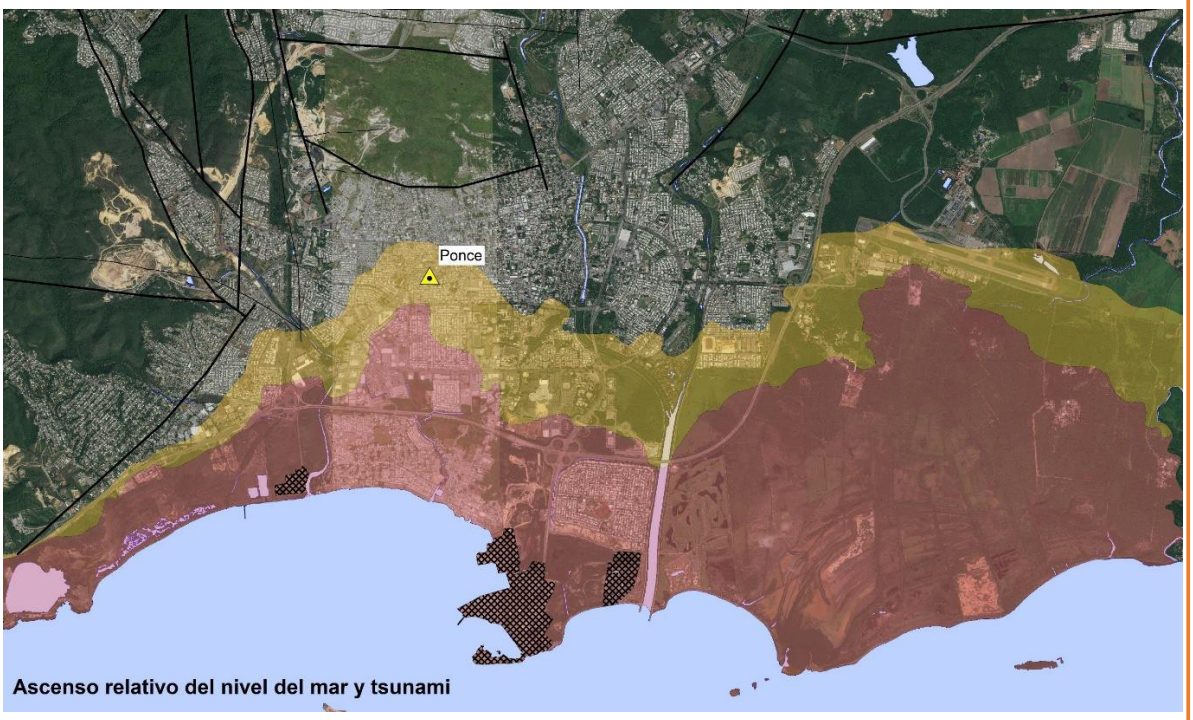


Análisis de alta resolución del riesgo natural (georiesgos y efectos del cambio climático) para el suroeste de Puerto Rico

Allan Astorga-Gättgens. Andreas Mende & equipo SALVETERRA® (septiembre 2021)

Patrocinador y Colaborador: NASA - Programa de Desastres

EARTH SCIENCE
APPLIED SCIENCES
DISASTERS
https://maps.disasters.nasa.gov/

Realizado por: SALVETERRA

TERRA DIAGNOSIS - TERRA HELTH - TERRA RESTAURATION

Análisis de alta resolución del riesgo natural (georiesgos y efectos del cambio climático) para el suroeste de Puerto Rico

Allan Astorga-Gättgens, Andreas Mende & Equipo SALVETERRA (septiembre 2021)

Resumen

Se presenta el resultado de una investigación colaborativa sobre las mejores prácticas para la evaluación de riesgos múltiples en comunidades vulnerables y expuestas del suroeste de Puerto Rico. El estudio se realizó durante el primer semestre del año 2021, bajo el patrocinio del Programa de Desastres de la Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (NASA, por sus siglas en inglés) y la gestión de proyectos de Para la Naturaleza de Puerto Rico.

El objetivo del estudio es realizar un análisis a escala detallado del riesgo a las amenazas naturales (georiesgos y efectos del cambio climático) con un énfasis especial en la amenaza sísmica para los municipios del sector suroeste de Puerto Rico afectados por la actividad sismotectónica de finales del 2019 e inicios del 2020. Esto con el fin de establecer lineamientos prácticos de aumento de la resiliencia humana y de la infraestructura, particularmente la estratégica, con el uso de una metodología de evaluación de riesgo de tipo multivariable y multifactorial (Sistema SALVETERRA).

La base topográfica utilizada se basa en el Modelo Digital de Terreno (MDT), elaborado a partir del método LIDAR (acrónimo del inglés LiDAR, *Light Detection and Ranging o Laser Imaging, Detection, and Ranging*) de la Agencia Federal para el Manejo de Emergencias (FEMA, por sus siglas en inglés), completado con el mapa topográfico del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés), escala 1:24.000. La información satelital procesada se obtuvo de la NASA. Además, se integró información ambiental sobre temas de sismicidad, pozos de extracción de aguas subterráneas y datos sociológicos de diferentes fuentes institucionales de Puerto Rico. Se consultó una considerable cantidad de información científica publicada para Puerto Rico, algunas cuyas fuentes principales se citan en las referencias de este documento. La información obtenida se completó con datos de campo y fotointerpretación de imágenes satelitales de alta resolución.

La metodología aplicada corresponde con SALVETERRA Resiliencia, que tiene como objetivo identificar y categorizar el grado de amenaza (o peligro) a diferentes tipos de georiesgos, riesgos antrópicos y a la salud de las personas, así como los efectos del cambio climático. La metodología multivariable fue desarrollada en Costa Rica como base para la gestión preventiva del riesgo, el ordenamiento ambiental del territorio y la planificación territorial. Durante los últimos años, como producto del intercambio técnico con el Programa de Desastres de la NASA, ha sido mejorada y perfeccionada para ampliar su alcance y pasar a ser un sistema automatizado de datos abiertos para la búsqueda de la sustentabilidad ambiental del progreso humano. El área de estudio corresponde al sector suroeste de Puerto Rico, tiene una superficie de 1.781 Km^2 y una población cercana a los 300 mil habitantes. Está conformada por once municipios: San Germán, Lajas, Sabana Grande, Guánica, Yauco, Guayanilla, Peñuelas, Adjuntas, Utuado, Jayuya y Ponce.

El suroeste de Puerto Rico forma parte de un sistema tectónico complejo, conformado por un área ancestral de arco y antearco del Mesozoico que fue tectónicamente deformada y que ahora conforma la zona trasarco referente a la subducción actual de la trinchera de Puerto Rico, desde el periodo Terciario Superior a la actualidad. Como tal, la zona está constituida por un basamento de litosfera oceánica atrapada y representada principalmente por serpentinitas, sobre las cuales se presentan rocas volcánicas de un arco volcánico que evolucionó desde una geoquímica de arco primitivo a un arco volcánico calco-alcalino maduro. También se presentan abundantes y diversas rocas sedimentarias clásticas y carbonatadas del relleno de la cuenca antearco y, además, batolitos de rocas intrusivas ácidas que muestran la evolución y madurez del arco volcánico hacia el final del Terciario Inferior. El Terciario Superior está representado por sucesiones relativamente espesas de rocas marinas carbonatadas y poco profundas que marcan un cambio importante en la evolución tectónica del arco de islas de Puerto

Rico.

El análisis de identificación de amenazas naturales para el área de estudio, a escala 1:5.000, y el análisis de riesgo multifactorial aplicado permiten concluir que el área de estudio es una zona multirriesgo y que cerca del 60 al 70 % de las edificaciones de esta se encuentran en condiciones de alto a muy alto riesgo ante diferentes fuentes de amenazas naturales (georiesgos) y efectos del cambio climático. Entre las fuentes de amenaza principales se encuentran los terremotos, que provienen de cinco orígenes diferentes: a) la subducción de placas en la trinchera de Puerto Rico, b) el sistema transtensivo de Mona, c) la subducción oblicua de la trinchera de los Muertos, d) el sistema transtensivo de las Islas Vírgenes y e) las fallas geológicas del suroeste de Puerto Rico, asociadas aquí de forma preliminar con el denominado sistema transtensivo de Guayanilla. Los datos de la sismicidad histórica de Puerto Rico indican que, por siglo, se pueden producir aproximadamente una docena de eventos con magnitudes mayores a 5.0, por lo que es de esperar que se presenten eventos de este tipo en el futuro.

Otra de las fuentes de amenaza importantes corresponde al desarrollo potencial de deslizamientos. Ello se debe al relieve notable que conforma gran parte del territorio bajo estudio y de las fuertes fracturas que presentan las unidades de roca, así como el desarrollo de cortezas de meteorización susceptibles a deslizamientos. Estos pueden ser detonados por eventos climáticos como lluvias persistentes, tormentas tropicales o huracanes, o bien, por eventos sísmicos o una combinación de los dos.

Por las características geológicas que tiene Puerto Rico, desde el final del Terciario Inferior hasta la actualidad y, en particular, por el tipo de subducción oblicua de placas que se presenta tanto en la trinchera de Puerto Rico como en la de Muertos, no existe potencial para el desarrollo de actividad volcánica en la isla. Desde este punto de vista, no se presenta esta fuente de amenaza en el área de estudio.

Se presentan, además, otras fuentes de amenazas naturales, tales como: las inundaciones y el paso de flujos de sedimentos, la licuefacción, los tsunamis y el ascenso relativo del nivel del mar, este último originado por los efectos del calentamiento global durante los últimos dos siglos. La identificación de las condiciones de riesgo observadas para el área de estudio tiene como fin primordial el establecimiento de información útil para el aumento de la resiliencia humana y de la infraestructura. Desde el punto de vista de la resiliencia humana, es de suma importancia promover la educación ambiental en la población, partiendo del concepto de aprender a convivir y gestionar el riesgo. Es fundamental que, en función de la fuente de amenaza, se continue promoviendo y actualizando el desarrollo de planes de emergencia local y de mitigación en caso de un desastre. A la par con esta acción, también resulta importante establecer o definir los sitios seguros de reunión y de gestión de la emergencia durante un desastre. Asimismo, es necesario el desarrollo de un Seguro de Resiliencia contra Desastres a fin de que el Estado cuente con recursos económicos en caso de un evento catastrófico.

En cuanto a la resiliencia de infraestructura y basándonos en los resultados del estudio de análisis de riesgo realizado, es relevante que se establezcan medidas concretas para incrementar la resiliencia de las edificaciones y, a su vez, aumentar su seguridad. De igual forma, es muy importante el desarrollo de un sistema generalizado de seguros paramétricos y reaseguros que permitan cubrir daños, aunque sea parcialmente, en caso de un desastre.

Un capítulo especial requiere el aumento de la resiliencia de la infraestructura estratégica, como las líneas de electricidad, de agua y de transporte, así como las edificaciones esenciales como la infraestructura de instituciones hospitalarias y educativas, entre otras.

Finalmente, es de particular importancia destacar que, dadas las condiciones geológicas y de geoaptitud del área de estudio, sería muy relevante poder extender el análisis realizado a toda la isla de Puerto Rico, especialmente a las zonas más urbanizadas como San Juan. Esto a fin de amplificar y detallar las medidas de gestión preventiva del riesgo y del aumento de la resiliencia. Además, desde el punto de vista de planificación territorial, es recomendable completar la aplicación de la metodología empleada en el estudio (SALVETERRA) para generar las bases de un ordenamiento ambiental territorial que brinde a los municipios instrumentos para un desarrollo urbano más sostenible, así como otros datos importantes como las fuentes de agua, el tratamiento de aguas residuales, el desarrollo de una agricultura y ganadería sustentables, el desarrollo geoturístico, el potencial de energía geotérmica, el desarrollo de bosques y la recuperación de ecosistemas como forma de

mitigar el cambio climático y el daño a la ecosfera terrestre.

Abstract

The result of a collaborative research on the best practices for the assessment of multiple risks in vulnerable and exposed communities in southwestern Puerto Rico is presented. The study was conducted during the first semester of 2021, under the sponsorship of the Disasters Program of the National Aeronautics and Space Administration (NASA) and Para la Naturaleza de Puerto Rico project management.

The objective of the study is to conduct a detailed scale risk analysis of natural hazards (georisks and effects of climate change) with special emphasis on the seismic threat for municipalities in the southwestern sectorof Puerto Rico affected by the seismotectonic activity at the end of 2019 and early 2020. This in order to establish practical guidelines for increasing human and infrastructure resilience, particularly the strategic one, with the use of a multivariate and multifactorial risk assessment methodology (SALVETERRA System).

The topographic base used is founded on the Digital Terrain Model developed from LIDAR (Light Detection and Ranging or Laser Imaging, Detection, and Ranging) of the Federal Emergency Management Agency (FEMA), completed with the topographic map of the United States Geological Survey (USGS), scale 1:24.000. The processed satellite information was obtained from NASA. In addition, environmental information on issues of seismicity, groundwater extraction wells, and sociological data from different institutional sources in Puerto Rico was included. A considerable amount of scientific information published for Puerto Rico was consulted, some of whose main sources are cited in the references of this document. The information obtained was completed with field data and photointerpretation of high-resolution satellite images.

The applied methodology corresponds to SALVETERRA Resilience, which aims to identify and categorize the degree of threat (or danger) to different types of georisks, anthropic risks, and risks to people's health, as well as the effects of climate change. The multivariate methodology was developed in Costa Rica as a basis for preventive risk management, environmental management of the territory, and territorial planning. During the last years, as a result of the technical exchange with the NASA Disasters Program, it has been improved and perfected to broaden its scope and move to an automated open data system for the pursuit of environmental sustainability of human progress. The study area corresponds to the southwest sector of Puerto Rico, it has an area of 1,781 km^2, and a population of close to 300 thousand inhabitants. It is made up of eleven municipalities: San Germán, Lajas, Sabana Grande, Guánica, Yauco, Guayanilla, Peñuelas, Adjuntas, Utuado, Jayuya, and Ponce.

The southwest of Puerto Rico is part of a complex tectonic system made up of an ancestral Mesozoic arc and forearc area that was tectonically deformed and that now makes up the post-arc zone referring to the current subduction of the Puerto Rico Trench, from the Upper Tertiary era to the present. As such, the area is made up of a trapped oceanic lithosphere basement and represented mainly by serpentinites, over which there are volcanic rocks of a volcanic arc that evolved from a primitive arc geochemistry to a mature calc-alkaline volcanic arc. There are also abundant and diverse clastic and carbonate sedimentary rocks of the forearc basin fill and, in addition, batholiths of acidic intrusive rocks that show the evolution and maturity of the volcanic arc towards the end of the Lower Tertiary. The Upper Tertiary is represented by relatively thick successions of shallow marine carbonate rocks that mark an important change in the tectonic evolution of the island arc of Puerto Rico.

The natural hazards identification analysis for the study area, at a scale of 1:5,000, and the applied multifactorial risk analysis allows us to conclude that the study area is a multi-risk zone and that about 60 to 70% of the buildings itself are in conditions of high to very high risk of natural hazards (georisks) and effects of climate change. Among the main threat sources are earthquakes, from five different origins: a) subduction of plates in

the Puerto Rico Trench, b) Mona Transtensive System, c) oblique subduction of the Muertos Trough, d) Virgin Islands Transtensive System, and e) geological faults of the southwest of Puerto Rico, associated here preliminarily with the so-called Guayanilla Transtensive System. Puerto Rico's historical seismicity data indicate that approximately a dozen events with magnitudes greater than 5.0 can occur per century, so it is expected that this type of events will occur in the future.

Another important threat source is the potential development of landslides. This is due to the noticeable relief that makes up a large part of the territory being studied and the severe fracturing of the rock units, as well as the development of weathering crusts susceptible to landslides. These can be triggered by climatic events such as persistent rains, tropical storms, or hurricanes, or by seismic events or a combination of the two.

Due to the geological characteristics of Puerto Rico, from the end of the Lower Tertiary to the present day and, in particular, due to the type of oblique subduction of plates that occurs in both the Puerto Rico Trench and the Muertos Trough, there is no potential for the development of volcanic activity on the island. From this point of view, this threat source is not included in the study area.

Other sources of natural hazards are also presented, such as floods and the passage of sediment flows, liquefaction, tsunamis, and relative rise in sea levels caused by the effects of global warming during the last two centuries.

The primary purpose of identifying the risk conditions observed for the study area is establishing useful information to increase human and infrastructure resilience. From the point of view of human resilience, it is of foremost importance to promote environmental education in the population, starting from the concept of learning to live together and manage risk. Depending on the threat source, it is essential that the development of local emergency and mitigation plans continues to be updated and promoted. Along with this action, it is also important to establish or define safe meeting places and emergency management sites in the event of a disaster. Likewise, it is necessary to develop a Disaster Resilience Insurance so that the State has financial resources in case of a catastrophic event.

Regarding infrastructure resilience and based on the results of the risk analysis study conducted, it is relevant that specific measures be established to increase the resilience of buildings and, in turn, their safety. Similarly, it is also especially important to develop a generalized parametric and reinsurance system that allows to cover damages, even partially, in the event of a disaster.

A special part requires increasing the resilience of strategic infrastructure such as electricity, water, and transportation lines, as well as essential buildings such hospital and educational institutions, among others.

Finally, it is particularly important to note that, given the geological and geoaptitude conditions of the study area, it would be truly relevant to be able to extend the analysis conducted to the entire island of Puerto Rico, especially to the most urbanized areas such as San Juan. This in order to amplify and detail the Preventive Risk Management measures and resilience increase. In addition, from a territorial planning point of view, it is recommended to complete the application of the methodology used in the study (SALVETERRA) to generate the bases of a territorial environmental regulation that provides municipalities with instruments for a more sustainable urban development, as well as other important data such as water sources, wastewater treatment, sustainable agriculture and livestock development, geotourism development, geothermal energy potential, forest development, and ecosystem recovery as a way to mitigate climate change and damage to the terrestrial ecosphere.

Tabla de contenido

Resumen 2
Abstract 4
Tabla de contenido 6
1. Introducción 8
1.1 PRESENTACIÓN 8
1.2 ANTECEDENTES 8
1.3 OBJETIVO 8
1.4 ÁREA DE ESTUDIO 8
1.5 METODOLOGÍA 10
1.6 FUENTES DE INFORMACIÓN 10
1.7 AGRADECIMIENTOS 10
1.8 ACLARACIÓN 10
2. Contexto tectónico 11
2.1 MARCO REGIONAL 11
2.2 MARCO LOCAL 13
3. La geología y el IFA Geoaptitud litopetrofísica 16
4. La geomorfología y el IFA Geoaptitud por geodinámica externa 27
5. Hidrogeología y el IFA Geoaptitud hidrogeológica 31
6. IFA Geoaptitud por estabilidad de laderas 39
7. IFA Geoaptitud por amenazas naturales 41
7.1 AMENAZA SÍSMICA 41
7.2 NEOTECTÓNICA 53
7.3 LICUEFACCIÓN 55
7.4 INUNDACIÓN Y FLUJOS DE SEDIMENTOS 56
7.5 TSUNAMIS Y ASCENSO RELATIVO DEL NIVEL MAR 57
7.6 AMENAZAS NATURALES INTEGRADAS 60
8. IFA Geoaptitud integrado 61
9. Análisis de riesgo natural (georiesgos y efectos del cambio climático) 62
9.1 INTRODUCCIÓN 62
9.2 OCUPACIÓN HUMANA E INDICADORES SOCIOECONÓMICOS 62
9.3 ZONAS DE ALTO Y MUY ALTO RIESGO A DESLIZAMIENTOS 69

9.4 ZONAS DE ALTO Y MUY ALTO RIESGO AL POTENCIAL DE EVENTOS SÍSMICOS 70
9.5 ZONAS DE RIESGO A LICUEFACCIÓN 71
9.6 ZONAS DE RIESGO A INUNDACIONES Y PASO DE FLUJOS 73
9.7 ZONAS DE RIESGO A TSUNAMIS Y ASCENSO RELATIVO DEL NIVEL DEL MAR 73
9.8 RIESGOS ASOCIADOS A EVENTOS SÍSMICOS Y A EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO 75
10. Lineamientos sobre el aumento de la resiliencia 76
10.1 EL CONCEPTO DE RESILIENCIA 76
10.2 RESILIENCIA HUMANA 80
10.3 RESILIENCIA DE LA INFRAESTRUCTURA 81
10.4 IMPORTANCIA DE LOS SEGUROS PARAMÉTRICOS 83
11. Marco SENDAI: aplicación de los mapas de riesgo y fases subsiguientes 84
11.1 MARCO SENDAI 84
11.2 APLICACIÓN DE MAPAS DE ALTA RESOLUCIÓN SOBRE AMENAZAS 86
11.3 FASES SUBSIGUIENTES 88
12. Conclusiones principales y recomendaciones 89
13. Referencias principales 91

Análisis de alta resolución del riesgo natural (georiesgos y efectos del cambio climático) para el suroeste de Puerto Rico

Allan Astorga-Gättgens. Andreas Mende & equipo SALVETERRA (septiembre 2021)

1. Introducción

1.1 Presentación

Se presenta aquí el resultado de una investigación colaborativa sobre las mejores prácticas para la evaluación de riesgos múltiples en comunidades vulnerables y expuestas del suroeste de Puerto Rico. El estudio se realizó durante el primer semestre del año 2021, bajo el patrocinio del Programa de Desastres de la Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (NASA, por sus siglas en inglés) y la gestión de proyectos de Para la Naturaleza de Puerto Rico.

1.2 Antecedentes

En el marco de la Declaración Conjunta entre el Sistema de la Integración Centroamericana (SICA) y la NASA, firmado en abril del 2019, se inició un proceso de intercambio y colaboración científica entre el autor principal y el Programa de Desastres de la NASA acerca de la metodología del Índice de Fragilidad Ambiental (Astorga & Milano, 2010) aplicado al tema de identificación de zonas de amenazas naturales. Como producto de esta colaboración, la metodología aplicada por más de 20 años en Costa Rica se depuró y desarrolló a un sistema multivariable denominado SALVETERRA® – Resiliencia. Por recomendación de la NASA, esta herramienta técnica se aplicó en el área de estudio durante el 2020 (Astorga & Mende, 2020). Dados los resultados obtenidos, se seleccionó un área más amplia en el suroeste de Puerto Rico donde emplear la metodología a fin de obtener un análisis de riesgo de alta resolución para dicha zona.

1.3 Objetivo

Realizar un análisis a escala detallado del riesgo a las amenazas naturales (georiesgos y efectos del cambio climático) con énfasis especial en la amenaza sísmica para los municipios del sector suroeste de Puerto Rico afectados por la actividad sismotectónica de finales del 2019 e inicios del 2020. Esto con el fin de establecer lineamientos prácticos de aumento de la resiliencia humana y de la infraestructura, particularmente la estratégica, con el uso de una metodología de evaluación de riesgo de tipo multivariable y multifactorial (Sistema SALVETERRA).

1.4 Área de estudio

El área de estudio se encuentra en el suroeste de Puerto Rico (ver figuras 1 y 2) y corresponde a los municipios que fueron afectados por la actividad sísmica durante el 2019 y 2020. Estos pueblos son: San Germán, Lajas, Sabana Grande, Guánica, Yauco, Guayanilla, Peñuelas, Adjuntas, Utuado, Jayuya y Ponce. Como parte complementaria del área de estudio, se analizó la información del sector marino en lo referente al componente sismotectónico y geológico.

