

DOI: <https://doi.org/10.46296/ig.v5i10.0060>

**MODELO DE COMPORTAMIENTO GEOMECÁNICO PARA LA
DETERMINACIÓN DE ZONAS INESTABLES DENTRO DE LA CIUDADELA
BRIONES, PORTOVIEJO-MANABÍ, UTILIZANDO MÉTODOS
GEOTÉCNICOS, GEOFÍSICOS Y ANÁLISIS DE DEFORMACIÓN INSAR**

**GEOMECHANICAL BEHAVIOR MODEL FOR THE DETERMINATION OF
UNSTABLE ZONES WITHIN THE CITADEL BRIONES, PORTOVIEJO-
MANABÍ, USING GEOTECHNICAL, GEOPHYSICAL METHODS AND INSAR
DEFORMATION ANALYSIS**

Intriago-García Gabriel Antonio ¹; Pacheco-Gil Henry Antonio ²

¹ Universidad Técnica de Manabí, Maestría en Prevención y Gestión de Riesgos. Portoviejo, Ecuador. Correo: gabriel.intriago@utm.edu.ec.

² Universidad Técnica de Manabí, Maestría en Prevención y Gestión de Riesgos. Portoviejo, Ecuador. Correo: henry.pacheco@utm.edu.ec.

Resumen

Posteriormente al sismo del 16 de abril de 2016, la ciudadela Briones se vio sometida a varios procesos de levantamiento y subsidencia del relieve en geoformas que en épocas anteriores ya sufrieron una serie de deslizamientos y activación de flujos de masa provocados principalmente por factores climáticos intensos y por sistemas de erosión debido a la remoción de capa vegetal original. Otro factor que tiene mucha influencia para la intensificar la inestabilidad de laderas fue el agradamiento de la frontera urbana-agrícola como también la poca eficiencia de las obras estructurales de contención de movimientos en masa en zonas no adecuadas para ello. Para reducir este tipo de amenaza en la ciudadela, esta investigación tiene el objetivo de caracterizar el comportamiento geomecánico actual del subsuelo y de la superficie topográfica, mediante la utilización de 4 métodos: aplicación de la metodología INSAR para zonificar el levantamiento-subsidencia del relieve con el software SARPROZ, analizar procesos de Geodinámica Externa mediante parámetros morfométrico, como el Índice de Acumulación de Flujo-FACC, el Índice de Humedad Topográfica-TWI y el factor de Longitud y Magnitud de la Pendiente-LS, con el software SAGA, el análisis de la estabilidad de los taludes mediante el software SHALSTAB, todo esto apoyado con información Geotécnica proporcionada por el GAD Portoviejo y archivo propio. Los resultados indican que en la ciudadela Briones, existen XX zonas de deformación máxima del relieve que, correlacionados con las investigaciones geotécnicas elaboradas por el GAD Municipal de Portoviejo, son zonas inestables en las que puede ocurrir deslizamientos (rotacionales-traslacionales-expansión lateral, hundimientos gravitacionales profundos, caída de bloques y flujos de masa de diverso tipo.

Palabras clave: Interferómetro, Insar, Amenazas, Zonificación, deslizamiento.

Abstract

After the earthquake of April 16, 2016, the Briones citadel was subjected to several processes of uplift and subsidence of the relief in geoforms that in previous times already suffered a series of landslides and activation of mass flows caused mainly by intense climatic factors and by erosion systems due to the removal of the original topsoil. Another factor that has a lot of influence to intensify the instability of slopes was the aggravation of the urban-agricultural border as well as the low efficiency of the structural works to contain mass movements in areas not suitable for it. To reduce this type of hazard in the citadel, this research aims to characterize the current geomechanical behavior of the subsoil and the topographic surface, by using 4 methods:

Información del manuscrito:

Fecha de recepción: 11 de enero de 2022.

Fecha de aceptación: 04 de marzo de 2022.

Fecha de publicación: 11 de julio de 2022.



application of the INSAR methodology to zoning the uplift-subsidence of the relief with using the SARPROZ software, analyze External Geodynamics processes using morphometric parameters, such as the Flow Accumulation Index-FACC, the Topographic Moisture Index-TWI and the factor of Length and Magnitude of the Slope-LS, with the SAGA software, the analysis of slope stability using SHALSTAB software, all this supported with Geotechnical information provided by GAD Portoviejo and its own file. The results indicate that in the Briones citadel, there are XX zones of maximum deformation of the relief that, correlated with the geotechnical investigations carried out by the Municipal GAD of Portoviejo, are unstable zones in which landslides can occur (rotational-translational-lateral expansion, subsidence deep gravitational forces, falling blocks and mass flows of various kinds).

Keywords: Interferometer, Insar, Hazards, Zonification, landslide.

1. Introducción

En Ecuador, hasta la década de los 80 no se desarrollaron los Sistemas de Información Geográfica capaces de determinar con georeferencia este tipo de amenazas. A pesar de la existencia de Modelos Numéricos para la modelación de este tipo de eventos, los resultados no fueron tan eficientes para que las Autoridades puedan tomar decisiones para su reducción (Tarboton, D. & et al 1976). A partir de esa década, conforme los Sistemas Informáticos y Espaciales fueron desarrollándose, se fue mejorando la cartografía de riesgos naturales a escalas pequeñas 1:1000000, 1:500000, 1:100000, y 1: 50000. Sin embargo, a estas escalas no fue posible utilizar esa cartografía para la Ordenación del territorio. Posteriormente en la década de los 90, el sistema de

sensores remotos implementados en satélites de las naciones industrializadas, permitió el desarrollo de la Teledetección y de los Sistemas de Información Geográfica con lo que el Ecuador el desarrollo fue de manera intensa por medio del Centro de Levantamiento de Recursos Naturales por Sensores Remotos-CLIRSEN, Institución del estado pionera en este tema que capacitó a profesionales de las ramas relacionadas con las Ciencias de La Tierra, Ingeniería, Industria, Arquitectura y Ambiente, con lo que el cartografiado de estas y otras amenazas naturales fueron mejor detalladas en escalas 1:25000, 1:10000 y a escalas de proyecto. La investigación de las deformaciones del terreno fue mejor detallada con la producción de imágenes de radar tomadas por las misiones Sentinel 1

y Sentinel 2 en los años 2014 y 2016 respectivamente.

