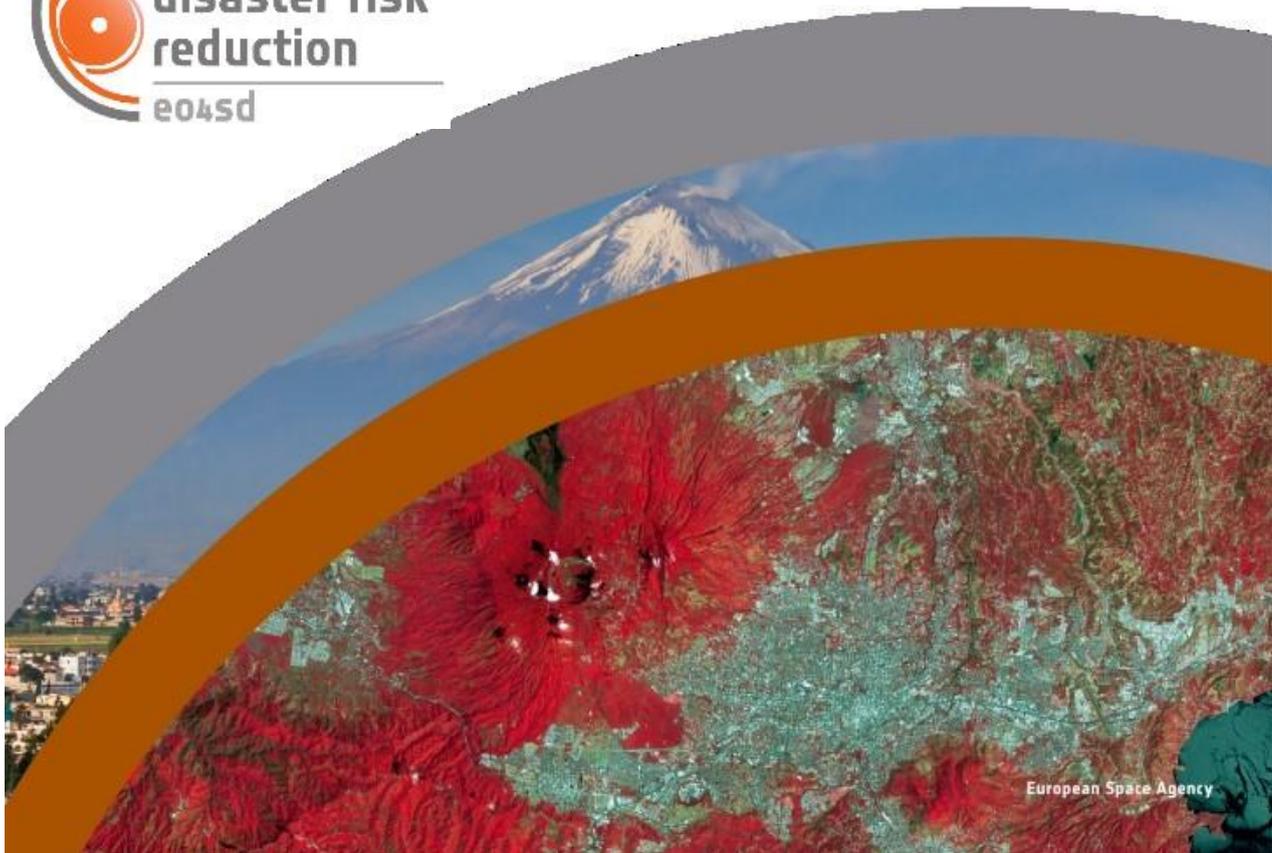


→EO4SD - EARTH
OBSERVATION FOR
SUSTAINABLE DEVELOPMENT
Reducción de Riesgo de Desastre

República Dominicana: Información de riesgo derivada de datos de satélite para infraestructuras de datos espaciales (07-WB-DRE)

Terremotos, evaluación de riesgo (WB-DRE-02)

Informe técnico



European Space Agency

INFORMACIÓN DE CONTROL DEL DOCUMENTO

Título del proyecto	EO4SD Disaster Risk Reduction	Título del proyecto	Informe técnico del ejercicio de demostración
Gerente del proyecto (Indra)	Ángel Utanda / Alberto Lorenzo	Gerente del proyecto (Indra)	Philippe Bally
Distribución	Giovanni Michele Toggia, Max Elgrer Lazaro Taico, Edouard Ereno Blanchet (WB) Bolivar Troncoso, Cenia Correa, Lisselote Binet (IGN)		

RESUMEN

El informe técnico resume los resultados entregados en el ámbito del servicio EO4SD-DRR "Evaluación del impacto del terremoto".

Ed./Rev.	Fecha	Versión	Nombre	Compañía
Elaborado	16/05/2021	A0	Michael Avian, Matthias Schlögl	ZAMG
Revisado/Aprobado	04/06/2021	A0	María Encina Aulló, Alberto Lorenzo	Indra

Los derechos de autor de este documento recaen en Indra Sistemas SA y en los socios del consorcio EO4SD-DRR. Este documento sólo puede ser reproducido en su totalidad o en parte, o almacenado, o transmitido en cualquier forma, o por cualquier medio, ya sea con el permiso previo de lo anterior o de acuerdo con los términos del Contrato de la ESA bajo el que fue producido.

Este informe ha sido producido siguiendo las instrucciones y requisitos del usuario y se proporciona estrictamente "tal cual" sin ninguna otra garantía. El usuario del informe reconoce que el autor o autores originales y el organismo de financiación correspondiente no asumen ninguna responsabilidad por el uso de este informe ni por las interpretaciones o inferencias basadas en dichos usos.

SOCIOS DEL CONSORCIO

Nombre de la compañía	Indra Sistemas SA	GISAT S.R.O.	ARGANS France	Planetek Italia	Central Institution for Meteorology and Geodynamics	Bureau de Recherches Géologiques et Minières	Nazka Mapps
Nombre corto	Indra	Gisat	ARGANS	Planetek	ZAMG	BRGM	Nazka
País	Spain	Czech Republic	France	Italia	Austria	France	Belgium

TABLA DE CONTENIDOS

Resumen ejecutivo	1
Servicio de observación de la tierra: evaluación de la vulnerabilidad	2
<hr/>	
Aspectos destacados	2
Especificación del producto EO: indicador de vulnerabilidad y exposición	2
Descripción	2
Formato	3
Resolución	3
Datos de entrada	4
Breve descripción metodológica	4
Limitaciones de la metodología y los datos de entrada y limitaciones respectivas de uso	15
Evaluación de la precisión / enfoque de control de calidad	15
EO product specification: P-SBAS	17
Descripción	17
Formato	17
Resolución	17
Datos de entrada	17
Breve descripción metodológica	18
Evaluación de la precisión / enfoque de control de calidad	21
Guía de uso	23
Resultados	24

ÍNDICE DE FIGURAS

Figure 1: Indicador de vulnerabilidad para la pendiente	5
Figure 2: Diez elementos del terreno. Fuente: Jasiewicz and Stepinski (2013).	6
Figure 3: Ejemplo de aplicación de la derivación del geomorfón con diferente granularidad.	7
Figure 4: Indicador de vulnerabilidad para geomorphons.	8
Figure 5: Geología de la isla La Española (modificada después de Mann et al., 1991, y Gorczyk et al., 2007). El área de estudio se indica mediante el marco discontinuo rojo.	9
Figure 6: Indicador de vulnerabilidad para geología.	9
Figure 7: Indicador de vulnerabilidad para uso del suelo / cobertura del suelo.	12
Figure 8: Indicador de vulnerabilidad para la distancia de falla.	13
Figure 9: Ejemplo de información de deslizamientos de tierra (punto y polígono) en el área de Puerto Plata.	15
Figure 10: Validación del indicador de vulnerabilidad derivado: indicador de vulnerabilidad para deslizamientos de tierra (información puntual) como se describe en el inventario de deslizamientos de tierra proporcionado ("puntos deslizamientos", 3.529 píxeles).	16
Figure 11: Validación del indicador de vulnerabilidad derivado: indicador de vulnerabilidad para deslizamientos de tierra (información poligonal) como se describe en el inventario de deslizamientos de tierra proporcionado ("áreas deslizamientos mayo", 458,745 píxeles).	16
Figure 12: Las fechas de detección de Sentinel-1 orbitas 33, 69 y 106.	18
Figure 13: Deformación media anual de la superficie (en LOS) dentro de los "geomorphons".	19
Figure 14: Ángulo de pendiente y distribución de puntos SBAS (puntos rojos).	20
Figure 15: Distribución espacial de clases de vegetación y puntos InSAR SBAS derivados de GEP (negro).	21

Figure 16: Desplazamiento superficial medio por año dependiendo de la elevación. La transparencia corresponde a la coherencia de la serie temporal InSAR, el color indica la dirección de la órbita.	21
Figure 17: Series temporales de resultados de deformación que exceden las tasas medias de deformación anual de 2,5 cm por año. La forma del punto indica el número de la órbita, el color representa la coherencia de la serie de tiempo de InSAR.	22
Figure 18: Número de píxeles P-SBAS disponibles dentro de las subregiones geomorfológicas definidas.	22
Figure 19: Ejemplo de la capa de indicador de vulnerabilidad con simbología predefinida que se muestra después de la apertura de la plantilla QGIS qgz entregada en el software QGIS. Fondo de la imagen: Satélite ESRI / Relieve sombreado.	23
Figure 20: Indicador de vulnerabilidad general para toda el área de interés.	24
Figure 21: Vulnerabilidad de las áreas urbanizadas.	25
Figure 22: Vulnerabilidad de la red vial.	25
Figure 23: Desplazamientos superficiales medios anuales para subregiones geomorfológicas definidas (celdas geomorfológicas).	26
Figure 24: Desplazamientos superficiales máximos anuales para subregiones geomorfológicas definidas (celdas geomorfológicas).	26

ÍNDICE DE TABLAS

Table 1-1 Datos de entrada	4
Table 1-2 Tabla de reclasificación "lookup-table" para la pendiente	5
Table 1-3 Tabla de reclasificación Lookup-table para geomorphons	6
Table 1-4 Tabla de reclasificación "Lookup-table" para unidades geológicas	10
Table 1-5 Tabla de reclasificación "Lookup-table" para LULC (clases de uso y cobertura del suelo) relacionados con la necesidad de irrigación	11
Table 1-6 Tabla de reclasificación para los factores de entrada "pendiente, geomorfos, geología, distancia a las líneas de falla, riego LULC" como base para el indicador de vulnerabilidad.	14
Table 1-7 Conjuntos de datos de entrada: Sentinel-1 (SLC – productos complejos de aspecto único)	17

ACRONIMOS

AOI	Area of Interest –	Area de Interés
DEM	Digital Elevation Model	Modelo Digital de Elevación
DInSAR	Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar	Radar de apertura sintética interferométrica diferencial
DRR	Disaster Risk Reduction	Reducción de Riesgo de Desastres
EO	Earth Observation	Observación de la Tierra
EO4SD	Earth Observation for Sustainable Development	Observación de la Tierra para el Desarrollo Sostenible
ESA	European Space Agency	Agencia Espacial Europea
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations	Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación
GEP	Geohazard Exploitation Platform (ESA)	Plataforma de explotación de riesgos geológicos (ESA)
InSAR	Interferometric Synthetic Aperture Radar	Radar interferométrico de apertura sintética
LOS	Line of Sight	línea de visión
LTP	Local ternary pattern	Patrón ternario local
LULC	Land use/ Land Cover	Uso y cobertura del suelo
DEM/MDE	Digital Elevation Model	Modelo Digital de Elevaciones
P-SBAS	Parallel Small Baseline Subset	Subconjunto de línea de base pequeño paralelo
SLC	Single Look Complex	Complejo de una sola mirada
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission	Misión de Topografía de Radar de Transbordador
WLC	Weighted linear combination	Combinación lineal ponderada

Resumen ejecutivo

El servicio EO4SD-DRR ofrece un conjunto de productos destinados al apoyo, basado en evidencias, para la evaluación del impacto de terremotos en la República Dominicana. La información geoespacial proporcionada describe la vulnerabilidad de los activos expuestos (áreas de construcción, red de carreteras) a los impactos de los terremotos en términos de estabilidad de taludes.

