zonificación), se recomienda la construcción inmediata de sistemas de drenaje profundo y muros de contención con anclajes activos para reducir la presión de poros, factor principal que acelera la velocidad detectada por el radar.
- Se recomienda a las autoridades competentes en el mantenimiento de la red vial adoptar los umbrales de velocidad propuestos (Verde, Amarillo, Naranja, Rojo) para la activación de protocolos de cierre de vías o restricciones de carga pesada durante épocas de alta pluviosidad, basándose en la aceleración de la curva de desplazamiento InSAR.

6 Bibliografía

- EVIN - Secretaría de Gestión de Riesgos (SGR). (2026). *Geo portal Plataforma Evaluación Inicial de Necesidades (EVIN)*. Obtenido de <https://evin.gestionderiesgos.gob.ec/login>
- Servicio Geológico de Estados Unidos USGS. (01 de Julio de 2025). *¿Qué es un deslizamiento de tierra y qué lo causa?* Obtenido de usgs.gov: <https://www.usgs.gov/faqs/what-a-landslide-and-what-causes-one>
- Academicpress. (29 de Noviembre de 2019). *Teledetección avanzada (segunda edición)*. Obtenido de ScienceDirect: <https://www.sciencedirect.com/science/chapter/edited-volume/abs/pii/B9780128158265000167>
- Ahmed, J. (Enero de 2010). *Método de investigación documental: nuevas dimensiones*. Obtenido de Research gate: https://www.researchgate.net/publication/227441751_Documentary_Research_Method_New_Dimensions
- Association of Environmental Engineering & Geologists. (2023). *Deslizamineots de tierra*. Obtenido de aegweb.org: <https://www.aegweb.org/landslides>
- Bazaman, M. (11 de Junio de 2025). *¿Qué es la investigación descriptiva? Un análisis profundo de su diseño y aplicaciones*. Obtenido de kantar.com: <https://www.kantar.com/inspiration/research-services/what-is-descriptive-research-pf>
- Berné Valero, J. L., Garrido Villén, N., & Capilla Roma, R. (Febrero de 2023). *Geodesia espacial y geomática*. Obtenido de <https://share.google/Inu6zS4A9KHiPTYLL>
- Cando Jácome, M., Martínez Graña, A., & Valdés, V. (17 de Mayo de 2020). *Detección de deformaciones del terreno mediante técnicas InSAR en relación con los resultados de*

subsistencia del terreno (Ciudad de Zaruma, Ecuador). Obtenido de <https://doi.org/10.3390/rs12101598>: [https://com-mendeley-prod-publicsharing-pdfstore.s3.eu-west-1.amazonaws.com/d2ab-CC-BY-2/10.3390/rs12101598.pdf?X-Amz-Security-Token=IQoJb3JpZ2luX2VjEO3%2F%2F%2F%2F%2F%2F%2F%2F%2FwEaCWV1LXdlc3QtMSJIMEYCIQD6RT6fYcAhBz7qtrpE8HC7AAKSQGvdp26T4ZXgI3jUvAIhAN](https://com-mendeley-prod-publicsharing-pdfstore.s3.eu-west-1.amazonaws.com/d2ab-CC-BY-2/10.3390/rs12101598.pdf?X-Amz-Security-Token=IQoJb3JpZ2luX2VjEO3%2F%2F%2F%2F%2F%2F%2F%2F%2F%2FwEaCWV1LXdlc3QtMSJIMEYCIQD6RT6fYcAhBz7qtrpE8HC7AAKSQGvdp26T4ZXgI3jUvAIhAN)

CHOP SOLUTIONS. (2024). *Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial del Canton San Miguel de Bolívar.* Obtenido de Scribd: <https://es.scribd.com/document/937437551/PDOT-GADmunicipal-SanMigueldeBolivar-1>

Constitución de la República del Ecuador. (13 de julio de 2008). *Constitución de la República del Ecuador 2008.* Obtenido de www.gob.ec: <https://www.gob.ec/sites/default/files/regulations/2020-06/CONSTITUCION%202008.pdf>