Según los estudios realizados por la Compañía SUBSUELO SERVICIOS (CIASUBSER S.A.), la zona tiene una estabilidad geotécnica de alta, media y baja intensidad (referencia GADM-2017), en la que las características geomecánicas del suelo corresponden a tipos de suelo C según la NEC-15, son suelos muy densos o roca blanda, con velocidades de onda de cortante, entre $760 \text{ m/s} > V_s \geq 360 \text{ m/s}$. Perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con cualquiera de los dos criterios $N \geq 50.0$, $S_u \geq 100 \text{ KPa}$.

Esta tipología puede cambiar en desmejora de sus propiedades geomecánicas cuando se deforesta intensamente las vertientes en períodos precipitaciones intensas, en donde han ocurrido deslizamientos inventariados desde el año 2000.

Contexto geográfico.

El cantón Portoviejo ubicación geográfica y división política

El cantón Portoviejo tiene una extensión de 967 km^2 (96.756 has)

que representan el 5.12% del área total de la provincia de Manabí. Cuenta con una población de 238.430 habitantes, de los cuales 177.847 habitan en el área urbana y 66.583 en el área rural. Está conformado por 14 parroquias; 7 urbanas: Andrés de Vera, 12 de Marzo, Colón, Portoviejo, Picoazá, San Pablo y Simón Bolívar; y 7 parroquias rurales: Alajuela, Abdón Calderón, Chirijo, Río Chico, San Plácido, Crucita y Pueblo Nuevo. Portoviejo, es la capital de la provincia de Manabí, se halla ubicada en la zona central de la costa ecuatoriana, al noroeste del país, en las coordenadas geográficas $10^{\circ} 04'$ de latitud sur y $80^{\circ} 26'$ de longitud oeste. Se localiza a 355 Km. de Quito y a 35 Km. de la costa.

ASPECTOS FISICOS. **Clima** En el cantón Portoviejo se presentan 2 estaciones definidas: una lluviosa (invierno), entre los meses de enero a abril, y la estación seca (verano) que se produce entre los meses de mayo a diciembre (Dirección Nacional Forestal, 1998). La temperatura media anual, registrada en la Estación Meteorológica de Portoviejo oscila entre los 26°C . El

SE. Sistema de Indicadores Sociales del Ecuador. 2001. 11 La humedad relativa tiene valores promedios de 76.2 anuales. El diagrama ombrotérmico de la Estación Meteorológica Portoviejo de los últimos años señala que los meses ecológicamente húmedos van de febrero a abril; el mes de marzo es ecológicamente el más húmedo (INEFAN, 1996, Op. Cit.) La evaporación anual es de 1.574,8 mm, valor que comparado con el de precipitación (491 mm) deja ver claramente la existencia de un déficit hídrico en la zona. De acuerdo con el Mapa Bioclimático del Ecuador, Portoviejo está localizada en una región clasificada por Holdridge como Sub-desértica Tropical. Según el mismo autor, la ciudad y su área de influencia se ubican en una región ecológica clasificada como monte espinoso tropical. En la siguiente tabla, se muestran los valores medios multianuales registrados en la estación Portoviejo, la misma que se localiza en las coordenadas 80° 27' 30" de longitud oeste, 10° 2' de latitud sur y 48 SNM de altitud. Esta estación es del tipo Climatológica Ordinaria con el código M005.

Es operada por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI), desde el 1 de julio de 1930. Datos medios multianuales mensuales de temperatura, precipitación y humedad relativa ~l e5! Enc : Fch I ~lar I Abr j ~lay I .Jun I Jul 1Ago I Set I Del I \ 0 \ Temperatura del aire (oC): :4 .5 34.0) h.O 34.4 80 Periodo de información: 6.1 años 12 I Die] I :4,X Como puede verse, el mes más frío es septiembre (17,60 C), mientras que el más caluroso es marzo (36,0 C). En lo que respecta a las precipitaciones, existe una marcada disminución de las mismas durante el período comprendido entre abril y diciembre, meses durante los cuales se registra apenas 33% de la precipitación anual. El 67% restante corresponde a los meses de enero, febrero y marzo. La humedad relativa puede considerarse moderada y se registran los mayores valores durante los meses más lluviosos. Su rango de variación se halla entre 74% en noviembre y 87% en febrero. El viento no tiene valores significativos de velocidad, por lo que se puede considerar que el mismo no tiene influencia marcada sobre los cultivos existentes. La velocidad media mensual es de 1,06 m/s. La

dirección predominante del viento es el norte. 1.2.2. Recursos hídricos El principal sistema hidrográfico es el Río Portoviejo. La cuenca hidrográfica abarca una superficie de 2.040 km² aproximadamente (RIVENEIRA, Alfredo, et. al. 2001), con una longitud de cauce de 149 km. Está localizada en la zona climática influenciada por la corriente de Humboldt, o sea la franja seca de la provincia, la cual se caracteriza por la escasez de pluviosidad y recursos hídricos. La baja pluviometría de esta cuenca contribuye en gran parte, durante la época de estiaje

Portoviejo está a una altura media de 44 msnm, se encuentra rodeado de colinas, de alturas menores a los 300 msnr'. Presenta relieves que van desde planos a casi planos de valles fluviales, llanuras aluviales costeras y pie de monte occidental, terrazas, llanuras y cuencas deprimidas costeras.

Dentro del cantón se registran cotas que van desde los 10 msnm hasta los 700 msnm aproximadamente. Los suelos tienen características de sedimentos marmos, con bosques tropicales y subtropicales secos,

constituyéndose en suelos productores de ceibos, algarrobos, guayacán, caña guadúa, palma real entre otros. Fernández (1994) señala que en Portoviejo se presenta el tipo de suelo zonal, que corresponde a la zona de vida denominada bosque espinoso tropical. Son suelos con predominancia de areniscas, sobre colinas de fuerte pendiente, donde predominan las areniscas, se encuentra un suelo desarrollado, con 3 GALLARDO, H. 1996. Plan de Manejo del área de bosque y vegetación protectores de las colinas circundantes a la ciudad de Portoviejo. FERNANDEZ, J. 1994. Estudio de Impacto Ambiental y Plan de Manejo para el Área Minera Canteras Basálticas Picoazá, horizontes típicos de alteración, poco profunda de textura limoso y en proceso de erosión. Tiene buenas condiciones para la agricultura y ganadería por ser relativamente fértiles y planos. Su topografía se caracteriza por vanar desde ondulada a fuertemente socavada; muchos de los cultivos se encuentran en zonas no aptas para el efecto, ya que en la mayoría de los casos no se ha tomado en cuenta la textura del suelo para el desarrollo

de los diferentes cultivos agrícolas, los mismos que se han ejecutado sin normas de buen manejo y conservación del suelo. Esto ha generado su acelerada erosión, la misma que se estima en 2.856,5 tn/krnz/año'.