En total, los productos de cuatro servicios se presentan a las partes interesadas locales (usuarios institucionales) y al Banco Mundial. Los resultados han sido producidos por los socios del proyecto EO4SD-DRR, Indra y ZAMG, utilizando tecnología de observación de la tierra de última generación mediante el uso de diversas imágenes satelitales, DEM disponibles, datos auxiliares proporcionados por partes interesadas locales y técnicas analíticas. En resumen, los productos entregados comprenden:

- (i) **Indicador de vulnerabilidad para la estabilidad de taludes derivado de la suma ponderada de factores de entrada (por ejemplo, pendiente, geología, uso del suelo / cobertura del suelo, distancia a las fallas);**
- (ii) **exposición de áreas construidas a la vulnerabilidad al impacto de terremotos;**
- (iii) **exposición de carreteras a la vulnerabilidad al impacto de terremotos; y**
- (iv) **evaluación de la estabilidad del talud basada en la deformación de la superficie derivada de InSAR.**

Nota: algunas figuras de este informe y algunos términos en tablas permanecen en inglés, por haber sido generadas originalmente en ese idioma. La traducción o explicación en castellano aparece en los pies de las figuras y tablas.

Servicio de observación de la tierra: evaluación de la vulnerabilidad

Aspectos destacados

Sobre la base de múltiples fuentes de datos geoespaciales, que reflejan importantes precursores relacionados con la ocurrencia de deslizamientos de tierra inducidos por terremotos, se deriva un indicador de vulnerabilidad para la evaluación del impacto de los terremotos. Al cruzar los activos expuestos (área construida, red vial) con el indicador de vulnerabilidad, se obtiene la vulnerabilidad de los elementos en riesgo.

Especificación del producto EO: indicador de vulnerabilidad y exposición

Descripción

La evaluación de la estabilidad del talud, es decir, la susceptibilidad a los deslizamientos de tierra, depende principalmente de un inventario de deslizamientos exhaustivo y completo. Tales inventarios representativos juegan un papel crucial en los modelos de susceptibilidad estadísticos clásicos, ya que representan la variable objetivo a modelar. En términos de deslizamientos de tierra inducidos por terremotos, un inventario de deslizamientos de tierra inducidos por terremotos respectivo sería el mejor punto de partida para un buen modelo de susceptibilidad. En el área de observación en el norte de la República Dominicana, el inventario de deslizamientos de tierra proporcionado (información de puntos: posición, información de polígono: tamaño / área) no cumplió con los requisitos para servir como base para un enfoque de modelado de susceptibilidad a deslizamientos de tierra basado en datos de inventario histórico.

Con el fin de proporcionar información sobre el impacto de los terremotos en la estabilidad de la pendiente, utilizamos la experiencia sobre la relación entre diferentes parámetros topográficos (por ejemplo, pendiente, situación geomorfológica en general), uso y cobertura del suelo (LULC) e información sísmica (posición de las líneas de falla) para describir la situación topográfica de píxeles individuales (por ejemplo, Michael & Samanta, 2016). La información topográfica, LULC y sísmica se ponderan y combinan en un "indicador de vulnerabilidad". Debido a la falta de información completa sobre la ocurrencia de deslizamientos de tierra, el producto proporciona un indicador de vulnerabilidad en toda el área para la estabilidad de taludes inducida por terremotos. Como se mencionó brevemente antes, se utilizaron en detalle los siguientes conjuntos de datos geoespaciales, que representan importantes precursores de los deslizamientos de tierra:

- (1) Pendiente
- (2) "Geomorphons"¹
- (3) Geología
- (4) LULC
- (5) Distancia a las líneas de falla

Cada una de las capas de entrada se reclasificó individualmente de acuerdo con tablas de búsqueda específicas de precursores, que se establecieron específicamente para el área de interés. El indicador de vulnerabilidad general final se obtuvo como una media ponderada de

¹ Geomorphon es un nuevo concepto de presentación y análisis de formas del terreno. Este concepto utiliza un patrón de 8 elementos de la vecindad de visibilidad y rompe la limitación conocida del enfoque de cálculo estándar donde todas las formas del terreno no se pueden detectar en un tamaño de ventana único. El patrón surge de una comparación de un píxel de enfoque con sus ocho vecinos comenzando por el que se encuentra al este y continuando en sentido antihorario produciendo un operador ternario.

estas capas de entrada reclasificadas. Esto implica que el indicador final comprende todos los subindicadores para todas las capas de entrada, ponderados de acuerdo con su contribución esperada al desencadenamiento de deslizamientos de tierra inducidos por terremotos.

Formato

- Mapas (PDF)
- Datos geoespaciales (GeoTIFF, Geopackage)

Resolucion

- Espacial:
 - Ráster data: 30 metros
 - Vector data: Segmentos de carretera disponibles en OpenStreetMap
- Temporal: El indicador de vulnerabilidad constituye una instantánea en el tiempo a mayo de 2021.

Datos de entrada

Table 1-1 Datos de entrada

Dato	Formato	Fuente	Uso
SRTM	Ráster	NASA	Base para el análisis geomorfométrico; Factor para el indicador de vulnerabilidad
Geología	PDF / Imagen	Banco Mundial / Mann et al. (1991)	Factor para el indicador de vulnerabilidad
Fallas	Vector	Banco Mundial	Cálculo de la distancia a las fallas; Factor para el indicador de vulnerabilidad
LULC	Ráster	EO4SD-Indra	Factor para el indicador de vulnerabilidad
Área construida	Ráster	EO4SD-Indra	Exposición / elementos en riesgo
Red vial	Vector	OpenStreetMap	Exposición / elementos en riesgo

Breve descripción metodológica

La implementación de los productos se llevó a cabo en dos etapas:

- (1) Cálculo del indicador de vulnerabilidad:
 - Derivación de geomorfos, agregación de clases de geomorfos a un tamaño razonable (500 m * 500 m)
 - Digitalización del mapa geológico (modificado después de Mann et al., 1991 y Gorczyk et al., 2007)
 - Ponderación de los factores de entrada: Pendiente, LULC (que también sirve como proxy para el riesgo), distancia a las líneas de falla (mayor y menor), geología (propensa a la estabilidad de la pendiente)
 - Garantía de calidad: incluyendo los puntos de deslizamiento de tierra proporcionados y la extensión (por interpretación visual).
- (2) Vinculación de la vulnerabilidad a la exposición:
 - Vulnerabilidad del área de construcción
 - Vulnerabilidad de la red de carreteras

Dado que el inventario de deslizamientos de tierra proporcionado no cumplía con las medidas de calidad deseadas (integridad, verosimilitud), que permitirían un mapeo robusto de la susceptibilidad a los deslizamientos de tierra, se estableció un enfoque diferente basado en la obtención de un indicador de vulnerabilidad física. Los factores contribuyentes que fueron considerados como precursores potenciales en la evaluación de la zona norte de la República Dominicana se presentan a continuación.

Pendiente

En general, las pendientes son sub-sistemas dinámicos de cadenas de procesos geomorfológicos expresados en una amplia gama de diferentes magnitudes de movimiento. Las magnitudes del proceso pueden variar de unos pocos mm a cm por año (fluencia) a m/s en eventos espontáneos de caída de rocas/bloques. El gradiente de pendiente es una información principal para caracterizar la estabilidad de la pendiente, ya que, por ejemplo, controla la condición del agua del subsuelo. Gradiente de pendiente mayor que $\text{appr. } 35^\circ$ son propensos a deslizamientos de tierra. La pendiente se derivó directamente del DEM SRTM (a una resolución espacial de 30 m) y se clasificó de la siguiente manera:

Table 1-2 Tabla de reclasificación “lookup-table” para la pendiente

Pendiente	Indicador
0 – 10 °	1
10 – 25 °	2
25 – 35 °	4
> 35 °	5

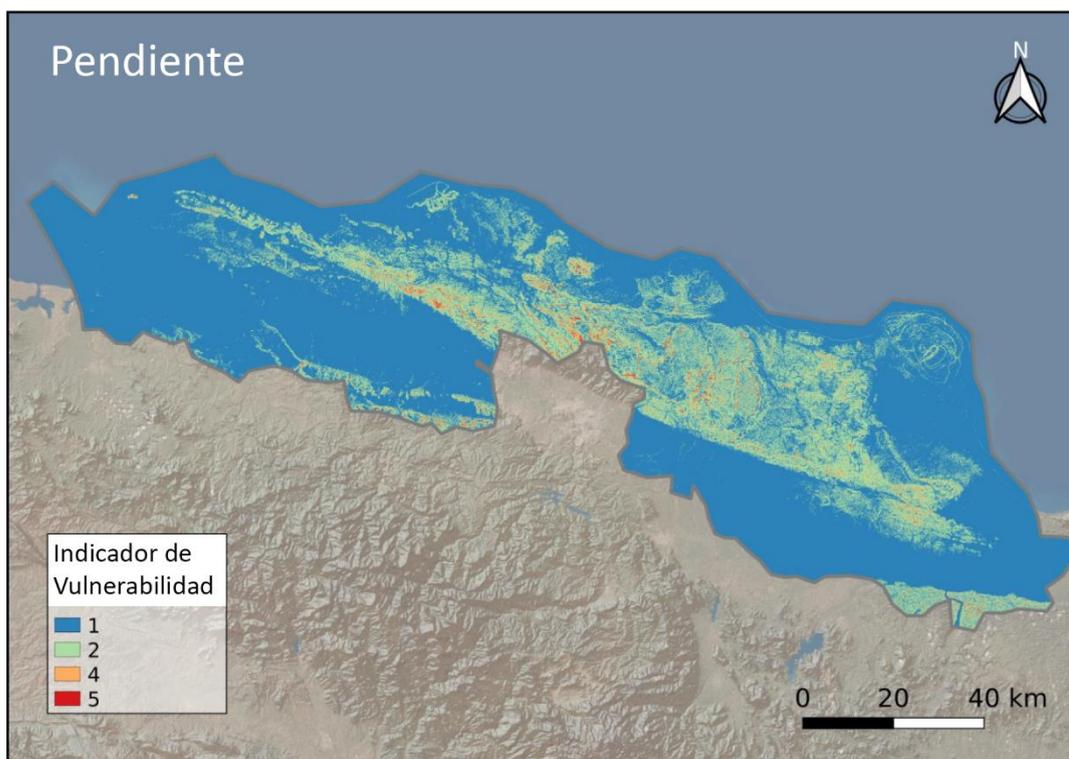


Figure 1: Indicador de vulnerabilidad para la pendiente

“Geomorphons”

El enfoque de “geomorphons” para la clasificación del terreno fue desarrollado por Jasiewicz y Stepinski (2013). En comparación con otros enfoques y algoritmos de clasificación del terreno, que se basan únicamente en derivados de modelos digitales de elevación (DEM), el enfoque se basa únicamente en los conceptos de visión artificial e intenta imitar mejor el enfoque del análisis humano de MDE. Los MDE son imágenes con valores de gris y, en este caso, la disposición espacial de los valores de celdas denota formas de terreno específicas (por ejemplo, un pico solo está rodeado por celdas de elevación más bajas que la celda de pico). El concepto se basa en el patrón ternario local (LTP) (Liao 2010) donde las celdas vecinas se clasifican en más alto, más bajo o igual. Sin embargo, para tener en cuenta que el algoritmo se adapta a la topografía local Jasiewicz y Stepinski (2013) optaron por no utilizar las celdas vecinas directas, sino las celdas que están en línea de visión. Sobre la base de un conjunto de búsqueda de distancia (L) la línea de visión se utiliza en las ocho direcciones principales (N, NE, E, SE, S ...).

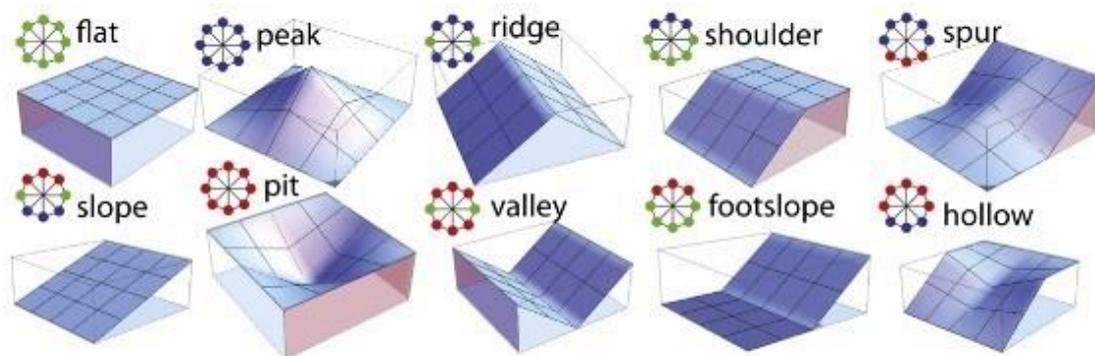


Figure 2: Diez elementos del terreno. Fuente: Jasiewicz and Stepinski (2013).