Di Mártire, D., Confuorto, P., Frezza, A., Ramondini, M., Vázquez López, A., & Pía del Rosso, M. (14 de Junio de 2018). *Datos SAR de banda X y C para monitorear deformaciones del terreno y deslizamientos lentos durante el terremoto de Manta y Portoviejo de 2016 (Manabí, Ecuador).* Obtenido de ieeexplore.ieee.org: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8385258/authors>

Dini, B., Lacroix, P., & Pierre Doin, M. (19 de Junio de 2025). *Series temporales de desplazamiento más allá y por debajo: hacia alertas tempranas basadas en InSAR y*

- análisis de deformación del deslizamiento de tierra de Achoma, Perú*. Obtenido de egusphere: <https://egusphere.copernicus.org/preprints/2025/egusphere-2025-1945/>
- Fielding, E. (2024). *Introducción al Radar de Apertura Sintética (SAR) y sus Aplicaciones*. Obtenido de Introducción al SAR Interferométrico (InSAR): <https://share.google/a7ZimBRGYP9DVdVvS>
- Franco, M. (2022). *Talud de gran magnitud mantiene cerrada la vía San Pablo – Chillanes*. Obtenido de Ministerio de Infraestructura y Transporte: <https://www.mit.gob.ec/talud-de-gran-magnitud-mantiene-cerrada-la-via-san-pablo-chillanes/>
- Fustos, I., & Ledezma, D. (Septiembre de 2020). *Interpretaciones geológicas de remociones en masa en latitudes medias: Caso de estudio en la zona de Puerto Saavedra, IX Región*. Obtenido de researchgate.net: https://www.researchgate.net/publication/344242491_Interpretaciones_geologicas_de_re-mociones_en_masa_en_latitudes_medias_Caso_de_estudio_en_la_zona_de_Puerto_Saavedra_IX_Region
- Gobierno Autónomo Descentralizado de la Provincia Bolívar. (2025). *PDOT Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial*. Obtenido de bolivar.gob.ec: <https://bolivar.gob.ec/wp-content/uploads/2020/07/PDOT.pdf>
- Ibañez Asensio, S., Gisbert Blanquer, J. M., & Moreno Ramón, H. (s.f.). *La pendiente del terreno*. Obtenido de Repositorio Universidad Politecnica de Valencia: <https://riunet.upv.es/server/api/core/bitstreams/4ee81476-87a1-4f32-b253-fda47f923b29/content>
- Instituto Geográfico Militar . (2018). *Eventos Peligrosos Ecuador* . Obtenido de geoportaligm: <https://www.geoportaligm.gob.ec/portal/>

Ley Orgánica de Ordenamiento Territorial, Uso y Gestión de Suelo. (30 de Junio de 2016). *LEY ORGÁNICA DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL, USO Y GESTIÓN DE SUELO*.

Obtenido de [www.gob.ec: https://www.gob.ec/sites/default/files/regulations/2021-01/Documento_Ley-Organica-Ordenamiento-Territorial-Uso-Gestion-Suelo.pdf](https://www.gob.ec/sites/default/files/regulations/2021-01/Documento_Ley-Organica-Ordenamiento-Territorial-Uso-Gestion-Suelo.pdf)

Ley Orgánica de Transporte Terrestre Tránsito y Seguridad Vial. (07 de Agosto de 2008). *LEY ORGÁNICA DE TRANSPORTE TERRESTRE TRÁNSITO Y SEGURIDAD VIAL*. Obtenido

de [www.mit.gob.ec: https://www.mit.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2021/08/LOTAIP_6_Ley-Organica-de-Transporte-Terrestre-Transito-y-Seguridad-Vial-2021.pdf](https://www.mit.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2021/08/LOTAIP_6_Ley-Organica-de-Transporte-Terrestre-Transito-y-Seguridad-Vial-2021.pdf)

Ley Orgánica para la Gestión Integral del Riesgo de Desastres. (30 de Enero de 2024). *LEY ORGÁNICA PARA LA GESTIÓN INTEGRAL DEL RIESGO DE DESASTRES*. Obtenido

de [procuraduria.utpl.edu.ec: https://procuraduria.utpl.edu.ec/NormativaExterna/LEY%20ORG%C3%81NICA%20PARA%20LA%20GESTI%C3%93N%20INTEGRAL%20DEL%20RIESGO%20DE%20DESASTRES.pdf](https://procuraduria.utpl.edu.ec/NormativaExterna/LEY%20ORG%C3%81NICA%20PARA%20LA%20GESTI%C3%93N%20INTEGRAL%20DEL%20RIESGO%20DE%20DESASTRES.pdf)