ASPECTOS BIOTICOS. Flora Las zonas de vida que se encuentran dentro del cantón son: Bosque Seco Tropical con una precipitación anual que va desde los 1000 a 2000 mm; Bosque Muy Seco Tropical con una precipitación anual que va de 500 a 1000 mm y el Monte Espinoso Tropical que tiene una precipitación anual de 250 a 500 mm (Femández, 1994) Existen aproximadamente 35 especies de plantas en las colinas que circundan Portoviejo, 37 en Cerro de Hojas y 7 especies de herbáceas, trepadoras y epífita (INEFAN, Op. Cit. 1996).

Fauna En el Plan de Manejo del bosque protector de las colinas circundantes a Portoviejo (INEFAN, 1996 Op. Cit.) se menciona que existen 27 especies de animales; 11 especies de invertebrados; 8 especies pertenecientes a herpetofauna; 58 especies de avifauna.

Areas Protegidas Mediante resolución No. 02 del 27 de mayo de 1994 y asentada en el Registro Forestal del INEFAN, se declaró Área de Bosque y Vegetación Protectores a las Colinas que circundan la Ciudad de Portoviejo en una superficie de 4045 has. El área de ubica en las parroquias 12 de marzo, Portoviejo, Colón, Picoazá y San Pablo. Comprende 6 bloques o área, que se identifican por sus nombres de la siguiente manera: Área 1: San Pablo, Cimarrón y Barrio Fátima 1.235 has Área 2: Los Ángeles 116 has Área 3: Maconta Abajo 382 has Área 4: El Florón 610 has Área 5: Loma San José 328 has Área 6: Cerro Jaboncillo, Cerro Verde y Cerro de Hojas 1.373 has TOTAL 4.045 has Dentro del bosque protector el suelo se utiliza con diferentes fines: agrícola 1000 has (25%), bosque natural cubre 2400 has (60%), los pastos naturales 500 has (12%) y viviendas 145 has (3%) (INEFAN Op, Cit, 1996). Los pastos naturales son producto de la tala rasa del bosque natural primario con fines agropecuarios. El estudio del INEFAN (1996) encontró que en el bosque protector viven aproximadamente de entre 5000 y 10000 personas dentro de los

límites. De estos, son muy pocos los hogares que cuentan con los servicios básicos, sin embargo, la mayoría de ellos tienen escrituras legalizadas. Las áreas deforestadas en el cantón Portoviejo para el año 1994 cubrían 66 has. Para el año 1996 estas áreas cubrían 158 has (INEFAN, 1996).

Contenido

Los deslizamientos son procesos geológicos que son parte de los Movimientos en Masa más destructivos que afectan a las comunidades. Han causado miles de muertes y daños a la propiedad y a los sistemas productivos por varias decenas de billones de dólares cada año. Es un fenómeno que muy pocas personas los percibe como amenaza por desconocimiento y por importancia. Según (Felgentreff y Glade 2008), el 90% de las pérdidas por deslizamientos son evitables si el problema se identifica con anterioridad a esto se denomina Previsión.

Las colinas que rodean las grandes ciudades son generalmente cinturones de pobreza en donde reside la población de bajos recursos económicos y son muy vulnerables

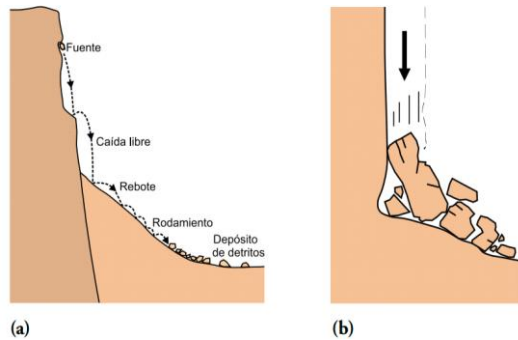
ante estos fenómenos. En estas colinas confluyen cuatro de los elementos más importantes para la ocurrencia de este tipo de amenazas: la topografía con altas pendientes, sismicidad activa, alta meteorización y erosión por precipitaciones intensas.

En este estudio los movimientos en masa se han clasificado según lo indicado en el manual: Una Guía para la Evaluación de Amenazas del Proyecto Multinacional Andino (Coello, 2009) que los clasifica en:

Caída (Fall)

La caída es un tipo de movimiento en masa en el cual uno o varios bloques de suelo o roca se desprenden de una ladera, sin que a lo largo de esta superficie ocurra desplazamiento cortante apreciable. (Varnes, 1978). Dependiendo del material desprendido se habla de una caída de roca, o una caída de suelo. Para (Cruden y Varnes, 1996) el movimiento es de muy rápido a extremadamente rápido decir con velocidades mayores a 5×10^1 mm/s.

Figura 1. a, b Deslizamiento tipo Fall, en donde según Cronominas y Yagué (1997) se denomina colapso

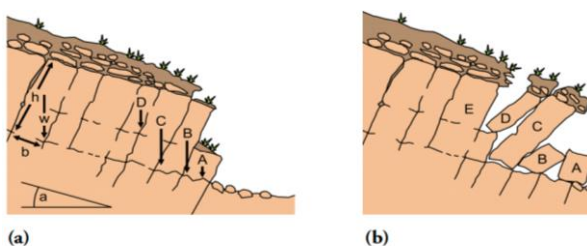


Volcamiento (Topple)

Se denomina así a un tipo de movimiento en masa en el cual hay una rotación generalmente hacia adelante de uno o varios bloques de roca o suelo, alrededor de un Punto o pivote de giro en su parte inferior. Este movimiento ocurre por acción de la

Gravedad, por empujes de las unidades adyacentes o por la presión de fluidos en grietas (Varnes, 1978). El volcamiento puede ser en bloque, flexional (o flexural) y flexional del macizo rocoso como se describe a continuación.

Figura 2. Modelo de Freitas y Waters



Deslizamiento (Slide)

Es un movimiento ladero abajo de una masa de suelo o roca cuyo desplazamiento ocurre predominantemente a lo largo de una superficie de falla, o de una delgada zona en donde ocurre una gran deformación cortante.

En el sistema de Varnes (1978), se clasifican los deslizamientos, según la forma de la superficie de falla por la cual se desplaza el material, en traslacionales y rotacionales.