***Fig.1**. Localización del área de estudio en el suroeste de Puerto Rico. Además del área insular (ver Figura 2), se realizó una integración de información geológica y tectónica del área marina que corresponde con el talud interno (norte) de la trinchera de los Muertos en el Mar Caribe.*

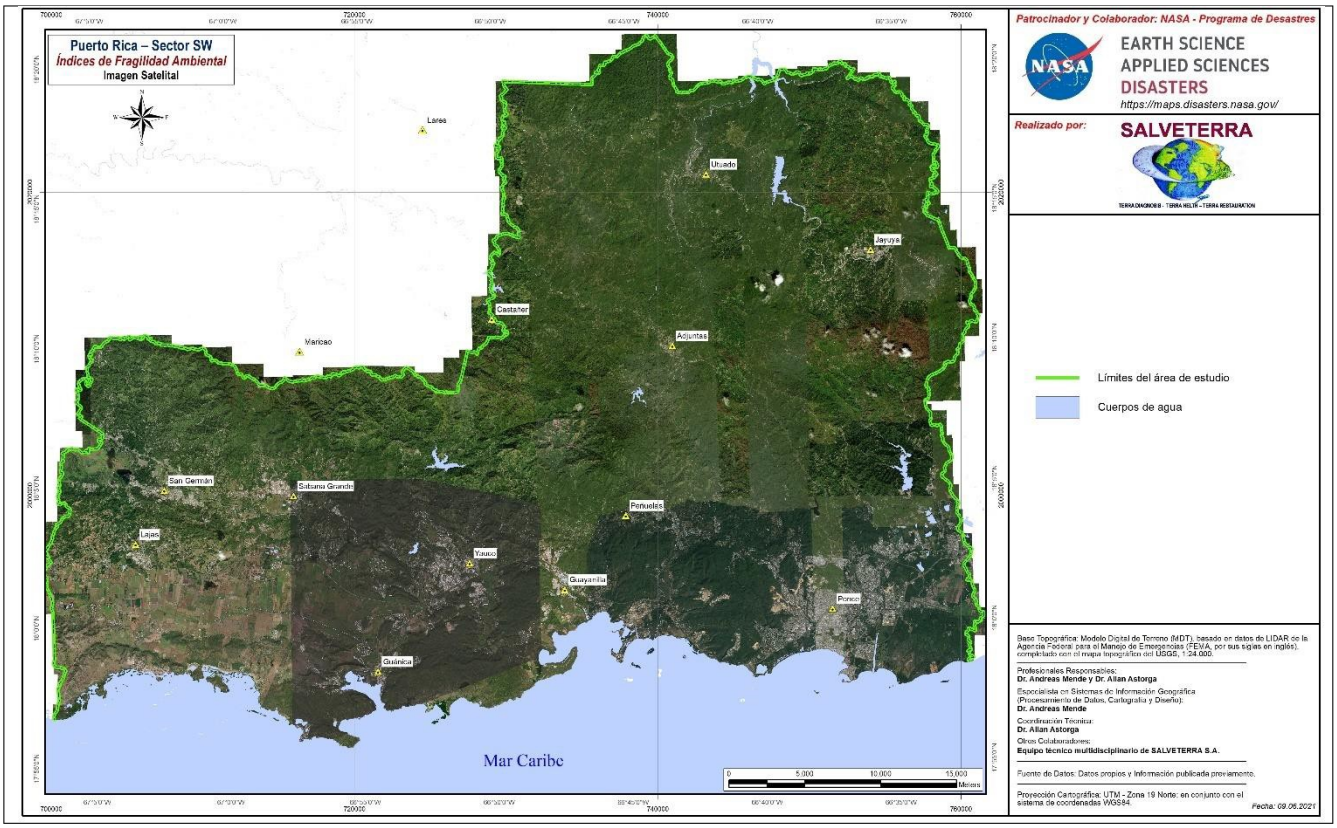


***Fig. 2**. Detalle del área de estudio y de los 11 municipios que la conforman. Los municipios son: San Germán, Lajas, Sabana Grande, Guánica, Yauco, Guayanilla, Peñuelas, Adjuntas, Utuado, Jayuya y Ponce.*

1.5 METODOLOGÍA

SALVETERRA – Resiliencia es una herramienta integral para el diagnóstico de la salud ambiental de la ecosfera terrestre y para el desarrollo de acciones concretas que permitan recuperar su estado de equilibrio. Funciona como una tomografía que permite identificar en detalle los recursos disponibles (agua, suelos, energía, etc.) para su aprovechamiento sustentable y establecer las zonas ambientales que están en desequilibrio, de manera que posibilita plantear acciones de escala detallada o puntual, pero de forma multiplicativa y global que reviertan esas situaciones. Como parte del análisis, genera mapas detallados de amenazas naturales y análisis de riesgo natural y antrópico (SALVETERRA-Resiliencia).

Opera con el uso integral y sistemático de imágenes satelitales y de radar, complementado con información disponible y datos de campo directos que permiten el desarrollo de cartografía detallada multivariable, con el uso de un sistema de algoritmos desarrollado y probado por más de 20 años.

SALVETERRA - Resiliencia tiene como objetivo identificar y categorizar el grado de amenaza (o peligro) a diferentes tipos de georiesgos, riesgos antrópicos y a la salud de las personas, así como a los efectos del cambio climático. La metodología multivariable fue desarrollada en Costa Rica como base para la gestión preventiva del riesgo, el ordenamiento ambiental del territorio y la planificación territorial. Durante los últimos años, como producto del intercambio técnico con el Programa de Desastres de la NASA, ha sido mejorada y perfeccionada para ampliar su alcance y pasar a ser un sistema automatizado de datos abiertos para la búsqueda de la sustentabilidad ambiental del progreso humano.

1.6 FUENTES DE INFORMACIÓN

La base topográfica utilizada se fundamenta en el Modelo Digital de Terreno elaborado a partir del método LIDAR (acrónimo del inglés LiDAR, *Light Detection and Ranging o Laser Imaging, Detection, and Ranging*) de la Agencia Federal para el Manejo de Emergencias (FEMA, por sus siglas en inglés), completado con el mapa topográfico del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés), escala 1:24.000. La información satelital procesada se obtuvo de la NASA. Además, se integró información ambiental sobre temas de sismicidad, pozos de extracción de aguas subterráneas y datos sociológicos de diferentes fuentesinstitucionales de Puerto Rico. Se consultó una considerable cantidad de información científica publicada para Puerto Rico, algunas cuyas fuentes principales se citan en las referencias de este documento. La información obtenida se completó con datos de campo y fotointerpretación de imágenes satelitales de alta resolución.

1.7 AGRADECIMIENTOS

Los autores de este estudio y, en general, el equipo SALVETERRA agradece profundamente al Programa de Desastres de la NASA por el apoyo y auspicio brindados para la realización de este trabajo. También a Para la Naturaleza de Puerto Rico, por la gestión realizada para el proyecto. Se agradece también a todas las instituciones y organizaciones cuyos datos fueron utilizados para completar la información técnica procesada.

1.8 ACLARACIÓN

El presente documento constituye una síntesis de los resultados técnicos del estudio realizado. Como complemento al mismo, se dispone de un paquete de información técnica cartográfica más detallada que seentrega a todos los municipios que conforman el área de estudio. En este documento se presentan los mapas principales y el resumen de estos. Se hace un énfasis especial en los resultados del análisis de riesgo y en las recomendaciones

básicas para el aumento de la resiliencia humana y de la infraestructura.

2. Contexto tectónico

2.1 Marco regional

La isla de Puerto Rico forma parte de la placa del Caribe. Esta placa está formada por un mosaico de bloques tectónicos de diferentes orígenes, ensamblados como producto de la geodinámica de placas tectónicas desde hace aproximadamente 140 millones de años. Los márgenes de la placa del Caribe presentan una actividad sismotectónica significativa (ver Figura 3).

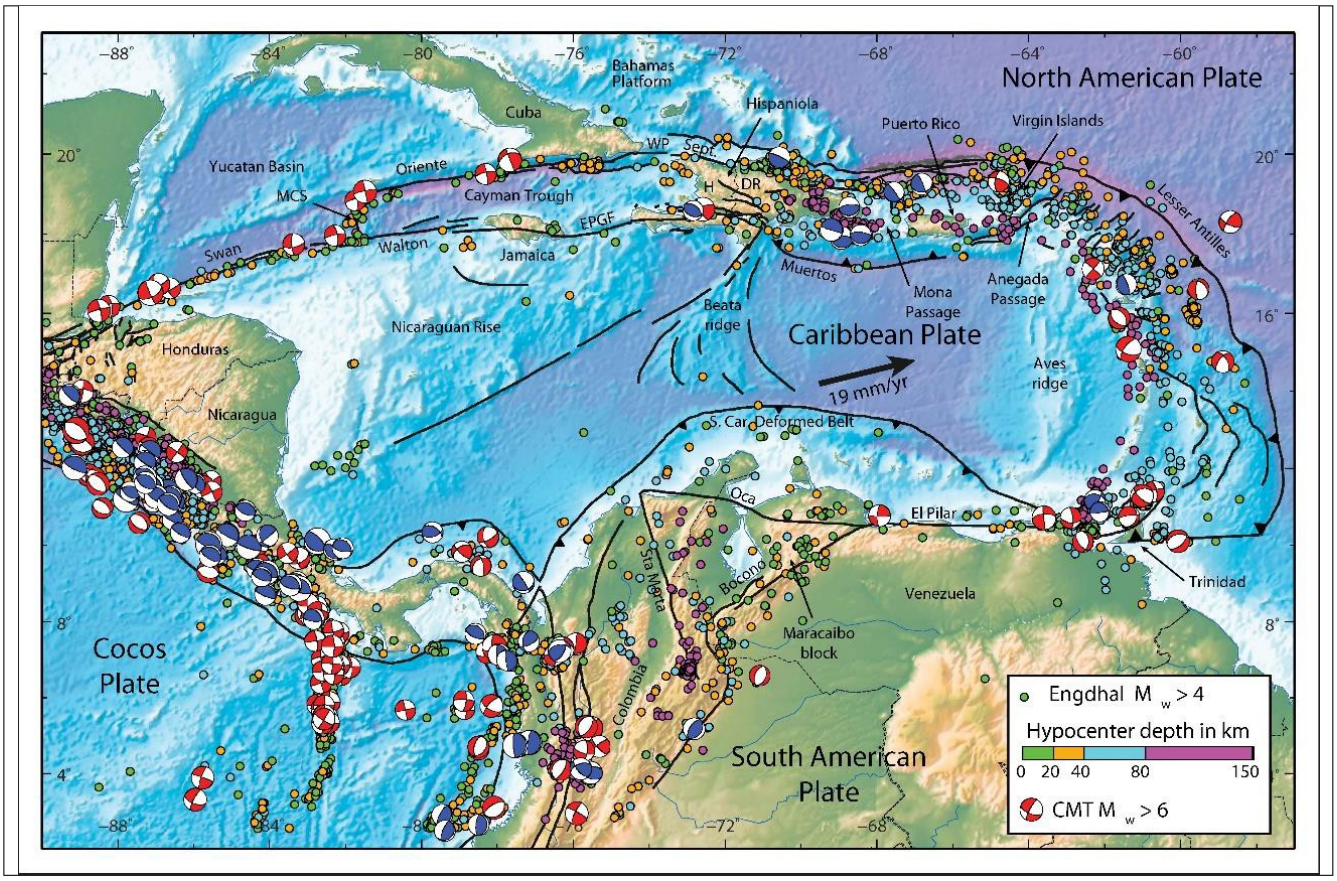


***Fig. 3**. Mapa sismotectónico de la placa del Caribe (según: Engdahl et al., 1998; Ekstrom et al, 2012).*

El umbral noreste de la placa del Caribe se constituye de varias microplacas y bloques tectónicos, uno de los cuales corresponde con el denominado bloque de Puerto Rico (ver Figura 4). Al oeste del bloque de Puerto Rico están las microplacas de La Española y Gonave, donde se encuentran la República Dominicana y Haití.

Una zona de graben tectónico (transtensiva) importante separa la isla de Puerto Rico de La Española. Las Islas Vírgenes, localizadas al este de Puerto Rico, forman parte del bloque homónimo. El bloque de Puerto Rico está separado del bloque tectónico del noroeste de las Antillas Menores por otra zona distensional (graben) importante identificada como la cuenca de las Islas Vírgenes.

Los límites tectónicos del norte y sur del bloque de Puerto Rico están conformados por trincheras tectónicas donde ocurre una subducción de placas (ver Figura 5). La trinchera del norte corresponde con la fosa de Puerto Rico,donde ocurre una subducción oblicua de la placa norteamericana bajo la placa del Caribe.

Por su parte, la trinchera del sur, denominada trinchera de los Muertos, también es una zona de subducción oblicua intraplaca, donde el piso de la placa del Caribe (Plateau Caribe), se subduce bajo el bloque de Puerto Rico. En la Figura 5 se indica la velocidad de movimiento relativo de las placas.

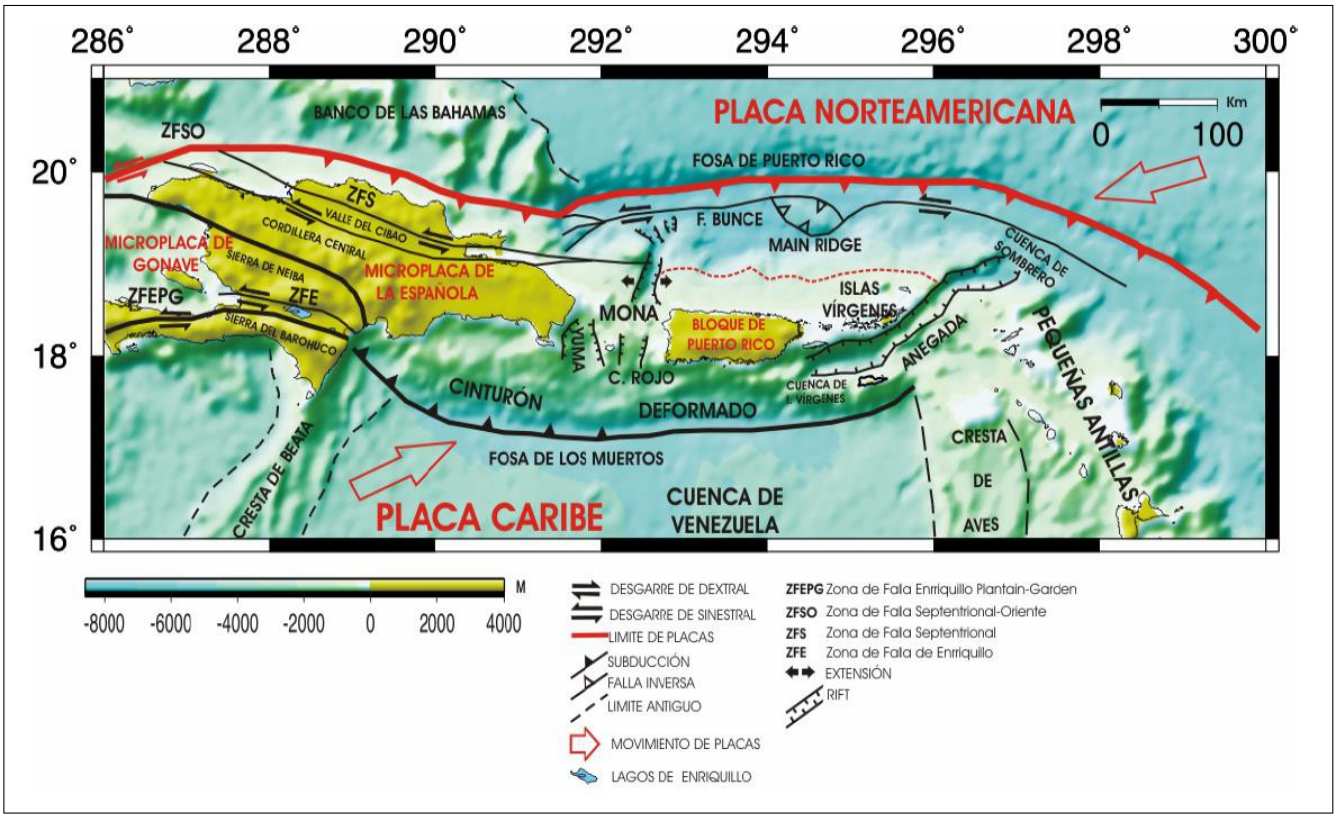


***Fig. 4**. Estructura tectónica del sector este de las Antillas Mayores (cf. GRANJA, 2005).*

Los modelos de evolución tectónica del Caribe más aceptados reconocen un origen exótico, es decir, en el sector este del Océano Pacífico, con un movimiento este–noreste, desde el Cretácico Inferior hasta el Presente (ver Figura 6). De acuerdo con este modelo, el sector este de las Antillas Mayores (Figura 4) se originaron en el Cretácico Inferior, como producto de la subducción tectónica en una zona que coincide aproximadamente con la posición tectónica que tiene en la actualidad el sur de América Central.

Hace casi 140 millones de años, el sector este de las Antillas Mayores, incluyendo Puerto Rico, estaba compuesto por un incipiente arco de islas formado por la subducción de la placa de Farallón y una placa oceánica que conformó el primitivo mar de Tetis. Esta situación prevaleció por cerca de 50 millones de años.

Durante el Santoniano Superior (hace 90 millones de años), con la apertura de la zona de subducción del arco de islas del sur de América Central, se invierte la subducción en el sector este de las Antillas Mayores, dejando entre ambos márgenes la denominada Plateau Caribe (cf. Astorga, 1997).

Desde el Cretácico Superior hasta el presente, la Plateau Caribe y, a partir del Eoceno, la placa del Caribe se movilizó como un complejo mosaico de bloques tectónicos en dirección noreste, por medio de la subducción tectónicade la placa norteamericana bajo la placa del Caribe. Desde el Eoceno, hace cerca de 50 millones de años, dicha subducción tuvo un componente cada vez más oblicuo, lo que provocó que la actividad volcánica disminuyera y cesara en el arco de islas del sector este de las Antillas Mayores desde ese periodo.

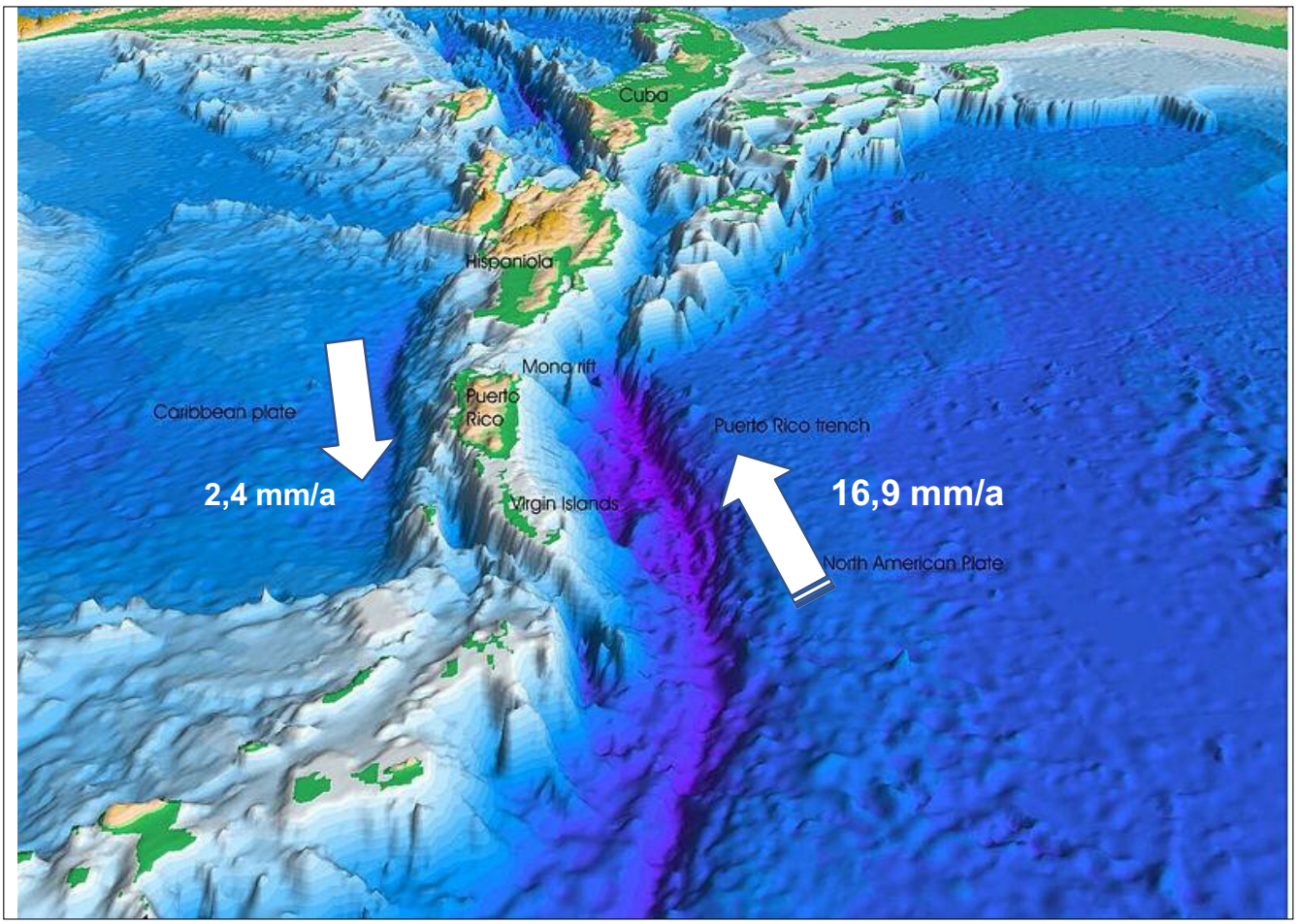


***Fig. 5**. Modelo tridimensional del piso oceánico de Puerto Rico y las Antillas Mayores. Se muestra el límite entre las placas del Caribe y norteamericana y los vectores del movimiento relativo.*

2.2 MARCO LOCAL

Como parte de este trabajo, se realizó un análisis detallado de interpretación de lineamientos estructurales de la isla de Puerto Rico. Esto, a partir de una evaluación sistemática del modelo digital de terreno de alta resolución. A ello se le combinó la revisión de una profusa información bibliográfica sobre la tectónica y neotectónica de Puerto Rico. El mapa inicial resultante se presenta en la Figura 7.

La evaluación de sistemas de fallas y estructuras de compresión y transtensión identificadas ha permitido derivar una hipótesis inicial sobre el modelo tectónico y neotectónico del bloque de Puerto Rico. Se considera que, en gran medida, este sistema de estructuras corresponde de forma significativa con el modelo teórico de deformación estructural según Ridel (1929) para un sistema de deformación de cizalla sinestral.

Este modelo interpretativo permitiría explicar la existencia de un sistema transtensivo, identificado en el área de estudio, que tiene un sentido general de norte a sur y que designamos aquí como el sistema transtensivo de Guayanilla. Este sistema se extiende desde la parte marina en el talud interno de la trinchera de los Muertos hacia el norte, atravesando la isla hacia el talud de la trinchera de Puerto Rico en una orientación aproximadamente paralela a la estructura distensiva de la isla de Mona (ver Figura 4). Este modelo se considera preliminar, empero explicaría con bastante lógica la conspicua sismicidad de la zona y el paisaje geomorfológico y neotectónico evaluado en este estudio.