Table 1-3 Tabla de reclasificación Lookup-table para geomorfón (geomorphons)

Geomorphon (ingles)	Geomorfón (español)	Indicador
flat	plano	1
peak	cima	3
ridge	cresta	3
shoulder	hombro	3
spur	espuela	3
slope	pendiente	5
pit	fosa	2
valley	valle	2
footslope	piedemonte	2
hollow	hueco	2

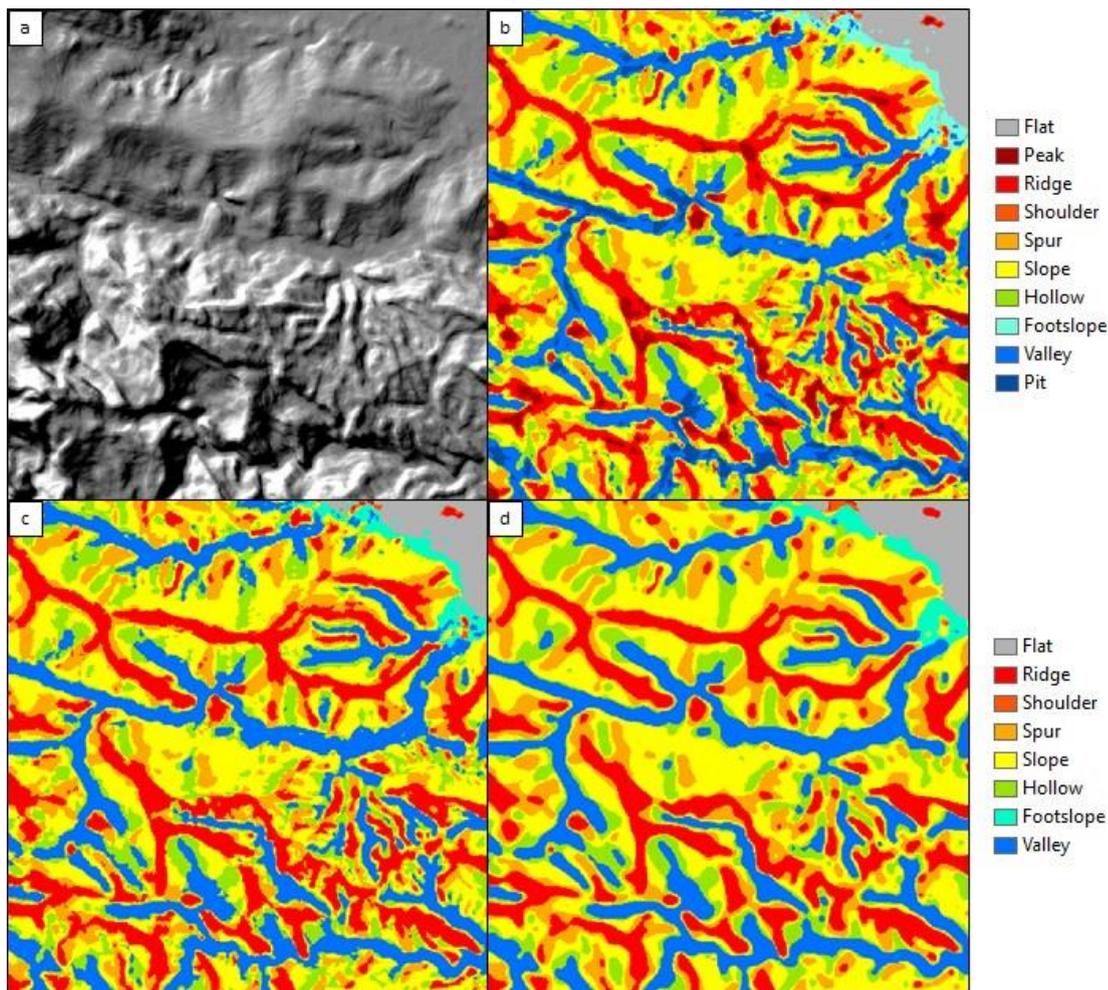


Figure 3: Ejemplo de aplicación de la derivación del geomorfón con diferente granularidad.

El SRTM-DEM con una resolución de 30 m se filtró con un filtro mediano de 5x5 para eliminar posibles errores de elevación. En un paso siguiente, el enfoque de “geomorphons” se aplicó al MDE filtrado, considerando un rango de distancias de búsqueda, así como distancias de salto. Los mejores resultados se obtuvieron con una distancia de búsqueda de 30 píxeles (900 m), un umbral de planitud de 1 grado y 6 píxeles como la distancia de salto (180 m). Estos hallazgos están en línea con Atkinson et al. (2020), Ngunjiri et al. (2020), así como Jasiewicz y Stepinski (2013), que también utilizaron un DEM de 30 m. El mapa de “geomorphons” resultante contenía 10 clases. Para aumentar la homogeneización, este conjunto de datos se filtró nuevamente con un filtro de mediana circular de 5x5.

Diferenciación del área de captación dentro de los “geomorphons”: Las áreas de captación se obtuvieron a partir del DEM utilizando una cadena de procesamiento implementada en SAGA GIS. En un primer paso, se llenaron los sumideros y depresiones en el DEM (pre-procesado), y se conserva una pendiente descendente, utilizando un gradiente de pendiente mínimo. Después de este primer paso, la acumulación de flujo se calculó utilizando la celda más baja del DEM como punto de partida, y las rutas de flujo se trazan recursivamente hacia arriba desde allí (proporcionando acumulación de flujo). Se extrajeron canales y se extrajeron las cuencas hidrográficas. Se utilizó un umbral de 30 para el tamaño mínimo de la cuenca. Para minimizar los errores y suavizar las áreas de captación calculadas se aplicó un filtro mediano de 7x7. Con el fin de obtener tamaños de celda razonables, posteriormente se agregaron “geomorphons” sobre una base de área de captación menor que los 500x500 m.

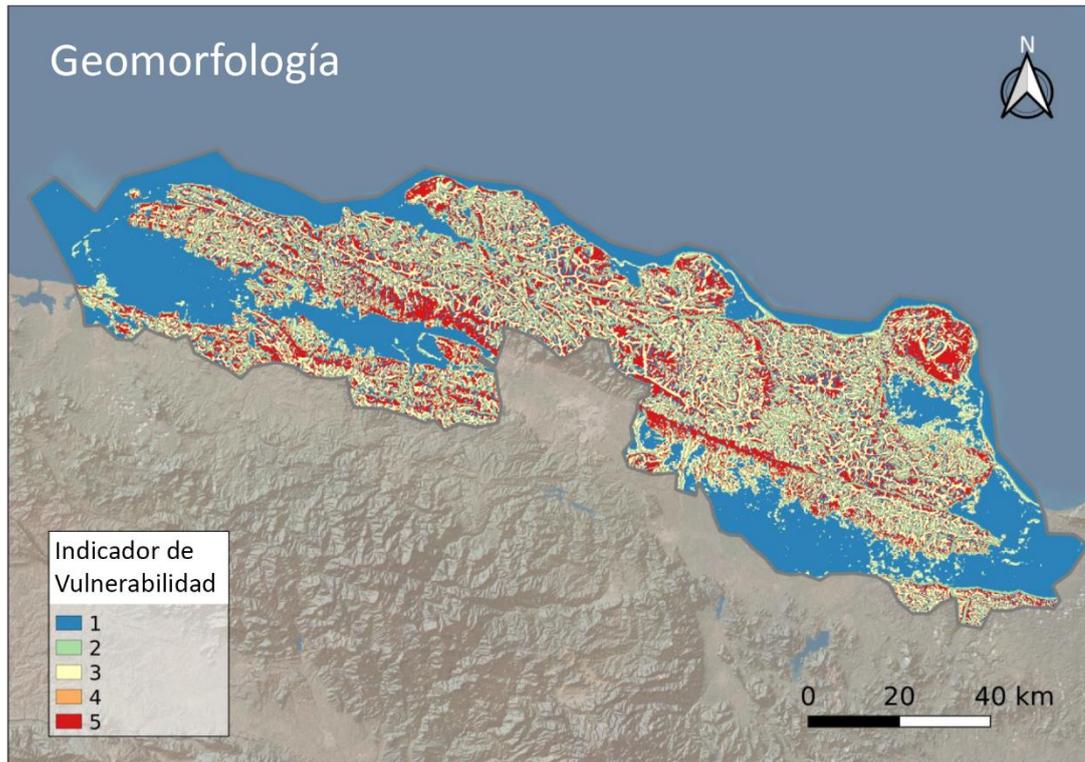


Figure 4: Indicador de vulnerabilidad para geomorfones

Geología

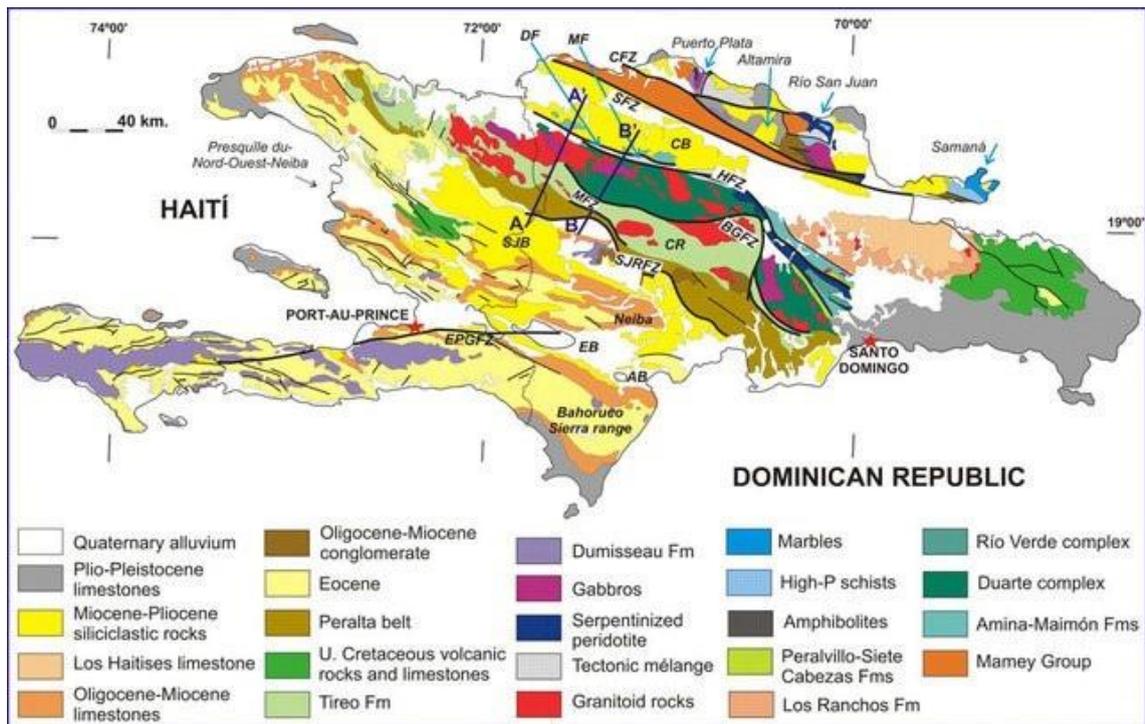


Figure 5: Geología de la isla La Española (modificada después de Mann et al., 1991, y Górczyk et al., 2007). El área de estudio se indica mediante el marco discontinuo rojo.

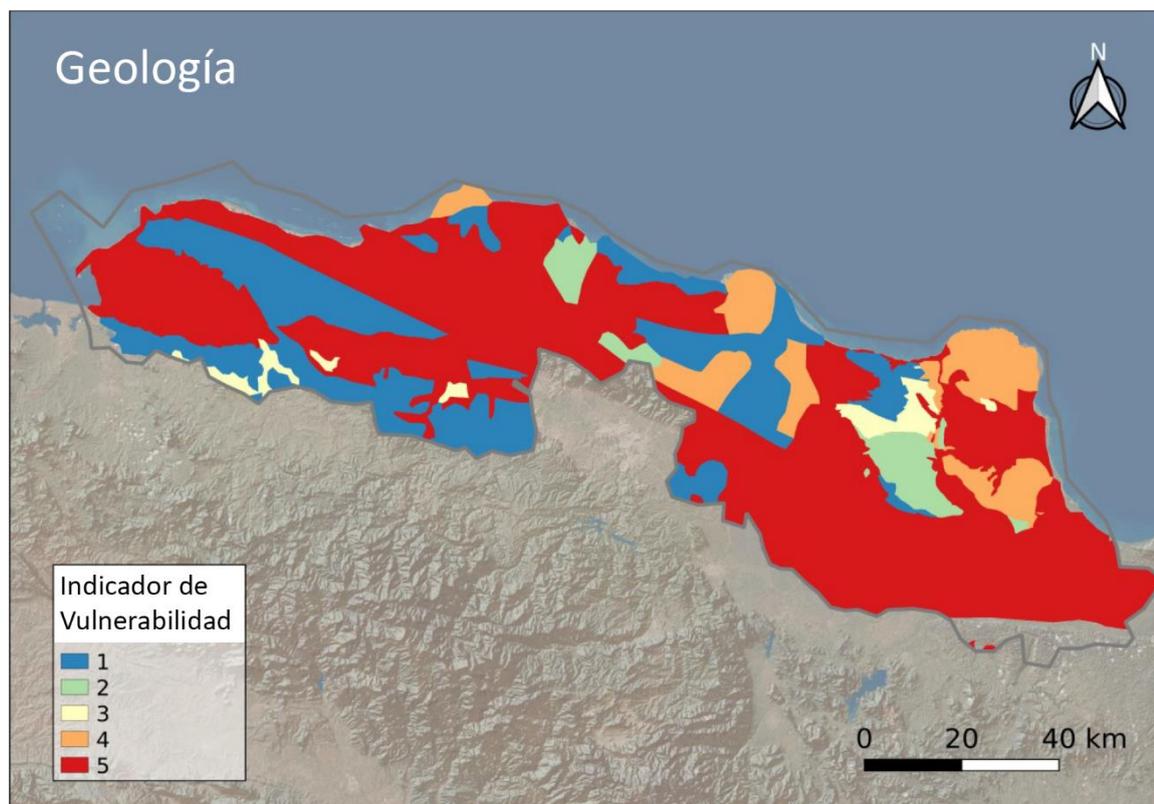


Figure 6: Indicador de vulnerabilidad para geología.