Propagación Lateral (Lateral Spread)

La propagación o expansión lateral es un tipo de movimiento en masa cuyo desplazamiento ocurre predominantemente por deformación interna (expansión) del material.

La mayoría de los deslizamientos y los flujos involucran algún grado de expansión. Las

Propagaciones laterales pueden considerarse como la etapa final en una serie de movimientos donde la deformación interna predomina decididamente sobre otros mecanismos de desplazamiento

como los que imperan en el deslizamiento o el flujo.

Varnes (1978) distingue dos tipos de propagación, uno en que el movimiento

Afecta a todo el material sin distinguirse la zona basal de cizalla, típico de masas rocosas, y otro que ocurre en suelos cohesivos que sobre yacen a materiales que han sufrido

Flujo (Flow)

Es un tipo de movimiento en masa que durante su desplazamiento exhibe un comportamiento semejante al de un fluido; puede ser rápido o lento, saturado o seco. En muchos casos se originan a partir de otro tipo de movimiento, ya sea un deslizamiento o una caída.

Actualmente, la investigación de deslizamientos está relacionada con varias áreas del conocimiento, tales como: Ingeniería Civil, Geología, Ingeniería Geológica, Geomorfología, Geotecnia, Mecánica de Suelos y de Rocas, etc. Bajo el aspecto de la aplicación, la importancia del análisis y control de los deslizamientos, resulta de la demanda socioeconómica

proveniente de accidentes y problemas diversos concernientes a la inestabilidad de las laderas.

2. Aplicación metodológica

Arte sobre las metodologías en el estudio de inundaciones y movimientos en masa es amplio. Estos utilizan criterios Determinísticos y Probabilísticos.

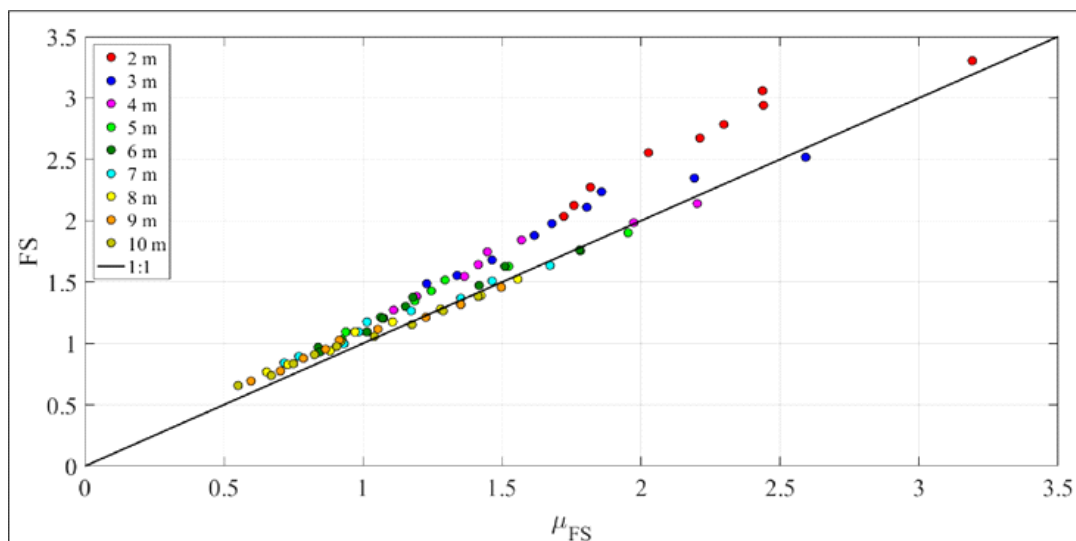
Métodos Determinísticos: se utilizan para el estudio de la estabilidad de una ladera o talud concreto se fundamentan en métodos basados en el equilibrio límite o en modelos numéricos teniendo, pues, una base física, lo que es de una gran ventaja respecto a otros métodos. Estos métodos muestran un grado de fiabilidad alto en el caso en que los datos utilizados sean correcto. Lo que significa, que los datos correspondan geográficamente a la zona de estudio y que los valores de los parámetros estudiados tengan un análisis de error mínimo, como una varianza mínima o correlación alta, con respecto a estándares establecidos en Normas vigentes. Su principal inconveniente es su baja idoneidad para zonificaciones de amenazas naturales rápidas y para

detectar el cambio de una variable en el tiempo en áreas extensas o regionales (Van Westen, 1993).

Métodos Probabilísticos: Dentro de este grupo se encuentran los métodos estadísticos y de análisis de frecuencia de deslizamientos. Son métodos indirectos cuyos resultados se pueden extrapolar cuando se

analizan variables aleatorias como la porosidad, la permeabilidad, el contacto geológico, la velocidad de corte, el espesor de los estratos litológicos, entre otras variables. Son utilizados para estimar la susceptibilidad en condiciones geológicas y climáticas. Estas aproximaciones permiten regionalizar los resultados.

Figura 3. Media del factor de seguridad (caso probabilístico) contra el factor de seguridad determinístico.



3. Resultados

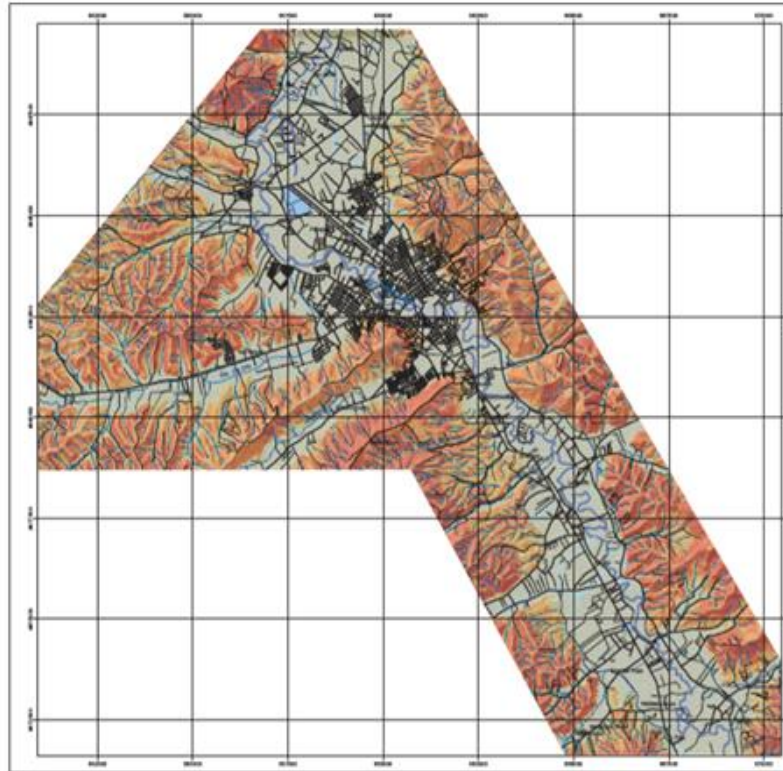
La obtención y análisis de datos geotécnicos-geofísicos del suelo-subsuelo en el área de la Ciudadela Briones (colina), más el análisis de deformación del relieve con el método INSAR permitió obtener nuevos resultados sobre la estabilidad geotécnica del sector, que pueden mejorar el criterio