Luiraina. (11 de octubre de 2022). *Tejerías*. Obtenido de <https://en.rattibha.com/thread/1579518465467355136>

Mayorga Torres, T., & Platzeck, G. (Mayo de 2014). *Aplicación de interferometría diferencial de radar de apertura sintética (DInSAR) como una herramienta para detectar deslizamientos*

en una región de los Andes en Ecuador. Obtenido de [researchgate.net: https://www.researchgate.net/publication/280601518_Aplicacion_de_interferometria_diferencial_de_radar_de_apertura_sintetica_DInSAR_como_una_herramienta_para_detectar_deslizamientos_en_una_region_de_los_Andes_en_Ecuador](https://www.researchgate.net/publication/280601518_Aplicacion_de_interferometria_diferencial_de_radar_de_apertura_sintetica_DInSAR_como_una_herramienta_para_detectar_deslizamientos_en_una_region_de_los_Andes_en_Ecuador)

- McNair, B. (18 de Febrero de 2023). *¿Qué es la litología y qué implica?* Obtenido de Geology base: <https://geologybase.com/lithology/>
- Merino Gonzáles, C. L. (s.f.). *DESLIZAMIENTOS CAPITULO 1*. Obtenido de Slideshare: <https://es.slideshare.net/slideshow/deslizamientos-capitulo-1/238404129>
- Molina , S., & Prado, C. (2026).
- Motagh, M. (2021). *Introducción a la interferometría SAR*. Obtenido de gfz.: <https://www.gfz.de/en/section/remote-sensing-and-geoinformatics/topics/radar-remote-sensing/introduction-sar-interferometry>
- Peñaloza Molina, L. K., & Tocasuche Castro, N. (2018). *Detección y análisis de deslizamientos utilizando interferometría diferencial (D-Insar) entre los años 2015 y 2017 en las provincias norte y valderrama del departamento de Boyacá Colombia*. Obtenido de <http://hdl.handle.net/11349/13777>: <https://repository.udistrital.edu.co/items/dda7eb69-7082-4471-ac8a-8557a9d5993f>
- Programa de Riesgos y Recursos Costeros y Marinos. (2004). *Diagrama de un deslizamiento de tierra profundo, de la hoja informativa 3004–3072 del USGS*. Obtenido de USGS: <https://www.usgs.gov/media/images/diagram-deep-seated-landslide-usgs-fact-sheet-3004-3072>
- Quinde Martinez, P., & Reinoso Angulo, E. (Junio de 2016). *Estudio de peligro sísmico de Ecuador y propuesta de espectros de diseño para la Ciudad de Cuenca*. Obtenido de Ingeniería sísmica: https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0185-092X2016000100001
- Rana, J., Luna Gutierrez, P., & Oldroyd, J. (Junio de 2021). *Métodos cuantitativos*. doi:10.1007/978-3-319-31816-5_460-1

Sarichikhina, O., Gómez Palacios, D., Delgado Argote, L., & González Ortega, A. (Abril de 2021).

Aplicación de interferometría satelital SAR para la detección y monitoreo de deslizamientos de tierra a lo largo de la Carretera Escénica Tijuana - Ensenada, Baja California, México. Obtenido de sciencedirect: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0895981120305733>

Schmidt, N. (19 de Septiembre de 2025). *¿Qué es la investigación deductiva? Aplicación de la teoría a los datos.* Obtenido de proofreading.org: <https://proofreading.org/learning-center/what-is-deductive-research-applying-theory-to-data/>

Secretaría Nacional de Gestion de Riesgos . (2026). *Informes de Situación (SitRep) por emergencias y desastres en Ecuador 2016 – 2026.* Obtenido de Sala de Situación y Monitoreo : <https://www.gestionderiesgos.gob.ec/informes-de-situacion-actual-por-eventos-adversos-ecuador/>