La situación geológica fue utilizando los mapas de Mann et al., 1991, presentando una visión general de la isla La Española (escala 1:1.000.000), y una descripción detallada de la parte oriental del área de observación realizada por Gorczyk et al. (2007), basada en Draper & Nagler, 1991). Los tipos de roca se agregaron a cinco clases que representan las principales unidades geológicas. Dependiendo de su composición y grado de meteorización, las unidades geológicas se comportan de manera diferente en relación con la estabilidad de la pendiente (Kanungo et al., 2007). Las unidades geológicas individuales se agregaron a 5 unidades geológicas principales (Table 1-4) y ponderado después.

Table 1-4 Tabla de reclasificación “Lookup-table” para unidades geológicas

Indicador	Nombre de la clase (inglés)	Nombre de la clase (español)	Unidad geológica principal (inglés)	Unidad geológica principal (español)
5	Quaternary alluvium	Aluvión cuaternario	Sedimentary beds	Lechos sedimentarios
5	Sandstone and conglomerate	Arenisca y conglomerado		
5	Miocene flysch	Flysch del Mioceno		
5	Tectonic melange	mezcla tectónica		
4	Miocene limestone	Caliza del Mioceno	Limestones	Calizas
4	Limestone and marbles	Calizas y mármoles		
4	Plio-Pleistocene limestones	Calizas del Plio-Pleistoceno		
3	Basalt, rhyolite	basalto, riolita	Extrusive igneous	Ígnea extrusiva
2	Gabbro	Gabro	Intrusive igneous	Ígnea intrusiva
2	Dumisseau Fm	dumisseau fm		
1	Schist	Esquisto	Metamorphics	Metamórficas
1	Serpentinized peridotite	Peridotita serpentizada		
1	Serpentine melange	mezcla de serpentinita		
1	Serpentinized peridotite	Peridotita serpentizada		
1	Metaeclogites with garnet bearing peridotites	Metaeclogitas con peridotitas en garra		
1	Miocene-Pliocene siliciclastic rocks	Rocas siliciclásticas del Mioceno-Plioceno		

Uso y cobertura del suelo (LU/LC): un indicador de las necesidades de riego

En general, la cubierta vegetal (extensión, tipo) juega un papel importante en la estabilidad de las laderas, ya que reduce la erosión del suelo. En detalle, las actividades humanas, expresadas en, por ejemplo, el riego agrícola, afectan la estabilidad de los taludes, ya que estas acciones saturan los materiales del subsuelo y, por lo tanto, son un factor para una mayor probabilidad de deslizamientos de tierra (por ejemplo, García-Chevesich et al, 2020). Utilizamos una clasificación LULC -proporcionada por las autoridades de la República Dominicana- que distinguía 42 clases. Con el fin de obtener información relevante sobre la estabilidad de la pendiente, se integraron las necesidades de riego para cada clase (l/kg).

Todas las clases de bosques y arbustos, que en su mayoría no se riegan artificialmente, se resumen como zonas sin riego. Todas las demás clases se ponderan posteriormente después de la evaluación de las necesidades de riego de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO):

Table 1-5 Tabla de reclasificación “Lookup-table” para LULC (clases de uso y cobertura del suelo) relacionados con la necesidad de irrigación

ID	Indicador	Nombre de la clase (inglés-español)		l/kg	ID	Indicador	Nombre de la clase (inglés-español)		l/kg
1	1	Mangroves	Manglares	-	12	1	Parse vegetation	Vegetación escasa	-
4	1	Deciduous trees, semi-humid	Árboles caducifolios, semihúmedos	-	37	1	Agroforestry	Agroforestería	-
5	1	Conifers dense	Coníferas densas	-	39	1	Sand	Arena	-
6	1	Conifers dispersed	Coníferas dispersas	-	44	1	African Palm	Palma Africana	-
7	1	Dry forest	Bosque seco	-	48	1	Pastures	Pastos	-
8	1	Deciduous shrub	Arbusto caducifolio	-	17	1	Agriculture / Pasture	Agricultura / Pasto	-
9	1	Dry shrub	Arbusto seco	-	49	2	Intensive crops	Cultivos intensivos	150
10	1	Shrubs	Arbustos	-	47	2	Pineapple	Piña	250
11	1	Brackish wetlands	Humedales salobres	-	43	2	Citrus fruits	Frutas cítricas	350
13	1	Deciduous trees, humid	Árboles de hoja caduca, húmedo	-	125	2	Grapes	Uvas	600
15	1	Savanna	Sabana	-	105	2	Bananas	Plátanos	950
16	1	Savanna	Sabana	-	120	2	Fruit trees	Árboles frutales	700
18	1	Savanna	Sabana	-	100	3	Avocados	Aguacates	1500
20	1	Urban area	Área urbana	-	51	3	Mangos	Mangos	2000
30	1	Rivers	Ríos	-	42	3	(Sugar) cane	(Caña de azúcar)	1500
31	1	Dams	Presas	-	46	4	Rice	Arroz	3500
35	1	Dragon forest	Bosque de dragones	-	52	4	Coconut	Coco	2500
50	1	Mine	Mío	-	45	4	Tobacco	Tabaco	3500
85	1	Sweet water wetlands	Humedales de agua dulce	-	14	5	Traditional cafe	Café tradicional	21000
144	1	Lakes and lagunes	Lagos y lagunas	-	19	5	Cacao	Cacao	27000
112	1	Deciduous trees	Árboles de hoja caduca	-	137	5	Cafe (unshadowed)	Café (sin sombra)	29000

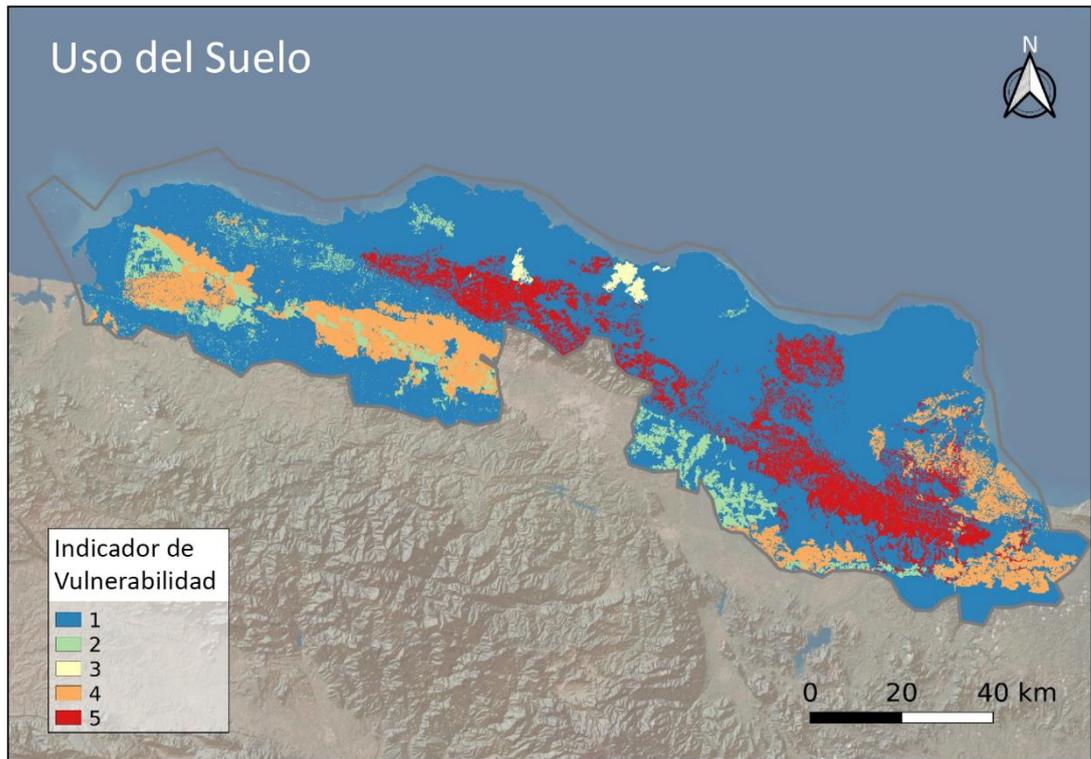


Figure 7: Indicador de vulnerabilidad para uso del suelo / cobertura del suelo.

Distancia a fallas

En terreno montañoso con tectónica activa, los grandes terremotos pueden inducir deslizamientos de tierra. Como los inventarios de deslizamientos de tierra co-sísmicos (por ejemplo, Tian, et al., 2015) o incluso los inventarios regulares completos de deslizamientos de tierra no están disponibles para el área de observación, se implementó un enfoque que aborda la distancia a las fallas de celdas particulares. Esto se basó en evidencias de que, por ejemplo, los deslizamientos de tierra más recientes después de los terremotos se encontraron dentro de los 10.000 m de las fallas, mientras que los deslizamientos de tierra antiguos están dentro de los 8.500 m (Shao et al., 2020).

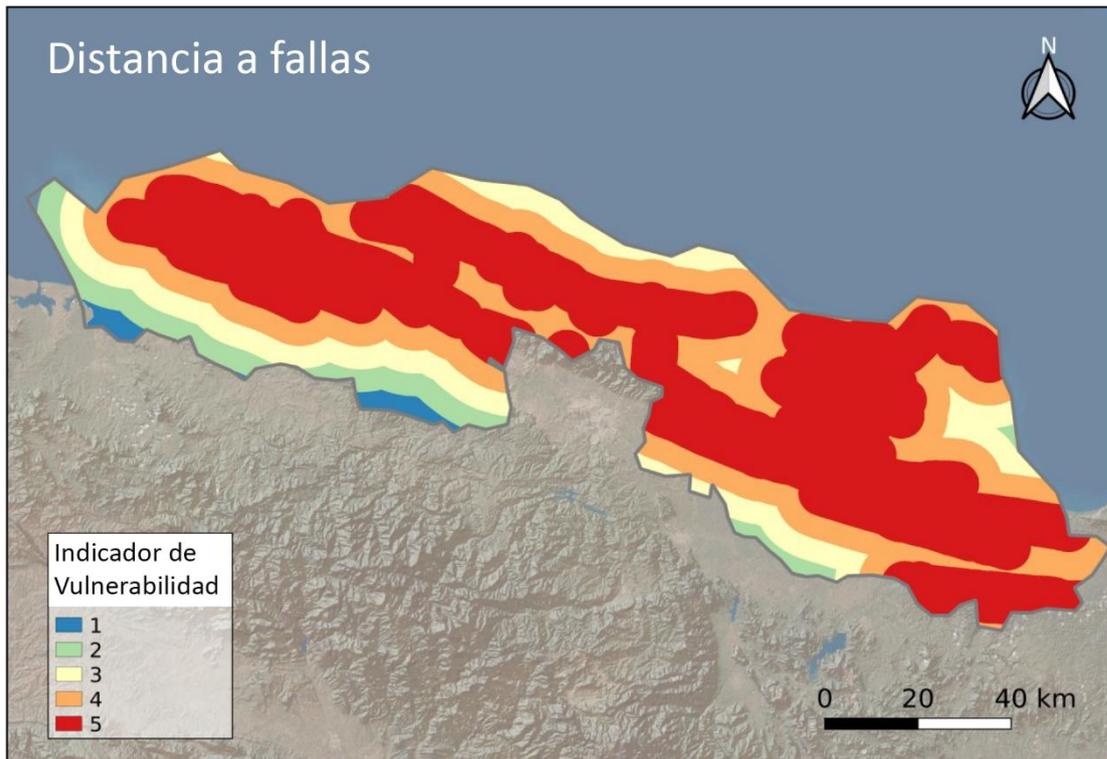


Figure 8: Indicador de vulnerabilidad para la distancia de falla.