técnico para su reducción y fortalecer las ordenanzas en el manejo uso del territorio.

En la siguiente figura se aprecia la zonificación de la amenaza por movimientos en masa a escala 1:25.000, según un estudio realizado por el Comitato Internazionale per lo Sviluppo dei Popoli CISP (2009). El círculo amarillo corresponde al área

de la ciudadela Briones, clasificada como un sector de alta amenaza.

Figura 4. Mapa de deslizamiento área de estudio (ciudadela Briones). FUENTE: Imagen Google Earth, 2019.



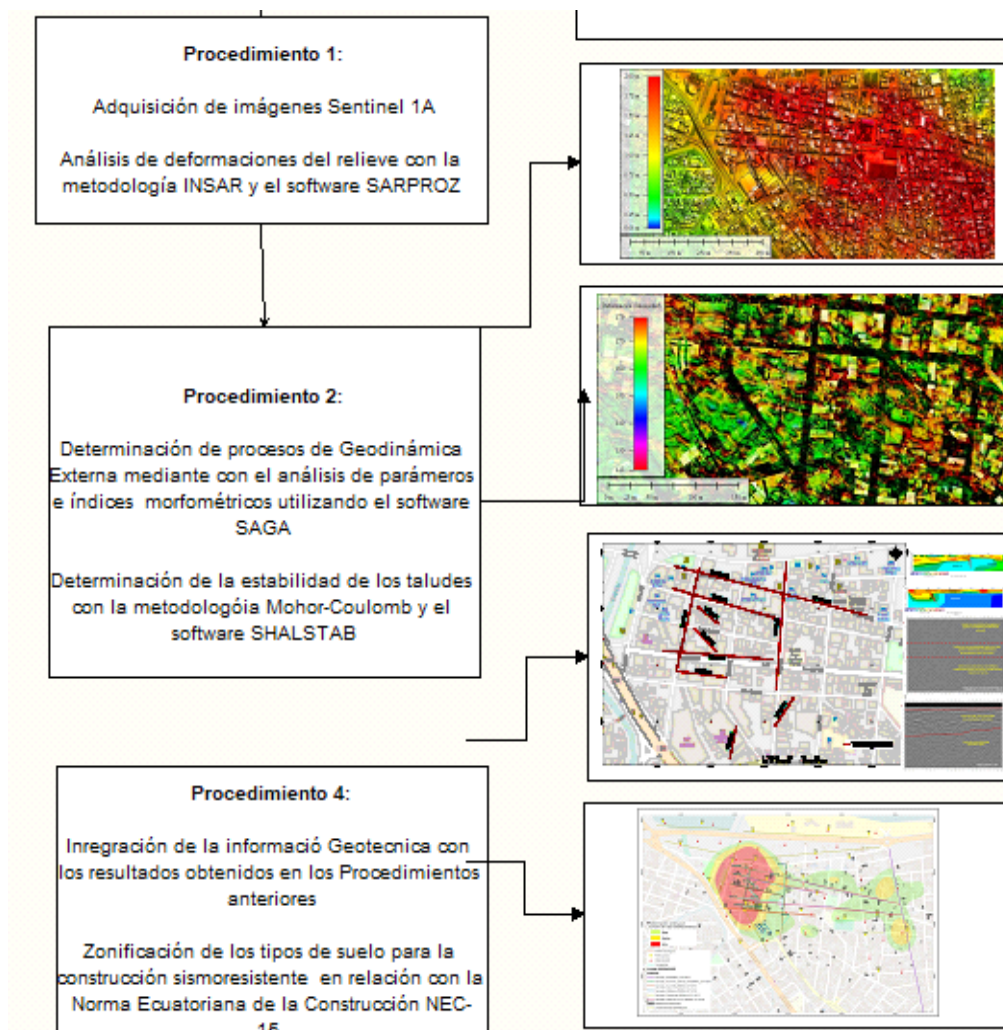
Recursos tecnológicos para la obtención de datos

- Se utilizaron 2 imágenes Sentinel 1B muy actuales, desde el 2015/10/27 hasta el 2020/01/14, obtenidas del Alaska Satellite Facility [13], para determinar las deformaciones del terreno mediante la técnica INSAR (Interferometría SAR) [14, 15].
- Para determinar los cambios en la morfología del relieve se utilizó el programa SAGA (System for

Automated Geoscientific Analyses), que incluye el módulo SAHASTAB (Shallow Landsliding Stability Model), que en este caso fue un aporte para la determinación de la estabilidad geológica de la zona en función de la teoría Mohr-Coulomb.

El flujo general de procedimientos utilizados en este estudio se puede ver en la Figura 5. A continuación se describen estos procedimientos.

Figura 5. Flujo general de procesos mediante la integración de metodologías INSAR, SAGA, SHALSTAB e información Geotécnica para la caracterización de deformaciones geomorfológica del relieve e inestabilidad de taludes.



Se utilizó un Modelo Digital de Elevaciones-MED de 12.5 metros de resolución espacial obtenidos de métodos radiométricos y del Proyecto ASF (Alaska Satellite Facility-Alos-Pals imágenes) respectivamente, mientras el GAD de Portoviejo, proporcionó la información planimétrica y otra información temática fue obtenida del Sistema Nacional de

Información-SIN. Al mismo el software utilizado fue Aspros, SAGA, SHALSTAB.

Procedimientos en toma muestral.

Procedimiento 1: Análisis INSAR-Proceso SARPROZ. Ubicación de zonas de deformación regional del relieve como posibles orígenes de lahares secundarios utilizando.