Sepulveda, D. N. (Diciembre de 2017). *Caracterización geométrica de fallas geológicas según parámetros críticos y estimación de su resistencia al corte en mina El Teniente. Región del Libertador General Bernardo O'Higgins, Chile.* Obtenido de researchgate.net: https://www.researchgate.net/figure/Figura-32-Esquema-idealizado-del-metodo-Hundimiento-de-Paneles-sin-escala-Hamrin_fig5_322020120

Solari, L., Mateo del Soldado, Raspini, F., Barra, A., Bianchini, S., Confuorto, P., . . . Crosetto, M. (24 de Abril de 2020). *Revisión de la interferometría satelital para la detección de deslizamientos de tierra en Italia.* Obtenido de <https://doi.org/10.3390/rs12081351>: <https://www.mdpi.com/2072-4292/12/8/1351>

- Wood Jr, T., & Marotti de Mello, A. (5 de Diciembre de 2019). *¿Qué es, en definitiva, la investigación aplicada?* Obtenido de Revista de Gestao: <https://doi.org/10.1108/REG-10-2019-128>
- Wu, S., Zhang, B., Ding, X., Zhang, L., Zhang, Z., & Zhang, Z. (09 de Octubre de 2023). Interferometría de radar para la monitorización de la estabilidad de infraestructuras urbanas: de las técnicas a las aplicaciones. *Sustainability*, 15(19). Obtenido de <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/19/14654>
- Youssef, A. M., Pradhan, B., Dikshit, A., & Al-Katheeri, M. (Marzo de 2022). *Mapeo de susceptibilidad a deslizamientos de tierra utilizando algoritmos de aprendizaje profundo CNN-1D y 2D: comparación de su desempeño en la región de Asir, Arabia Saudita*. Obtenido de [researchgate: https://www.researchgate.net/publication/359579955_Landslide_susceptibility_mapping_using_CNN-1D_and_2D_deep_learning_algorithms_comparison_of_their_performance_at_Asir_Region_KSA](https://www.researchgate.net/publication/359579955_Landslide_susceptibility_mapping_using_CNN-1D_and_2D_deep_learning_algorithms_comparison_of_their_performance_at_Asir_Region_KSA)