Resumen de indicadores para precursores únicos

Las capas de entrada individuales se agregaron en un índice de vulnerabilidad final. A fin de combinar razonablemente los factores de entrada seleccionados, se eligió un enfoque de análisis cualitativo basado en expertos para ponderar los conjuntos de datos de entrada única. Múltiples factores se combinan en la combinación lineal ponderada del modelo basado en datos (Mahini y Gholamalifard, 2006) para indicar el grado de influencia de cada factor en la estabilidad de la pendiente y, por lo tanto, en los deslizamientos de tierra.

Table 1-6 Tabla de reclasificación para los factores de entrada "pendiente, geomorfos, geología, distancia a las líneas de falla, riego LULC" como base para el indicador de vulnerabilidad.

precursor	id	clase	indicador	peso
pendiente	1	0 – 10 °	1	3
	2	10 – 25 °	2	
	3	25 – 35 °	4	
	4	> 35 °	5	
geomorfones	1	plano	1	1
	2	cresta	3	
	3	hombro	3	
	4	espuela	3	
	5	pendiente	5	
	6	hueco	1	
	7	pedemonte	2	
	8	valle	2	
geología	1,2,5,8	lechos sedimentarios	5	1
	4	calizas	4	
	3	ígnea extrusiva	3	
	6	ígnea intrusiva	2	
	7,9,10,11	metamórficas	1	
distancia de la falla	1	< 5 km	5	1
	2	5 – 10 km	4	
	3	10 – 15 km	3	
	4	15 – 20 km	2	
	5	> 25 km	1	
irrigación LULC	1	no	1	1
	2	0 – 1000	2	
	3	1000 -3000	3	
	4	3000 – 5000	4	
	5	> 5000 l/kg	5	

Debido a su flexibilidad y dependencia del conocimiento experto, los modelos de combinación lineal ponderada (WLC) se utilizan con frecuencia para el modelado de la susceptibilidad a los

deslizamientos de tierra y el mapeo de peligros. El WLC combina los medios ponderados de los factores de entrada seleccionados/disponibles expertos (redefinidos). Cada parámetro se clasifica, en nuestro caso a 5 clases (indicador), y se pondera. Los precursores individuales se combinaron linealmente de la siguiente manera: (Table 1-6):

*Vulnerability indicator = mean (3*slope + geomorphons + geology + LULC + distance to major faults)*

Limitaciones de la metodología y los datos de entrada y limitaciones respectivas de uso

La precisión del indicador de vulnerabilidad depende principalmente de dos aspectos: (i) la precisión de los datos de entrada (por ejemplo, la escala), y (ii) la selección de los pesos asignados de cada factor. La distribución espacial del indicador de vulnerabilidad ofrece una buena visión general de la importancia relativa.

Evaluación de la precisión / enfoque de control de calidad

Se realizó una verificación de la coherencia extrayendo la vulnerabilidad calculada para toda la información sobre deslizamientos de tierra disponible en el inventario de deslizamientos de tierra proporcionado. Debido a las inconsistencias observadas dentro de este inventario, que se describe en detalle a continuación, esta validación debe interpretarse con cuidado. Además, hay que señalar que el indicador de vulnerabilidad presenta naturalmente una distribución sesgada a la derecha, ya que las zonas con baja vulnerabilidad son más comunes que las zonas con alta vulnerabilidad. Las zonas de alta vulnerabilidad sólo se producen si todos (o un número sustancial) de los precursores considerados indican una alta vulnerabilidad.

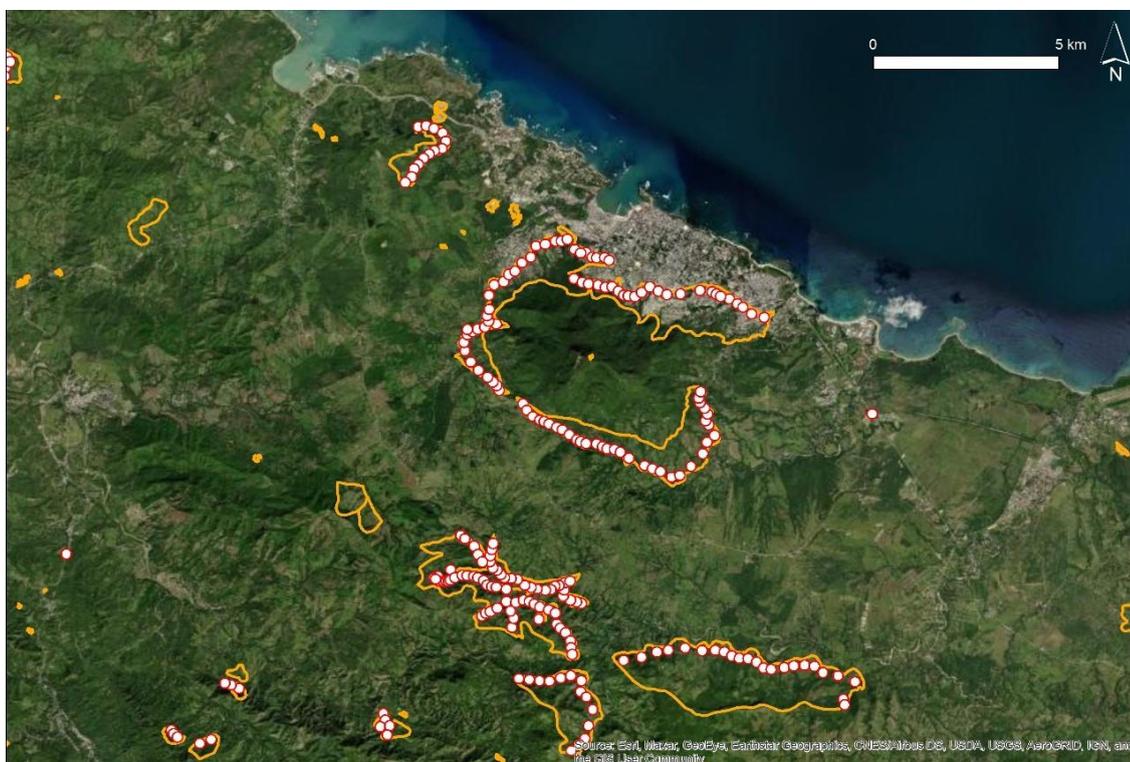


Figure 9: Ejemplo de información de deslizamientos de tierra (punto y polígono) en el área de Puerto Plata.

La información sobre la ocurrencia de deslizamientos de tierra se proporcionó en el punto (3529 puntos de deslizamiento de tierra) y la información de polígonos (4980 polígonos de deslizamiento de tierra). Ambos conjuntos de datos fueron validados por Indra y ZAMG en cuanto a verosimilitud. En general, los puntos de deslizamiento de tierra no son únicos para un evento. En cambio, varios puntos indican una forma de tierra singular (Figure 9). La información puntual describe principalmente el área de escorrentía/deposición, que generalmente está situada en áreas casi planas ($< 15^\circ$). Esto también se refleja en la distribución de los valores de los indicadores de vulnerabilidad para estos puntos, que muestra un valor medio alrededor de 2,4 y un cuartil superior alrededor de 2,7 (Figure 10). Este mayor grado de estabilidad de la pendiente no es sorprendente, teniendo en cuenta la ubicación de los puntos de deslizamiento de tierra contra el hecho de que la pendiente es el factor más importante en la definición del indicador de vulnerabilidad. La posición del área de desprendimiento, que representa una información crucial

para la evaluación de la susceptibilidad a los deslizamientos de tierra, no se refleja en la mayoría de los puntos de deslizamiento de tierra.

La información poligonal de los deslizamientos de tierra no es consistente en muchos sentidos. Los deslizamientos de tierra delineados se superponen pero no describen diferentes eventos en el tiempo. Las extensiones de deslizamiento de tierra son a menudo demasiado grandes y, por lo tanto, probablemente no distinguen eventos individuales. Las delineaciones de deslizamientos de tierra a menudo no son reproducibles, teniendo en cuenta los posibles sistemas de proceso (por ejemplo, deslizamientos de tierra que rodean casi una sola colina; todos los ejemplos en Figure 16). Sin embargo, dado que estos polígonos no solo cubren las áreas de deposición, la media de la distribución de la vulnerabilidad en las áreas mapeadas por polígonos de deslizamiento de tierra es ligeramente mayor (Figure 10).

Como la evaluación de la verdad sobre el terreno no es posible, no se incluyó la información sobre deslizamientos de tierra como factor en el análisis.

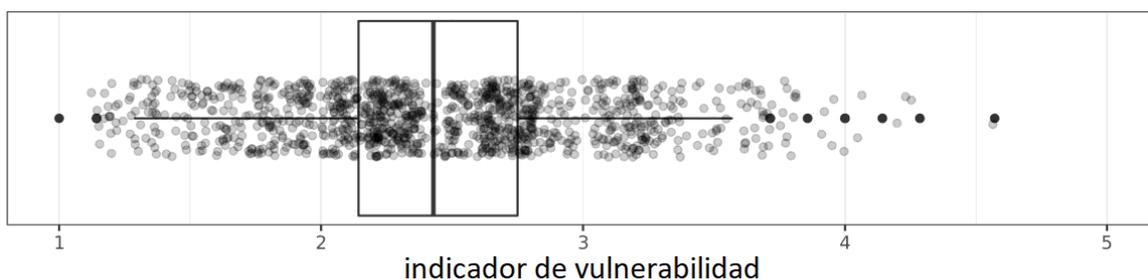


Figure 10: Validación del indicador de vulnerabilidad derivado: indicador de vulnerabilidad para deslizamientos de tierra (información puntual) como se describe en el inventario de deslizamientos de tierra proporcionado ("puntos deslizamientos", 3.529 píxeles).

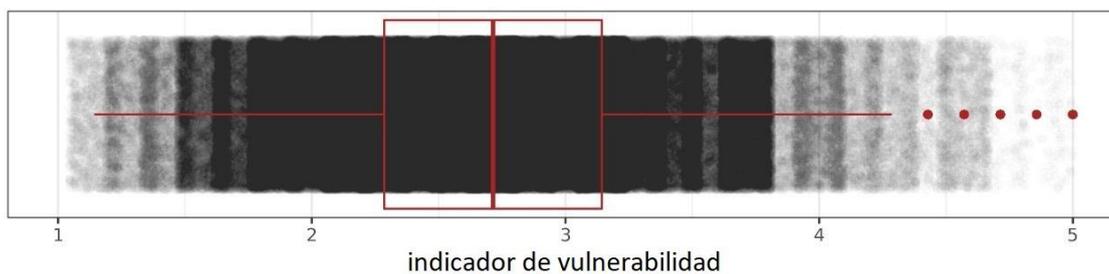


Figure 11: Validación del indicador de vulnerabilidad derivado: indicador de vulnerabilidad para deslizamientos de tierra (información poligonal) como se describe en el inventario de deslizamientos de tierra proporcionado ("areas deslizamientos mayo", 458,745 píxeles).

EO especificación de producto: P-SBAS

Descripción

Los valores de deformación de la superficie basados en satélites se obtuvieron utilizando datos de SAR Sentinel-1 multi-órbita. La información de fase contenida en los productos Sentinel-1 SLC fue la base para el cálculo de los valores de deformación. Estos valores se agregaron posteriormente para caracterizar celdas de “geomorphons” individuales y se validaron a la situación topográfica y la verosimilitud del proceso.

Formato

- Mapas (PDF)
- Datos geoespaciales (GeoTIFF)

Resolución

- Espacial: 90 metros
- Temporal: Dependiendo de la disponibilidad de datos, la resolución temporal mínima es de 6 días. Los intervalos de fechas se proporcionan en Tabla 1-7.