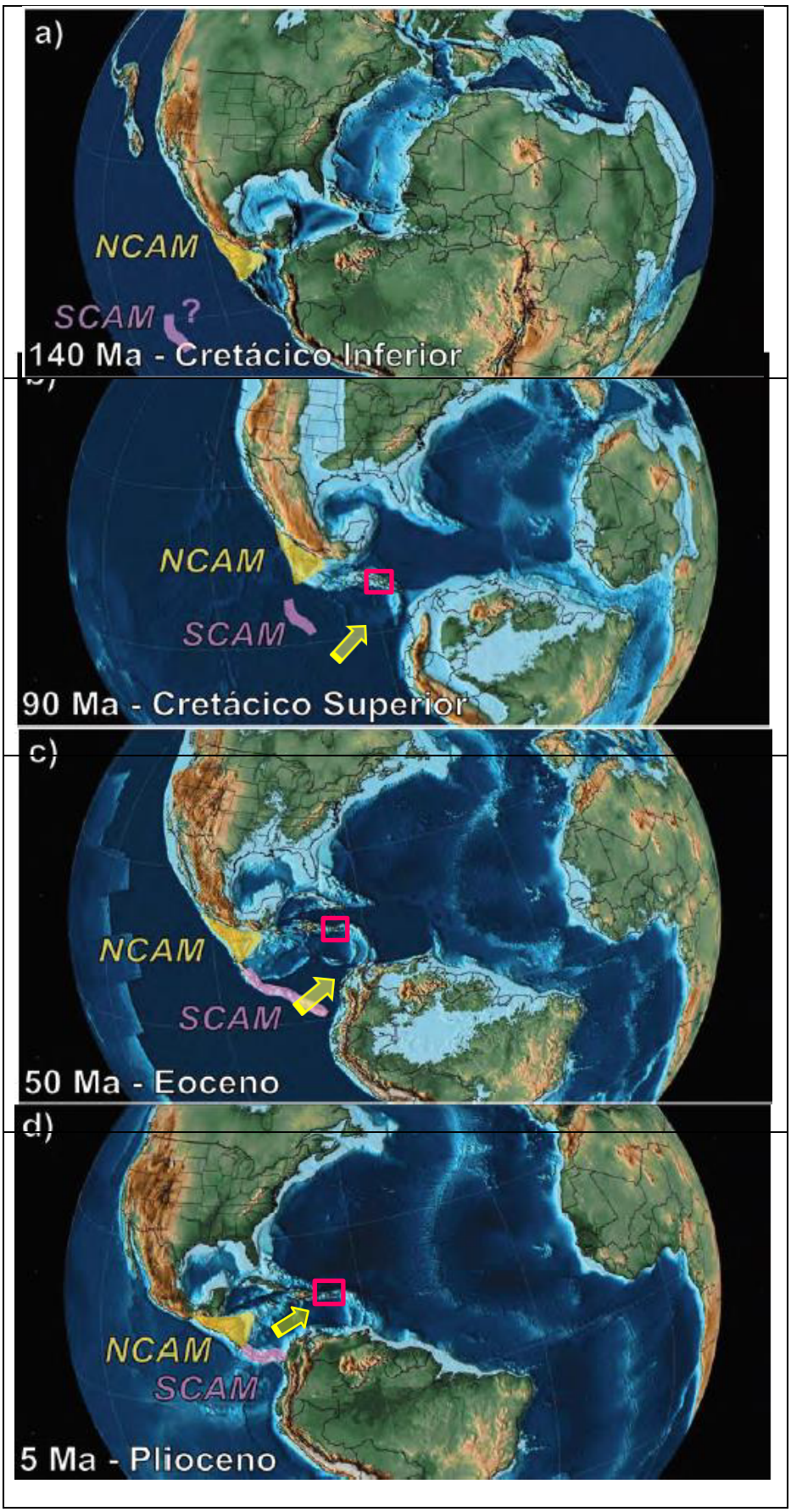


Fig. 6. *Síntesis de evolución tectónica del Caribe, incluyendo Centroamérica y las Antillas Mayores (cf. Álvarez et al, 2019). El rectángulo rojo indica la ubicación aproximada de Puerto Rico y su movimiento, junto con la placa del Caribe hacia el noreste, entre las placas de Norteamérica y Sudamérica. La flecha amarilla indica el movimiento de la Plateau Caribe durante los últimos 140 millones de años (cf. Astorga, 1997).*

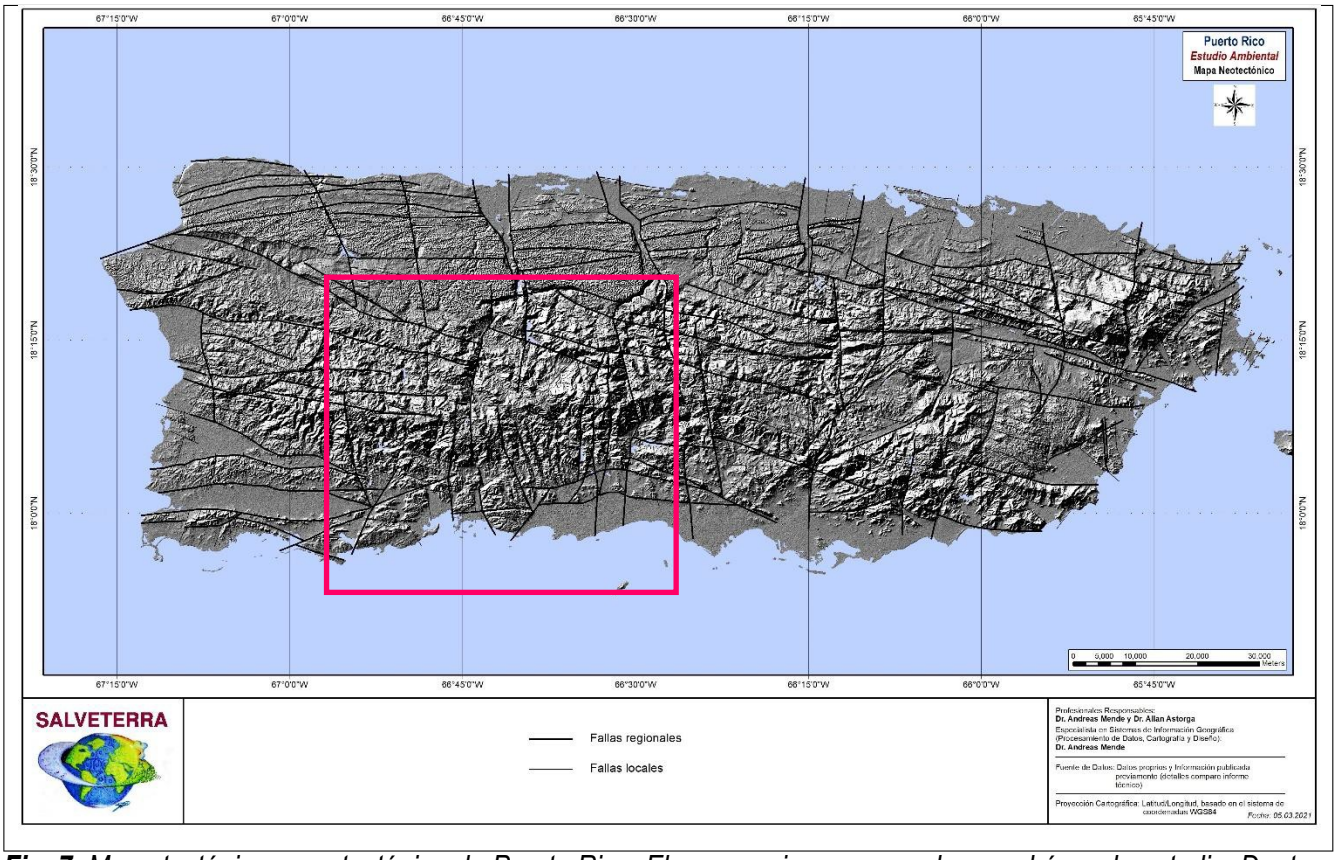


Fig. 7. *Mapa tectónico y neotectónico de Puerto Rico. El marco rojo corresponde con el área de estudio. Dentro de esta área se distingue el conjunto de lineamientos estructurales norte–sur que correspondería con el sistema transtensivo de Guayanilla, reconocido como parte de este estudio.*

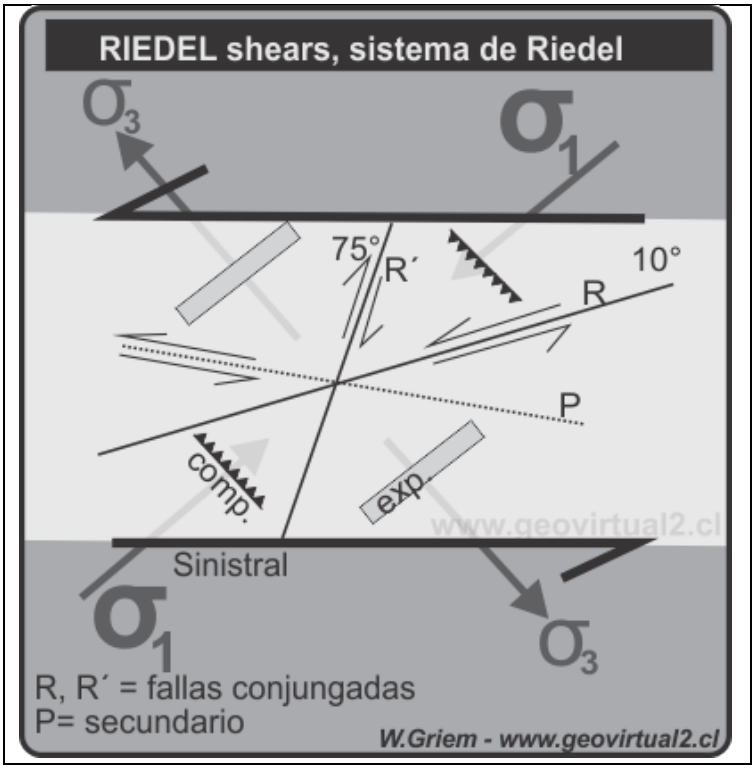


Fig. 8. *Modelo de Ridel (Ridel, 1929) que explica la deformación dentro de una zona de cizalla de tipo sinestral como el que ocurre en el bloque de Puerto Rico. Como producto del movimiento tectónico, se producen varias estructuras tectónicas, a saber: a) fallas conjugadas (destral y sinestral que ocurren entre los dos sistemas principales), b) estructuras de transpresión (cabalgamientos, fallas inversas,* horst*) y c) estructuras de expansión o transtensión (diques, vetas, fallas normales o de desplazamiento de rumbo y grábenes).*

3. La geología y el IFA Geoaptitud litopetrofísica

En la Figura 9 se presenta el mapa geológico del suroeste de Puerto Rico. Por un asunto de claridad, en dichomapa se observan de forma separada las unidades geológicas del Cuaternario. Como parte del mapa de la Figura 9, se incluye la ubicación de los perfiles geológicos A-A´ y B-B´, que se presentan en la Figura 10.

El mapa geológico de la Figura 9 tiene como principal fuente de información los distintos reportes del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS, por sus siglas en ingles) y de la base de datos disponible en: https://mrdata.usgs.gov/geology/pr/.

En la Tabla 1, se presenta el conjunto de unidades estratigráficas definidas para el área de estudio por el USGS, incluyendo varios estudios importantes de Mattson (1967 y 1974) y otras fuentes de investigación cuyas referencias se presentan en la sección bibliográfica. Debido a la gran cantidad de unidades geológicas definidas, y al hecho de que el objetivo de este estudio es establecer unidades geoespaciales del suelo y el subsuelo superior con fines de evaluación de amenazas naturales, se realizó un proceso de síntesisgeológica sistemático y detallado que se muestra en la columna de la derecha de la Tabla 1. A partir de esta síntesis, fue posible generar un mapa geológico más práctico, para los fines de este estudio y que es el que se muestra en la Figura 9.

La comunidad geocientífica ha aceptado, desde hace varias décadas, que Puerto Rico y las Islas Vírgenes están compuestas por un arco de islas deformado del Mesozoico–Terciario Inferior, flanqueado por depósitos clásticos y de carbonatos del Terciario Medio–Superior (Lewis & Draper, 1990).

Las rocas más antiguas del área de estudio también corresponden a las más antiguas de Puerto Rico. Pertenecen a un complejo ofiolítico compuesto por serpentinitas, anfibolitas, pedernales radiolaríticos y otras rocas asociadas a la de edad del Jurásico Superior–Cretácico Inferior al que se le denomina complejo bermeja u ofiolita bermeja (ver Figura 11).

La ofiolita bermeja representa un fragmento de litosfera oceánica (manto superior–corteza) del Jurásico Superior–Cretácico que conforma el “basamento” geológico del área de estudio y, quizás, de todo el arco de las islas de Puerto Rico. Geotectónicamente, se ha interpretado como un fragmento de la antigua placa de Farallón que quedó del lado interno de la zona de subducción con la apertura del proceso de choque de placas interoceánicas en algún momento del Jurásico Superior–Cretácico Inferior. Esto, cuando el arco de islas que forma hoy Puerto Rico se localizaba, aproximadamente, en la posición que tiene hoy el sur de América Central (ver Figura 6). Encima del complejo bermeja hay un conjunto denso de rocas (sedimentarias: volcanoclásticas y carbonatadas, volcánicas, intrusivas y metamórficas) del Cretácico Superior–Terciario Inferior (ver Figura 10 y Tabla 1). Las rocas sedimentarias comprenden, en su mayoría, secuencias de turbiditas volcanoclásticas, así como sucesiones carbonatadas (de posible origen alodápico). La sucesión evoluciona hacia sucesiones más volcaniclásticas, hasta tobas y brechas volcánicas. Estas rocas sedimentarias representan el relleno clástico y carbonatado de una cuenca antearco del Cretácico Superior–Terciario Inferior).

La parte del arco está conformado por rocas volcánicas que incluyen basaltos y andesitas, así como flujos y brechas volcánicos. También se presentan rocas intrusivas de dioritas, granodioritas y monzonitas de cuarzo, y rocas metamórficas e hidrotermalmente alteradas, mostrando la evolución del arco (ver Figura 13). La geoquímica de las rocas ígneas evidencia una evolución de un arco volcánico primitivo hasta un arco volcánico calco-alcalino maduro. Esto implicaría que el proceso de subducción de placas prevaleció hasta el Eoceno.

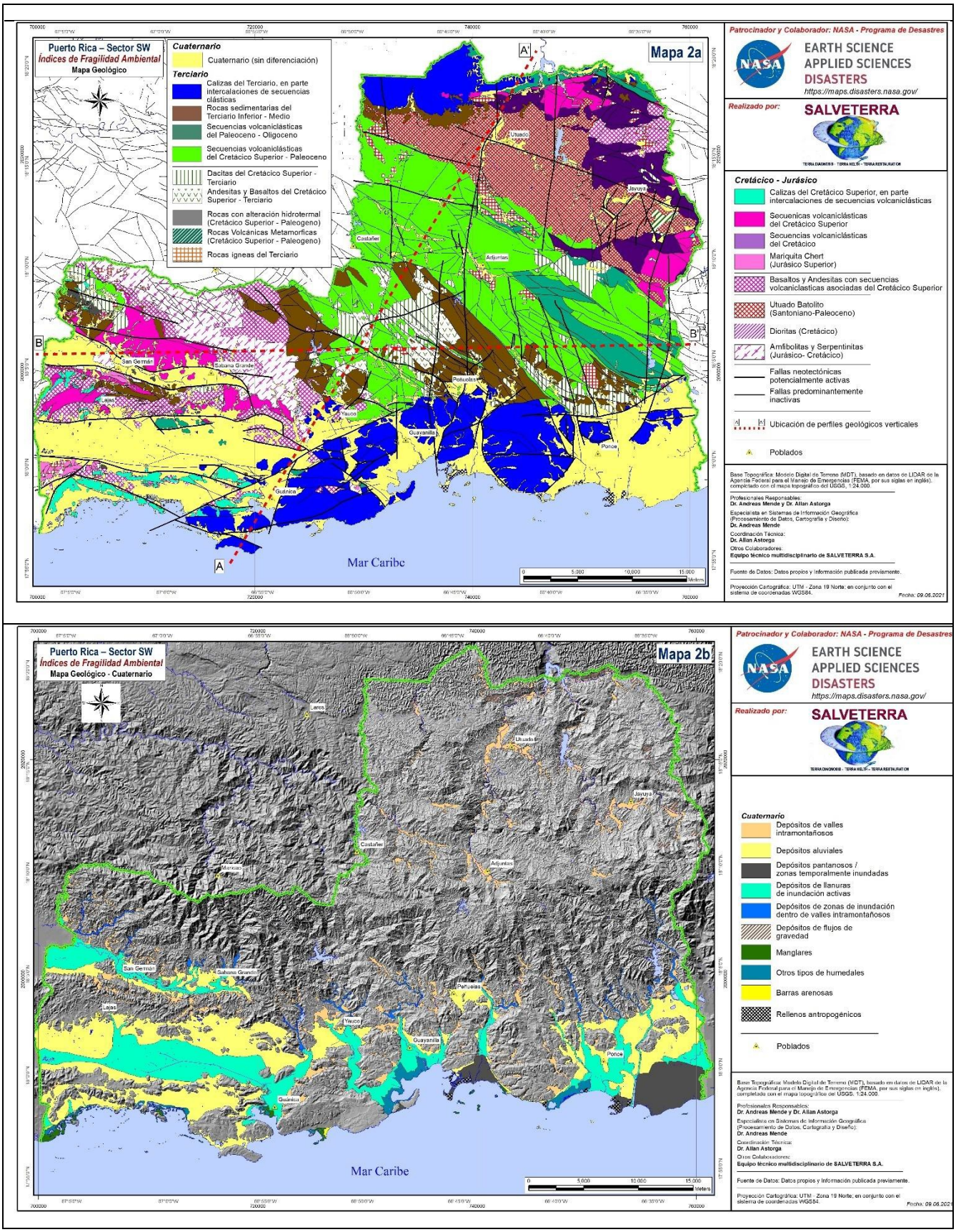


Fig. 9. *Mapa geológico del área de estudio. Imagen superior: pre-Cuaternario. Imagen inferior: Cuaternario.*

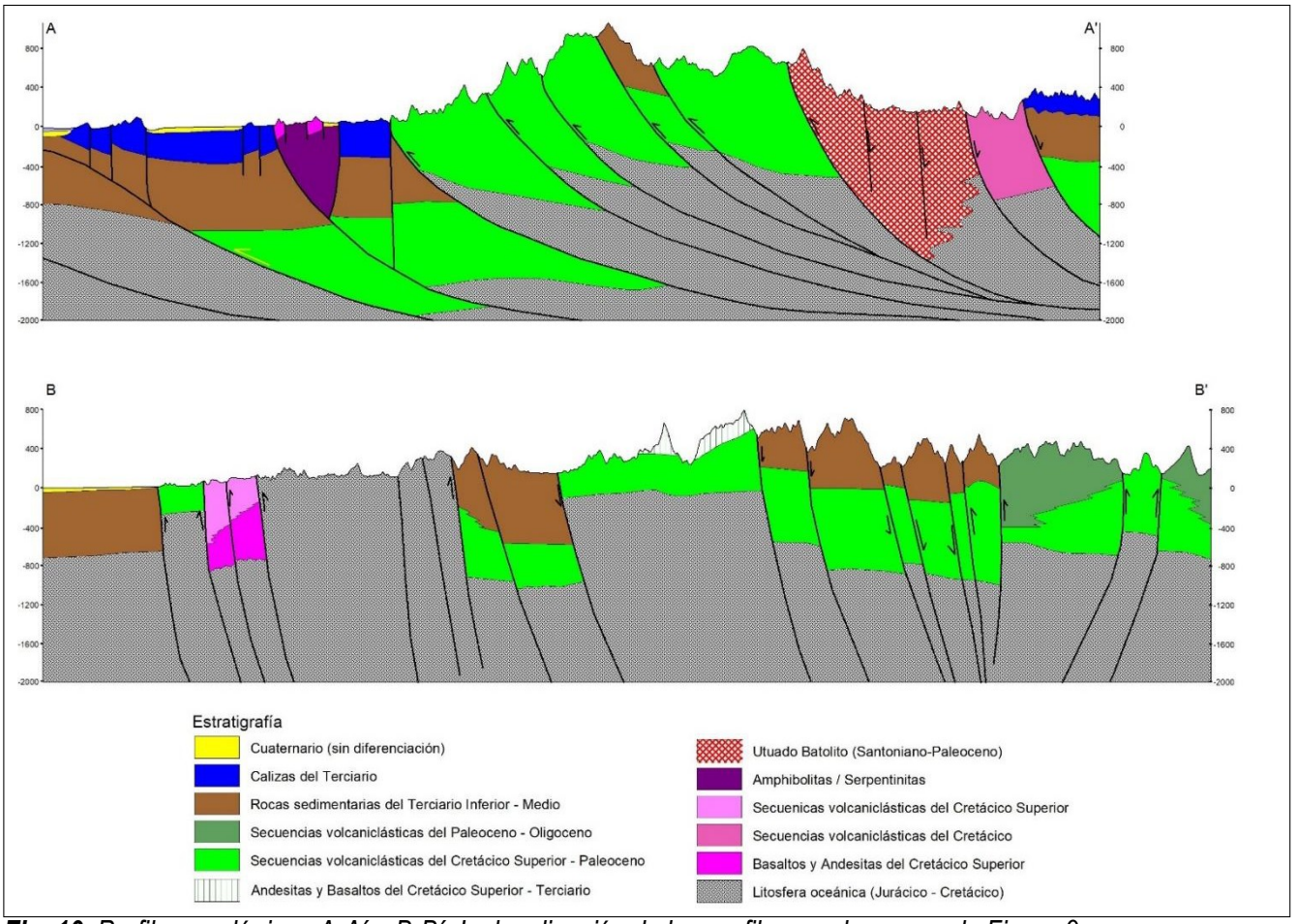


Fig. 10. *Perfiles geológicos A-A´ y B-B´. La localización de los perfiles se observa en la Figura 9.*

Fig. 11. *Afloramiento de rocas de la ofiolita bermeja (17°59´10 N – 67°08´55´´W). Cercanía de La Parguera, en el sector suroeste de Puerto Rico. Fuente: Allan Astorga (febrero 2021).*

Tabla 1.
Síntesis de unidades estratigráficas del suroeste de Puerto Rico

Código	Nombre	código 2021 06	nombre 2021 06
Tpo	Ponce Limestone	Tcl	**Calizas del Terciario**, en parte intercalaciones de secuencias clásticas
Tjd	Juana Diaz Formation	Tcl	
Tla	Lares Limestone	Tcl	
Tcbm	Montebello Limestone Member	Tcl	
Ts	San Sebastian Formation	Trs	**Rocas sedimentarias del Terciario Medio a Inferior**
Tg	Guayo Formation	Trs	
TKy	Yauco Formation	Trs	
Tjo	Jobos Formation	Tvcl	**Unidades volcaniclásticas de Oligoceno - Paleoceno**
TKamo	Anon and Monserrate Formations Interbedded	Tvcl	
Tm	Monserrate Formation	Tvcl	
Ty	Yunes Formation	Tvcl	
Tj	Jicara Formation	Tvcl	
TKlam	Lago Garzas, Anon, and Maricao Formations Interbedded	TCvcl	**Unidades volcaniclásticas de Paleoceno - Cretácico Superior**
TKly	Lago Garzas and Yauco Formations Interbedded	TCvcl	
TKm	Maricao Formation	TCvcl	
TKmy	Maricao and Yauco Formations Interbedded	TCvcl	
TKl	Lago Garzas Formation	TCvcl	
TKaym	Anon, Yauco, and Maricao Formations Interbedded	TCvcl	
TKam	Anon and Maricao Formations Interbedded	TCvcl	
TKal	Lago Garzas-Anon Formations Interbedded	TCvcl	
TKa	Anon Formation	TCvcl	
TKh	Hornblende quartz-diorite porphyry	Tig	**Rocas ígneas del Terciario**
Thp	Hornblende quartz-diorite	Tig	
TKqd	Quartz diorite-granodiorite	Tig	
TKdi	Diorite	Tig	
Td	Dacite	Td	**Dacitas del Terciario - Cretácico Superior**
TKahp	Augite-hornblende porphyry	TCvad	**Andesitas y basaltos del Terciario -Cretácico Superior**
TKap	Augite andesite porphyry	TCvad	
TKat	Augite trachybasalt	TCvad	
TKda	Dacite	Td	**Dacitas del Terciario - Cretácico Superior**
TKhda	Hornblende dacite	Td	
TKha	Hydrothermally altered rock	TKha	**Rocas hidrotermalmente alteradas**
TKmv	Metavolcanic Rocks	TKmv	**Rocas metavolcánicas**
Kcot	Cotui Limestone	Kcl	**Calizas del Cretácico Superior, en parte intercalaciones de secuencias volcaniclásticas**
Kp	Parguera Limestone	Kcl	
Kpe	Penoes Limestone	Kcl	

Código	Nombre	código 2021 06	nombre 2021 06
TKay	Anon and Yauco Formations Interbedded	Kcl	
KJm	Mariquita Chert	KJm	**Mariquita Chert**
Kcoa	Coamo Formation	KUvcl	**Unidades volcaniclásticas del Cretácico Superior**
Kpo	Pozas Formation	KUvcl	
Ks	Sabana Grande Formation	KUvcl	
Kac	Achiote Conglomerate	KUvcl	
Kal	Alonso Formation	KUvcl	
Kctt	Cotorra Tuff	KUvcl	
Kr	Robles Formation	Kvcl	**Unidades volcaniclásticas del Cretácico**
Kja	Jayuya Tuff	Kvcl	
Kte	Tetuan Formation	Kvcl	
Kv	Vista Alegre Formation	Kvcl	
Kmar	Maravillas Formation	Kvcl	
Ke	El Rayo Formation	KUba	**Basaltos y Andesitas con secuencias volcaniclásticas asociadas del Cretácico Superior**
Kpob	Two pyroxene olivine basalt	KUba	
Kl	Lajas Formation	KUba	
Kmam	Mameyes Formation	KUba	
Kdi	Diorite	Kdi	**Diorita**
Ku	Utuado batholith	Ku	**Batolitos de Utuado**
KJa	Amphibolite	KJapsp	**Anfibolita-Serpentinita del Cretácico-Jurásico**
KJas	Amphibolite-Serpentinite	KJapsp	
KJs	Serpentinite	KJapsp	

Fuente: https://mrdata.usgs.gov/geology/pr/

Las rocas del basamento ofiolítico bermeja y del complejo ígneo sedimentario del Cretácico Superior–Terciario Inferior, están recubiertas, de forma discordante, por rocas carbonatadas de poca profundidad de la edad Terciario Superior (ver Figura 14 y Tabla 1). De igual forma, sobre esas calizas y otras rocas másantiguas se presentan las rocas sedimentarias del Cuaternario, principalmente como depósitos de valles aluviales, llanuras costeras y playas recientes.