ANEXOS

Anexo 1. Mapas de deformación

Imagen A1.1: Mapa de velocidad de deformación (mm/año) – sector norte

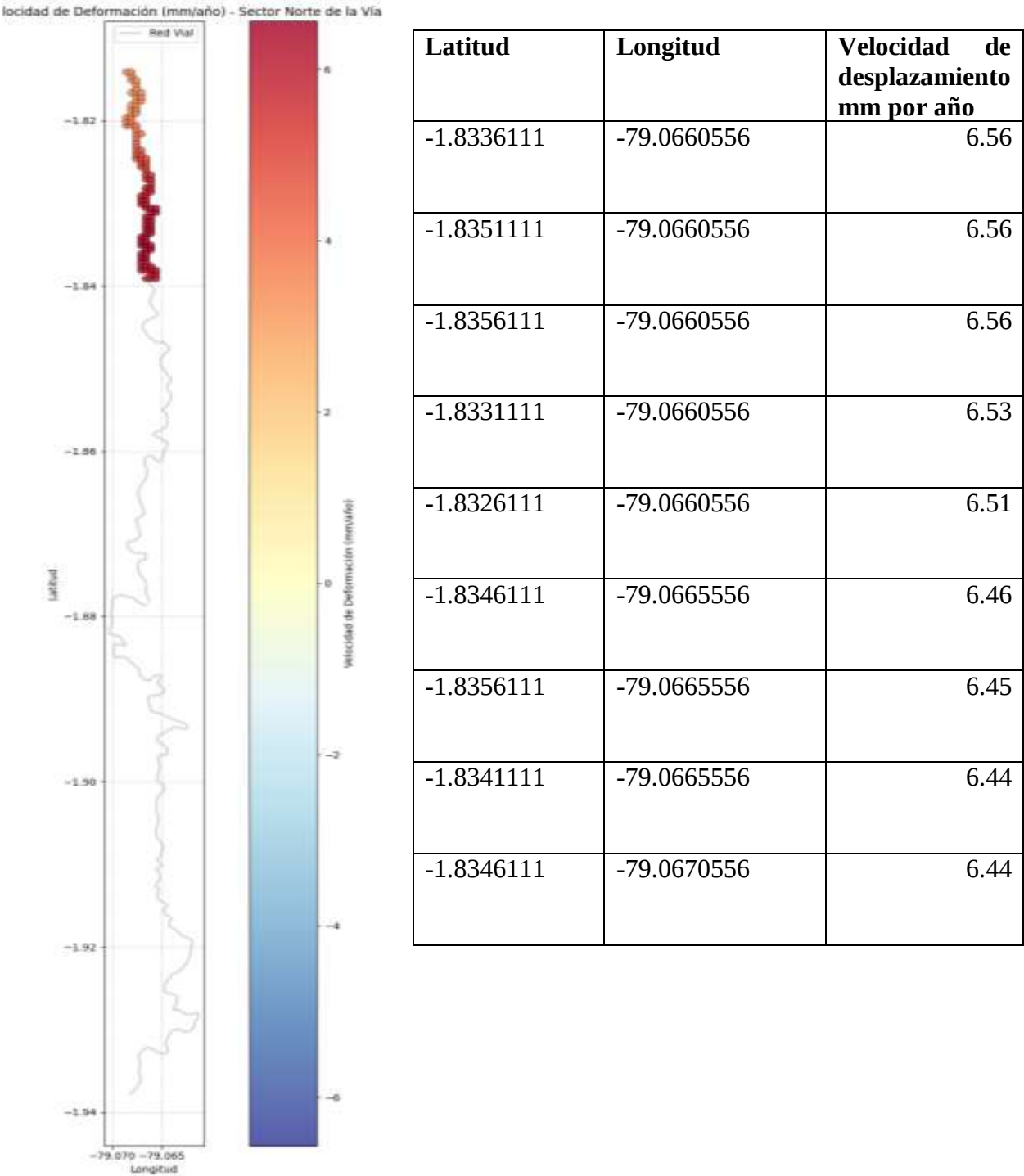
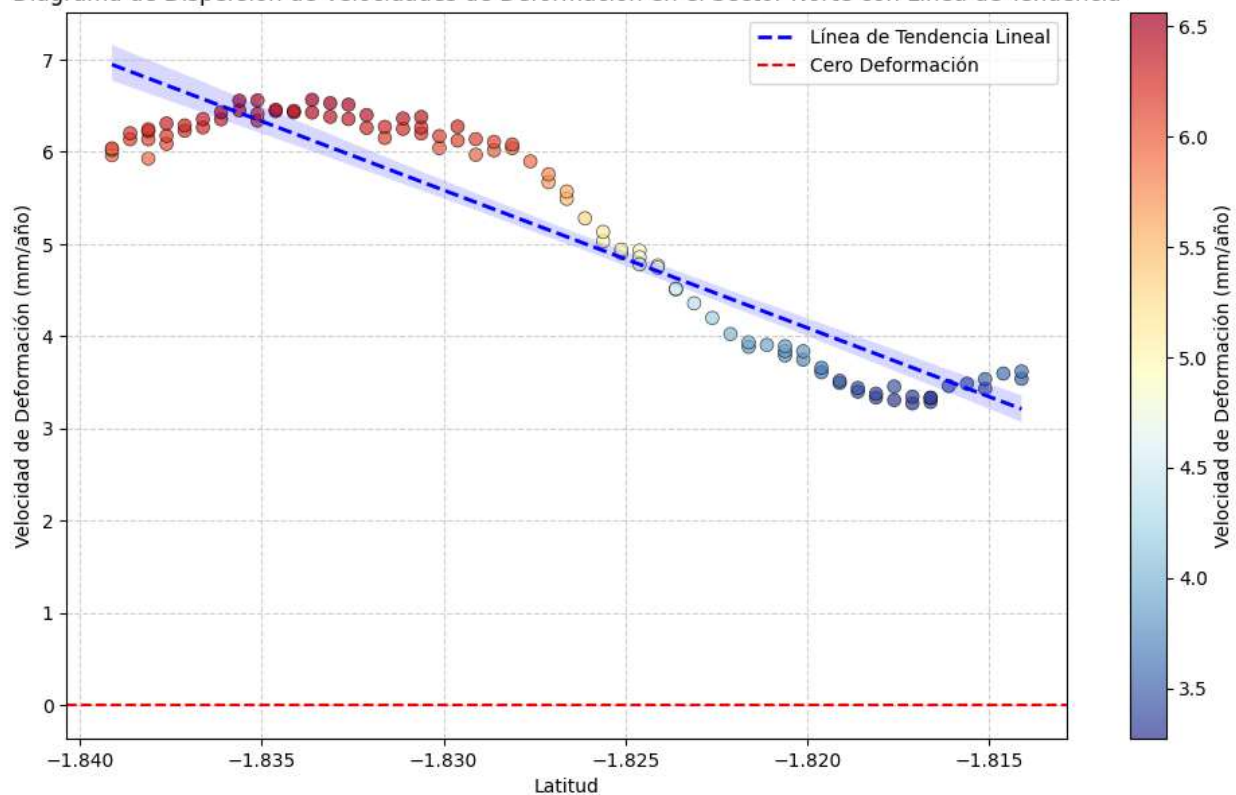
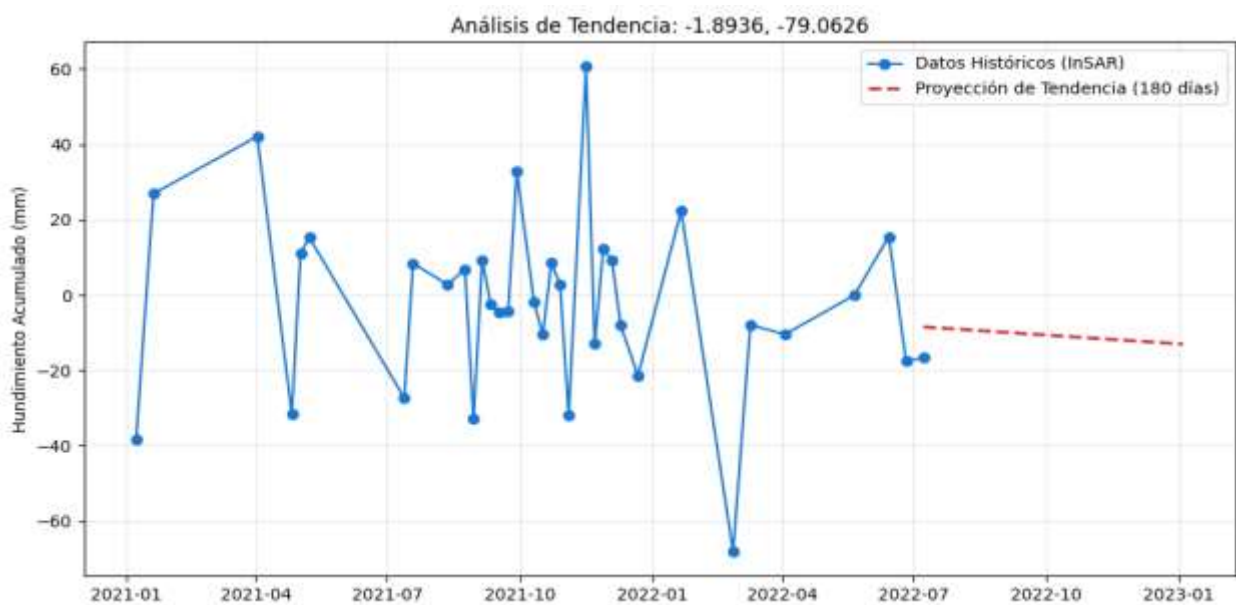


Diagrama de Dispersión de Velocidades de Deformación en el Sector Norte con Línea de Tendencia

**Imagen A1.2: Serie temporal de desplazamiento en el punto crítico (-1.8216, -79.0680)**

Anexo 2. Evidencia fotográfica de campo

Imagen A2.1: Georreferenciación puntos de control



Imagen A2.2: Punto de control en sector "La Gasolinera"



Imagen A2.3: Grietas de tensión en talud



Imagen A2.4: Toma aérea con dron de tramo crítico