Selección del conjunto de datos SLC-Single Look Complex. Se establecen las órbitas para leer y establecer la escena de estudio. Extracción de imágenes maestras y esclavas

Análisis preliminar del sitio de estudio. Elaboración del mapa de reflectividad (radiación incidente reflejada por una superficie): con esta función, el software genera el mapa de reflectividad como el promedio temporal de todas las imágenes del conjunto de datos que se han elegido para procesar.

Obtención del Interferograma. Parámetros Insar: con esta opción, se eligen los parámetros para el procesamiento INSAR.

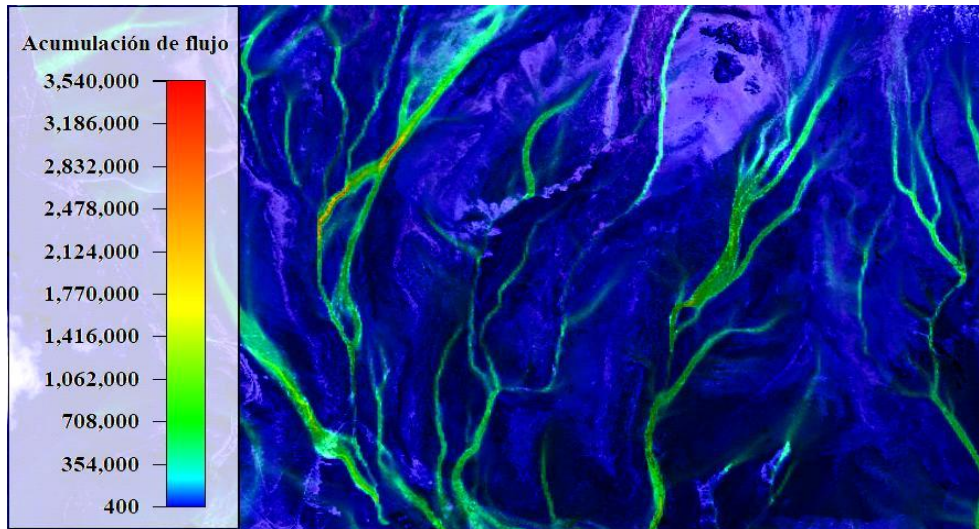
Procedimiento 2: Obtención de parámetros morfológicos e índices morfométricos-SAGA GIS.

El método morfométrico con SAGA se aplicó posteriormente a las

metodologías INSAR, para determinar las áreas de deformación superficial del relieve. Los parámetros e índices morfométricos principales estudiados fueron los siguientes:

Acumulación de Flujo-FCC. La Acumulación se calcula como el área de contribución ascendente (captación) utilizando el modelo hidrológico D8 o enfoque de dirección de flujo múltiple. El resultado es un ráster de flujo acumulado para cada celda, determinada por la acumulación del peso de todas las celdas que fluyen hacia cada celda del modelo numérico de elevaciones pendiente descendente. El flujo acumulado se basa en el número total de celdas, o una fracción de ellas, que fluye a cada celda en el ráster de salida. Figura 6.

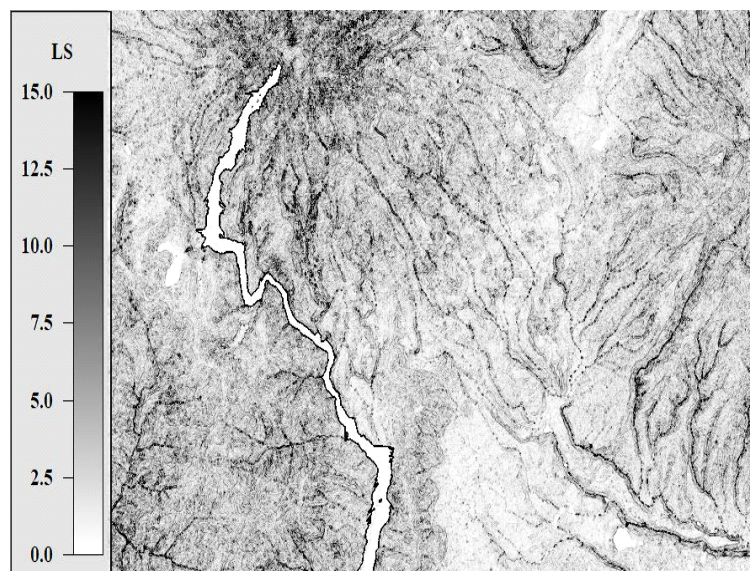
Figura 6 SAGA GIS. Acumuladores de flujo. Los valores más altos (tendencia al color rojo) representan mayores acumulaciones de flujo y áreas de flujo concentrado que pueden usarse para identificar canales de cursos de agua de llenado rápido y soporte de las rutas de lahares.



Factor Longitud y Magnitud de la Pendiente-LS [20]. Esta es una combinación de la pendiente y la longitud de la pendiente, que es útil para predecir el potencial de erosión. El factor de longitud de la pendiente, L, calcula el efecto de la longitud de la pendiente sobre la erosión, y el

factor de magnitud de la pendiente, S, calcula el efecto de la pendiente sobre la erosión. Los valores más altos de color hacia el negro representan una mayor susceptibilidad a la erosión como lo muestra la Figura 7.

Figura 7. SAGA GIS. Longitud y Magnitud de la Pendiente-LS. Valores más altos con tendencia al color negro representan zonas de mayor erosión.



Determinación del Índice de estabilidad utilizando el software SHALSTAB en base de la teoría Mohr-Coulomb. [21, 22, 23, 24, 25]: El programa SHALSTAB fue utilizado para mapear terrenos inestables poco profundos. SHALSTAB combina las características de flujo estacionario del subsuelo (flujo de agua que se mueve a poca profundidad debajo de la superficie de la tierra con una velocidad constante), considerando la relación morfología-hidrología.

SHALSTAB utiliza dos tipos de modelos numéricos: el modelo de estabilidad de taludes y el modelo hidrológico.

El modelo de estabilidad de taludes utilizado por el modelo, está basado en la teoría del talud infinito, que simula el grado de estabilidad de una determinada porción del suelo

localizada sobre el afloramiento rocoso.

Inclusive el análisis de la estabilidad en las laderas del volcán con SHALSTAB a través de la relación hidrológica Q / T , permite medir la intensidad de la precipitación, Q , en relación con la capacidad del subsuelo para transmitir agua a lo largo de las laderas T (Transmisividad) determinó que, cuánto cuanto mayor sea Q en relación con T , más probable será que el suelo esté saturado y mayor será el número de sitios con pendientes inestables. Esta relación utilizó la clasificación de píxeles con valores positivos estables a valores casi estables y crónicamente inestables con valores negativos de acuerdo con las 7 clases de estabilidad que aporta SHALSTAB ilustradas en la tabla 1.