En la Figura 15 se presentan los mapas de Índice de Fragilidad Ambiental (IFA) de los factores para el cálculo del IFA Geoaptitud litopetrofísico. Los datos se obtuvieron mediante el procesamiento de información de imágenes satelitales y datos procesados de publicaciones anteriores y obtenidos en campo a partir del análisis de las unidades geoespaciales identificadas. En la Figura 16 se presenta el mapa resultante que corresponde con el Mapa de IFA Geoaptitud por factor litopetrofísico.

Se identificaron tres zonas de IFA Geoaptitud litopetrofísica en el suroeste de Puerto Rico. Las zonas de muy alta fragilidad representan áreas con una consistencia de roca suave, con un factor de lineación alto a muy alto, con meteorización alta a muy alta, con espesores de corteza de meteorización altos (mayores a 8 metros o 26.25 pies), contenido de arcilla muy alto y una porosidad–permeabilidad aparente entre alta y muy alta. Esta característica hace que tenga una condición geomecánica limitada, pese a tener capacidad soportante moderada. Esto se debe a que esmuy susceptible a romperse en condiciones de poca tensión. Sus ángulos de estabilización son bajos y pueden retener agua.

Las zonas de alta fragilidad por IFA Geoaptitud litopetrofísica se caracterizan por tener una dureza firme, un factor de lineación moderado, un grado de meteorización moderado, una capa de suelo con un grosor entre 4 y 8 metros (13 y 26 pies aprox.), un contenido de arcilla y una porosidad-permeabilidad moderados. Tienen una capacidad de soporte moderada y ángulos de estabilización promedios.

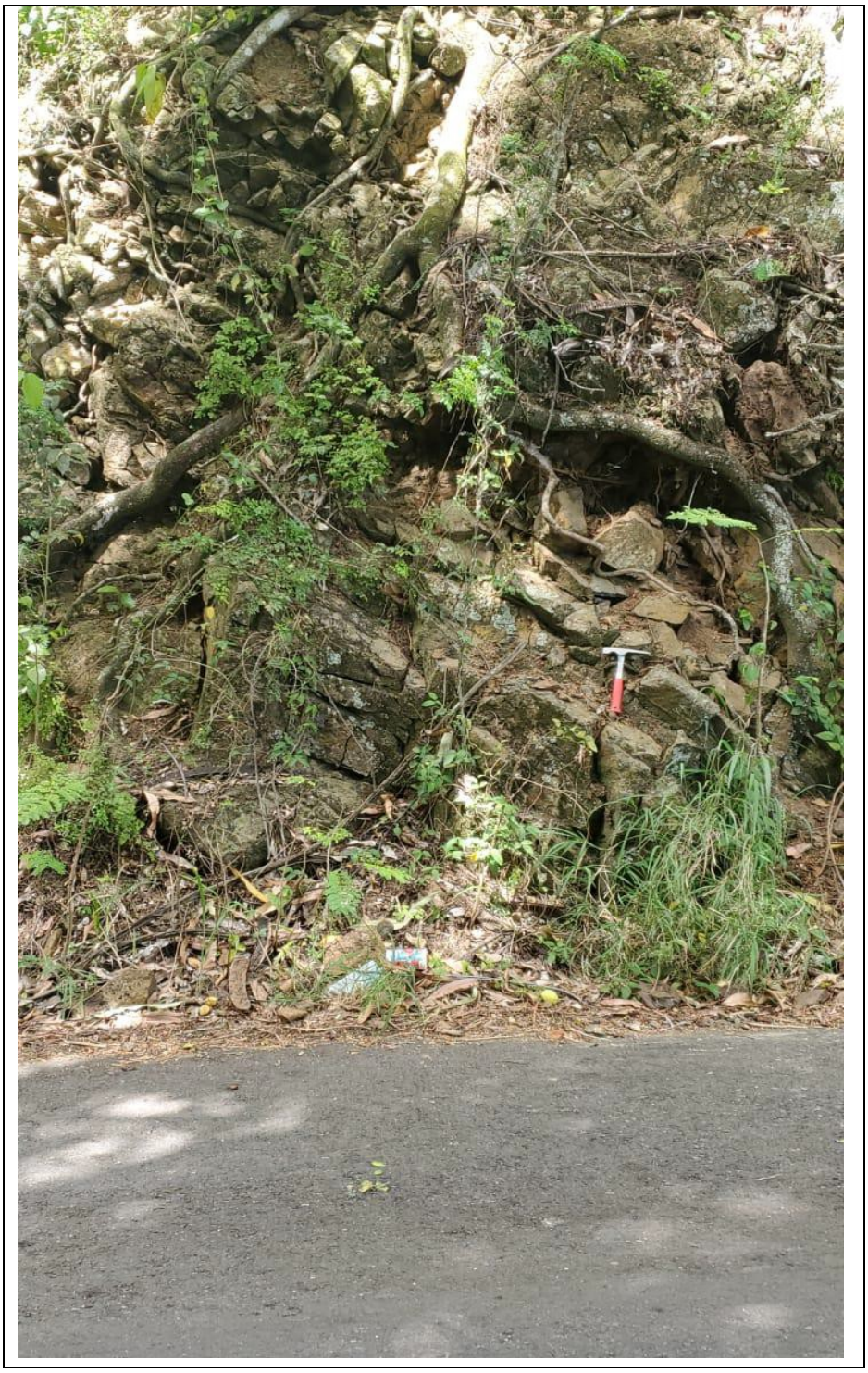


Fig. 12. *Afloramiento de rocas del Cretácico Superior – Terciario Inferior (18°08´00 N – 67°02´33´´W). Cercanía de Pico en el sector suroeste de Puerto Rico.*

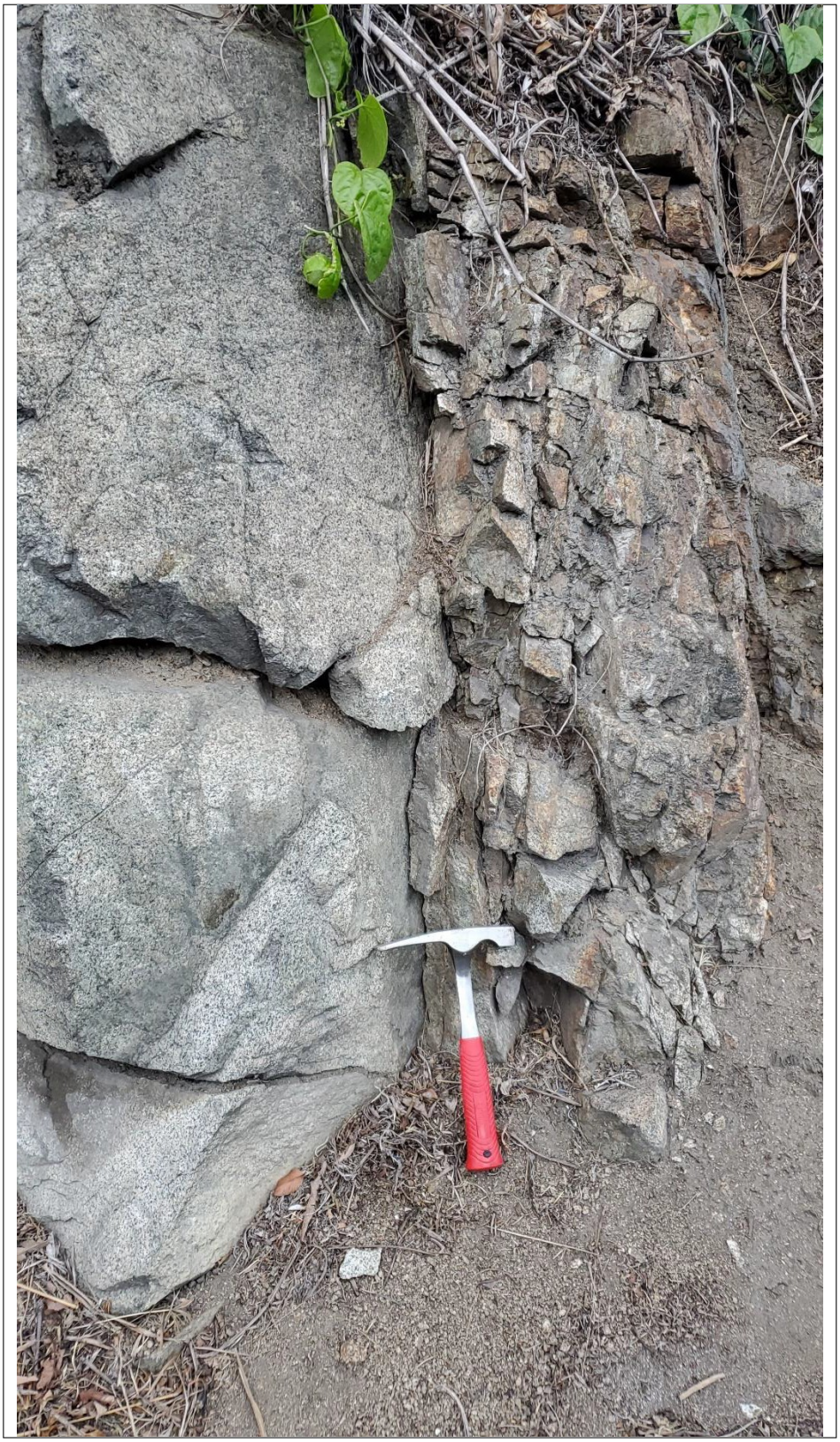


Fig. 13. *Afloramiento de rocas ígneas (dioritas) del Cretácico Superior – Terciario Superior (18°13´06"N – 67°36´55´´W). Cercanías de Jayuya, al sur de Puerto Rico.*

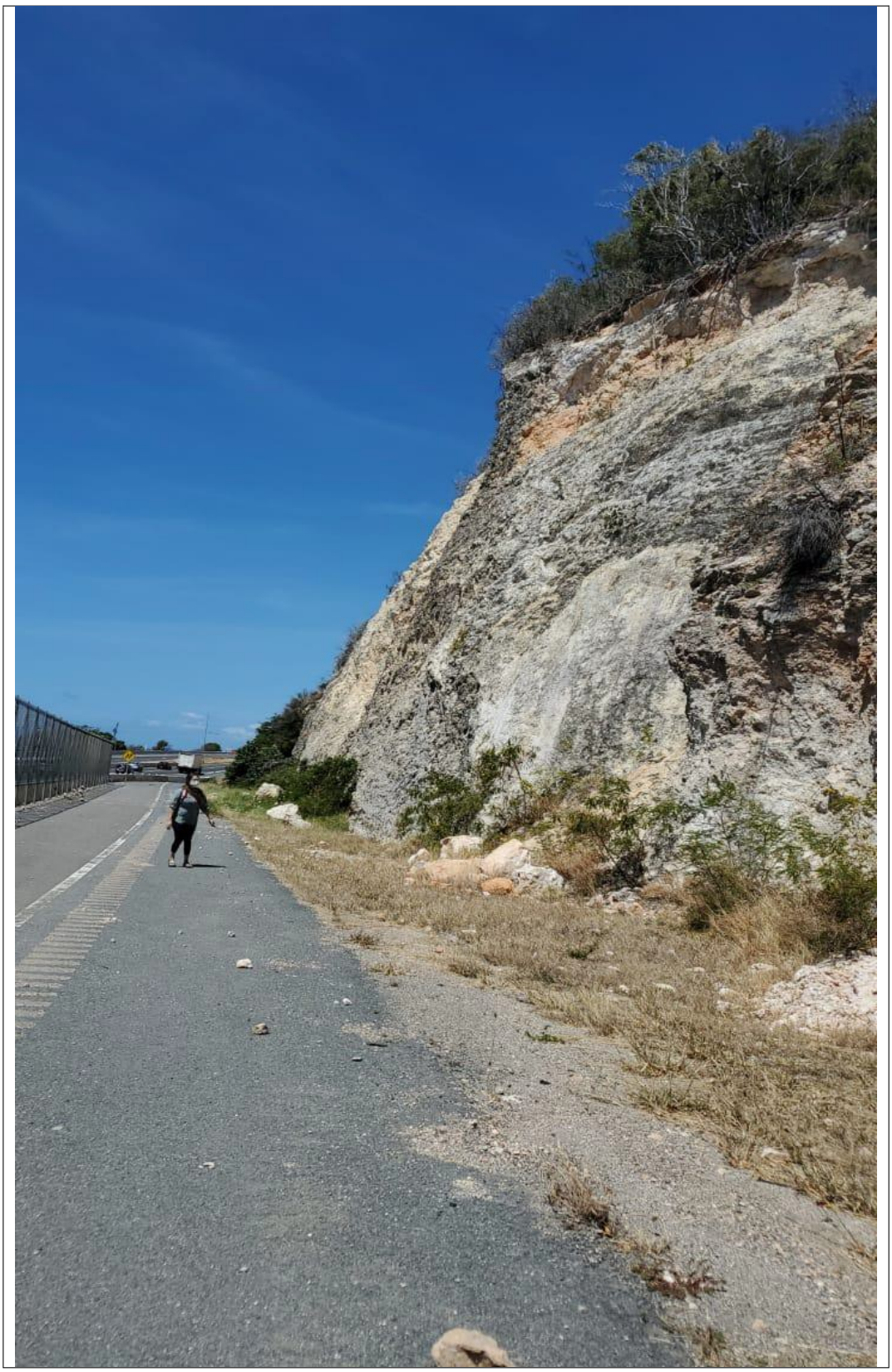


Fig. 14. *Afloramiento de rocas carbonatadas del Terciario Superior (17°58´46 N – 67°41´55´´W). Cercanías de Ponce, al sur dePuerto Rico.*