Datos de entrada

Table 1-7 Conjuntos de datos de entrada: Sentinel-1 (SLC – productos complejos de aspecto único)

Conjunto de datos	Dirección de la órbita (español)	Dirección de la órbita (inglés)	Número de órbita	Fecha inicial	Fecha final	Número de escenas	Número de píxeles SBAS
1	Ascendente	Ascending	106	2017-07-04	2020-06-30	93	32,459
2	Ascendente	Ascending	106	2017-07-04	2020-07-12	89	33,516
3	Ascendente	Ascending	106	2017-11-13	2019-11-15	35	52,082
4	Ascendente	Ascending	33	2019-03-03	2020-05-20	24	16,893
5	Descendiente	Descending	69	2019-05-23	2021-01-30	27	337,447

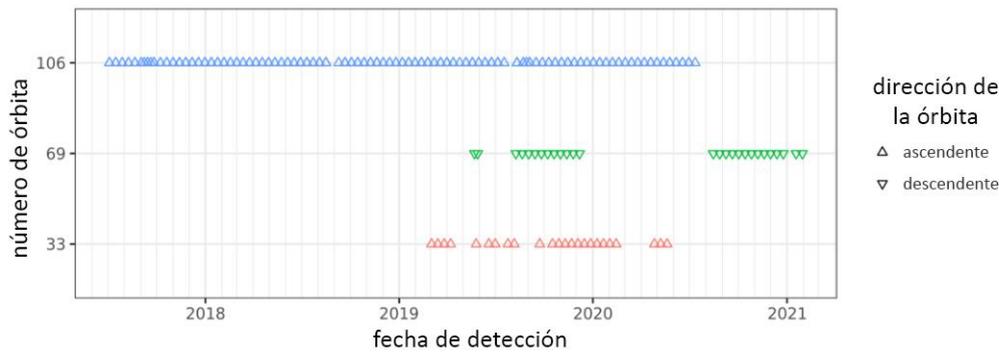


Figure 12: Las fechas de detección de Sentinel-1 orbitas 33, 69 y 106.

Breve descripción metodológica

El procesamiento de InSAR (Radar de apertura sintética interferométrica) se realizó utilizando el servicio P-SBAS (Casu et al., 2014, De Luca et al., 2015) (por CNR-IREA) de la Plataforma de Explotación Temática Geohazard (G-TEP, o GEP) de la ESA. La plataforma GEP se basa en la virtualización y federación de EO-Data satelitales con el fin de proporcionar un servicio de procesamiento sistemático y bajo demanda para las necesidades específicas de los usuarios (ESA, 2021). Esto incluye tanto los datos ópticos como los de SAR que se conectan a, por ejemplo, repositorios completos de Copernicus Sentinel 1-2-3.

P-SBAS stands for Parallel Small Baseline Subset and representa una cadena de procesamiento DInSAR (INSAR diferencial) para la generación de series temporales de deformación superficial y mapas de velocidad media. SBAS es una técnica DInSAR ampliamente utilizada, que se basa sólo en pequeños interferogramas de línea de base espaciales y temporales. Esto permite la mitigación de los fenómenos de ruido que afectan a los interferogramas DInSAR (efectos de descorrelación) y, por lo tanto, maximizar el número de píxeles SAR analizados de forma fiable. La implementación paralela del algoritmo SBAS (P-SBAS) permite la generación de series temporales de deformación en muy poco tiempo aprovechando los sistemas de computación distribuida.

Datos SLC de Sentinel-1 requeridos de 3 órbitas (Figure 12) se ordenaron a través de GEP utilizando el servicio de pedidos de productos ONDA DIAS. Después de establecer un punto de referencia y un umbral para la coherencia temporal, se puede iniciar la cadena de procesamiento P-SBAS no supervisada. Sobre la base de la información orbital y topográfica, los datos de SLC se co-registran y se refieren a la misma cuadrícula espacial. Posteriormente, los pares interferométricos se forman de acuerdo con un criterio mínimo de referencia y se calcula la fase interferométrica diferencial (interferogramas). La diferencia de fase, que se encuentra inicialmente en el dominio $(-\pi, +\pi)$ (fase envuelta), debe desenvolverse y las series de tiempo de desplazamiento finalmente se recuperan.

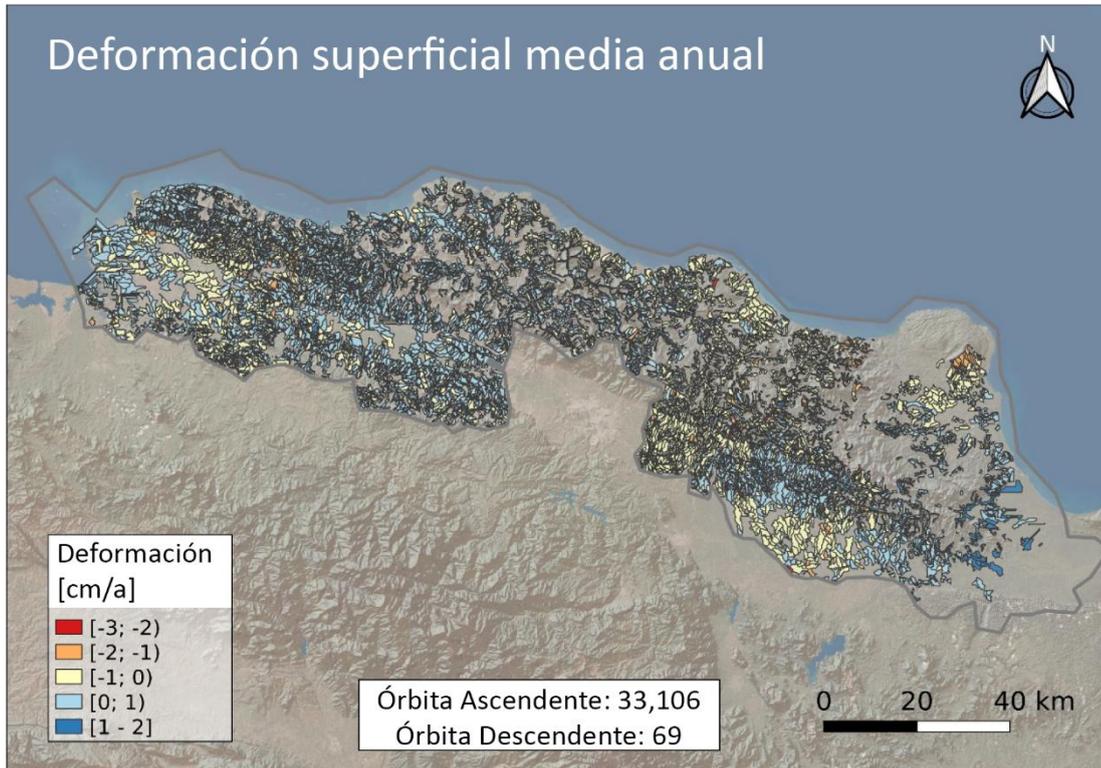


Figure 13: Deformación media anual de la superficie (en LOS) dentro de los “geomorphons”.

Con el fin de caracterizar las geomorfón-celdas individuales en términos de estabilidad de la superficie, los valores anuales de deformación de la superficie de los puntos SBAS (en la dirección de la "línea de visión" (LOS)) se promediaron dentro de las geomorfo-celdas. Las características de deformación superficial basadas en Sentinel-1 muestran que solo unas pocas geomorfinos-células muestran valores medios de LOS más grandes que ± 2 cm por año, lo que probablemente se puede ver como un grado de magnitud de proceso relevante (Figure 13). Resumiendo, este análisis se basa en la interpretación de la distribución puntual del SBAS y el movimiento medio a lo largo de los LOS. En esta etapa, no se ha realizado ninguna comparación con evidencia morfológica y geológica/tectónica hasta el momento. Por lo tanto, la verosimilitud geomorfológica tiene que ser validada especialmente por la "vernición del terreno" a escala de proceso.

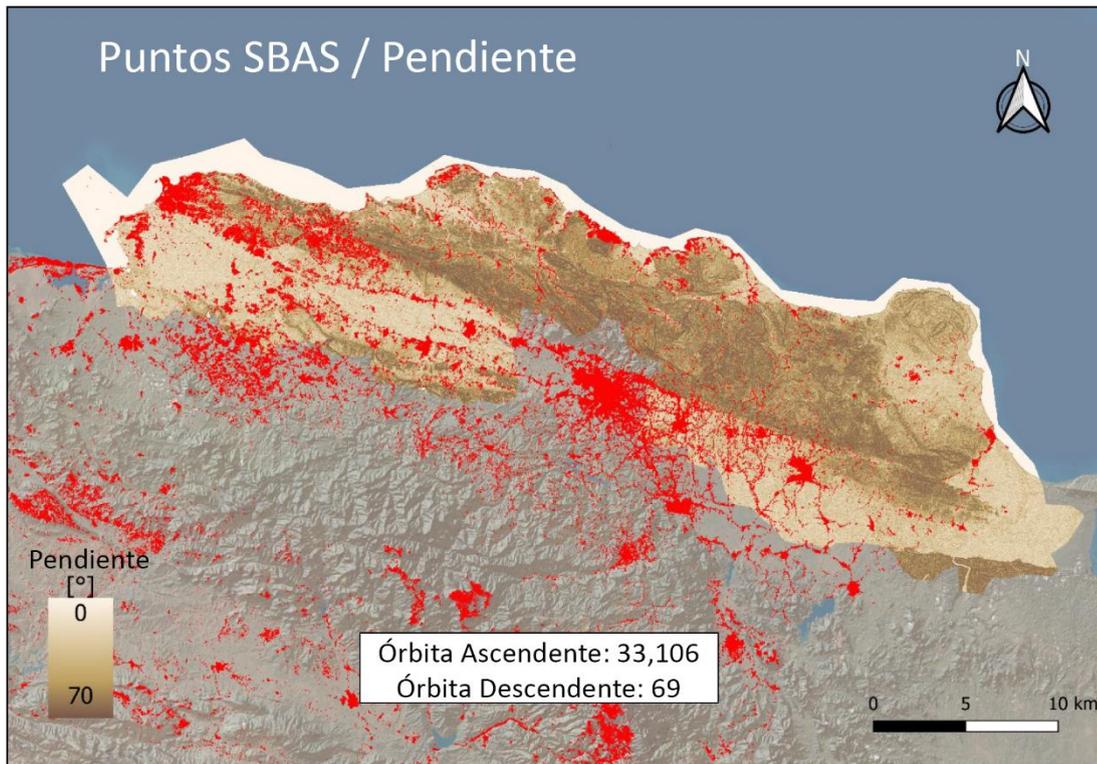


Figure 14: Ángulo de pendiente y distribución de puntos SBAS (puntos rojos).

La estabilidad de la pendiente se controla principalmente por el ángulo de la pendiente y la geología. La distribución de los puntos SBAS en relación a las características de pendiente muestra que los puntos SBAS se encuentran principalmente en áreas planas (Figura 14). Sólo unas pocas áreas en el NO exhiben puntos SBAS en situación de pendiente $> 20^\circ$, que son útiles para la caracterización razonable de la deformación de la pendiente.

Limitaciones de la metodología y los datos de entrada y limitaciones respectivas de uso

Los valores de deformación superficial derivados de DInSAR muestran una distribución distinta dentro del área de observación. Apparently, the vegetation cover (LULC) plays an important role in the distribution of the potential SBAS points. From a methodological point of view, the results achieved by SBAS are the best result of GEP.

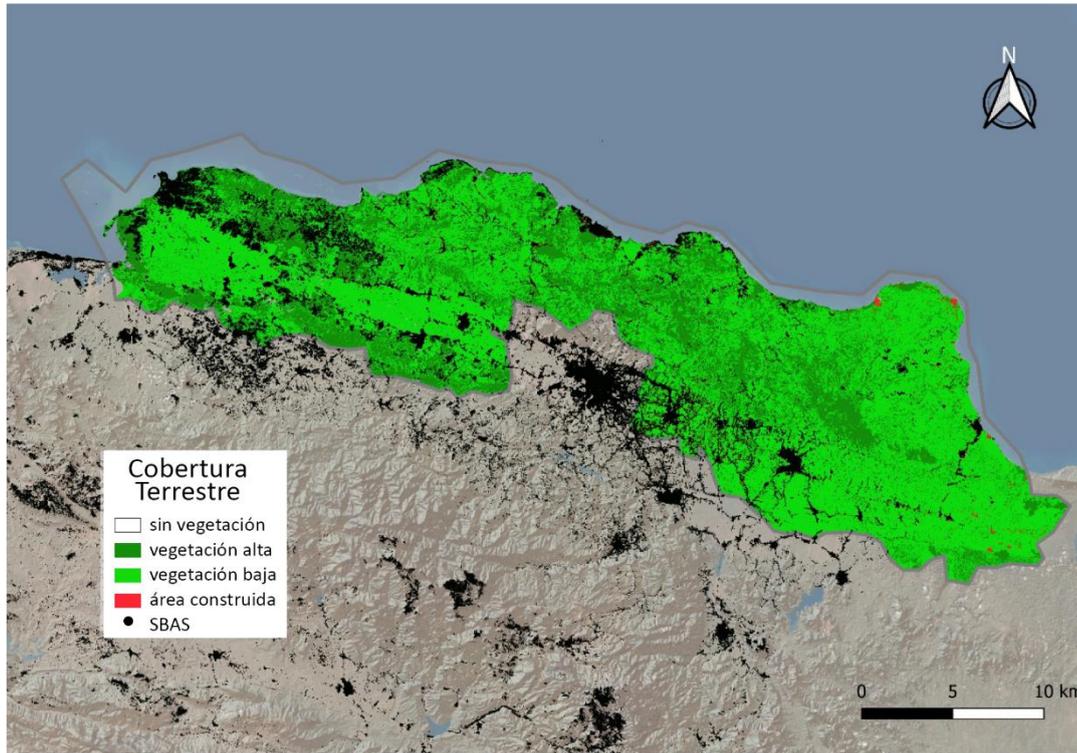


Figure 15: Distribución espacial de clases de vegetación y puntos InSAR SBAS derivados de GEP (negro).