Tabla 1. Clases de estabilidad obtenidas con SHASTAB e interpretación de las clases obtenidas.

Clases SHALSTAB	Interpretación de las clases
Inestabilidad crónica	Incondicionalmente inestable y saturado
$\text{Log } Q/T -1 < -3,1$	Incondicionalmente inestable Insaturado
$3,1 < \text{Log } Q/T -1 < -2,8$	Inestable y saturado
$-2,8 < \text{Log } Q/T -1 < -2,5$	Inestable e insaturado
$-2,5 < \text{Log } Q/T -1 < -2,2$	Estable e insaturado
$\text{Log } Q/T -1 > -2,2$	Incondicionalmente estable e insaturado
Stable	Incondicionalmente estable y saturado

Procedimiento 3: Integración de la información Geotécnica con los

resultados obtenidos en los Procedimientos 1,2 y la zonificación

de los tipos de suelo para la construcción sismorresistente en relación con la Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC-15. En este procedimiento se integraron los procesos anteriores para la elaboración de los mapas susceptibilidad a movimientos en masa–deformaciones actuales del terreno.

Resultados de procedimientos: El análisis del radar de apertura sintética de interferometría diferencial (INSAR), basado en las imágenes de Sentinel 1B, determino 3 zonas de deformación intensa del relieve ubicadas en las siguientes coordenadas:

Zona 1:

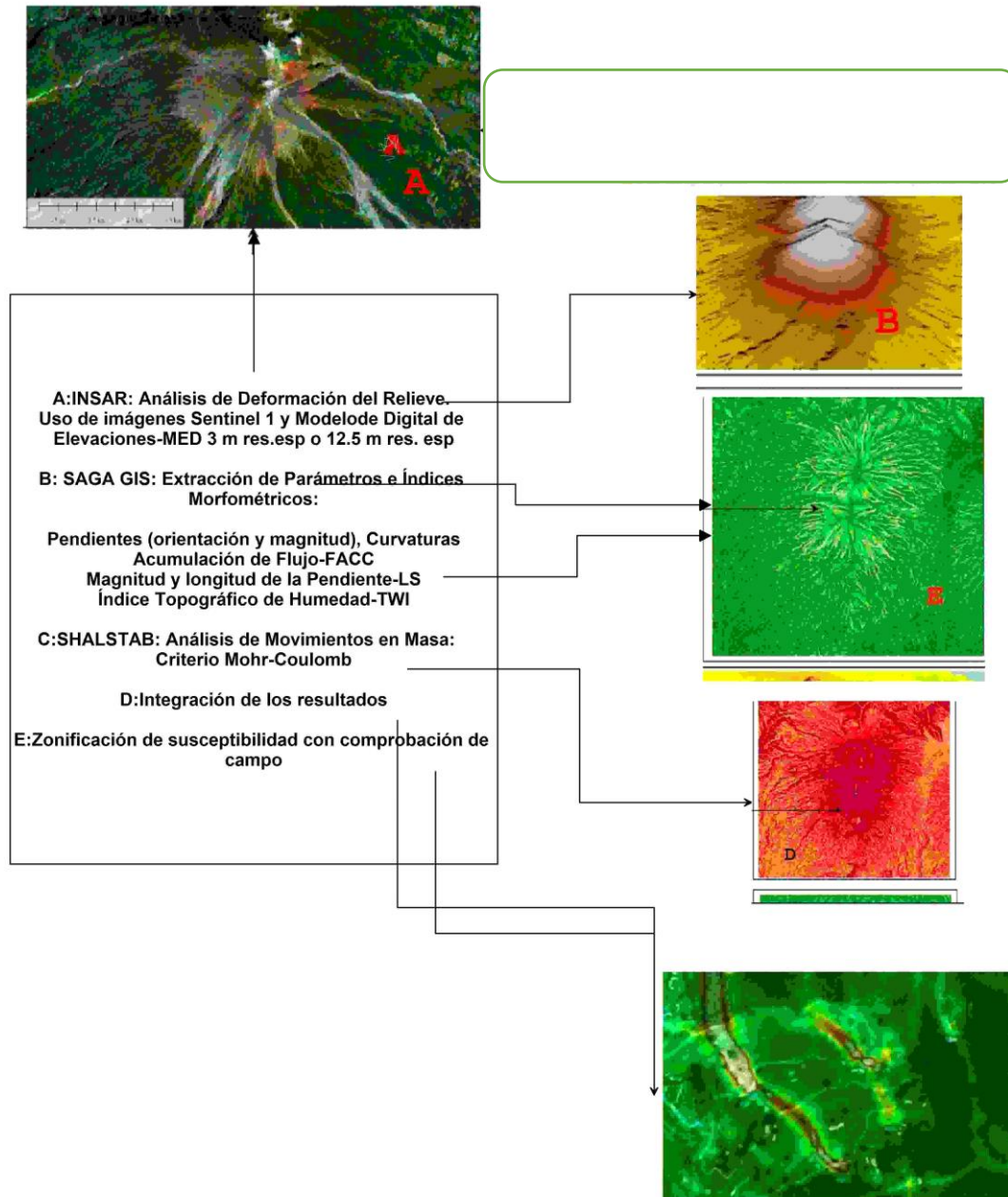
En la zona Cero, desde la calle nnn por el Norte hasta la calle nn hacia el sur en general el relieve se encuentra en procesos de levantamiento, con un rango de entre

4 a 120 mm por año. Dentro de esta zona se encuentran 5 viviendas con moderada condición estructural

Zona n:

Un análisis adicional a estos procesos fue el de determinar lineaciones de fractura utilizando el criterio de Líneas de Fractura descrito en la metodología (18), relacionadas con zonas de deformación intensa del relieve, inestabilidad crónica y erosión a partir de la metodología presentada. En la figura 19 se pueden ver las líneas de fractura superficiales que son los posibles factores de inestabilidad de la zona. Estas líneas de fractura se han localizadas en toda la zona de estudio y están relacionadas con esfuerzo tectónicos del sistema de fallas geológicas EC-14 Sistema Jipijapa (a, b) PONER LAS FALLAS (inversa-dextral).