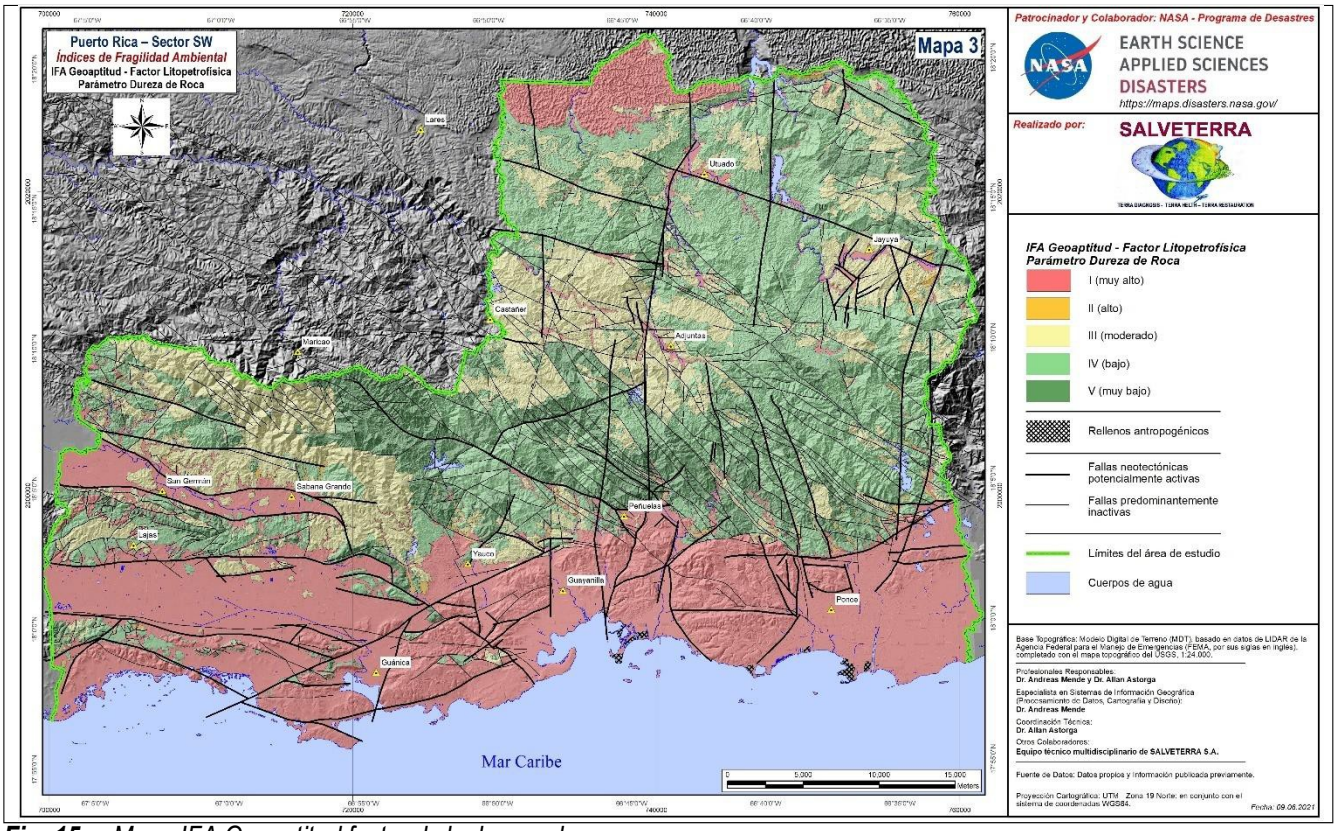


Fig. 15.a. *Mapa IFA Geoaptitud factor de la dureza de roca.*

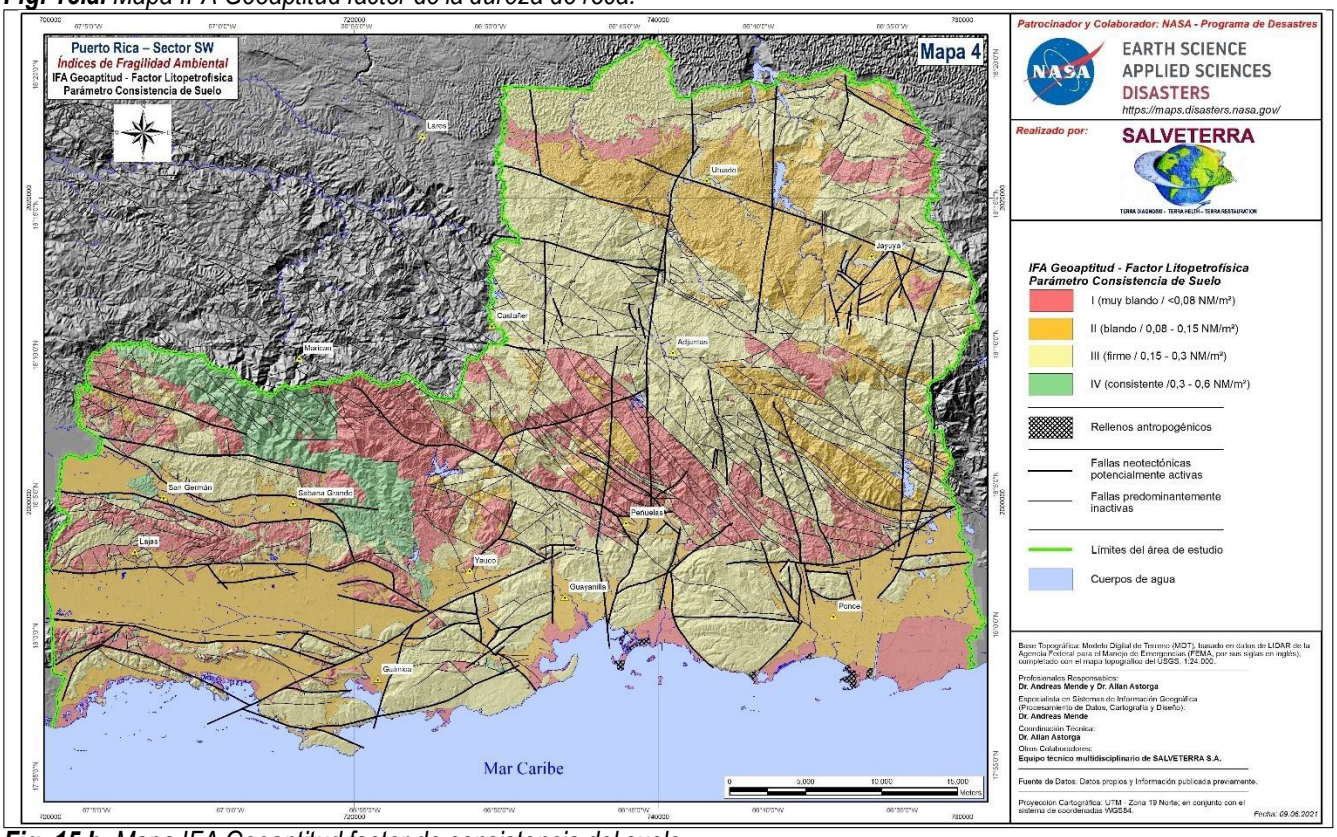


Fig. 15.b. *Mapa IFA Geoaptitud factor de consistencia del suelo.*

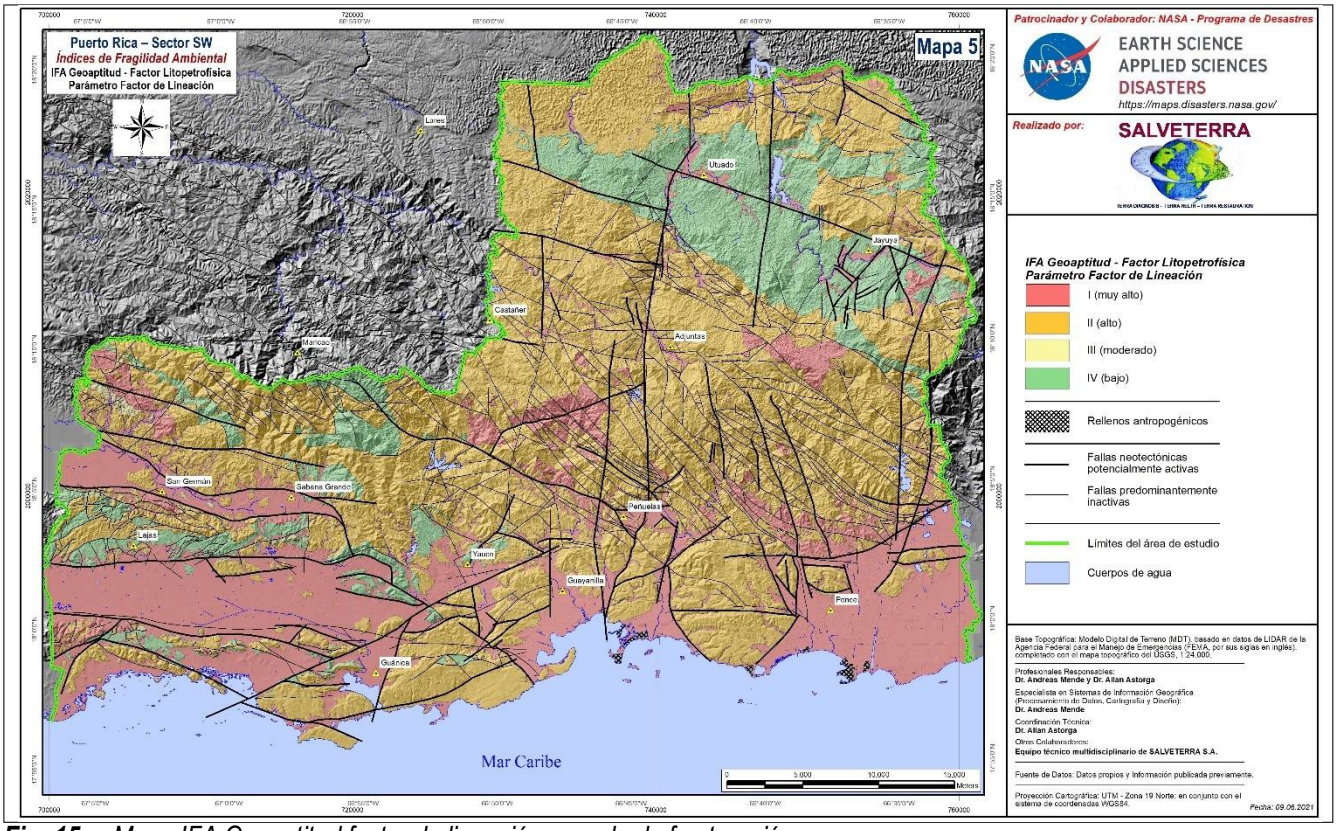


Fig. 15.c. *Mapa IFA Geoaptitud factor de lineación o grado de fracturación.*

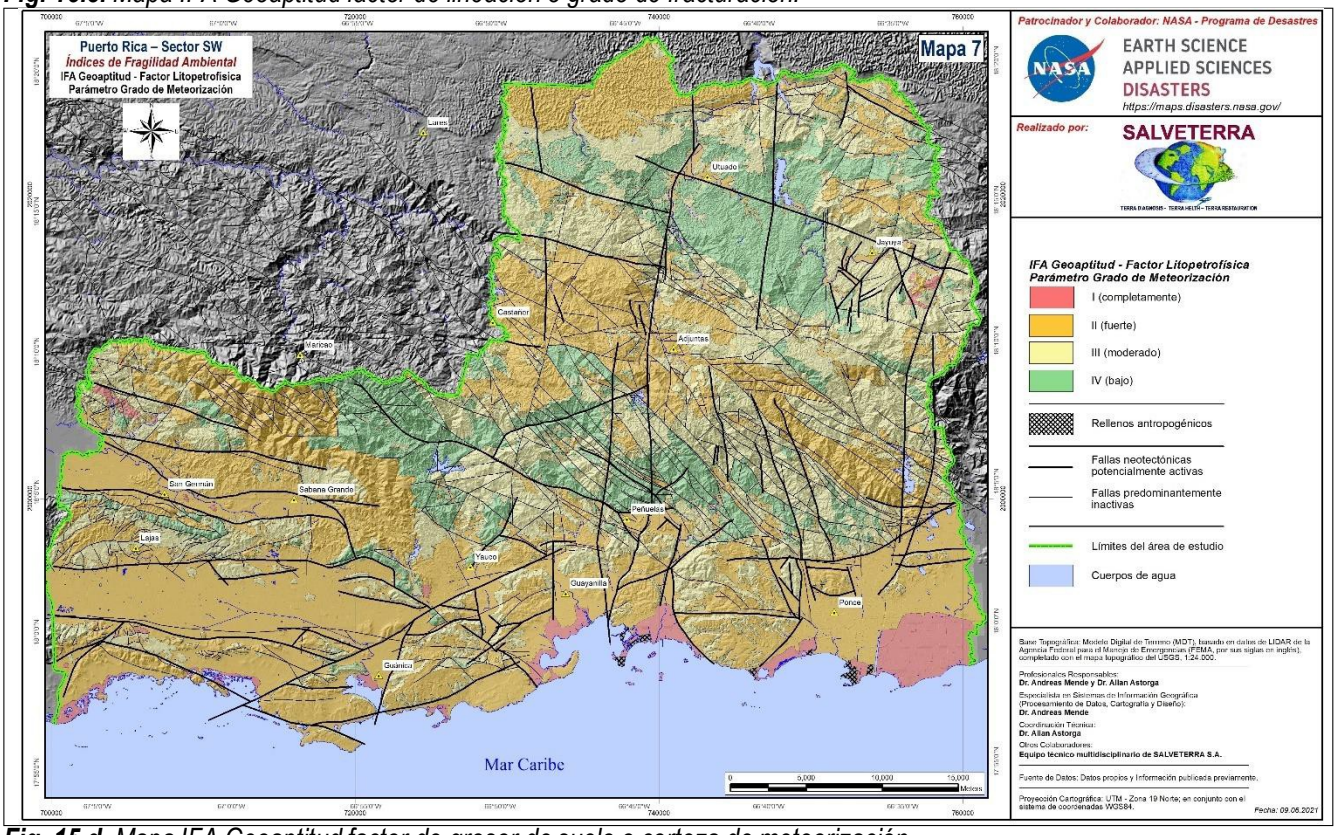


Fig. 15.d. *Mapa IFA Geoaptitud factor de grosor de suelo o corteza de meteorización.*

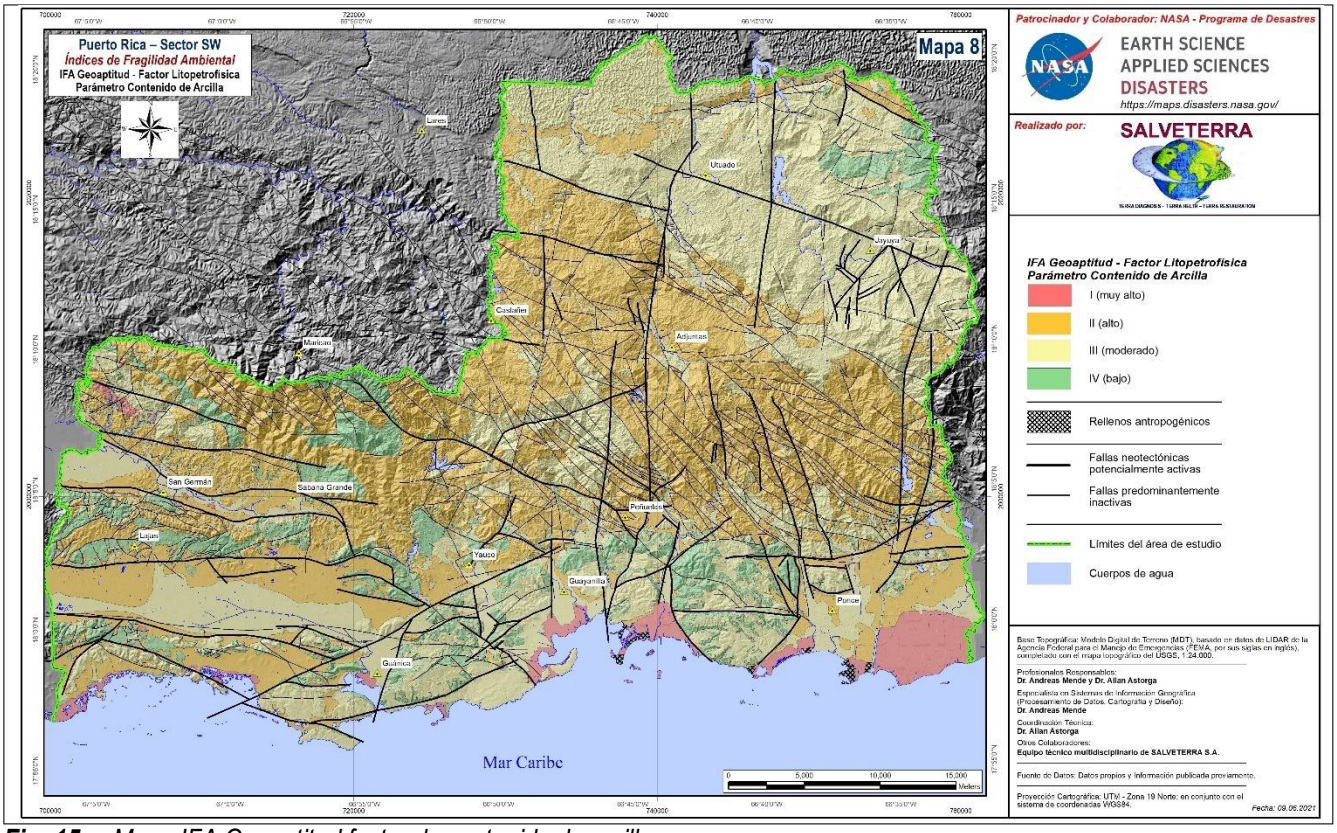


Fig. 15.e. *Mapa IFA Geoaptitud factor de contenido de arcilla.*

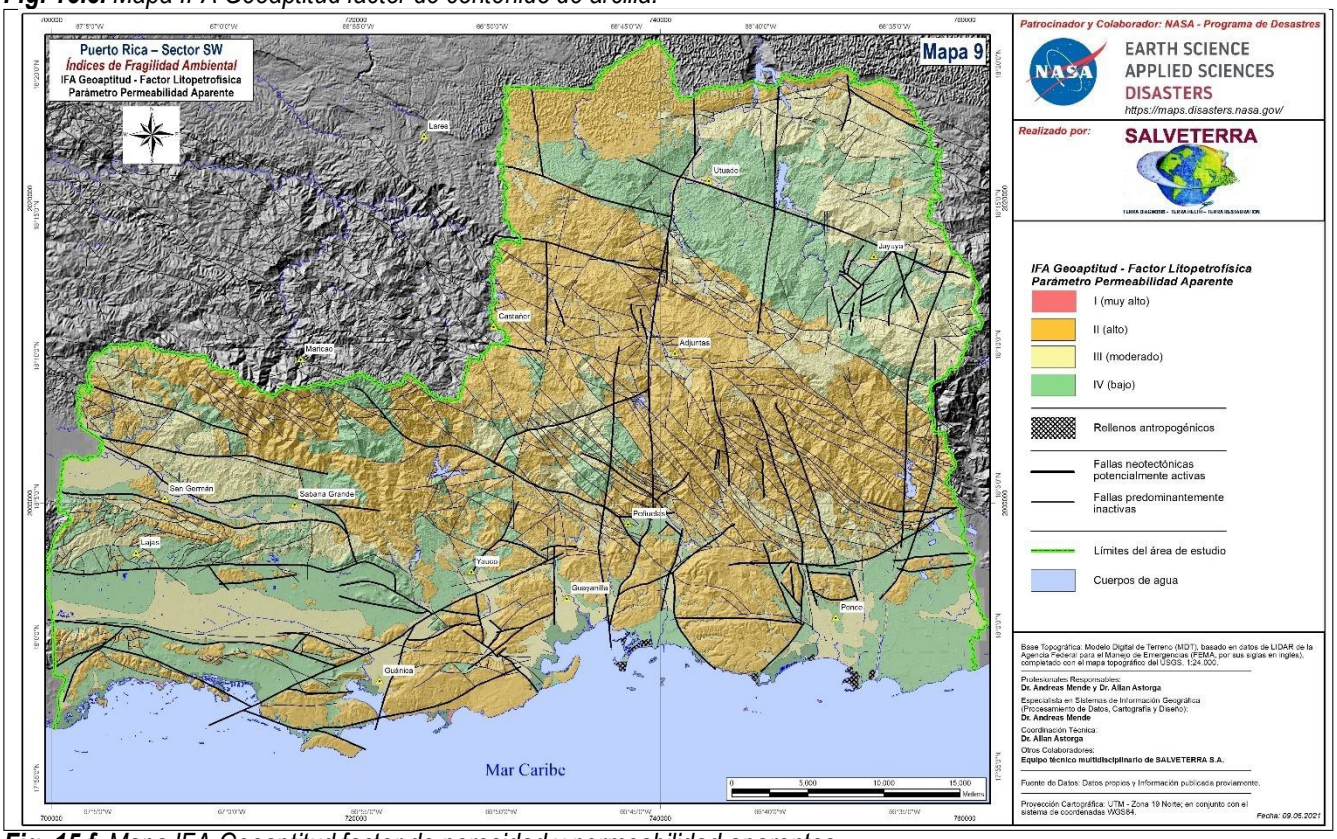


Fig. 15.f. *Mapa IFA Geoaptitud factor de porosidad y permeabilidad aparentes.*

Finalmente, las zonas de fragilidad moderada presentan una dureza de roca firme a muy firme, un suelo consistente, un factor de lineación moderado, un grado de meteorización moderado, un contenido de arcilla bajo y una porosidad–permeabilidad aparente bastante baja. Tienen una capacidad de soporte moderada y ángulos de estabilización moderados a altos.

La información de este mapa de IFA Geoaptitud Litopetrofísica sirve como una guía de la condición geomecánica y geotécnica de las unidades identificadas y aporta datos útiles para el análisis de susceptibilidad a las amenazas naturales, en combinación con otros factores de fragilidad ambiental. Sin embargo, los datos que se presentan no sustituyen los estudios geotécnicos locales y específicos para el desarrollo de infraestructura.

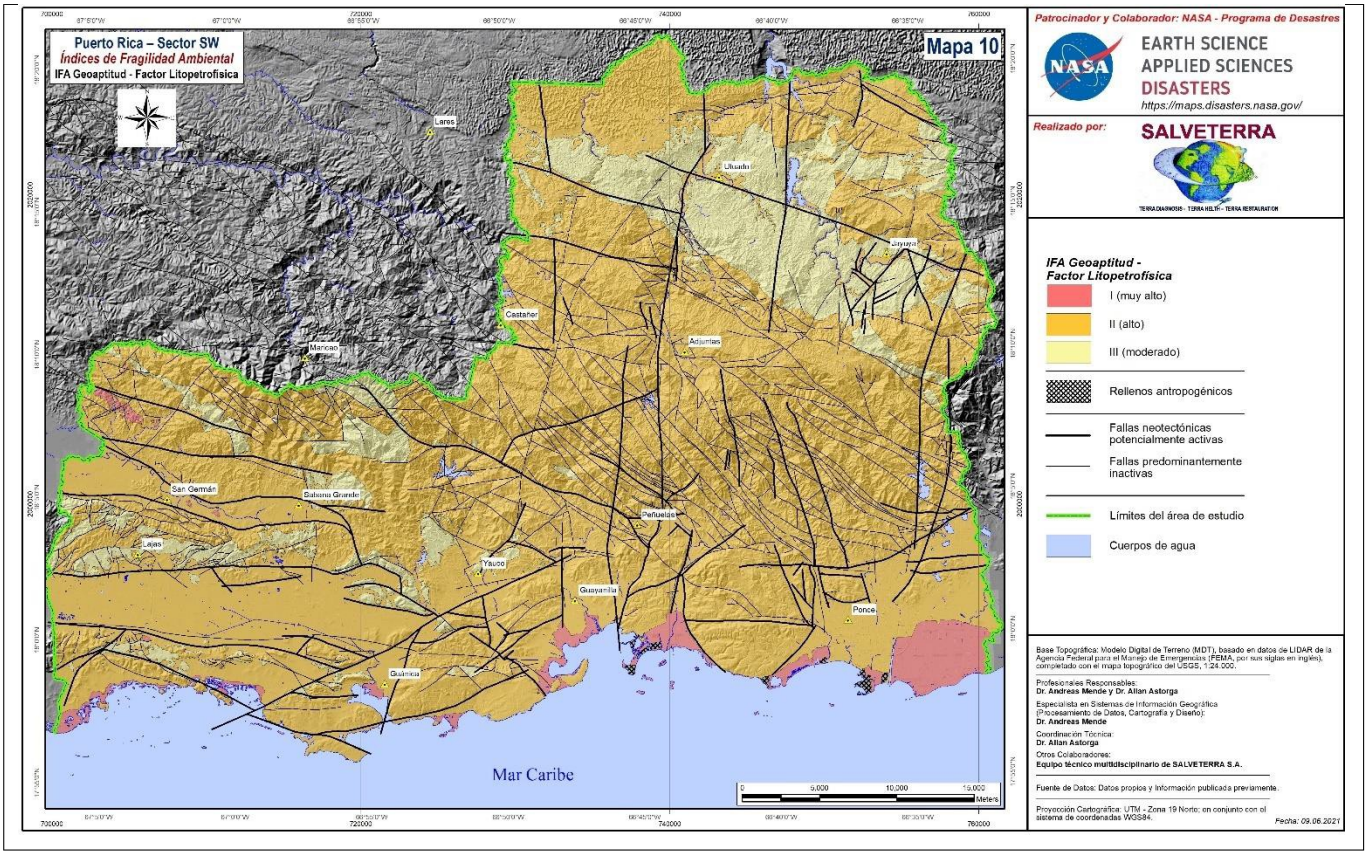


Fig. 16. *Mapa de IFA Geoaptitud litopetrofísica.*

4. La geomorfología y el IFA Geoaptitud por geodinámica externa

En la Figura 17 se presenta el mapa geomorfológico detallado del área de estudio obtenido por la interpretación de imágenes satelitales y datos de campo. Al igual que con el mapa geológico, se han separado las unidades geoespaciales del pre-Cuaternario y del Cuaternario. Se identificaron 48 unidades geoespaciales en función de la unidad geológica y la condición de relieve que presenta. La condición geomorfológica permite identificar la dinámica de procesos de erosión y de sedimentación que se encuentran activos y su vínculo con los procesos neotectónicos.

En términos generales, el área de estudio presenta una geomorfología dominada por procesos tectónicos y neotectónicos que conforman un relieve montañoso notable, sujeto a la denudación generada por procesos

hidrometeorológicos y una llanura costera interrumpida por un relieve de serranías costeras controladas, todavía, por procesos neotectónicos.

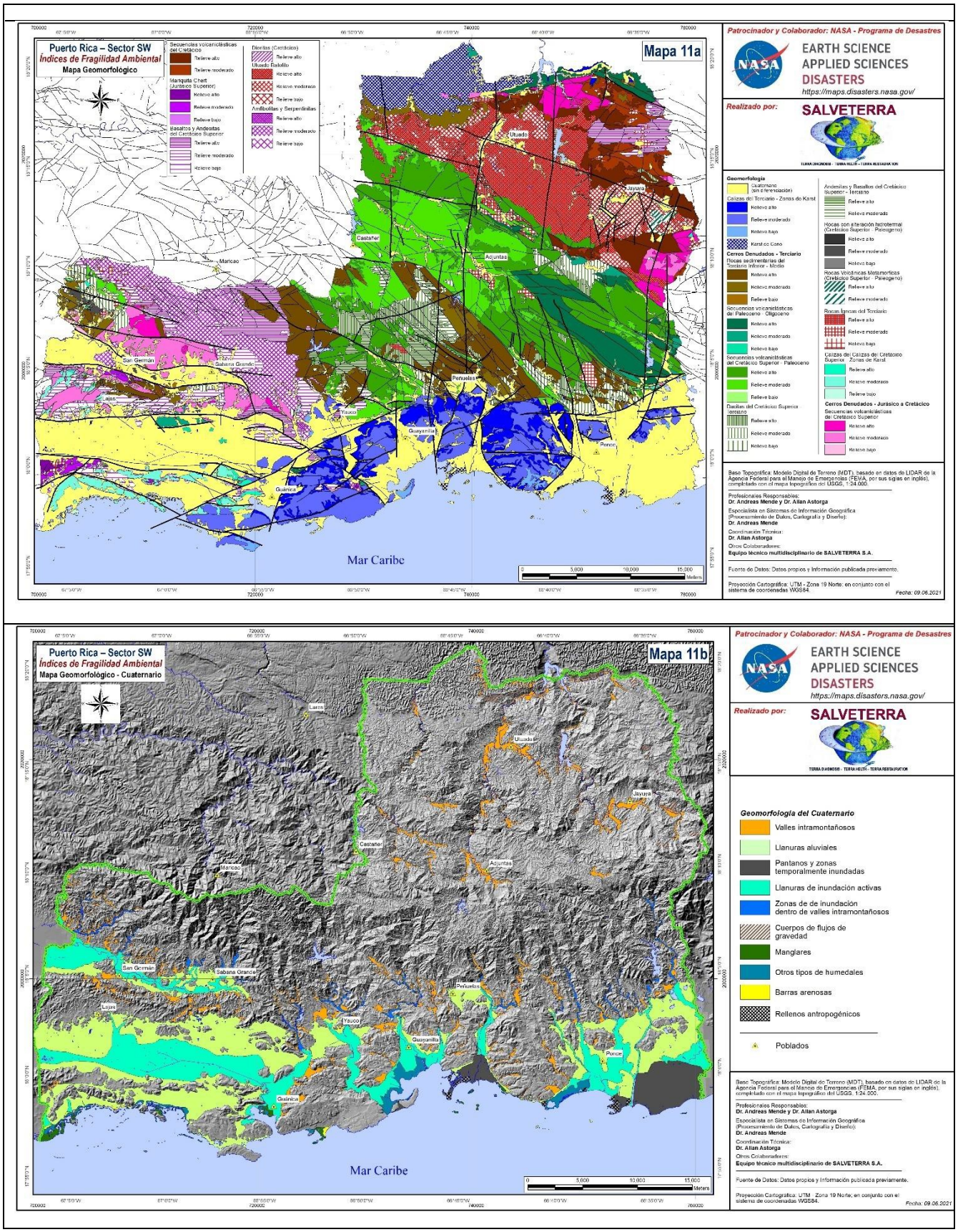


Fig. 17. *Mapa geomorfológico. Imagen superior: pre-Cuaternario. Imagen inferior: Cuaternario.*

En la Figura 18 se presenta el modelo digital del terreno para el área de estudio. En la imagen superior se observa el relieve notable que caracteriza este sector del suroeste de Puerto Rico. Por otra parte, en la imagen inferior se muestran las distintas alturas sobre el nivel del mar. El sector de mayor altura se encuentra al noreste del área de estudio, al sur de Jayuya, donde afloran las rocas ígneas del Cretácico Superior–Terciario.