La vegetación y, es decir, la vegetación densa es la principal limitación en el análisis DInSAR. La diferenciación de áreas no vegetadas a áreas con vegetación (baja, alta, Figure 15) muestra la posible relación entre la cobertura vegetal y la información SBAS confiable. Los puntos SBAS están ubicados principalmente en áreas de construcción y a lo largo de la infraestructura lineal.

Evaluación de la precisión / enfoque de control de calidad

La tasa de deformación absoluta muestra una relación inversa con la elevación. Tenga en cuenta que también el número de píxeles disminuye con el aumento de la altitud.

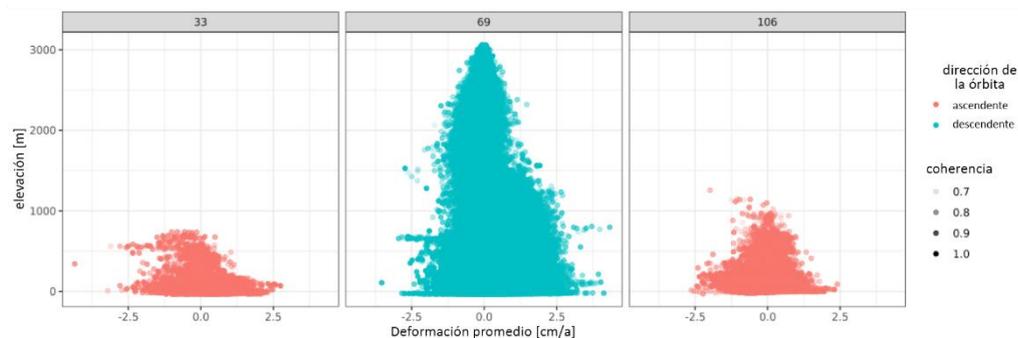


Figure 16: Desplazamiento superficial medio por año dependiendo de la elevación. La transparencia corresponde a la coherencia de la serie temporal InSAR, el color indica la dirección de la órbita.

Sólo un pequeño número de series temporales muestran tasas de deformación sustanciales.

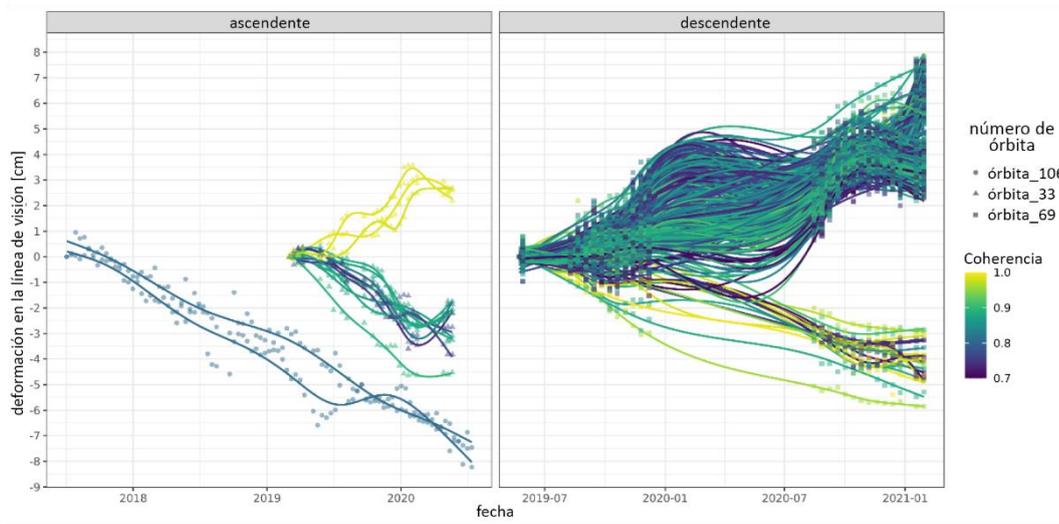


Figure 17: Series temporales de resultados de deformación que exceden las tasas medias de deformación anual de 2,5 cm por año. La forma del punto indica el número de la órbita, el color representa la coherencia de la serie de tiempo de InSAR.

Debido a la densa vegetación, la densidad del dispersor es bastante baja en toda el área de interés. Una gran mayoría de los “geomorphons” solo cuentan con un pequeño número de series temporales P-SBAS, con un número medio de píxeles P-SBAS menor que 5 en todos los conjuntos de datos.

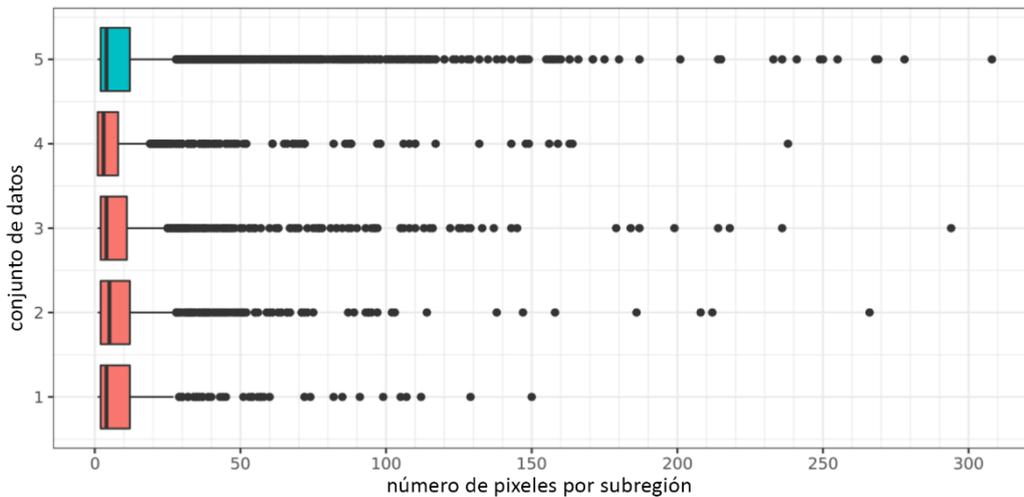


Figure 18: Número de píxeles P-SBAS disponibles dentro de las subregiones geomorfológicas definidas.

Guía de uso

Visualización y análisis de geodatos en entorno SIG

Los geodatos, incluida la simbología predefinida, se pueden mostrar y analizar en varios entornos SIG. Se proporciona un archivo de plantilla QGIS como parte de la entrega.

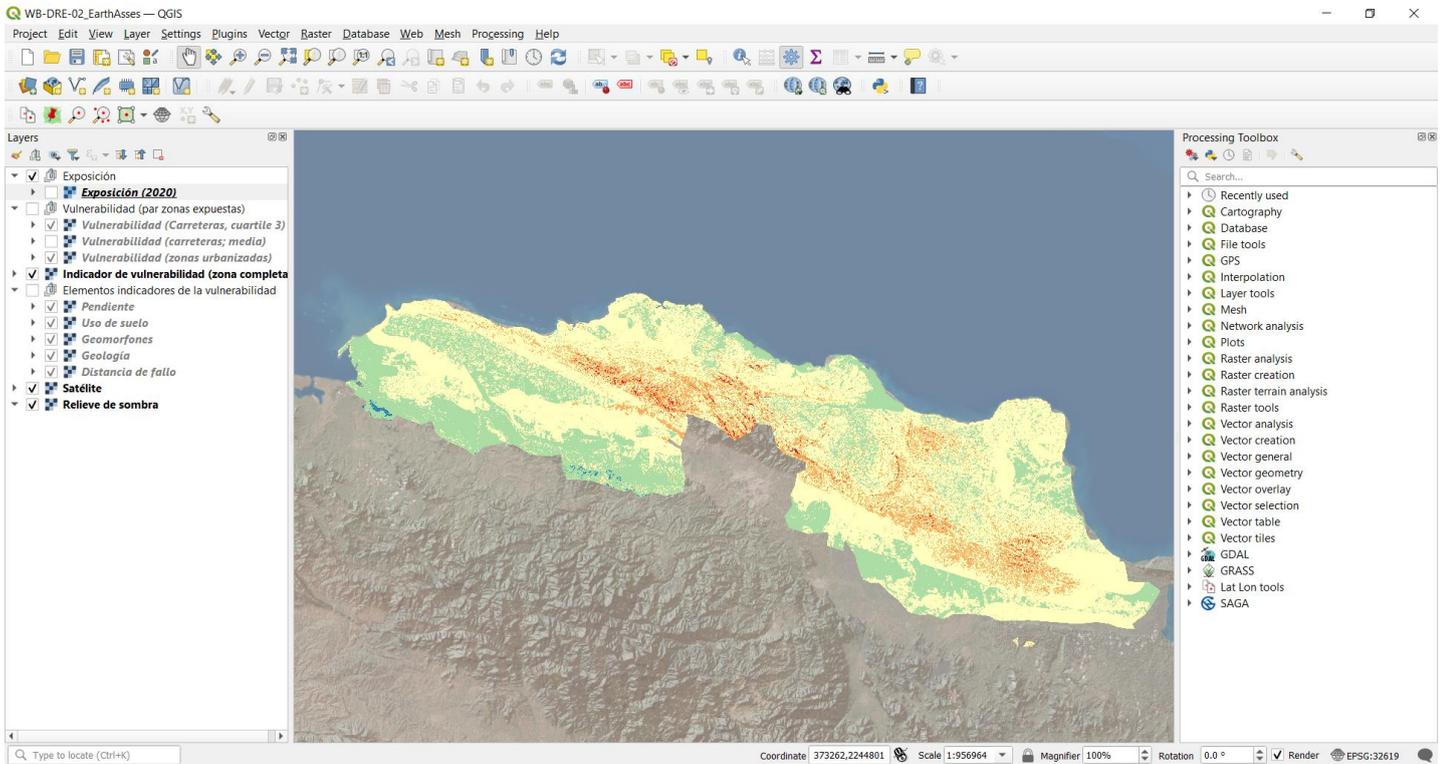


Figure 19: Ejemplo de la capa de indicador de vulnerabilidad con simbología predefinida que se muestra después de la apertura de la plantilla QGIS qgz entregada en el software QGIS. Fondo de la imagen: Satélite ESRI / Relieve sombreado.

Resultados

A continuación, se muestra el indicador de vulnerabilidad general definitivo para toda el área de interés.

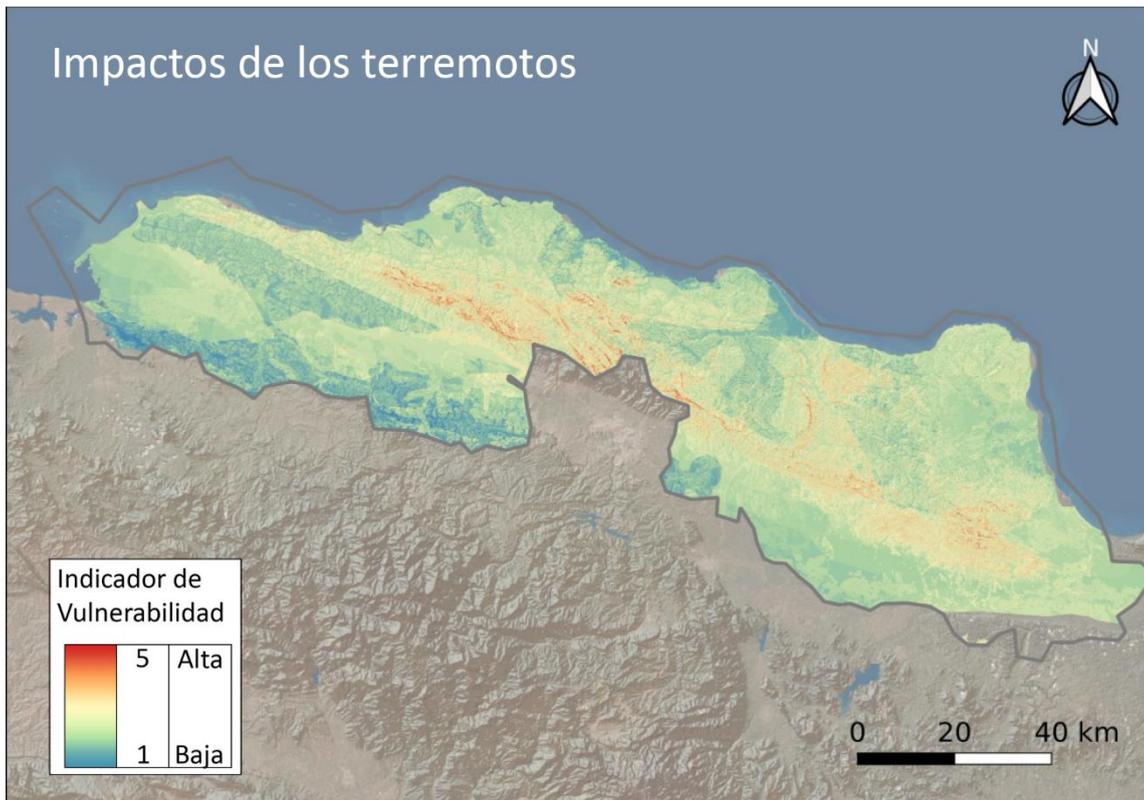


Figure 20: Indicador de vulnerabilidad general para toda el área de interés.