Figura 8 Flujo general de procesos mediante la integración de metodologías INSAR, SAGA y SHALSTAB para la determinación espacial de zonas de deformaciones del terreno, caracterización morfométrica, inestabilidad de taludes, inundaciones y variación del perfil costero



RESULTADOS COMPLEMENTARIOS.

ZONIFICACIÓN DE LA AMENAZA POR DESLIZAMIENTO



Perforaciones y métodos de análisis

Cinco sondeos de Roto-percusión, con profundidades comprendidas entre 12,50 y 30.00 m, como se detalla a continuación en la tabla 2:

SONDEO	UTM Este	UTM: Norte	LONGITUD (m)	Orientación
PB-1	561328.195	9884230.171	12,50	Vertical
PB-2	561371.934	9884275.375	22,00	Vertical
PB-3	561421.254	9884334.420	25,00	Vertical
PB-4	561460.572	9884409.701	30,00	Vertical
S-5	561421	9884275	20,00	Vertical

Humedad Natural

ASTM D 2216

Granulometría por Vía Húmeda

ASTM D 422

Límite Líquido y Límite Plástico

ASTM D 4318

Triaxial

ASTM D 2850

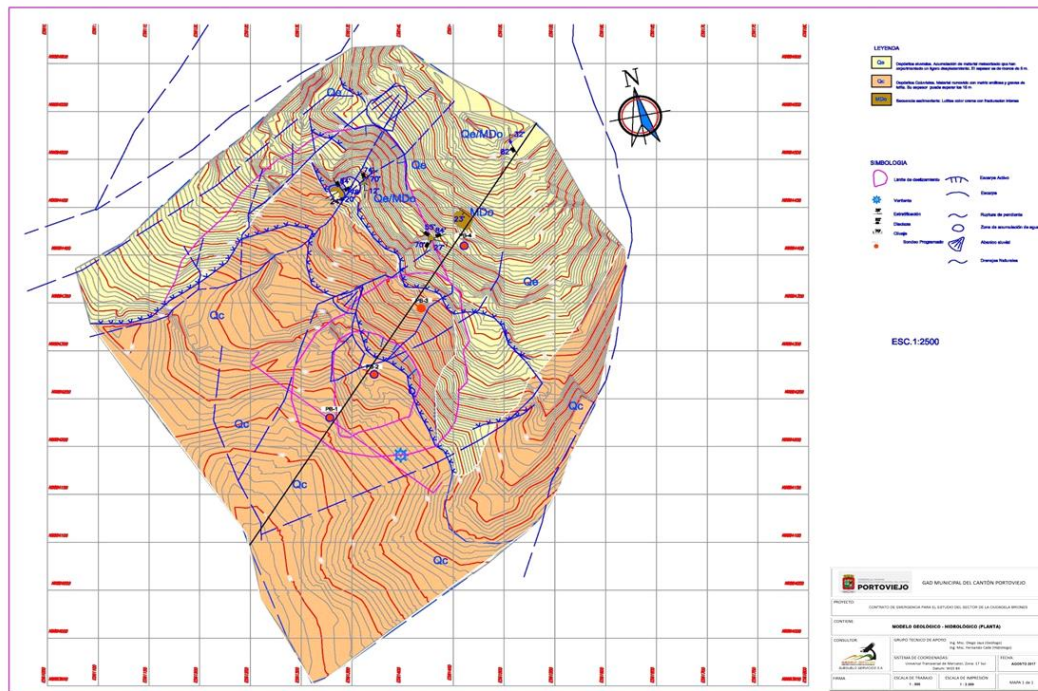
Compresión simple

ASTM D 2166

Expansión libre

ASTM D 4546-85

MODELO GEOLOGICO – HIDROLOGICO (PLANTA)



Bibliografía

- Aracil-Ávila, E., Porres-Benito, J.A.,
Espinosa-González, A.B.,
Maruri-Brouard, U., Vallés-
Iriso, J., García Castillo, L.,
Ibáñez-García, S., 2005,
Aplicación de la tomografía
eléctrica para la
caracterización de un
deslizamiento de ladera en un
vertedero, en Corominas, J.,
Alonso, E., Romana, M.,
Hürlimann, M. (eds.) VI
Simposio Nacional sobre
Taludes y Laderas Inestables:
Valencia, España,
Universidad Politécnica de
Valencia y UPC, 8 pp.

- Carena, S. (2011) - Subducting-plate topography and nucleation of great and giant earthquakes

- along the South America
trench. *Seismol. Res. Lett.*, 82
(5) 629-637,
doi:10.1785/gssrl.82.5.629.

- Chlieh, M. et al. Distribution of discrete seismic asperities and aseismic slip along the Ecuadorian megathrust. *Earth Planet. Sci. Lett.* 400, 292_301 (2014).

- Chunga K., Michetti AM., Mulas M., Besenon D., Ferrario MF., Garces D., Ochoa F. (2017). Intensidad MACrosísmica ESI-07 y Efectos Geológicos del Terremoto de Pedernales del 16.04.2016 (Mw 7.8). VIII Jornadas en Ciencias de la Tierra, Quito, 5 pág.

- Chunga K., Quiñonez-Macías M.,
Mulas M., Larreta E., et al.

- (2016). Geología de Terremotos y Tsunami. Instituto Panamericano de Geografía e Historia IPGH, Libro, pág 1-327. ISBN: 978-9942-9927-7-2.
- Chunga K., Besenzon D., Mulas M. et al. (2016). Areal distribution of Ground effects induced by the 2016 Mw 7.8 Pedernales earthquake (Ecuador). 88° Congresso della Societa' Geologica Italiana. Napoli, 7/9 sept.
- Chunga K. (2010). Shallow crustal earthquakes and seismic zonation for Ecuador through the integration of geological, seismological and morphostructural data. University of Insubria. Ph.D. Thesis, p. 165. (Italian version).
- He P., Hetland E., Wang Q et al. (2017). Coseismic slip in the 2016 Mw 7.8 Ecuador earthquake imaged from Sentinel-1A radar interferometry. Seismological Research Letters, Vol. 88, number 2A. doi: 10.1785/0220160151
- Kanamori, H. & McNally, K. (1982). Variable rupture mode of the suduction zone along the Ecuador-Colombia coast. Bull. Seismol. Soc. Am. 72, 1241_1253.
- Frank Lehmann y Alan G. Verde, (1999), "la adquisición de datos georadar semiautomatizado en tres dimensiones", GEOFÍSICA 64: 719-731.