Las zonas montañosas exhiben una serie de filas cuyas líneas divisorias de aguas muestran una orientación noroeste–suroeste bastante visible y controladas por estructuras geológicas regionales que se presentan en el suroeste de Puerto Rico (ver Figura 7). Entre las filas, se desarrollan paralelamente valles intramontañosos de la misma orientación (ver Figura 19). Sobre esta morfología, se superpone una serie de alineamientos geomorfológicos de orientación casi norte-sur que atraviesan toda el área de estudio (ver Figura 18) y que parece tener un origen más reciente y geo-dinámicamente más activo. Aquí se asocia al llamado sistema transtensional de Guayanilla (ver atrás). En la Figura 20, por su parte, se muestra una imagen de las llanuras costeras. En la Figura 21 se pueden ver la serie de mapas de los distintos factores de IFA Geoaptitud por geodinámica externa, obtenidos por el procesamiento de imágenes geoespaciales y de datos de campo. En la Figura 22, se puede apreciar el mapa de IFA Geoaptitud por geodinámica externa para el área de estudio. Para este factor se reconocieron tres zonas de fragilidad ambiental.

- Las zonas de fragilidad muy alta presentan condiciones de laderas superiores al 50 %, con relieve relativo alto, densidad de drenaje alta y una importancia de procesos de erosión muy elevada, con ausencia de procesos de sedimentación.
- Las zonas de fragilidad alta presentan condiciones de laderas entre 30 y 50 %, relieve relativo alto, densidad de drenaje alta, una importancia de procesos de erosión alta, con ausencia de proceso de sedimentación.
- Las zonas de fragilidad moderada tienen condiciones de laderas de baja a muy baja (menos de 30 %), relieve relativo bajo a moderado, densidad de drenaje moderada a alta y una importancia de procesos de erosión baja, con mayor predominio de los procesos de sedimentación. Dentro de esta zona se circunscriben las llanuras costeras.

La combinación de los datos de IFA Geoaptitud litopetrofísica y los de IFA Geoaptitud por geodinámica externa permite obtener una base de zonificación ambiental de gran utilidad para la realización de otros componentes de geoaptitud, como la hidrogeología, la estabilidad de laderas y otras fuentes de amenazas naturales. Esto, particularmente, cuando se combinan con otros datos técnicos como los climáticos y de potencial sísmico, que son muy importantes para determinar factores como la susceptibilidad a deslizamientos, desarrollo de flujos y eventos de inundación fluvial.

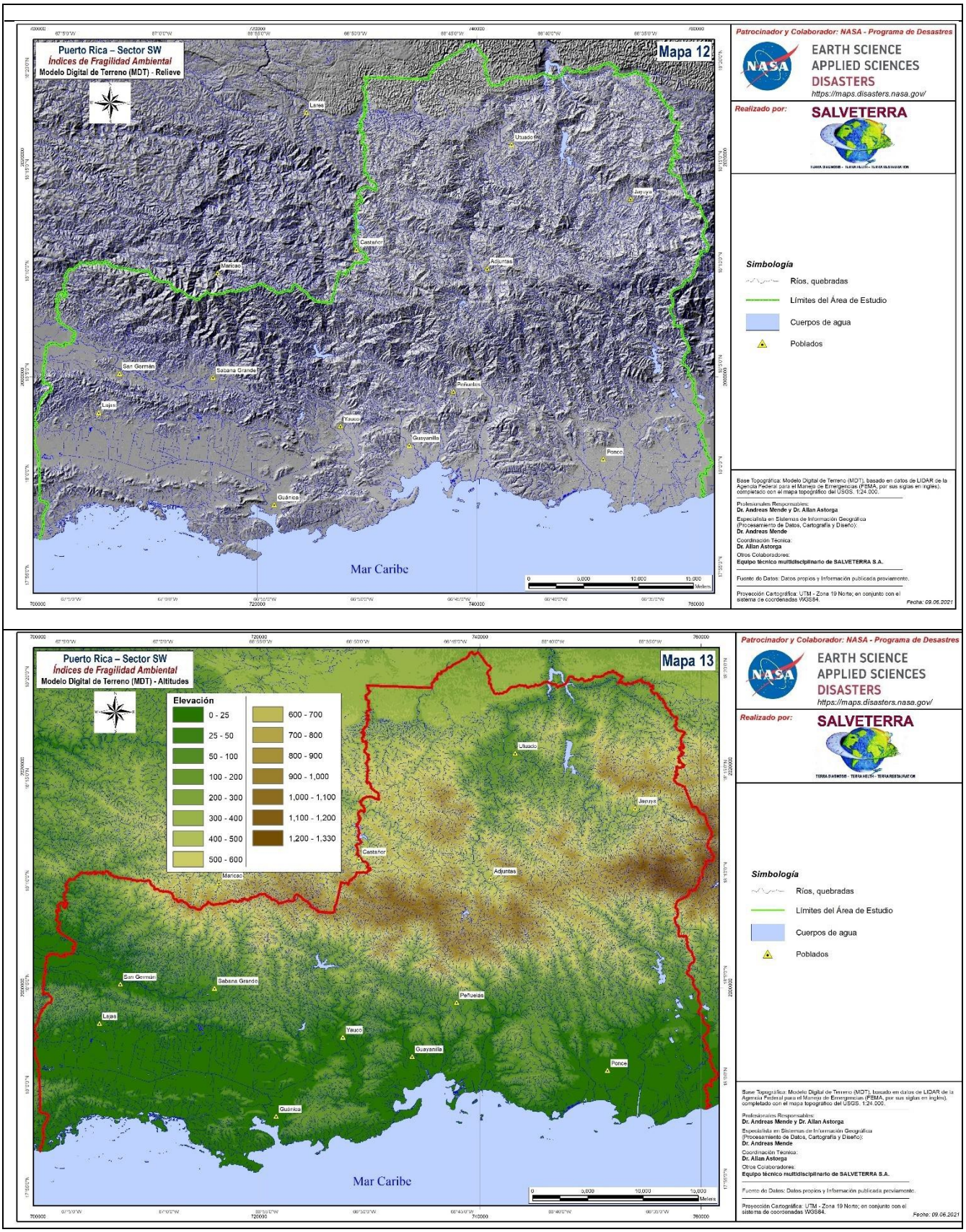


Fig. 18. *Mapas de modelo digital de terreno (superior) y alturas (inferior).*

Fig. 19. *Imagen del relieve montañoso del SW de Puerto Rico, cerca de Jayuya. Foto: Allan Astorga (febrero 2021).*

Fig. 20. *Imagen de la llanura costera del SW de Puerto Rico, cerca de Lajas. Foto: Allan Astorga (febrero 2021).*

5. La hidrogeología y el IFA Geoaptitud hidrogeológica

En la Figura 23 se muestra el mapa hidrogeológico del área de estudio. Este mapa se elaboró en virtud de las condiciones litopetrofísicas de las unidades geológicas, así como de los datos de geodinámica externa, en combinación con datos de precipitación fluvial, y con la información de pozos de extracción de aguas subterráneas.

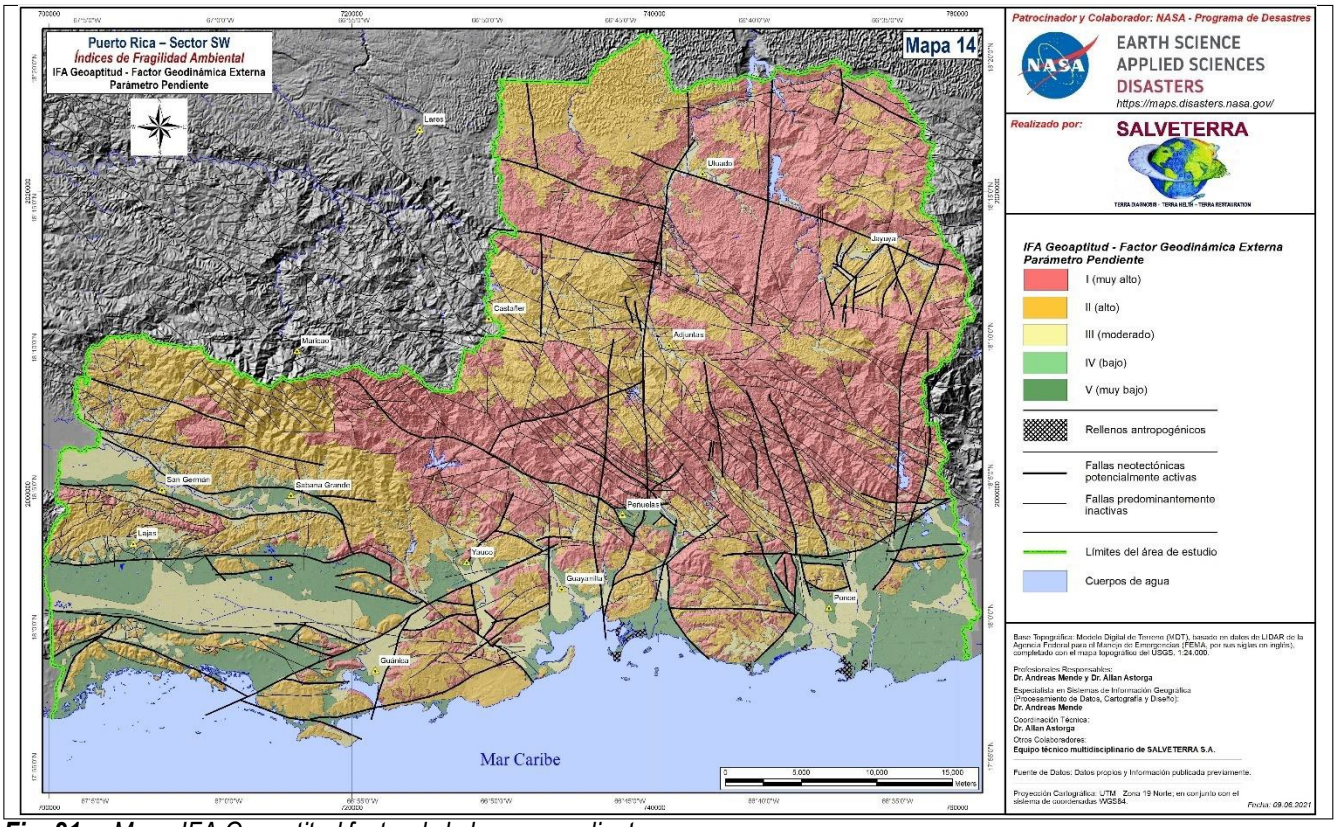


Fig. 21.a. *Mapa IFA Geoaptitud factor de laderas o pendientes.*

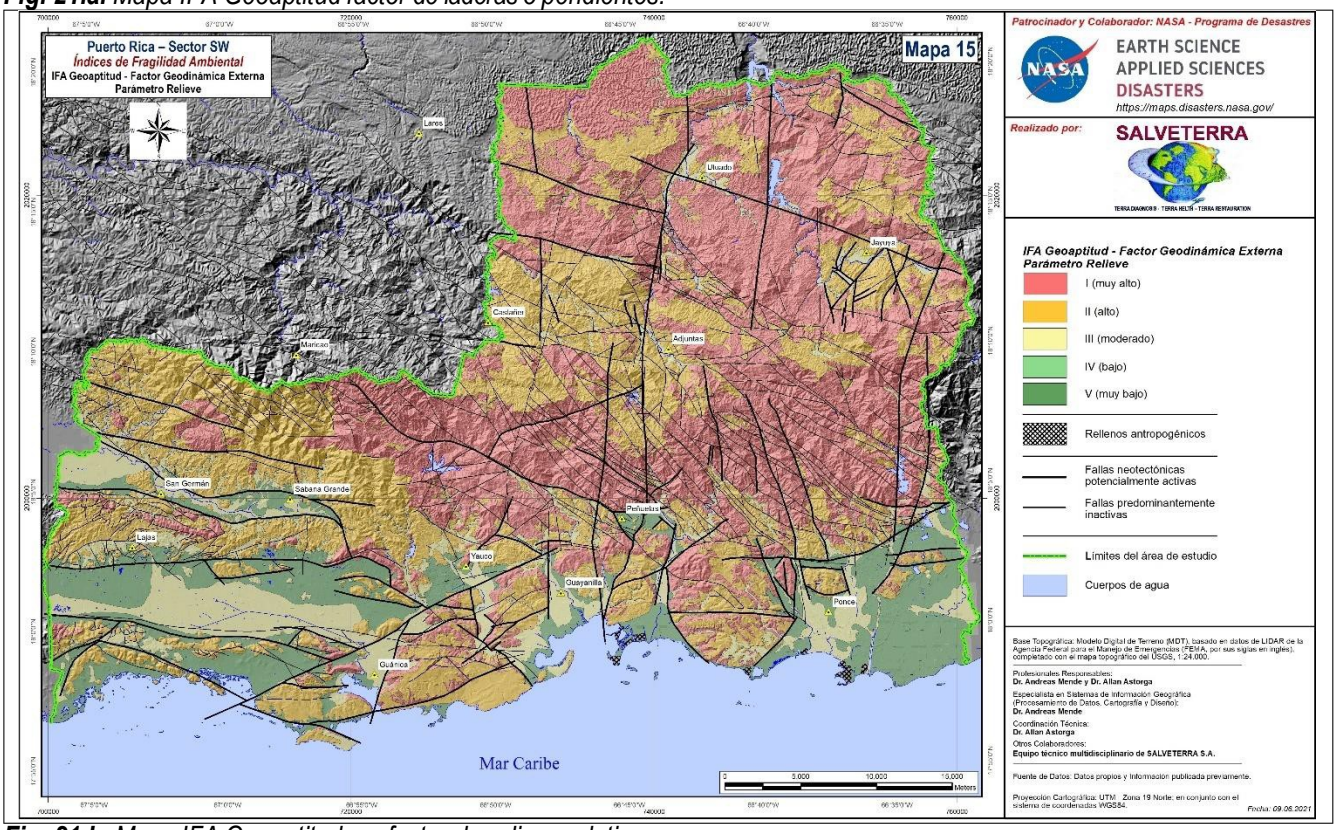


Fig. 21.b. *Mapa IFA Geoaptitud por factor de relieve relativo.*

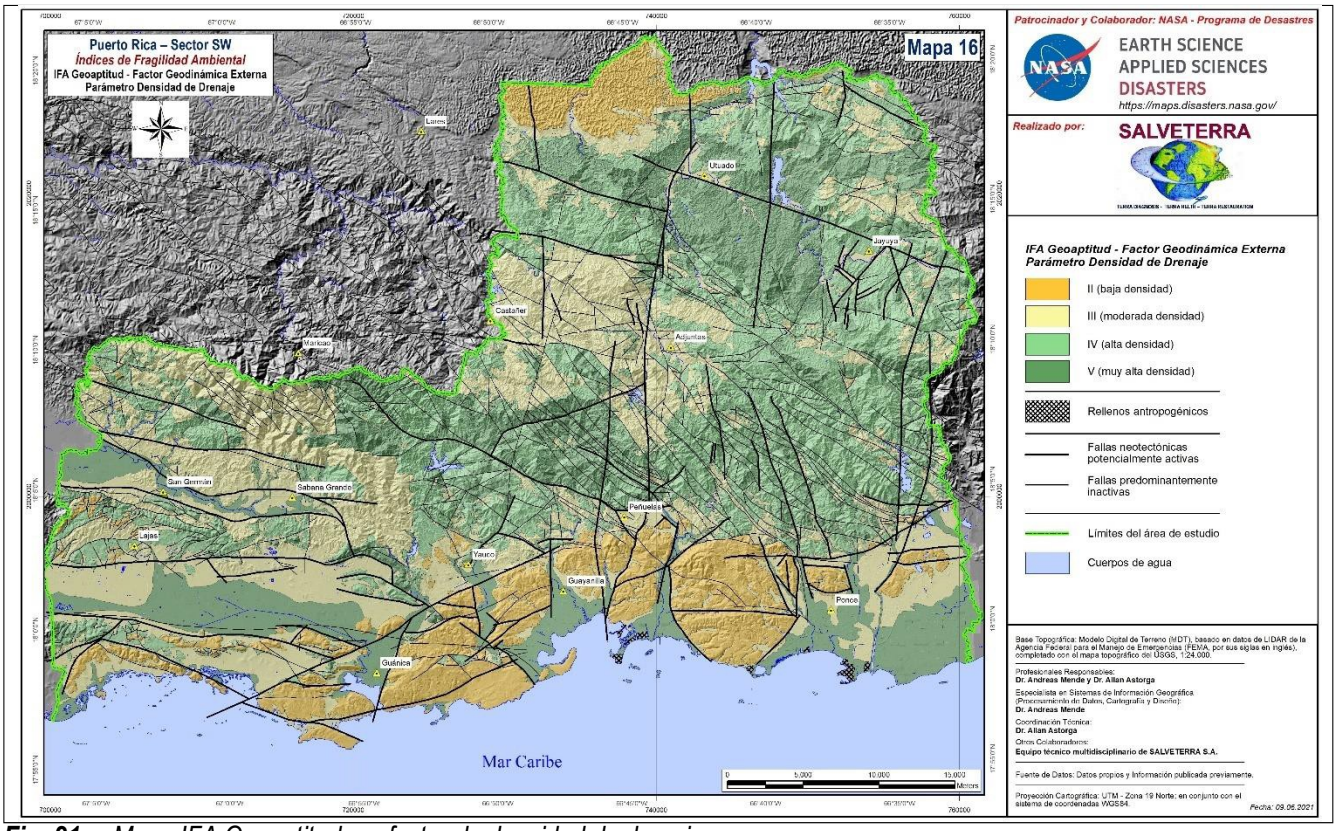


Fig. 21.c. *Mapa IFA Geoaptitud por factor de densidad de drenaje.*

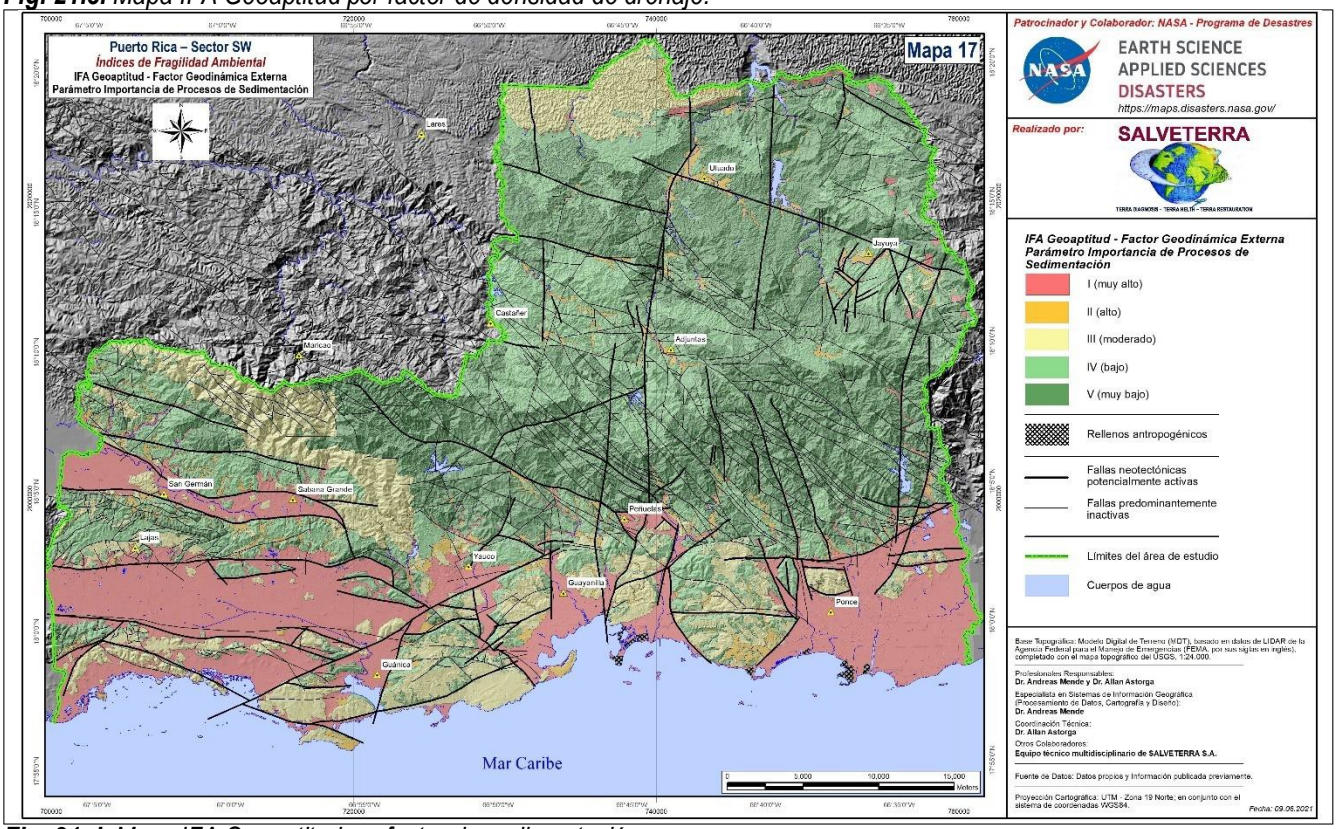


Fig. 21.d. *Mapa IFA Geoaptitud por factor de sedimentación.*

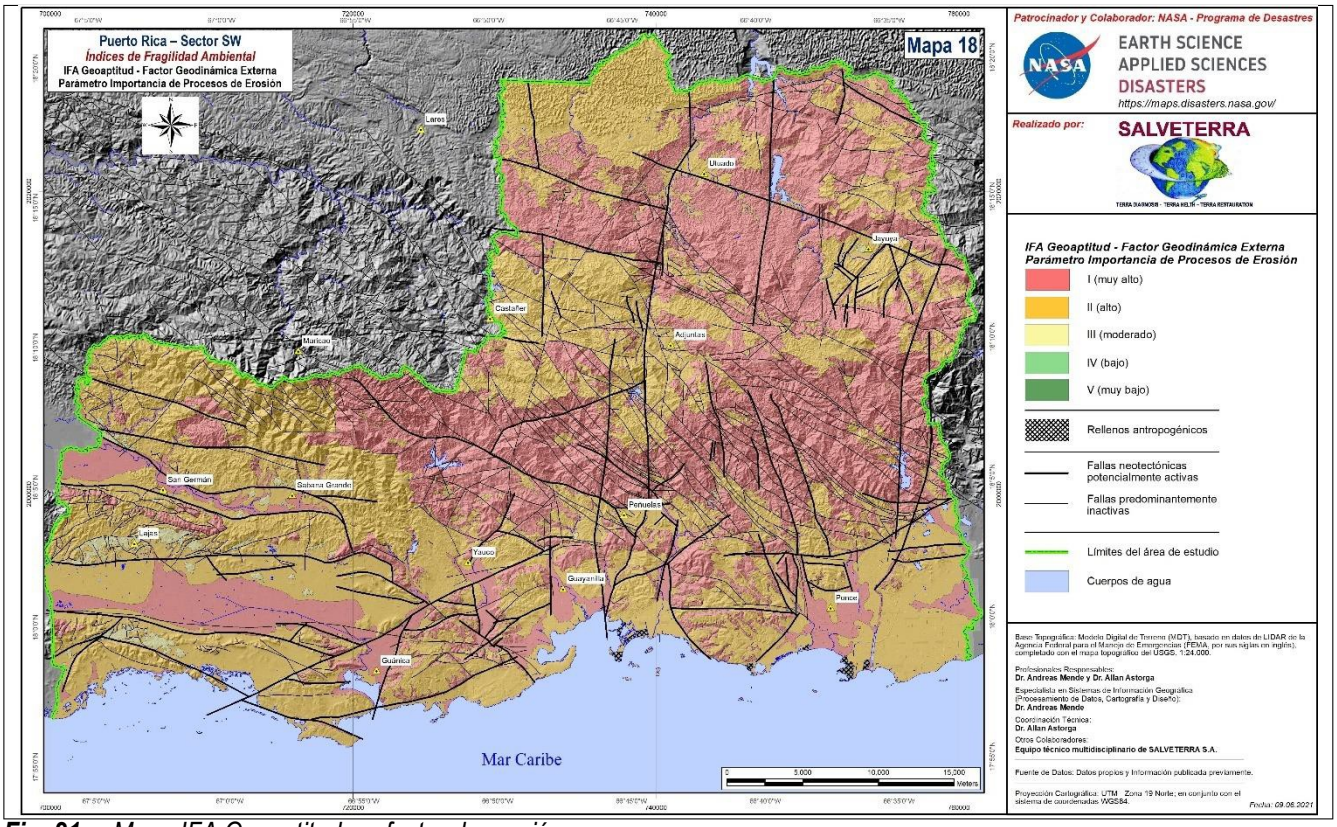


Fig. 21.e. *Mapa IFA Geoaptitud por factor de erosión.*

Fue posible reconocer ocho unidades acuíferas en el subsuelo superior del área de estudio:

- Acuíferos aluviales abiertos de potencial moderado a bajo.
- Acuíferos en rocas sedimentarias de potencial moderado.
- Acuíferos en rocas sedimentarias de potencial bajo.
- Acuíferos en rocas volcánicas de potencial moderado por su condición de fracturación.
- Acuíferos en rocas volcánicas de potencial bajo.
- Acuíferos kársticos o en rocas carbonatadas de potencial moderado a alto.
- Acuíferos en rocas ígneas de potencial moderado.
- Acuíferos en rocas metamórficas de potencial bajo.