Figure 21: Vulnerabilidad de las áreas urbanizadas.

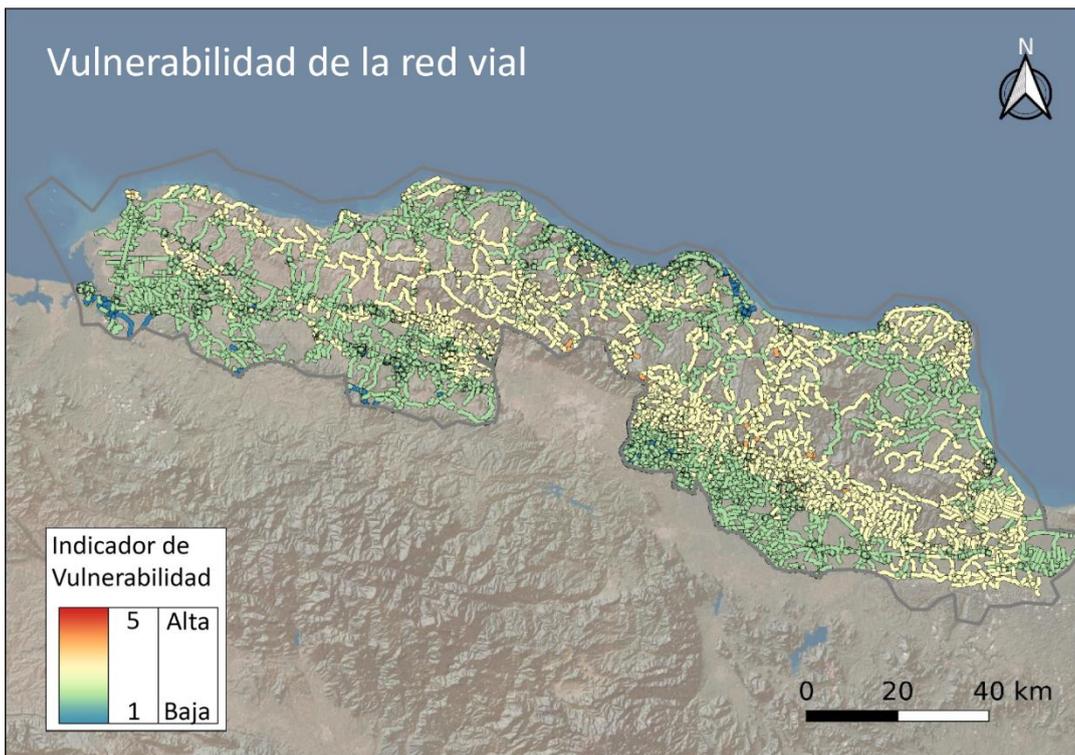


Figure 22: Vulnerabilidad de la red vial.

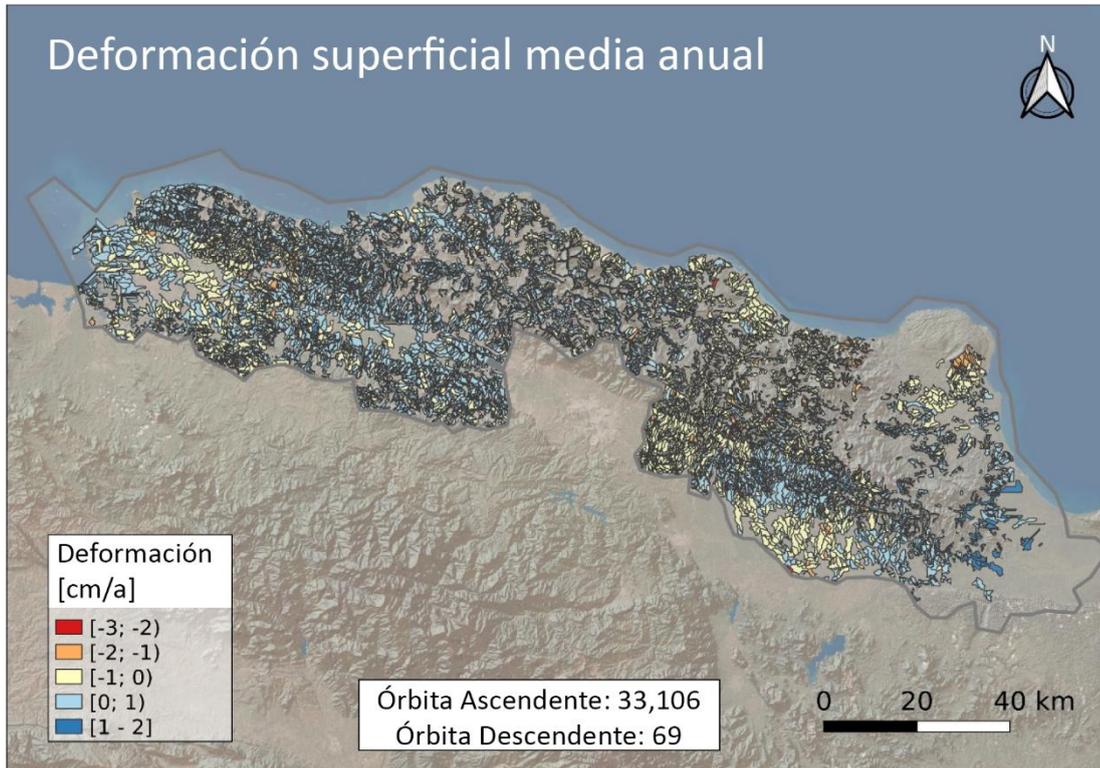


Figure 23: Desplazamientos superficiales medios anuales para subregiones geomorfológicas definidas (celdas geomorfológicas).

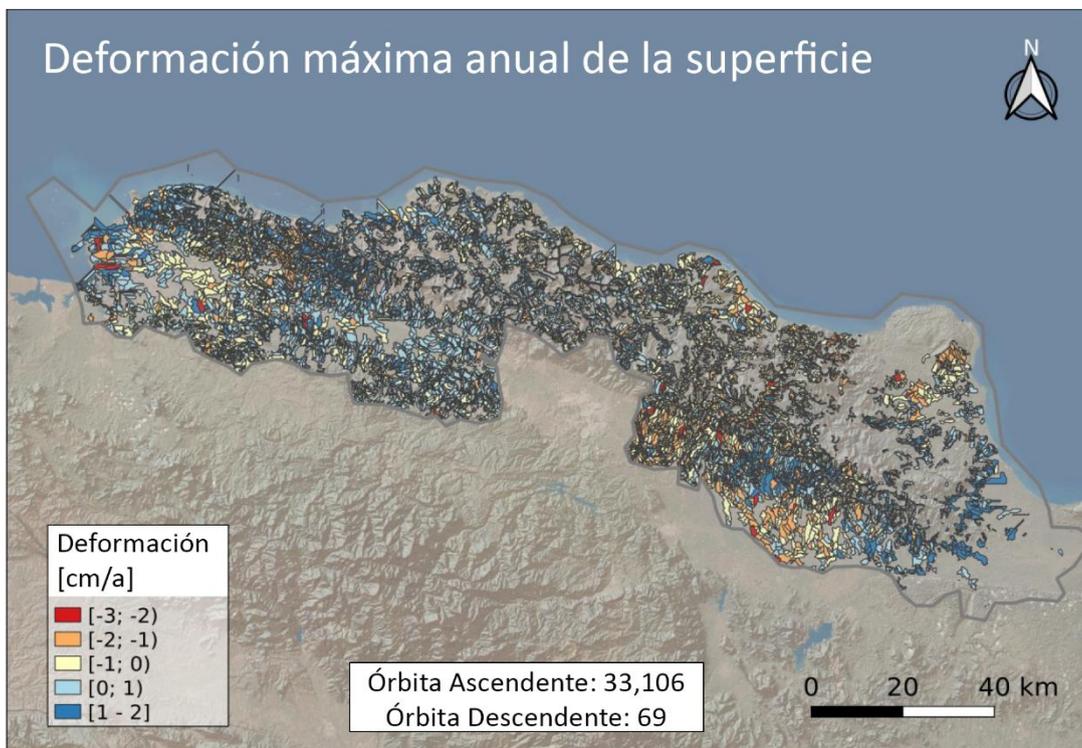


Figure 24: Desplazamientos superficiales máximos anuales para subregiones geomorfológicas definidas (celdas geomorfológicas).

References:

- Atkinson, J., de Clerq, W. and Rozanov, A. (2020): Multi-resolution soil-landscape characterization in KwaZulu Natal: Using geomorphons to classify local soils for improved digital geomorphological modelling. In: *Geoderma Regional* 22
- Casu, F., Elefante, E., Imperatore, P., Zinno, I., Manunta, M., De Luca, C., Lanari, R. (2014): "SBAS-DInSAR Parallel Processing for Deformation Time Series Computation", *IEEE JSTARS*, doi: 10.1109/JSTARS.2014.2322671
- De Luca, C., Cuccu, R., Elefante, S., Zinno, I., Manunta, M., Casola, V., Rivolta, G., Lanari, R., Casu, F. (2015): "An On-Demand Web Tool for the Unsupervised Retrieval of Earth's Surface Deformation from SAR Data: The P-SBAS Service within the ESA G-POD Environment", *Remote Sens.* 2015, 7(11), 15630-15650; doi:10.3390/rs71115630
- Garcia-Chevesich P., Wei X., Ticona J., Martínez G., Zea J., García V., Alejo F., Zhang Y., Flamme H., Graber A., Santi P., McCray J., Gonzáles E. and Krahenbuhl R. (2020): The Impact of Agricultural Irrigation on Landslide Triggering: A Review from Chinese, English, and Spanish Literature. *Water* 2021, 13, 10. <https://dx.doi.org/10.3390/w13010010>
- Gorczyk W., Guillot S., Gerya TV., and Hattori K. (2007): Asthenospheric upwelling, oceanic slab retreat, and exhumation of UHP mantle rocks: Insights from Greater Antilles. *GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS*, VOL. 34, L21309, doi:10.1029/2007GL031059, 2007
- Jasiewicz, J. and Stepinski, T.F. (2013): Geomorphons – a pattern recognition approach to classification and mapping of landforms. In: *Geomorphology* 182, pp. 147-156.
- Kanungo DP., Arora MK., Sarkar S., and Gupta RP (2009): Landslide susceptibility zonation (LSZ) mapping—a review. *J South Asia Disaster Stud* 2(1):81–105.
- Liao, W.-H. (2010): Region Description Using Extended Local Ternary Patterns. 2010 20th International Conference on Pattern Recognition, pp. 1003–1006 (Aug.).
- Mann P, Draper G. and Lewis JF. (1991): Geologic and tectonic development of the North American-Caribbean plate boundary in Hispaniola. *Geological Society of America* (262). DOI: <https://doi.org/10.1130/SPE262>
- Michael AE. and Samanta S. (2016): Landslide vulnerability mapping (LVM) using weighted linear combination (WLC) model through remote sensing and GIS techniques. *Model. Earth Syst. Environ.* (2016) 2:88, DOI 10.1007/s40808-016-0141-7
- Ngunjiri, M.W., Libohova, Z., Owens, P.R. and Schulze, D.G. (2020): Landform pattern recognition and classification for predicting soil types of the Uasin Gishu Plateau, Kenya. In: *Catena* 188.
- Shao, X.; Ma, S.; Xu, C.; Shen, L.; Lu, Y. (2020): Inventory, Distribution and Geometric Characteristics of Landslides in Baoshan City, Yunnan Province, China. *Sustainability* 2020, 12(6), 2433; <https://doi.org/10.3390/su12062433>
- Tian, Y.; Xu, C.; Xu, X.; Wu, S.E. (2015): Chen, J. Spatial distribution analysis of coseismic and pre-earthquake landslides triggered by the 2014 Ludian MS6.5 earthquake. *Seismol. Geol.* 2015, 37, 291–306.



GFDRR
Global Facility for Disaster Reduction and Recovery



GRUPO BANCO MUNDIAL



Socios del consorcio