En el mapa de la Figura 23 se indica la ubicación de los pozos de extracción de aguas subterráneas presentes en el área de estudio. Estos pozos tienen profundidades de decenas y centenas de pies y aprovechan el agua subterránea de los acuíferos presentes en el subsuelo superior, principalmente con profundidades leves (0–98.5 ft) a intermedias (98.6–492 ft).

En las figuras 24 y 25 se presentan los mapas de los diferentes factores de IFA Geoaptitud hidrogeológica para producir este mapa de Geoaptitud. Los datos de precipitación pluvial promedio para el área de estudio varían de 500–600 mm/a en la zona costera, hasta 2,300–2,400 mm/a al año en la zona montañosa, particularmente del sector noreste.

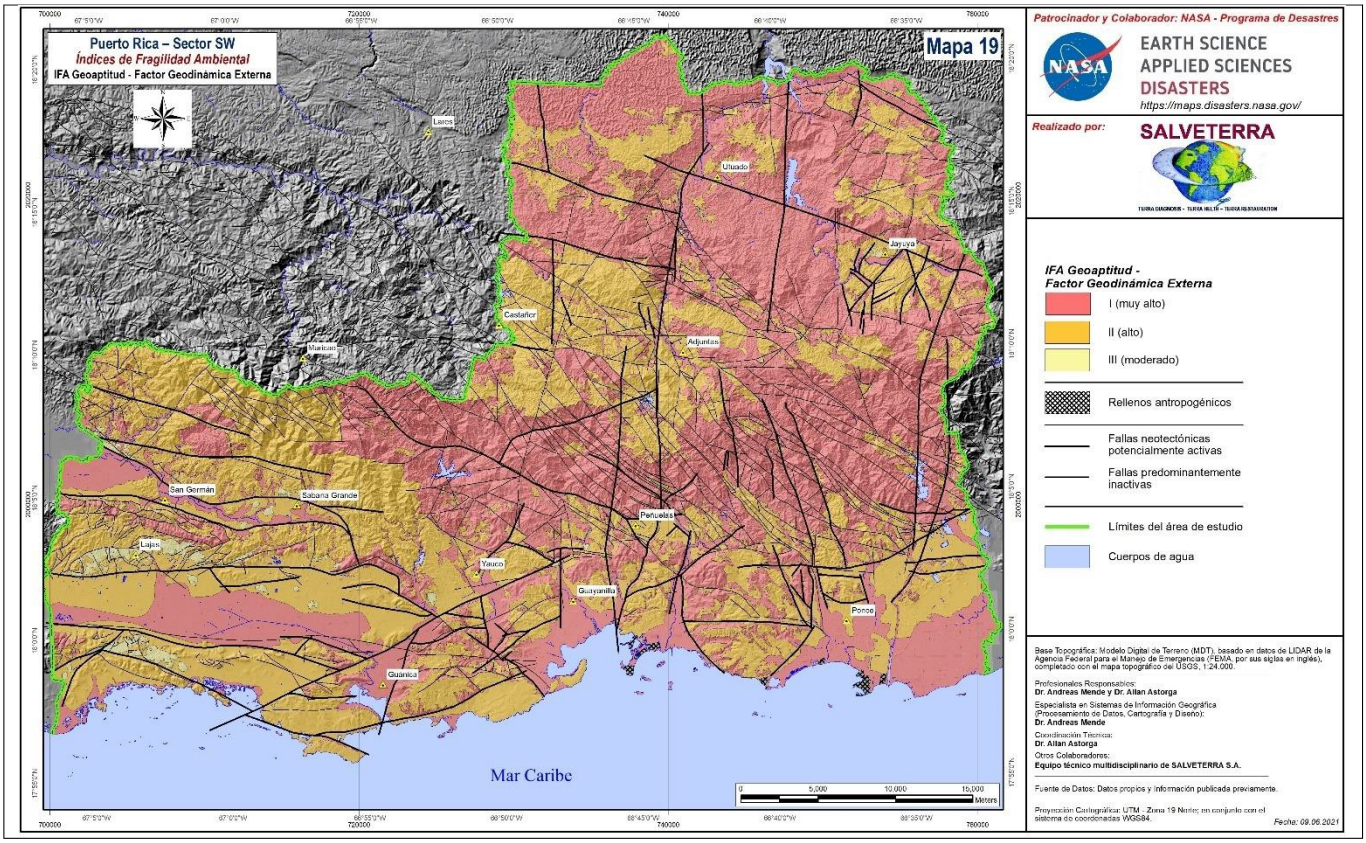


***Fig. 22**. Mapa de IFA Geoaptitud por geodinámica externa.*

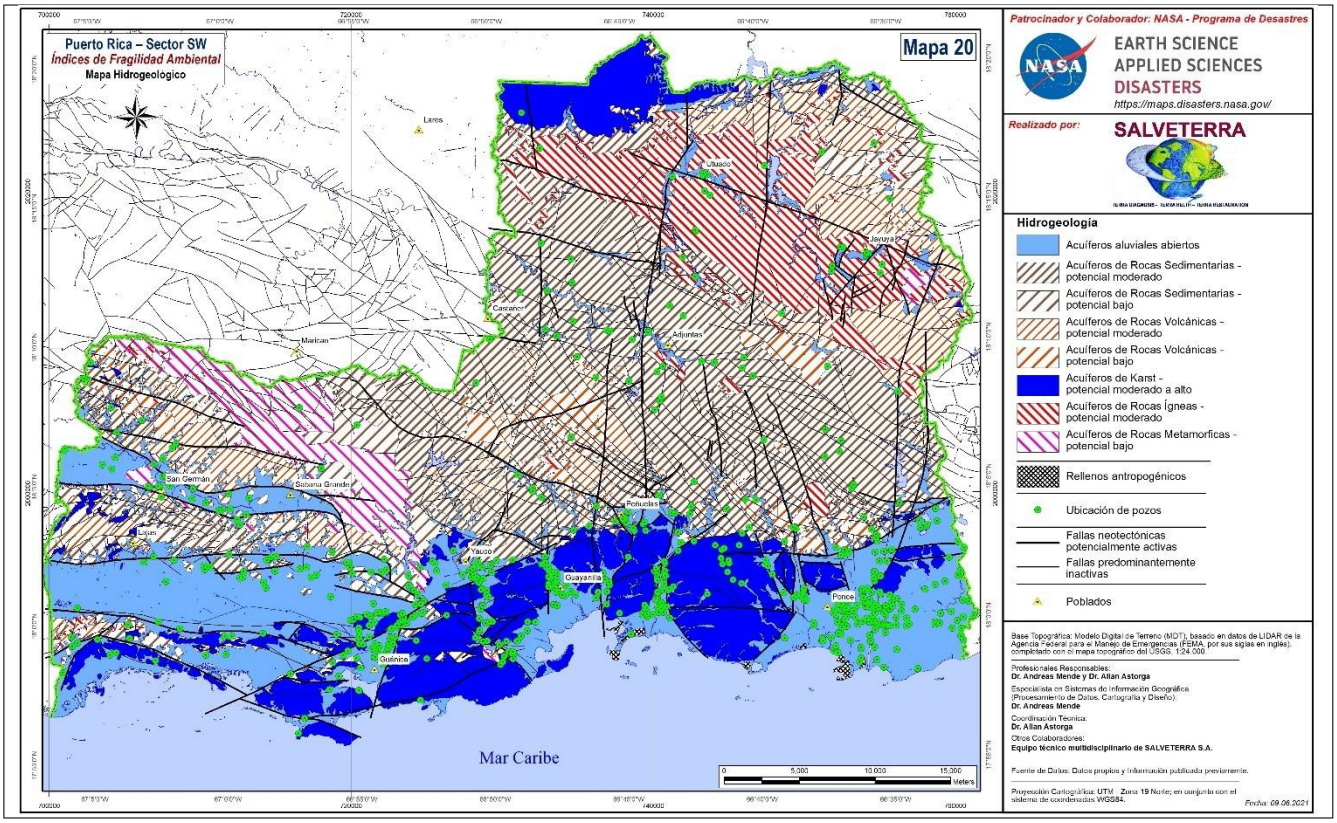


***Fig. 23**. Mapa hidrogeológico del área de estudio.*

Los datos de geoaptitud por factor litopetrofísico indican que, aunque la mayoría de las rocas del subsuelo superior del área de estudio presentan un grado de litificación bien marcado por la diagénesis y la deformación tectónica., también presentan algunas de las unidades geoespaciales y un grado de fracturación fuerte y significante, que se refleja en una mayor porosidad y permeabilidad secundarias aparentes. Esta circunstancia hace que surjan diferencias en el potencial del acuífero subterráneo que puede desarrollarse.

Como se muestra en el mapa de la Figura 23, cerca del 80 % de los pozos de extracción de aguas subterráneas se encuentran en la unidad de acuíferos aluviales abiertos de las llanuras costeras.La mayoría de los pozos están en o alrededor de las zonas urbanas, como en los casos de Ponce, Guayanilla, Yauco, Peñuelas y Guánica.

La existencia de acuíferos más profundos (mayores de 492 ft) es poco probable en la zona montañosa debido a la deformación tectónica compresiva que caracteriza esta parte de la corteza. No obstante, bajo las llanuras costeras del sector occidental del área de estudio, al sur de Lajas y el sector de San Germán, podrían habersedado las condiciones para que se almacenara el agua subterránea en niveles más profundos. Un tema que requeriría una mayor investigación.

En la Figura 26 muestra el mapa de IFA Geoaptitud hidrogeológica para el área de estudio.

La fragilidad ambiental por el factor hidrogeológico determina el potencial de que las aguas subterráneas en el subsuelo sean contaminadas por el desarrollo de actividades humanas en la superficie del suelo. Sin embargo, los datos también aportan información sobre la existencia de acuíferos con potencial de uso en el subsuelo superior.

Como se observa en el mapa de la Figura 26, la hidrogeología reconoció cuatro categorías de fragilidad ambiental en el área de estudio.

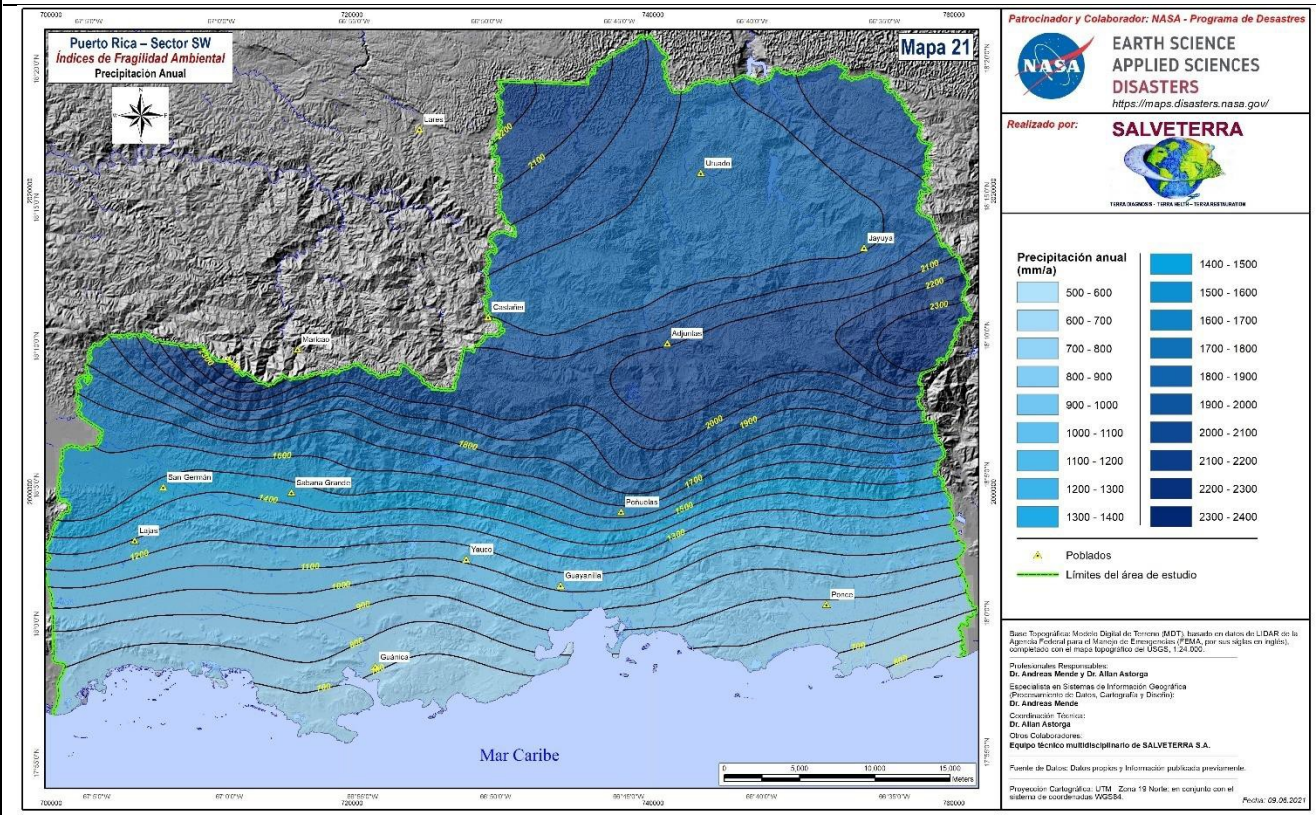
Las ***zonas de fragilidad muy alta*** ocurren principalmente en el sector sur del área de estudio, cubriendolas áreas de llanuras aluviales y de acuíferos kársticos de la Calizas del Terciario. También se presentan en el sector norte.

Las ***zonas de fragilidad alta*** ocurren en la zona montañosa del área de estudio, en la parte central yoeste. Se trata de zonas donde se presentan acuíferos en rocas fracturadas y que tienen potencial de uso.

Las ***zonas de fragilidad moderada*** cubren una parte significativa de la zona montañosa del área de estudio y, principalmente, en la parte norte.

Finalmente, las ***zonas de fragilidad baja*** corresponden con zonas de un potencial hidrogeológico bajo y se asocian a rocas impermeables con poco potencial acuífero. Estas ocurren en el sector noreste y oeste del área de estudio.

El conocimiento del potencial hidrogeológico (superficial, intermedio y profundo) es una información de valorestratégico para Puerto Rico. Esto, no solo para la identificación y manejo de depósitos de agua subterránea para el uso de comunidades humanas y actividades productivas, sino también para otros elementos asociados, como lo es el aprovechamiento de posible potencial geotérmico.



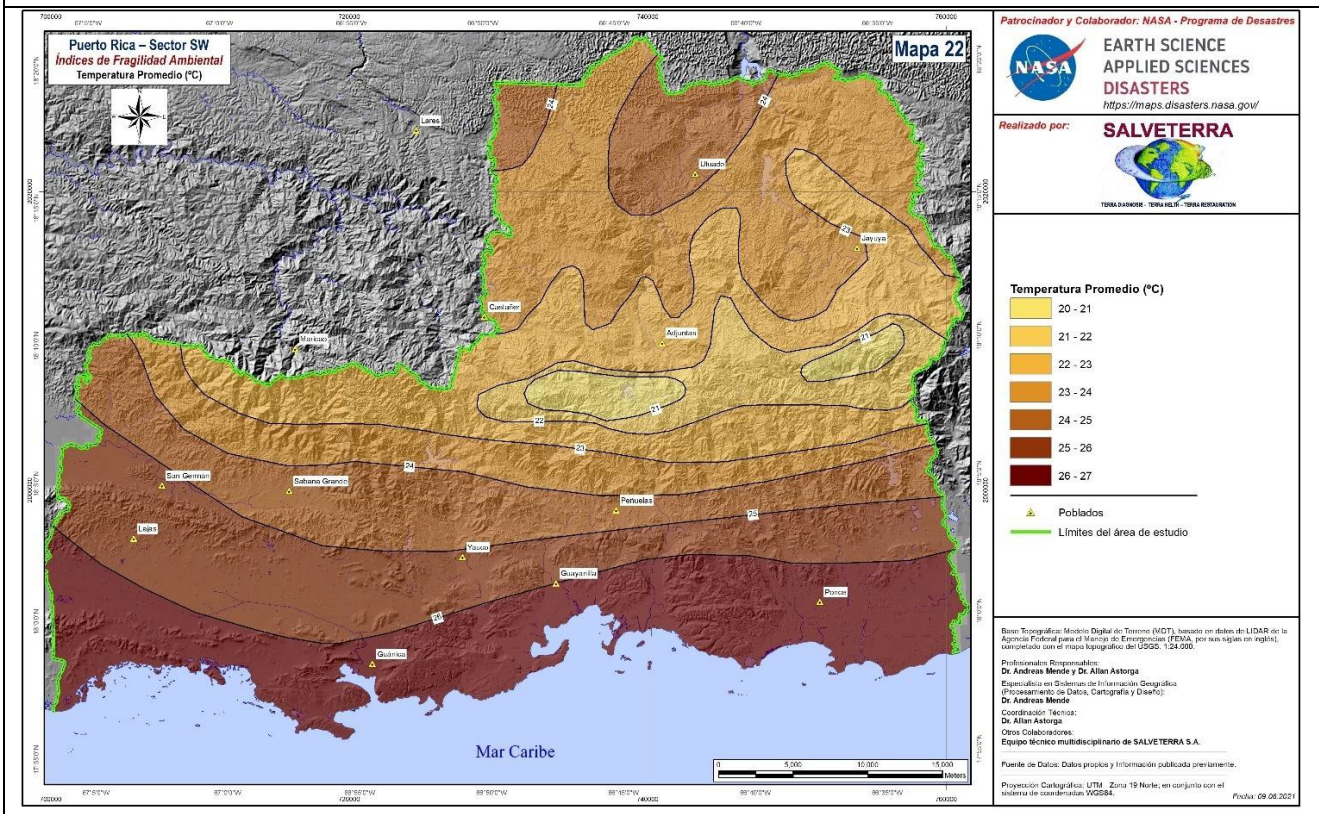


Fig. 24. *Mapas de precipitación promedio anual (superior) y de temperatura promedio (inferior).*

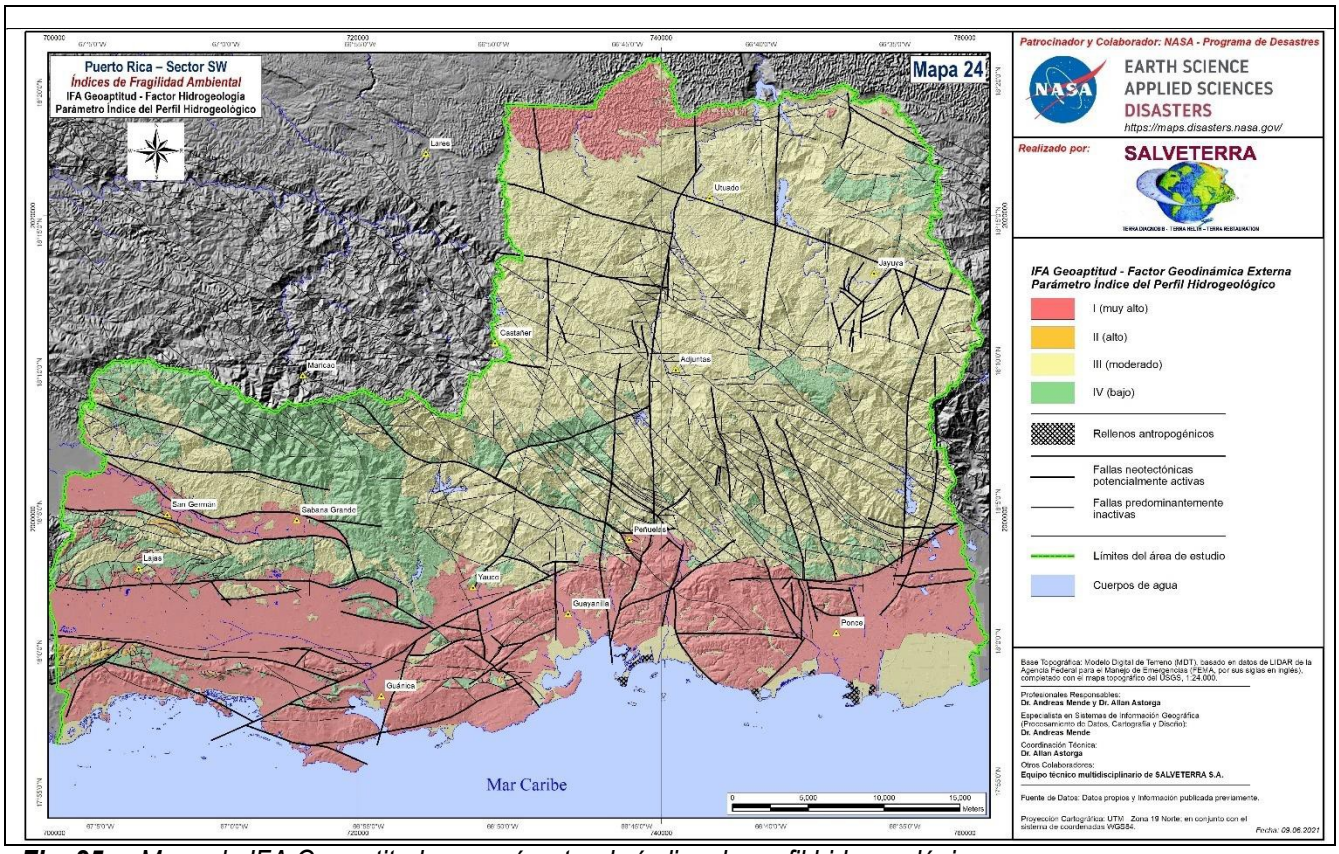


***Fig. 25.a**. Mapa de IFA Geoaptitud por parámetro de índice de perfil hidrogeológico.*

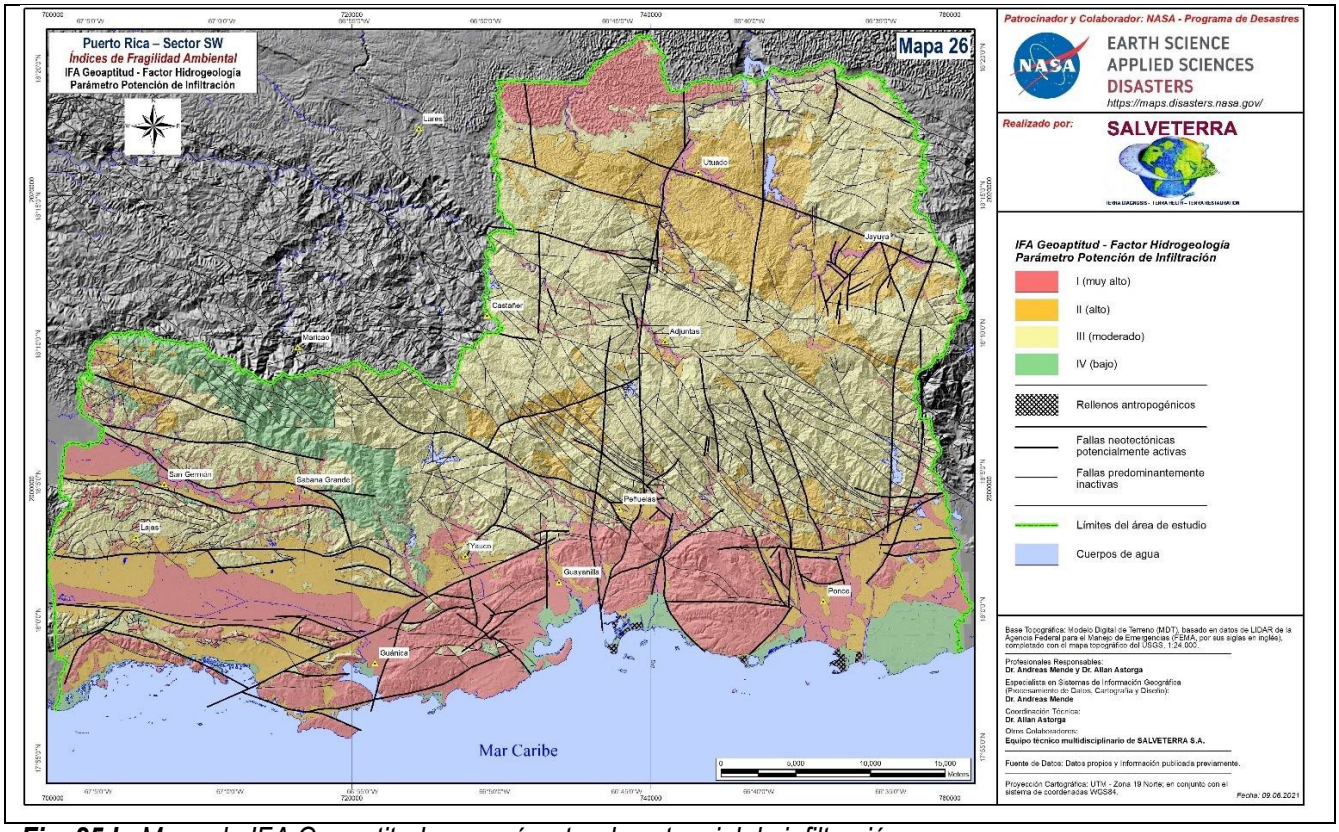


***Fig. 25.b**. Mapa de IFA Geoaptitud por parámetro de potencial de infiltración.*

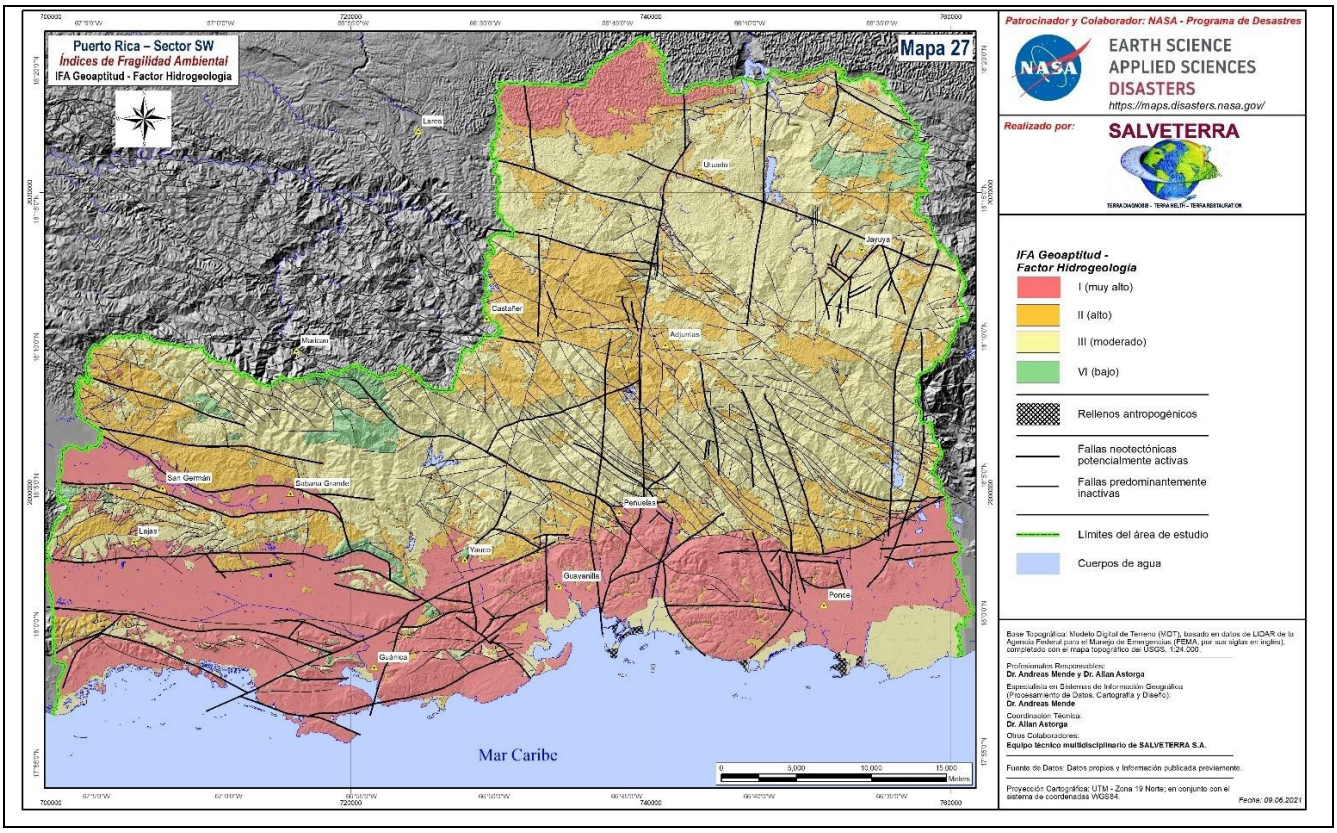


***Fig. 26**. Mapa de IFA Geoaptitud hidrogeológica.*

6. IFA Geoaptitud por estabilidad de laderas

Las laderas inestables corresponden con zonas de pendiente (generalmente superior al 15 %), de origen natural o artificial (taludes de corte o relleno, por ejemplo), donde, bajo determinadas condiciones propias del material que conforma el suelo y el subsuelo superior o, bien, por efectos externos o una combinación de ambos, se puede generar un deslizamiento de tierra o, más precisamente, un movimiento gravitacional de masas de rocas, suelos y otros materiales presentes.

Generalmente se acepta como sinónimo el término deslizamiento al movimiento gravitacional de una masa. En este caso se utiliza el concepto de deslizamiento en una acepción amplia. En la Figura 27 se presenta una ilustración sobre los tipos principales de deslizamiento que se pueden encontrar en la naturaleza para una ladera.

Son varios los factores que determinan el que una ladera se inestabilice y pueda generar un deslizamiento. Dos grupos de factores intrínsecos a la condición de la ladera corresponden con el IFA Geoaptitud litopetrofísica y el IFA Geoaptitud por geodinámica externa. La suma de todos esos factores permite establecer una base sobre la condición de fragilidad por geoaptitud de una determinada ladera. A esos datos factoriales se suma otrainformación importante, como la precipitación que caracteriza la zona, en particular durante los meses más lluviosos cuando la condición de los suelos puede alcanzar una saturación significativa. Además, resulta también un factor importante, la existencia de sismicidad que puede ser un mecanismo detonador importante para el desarrollo de deslizamientos. Finalmente, también se suman factores antrópicos, como cambios en el uso del suelo o el desarrollo de obras que

pueden representar cambios locales en la pendiente del terreno, entre otros.

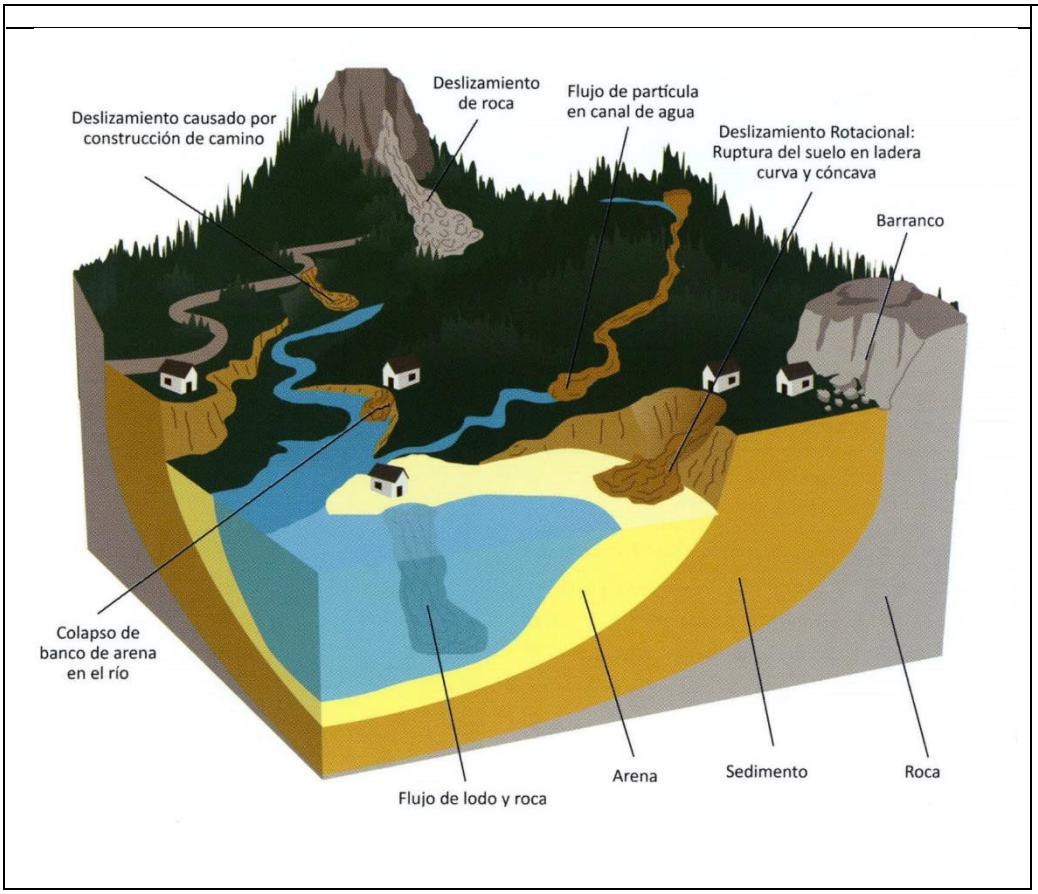


Fig. 27. *Tipos principales de deslizamientos o movimientos gravitacionales de masas.*

La Figura 28 muestra el mapa de IFA Geoaptitud por factor de estabilidad de laderas del área de estudio. Este mapa es el resultado del procesamiento de datos de los factores litopetrofísico, de geodinámica externa y de geoaptitud hidrogeológica, incluyendo los datos climáticos, particularmente de precipitación y potencial sísmico (ver más adelante). Se identificaron cinco zonas de fragilidad ambiental: muy alta, alta, moderada, baja y muy baja. Las dos primeras zonas son las más susceptibles al desarrollo de deslizamientos.

La ***zona de fragilidad muy alta*** corresponde a las zonas de mayor pendiente, particularmente las zonas de relieve alto y que, dadas las condiciones geológicas e hidrogeológicas de las unidades geoespaciales, presenta una condición de susceptibilidad muy alta al desprendimiento gravitacional de masas. Es importante señalar que estas zonas, ante eventos de precipitaciones y/o actividad sísmica altas, corresponden a las laderas donde es más probable que ocurran deslizamientos. Por la característica de las unidades de rocasdel área de estudio, este tipo de deslizamiento correspondería con deslizamientos de rocas y deslizamientos rotacionales de rocas y suelos, principalmente.

La ***zona de fragilidad alta*** corresponde a las zonas de relieve moderado a alto, pero con una pendiente menor a las de las zonas de fragilidad muy alta. Durante periodos de fuertes precipitaciones y/o actividad sísmica, estas laderas pueden desarrollar deslizamientos de tierra, pero en una condición menor que las zonas de fragilidad muy alta. Sin embargo, para ambas áreas resulta importante considerar el hecho de que la realización de actividades humanas, particularmente con el desarrollo de infraestructura, como cortes para carreteras o para construcciones de edificios o casas residenciales, puede hacer que, localmente, se potencien las condiciones de deslizamiento.

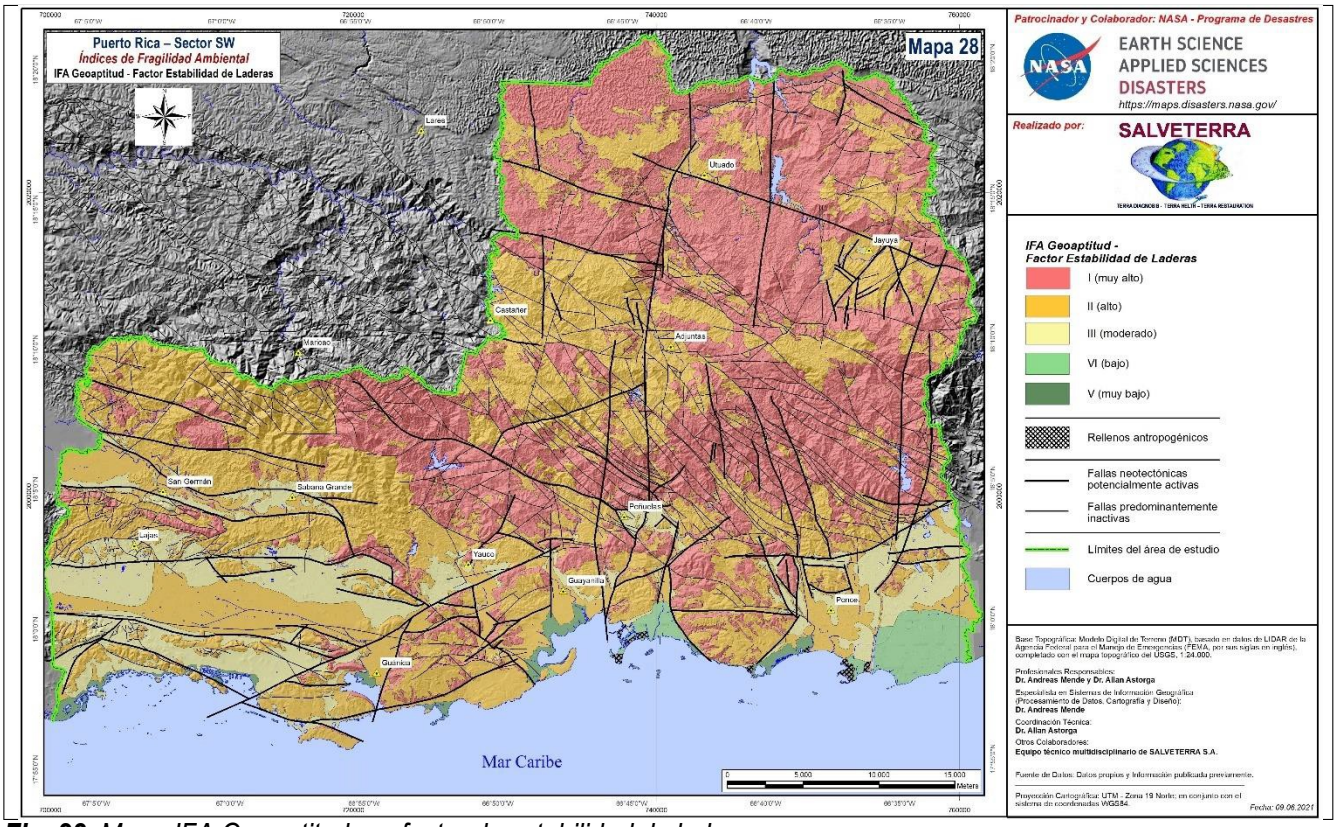


***Fig. 28**. Mapa IFA Geoaptitud por factor de estabilidad de laderas.*

Las zonas de fragilidad moderada, baja y muy baja corresponden con los terrenos de relieve moderado a muybajo y, por tanto, menos susceptibles al desarrollo de deslizamientos. No obstante, se debe tomar en cuenta que, si se realizan taludes de corte con pendientes altas dentro de esta zona, si podrían darse deslizamientos potenciales en caso de algún fenómeno detonador como lluvias intensas o un evento sísmico.

7. IFA Geoaptitud por amenazas naturales

7.1 Amenaza Sísmica

La Red Sísmica de Puerto Rico (http://redsismica.uprm.edu) señala que Puerto Rico presenta actividad sísmica como consecuencia de la subducción oblicua y el desplazamiento lateral entre dos placas tectónicas. Se observa actividad sísmica en toda la isla (ver Figura 29). Dicha fuente de datos de sismicidad de Puerto Rico señala que la actividad sísmica se concentra en ocho zonas: 1) la trinchera de Puerto Rico, 2) las fallas de pendiente norte y sur de Puerto Rico, 3) al noreste de la zona del Sombrero, 4) al oeste, en el cañón de la Mona, 5) en el pasaje de la Mona, 6) al este, en las depresiones de las Islas Vírgenes y Anegada, 7) en la depresión de los Muertos al sur y 8) en el suroeste dePuerto Rico. De acuerdo con esta fuente, la magnitud máxima de un terremoto ha sido de 7.5 en la escala de Ritcher.

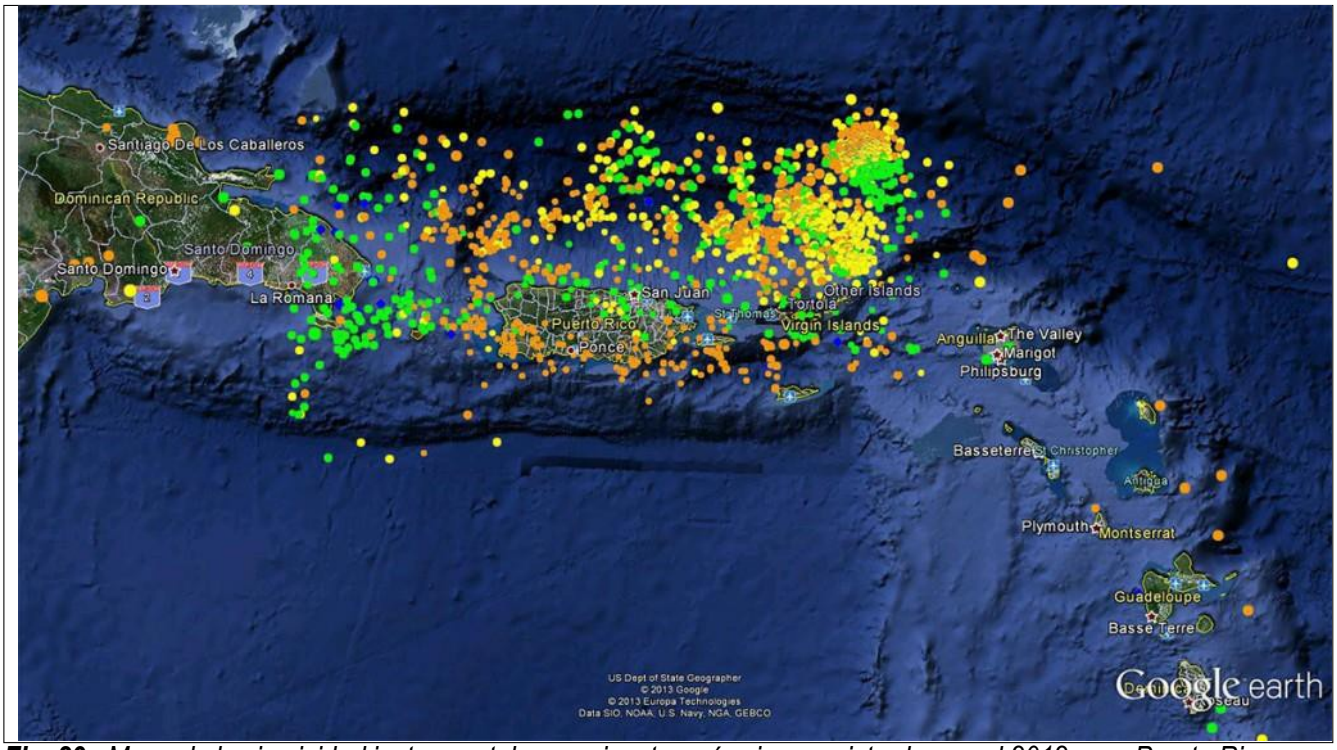


Fig. 29. *Mapa de la sismicidad instrumental con epicentros sísmicos registrados en el 2012 para Puerto Rico y sus alrededores y que ilustra la condición de sismicidad relativamente alta que tiene este arco de islas[1].*

En la Figura 30 se observa el mapa de riesgos a movimientos fuertes (*Seismic Design Category*) debido a terremotos en Puerto Rico, según datos de FEMA. De acuerdo con la fuente previamente citada

> La categorías que corresponden son D1 y D2, siendo el área oeste-suroeste la que pudiera experimentar mayor movimiento sísmico con temblores de menor profundidad. Sin embargo, en toda la isla, pudiera haber temblores fuertes ocasionando daños leves en estructuras bien diseñadas; daño considerable en edificios, algunos incluso con colapso parcial; y daños severos en estructuras pobremente construidas.

La actividad sísmica más reciente se dio a finales del año 2019 y principios del 2020 en el suroeste de Puerto Rico (López, Hughes & Vanacore, 2020). De acuerdo con estos autores, la actividad sísmica se inició el 28 de diciembre del 2019 con un evento de magnitud 4.7. Después de ese suceso, hubo una serie de sismos en la misma zona, siendo el sismo principal un evento de magnitud 6.4, ocurrido el 7 de enero de 2020, con una réplica principal de magnitud 6.0 (Figura 31). Esta actividad generó daños significativos (ver figuras 32 y 33).

De acuerdo con la Red Sísmica de Puerto Rico, referente a los datos de sismicidad histórica de Puerto Rico (ver Figura 34 y Tabla 1), desde el siglo XVII hasta el presente, han ocurrido cinco terremotos significativos: 1787, 1867, 1918, 1943 y 1946. Sin embargo, el origen tectónico de estos eventos fue diferente, lo que dificulta establecer con claridad el periodo de recurrencia para el desarrollo de eventos nuevos en el futuro.

[1] https://ecoexploratorio.org/amenazas-naturales/terremotos/terremotos-en-puerto-rico/

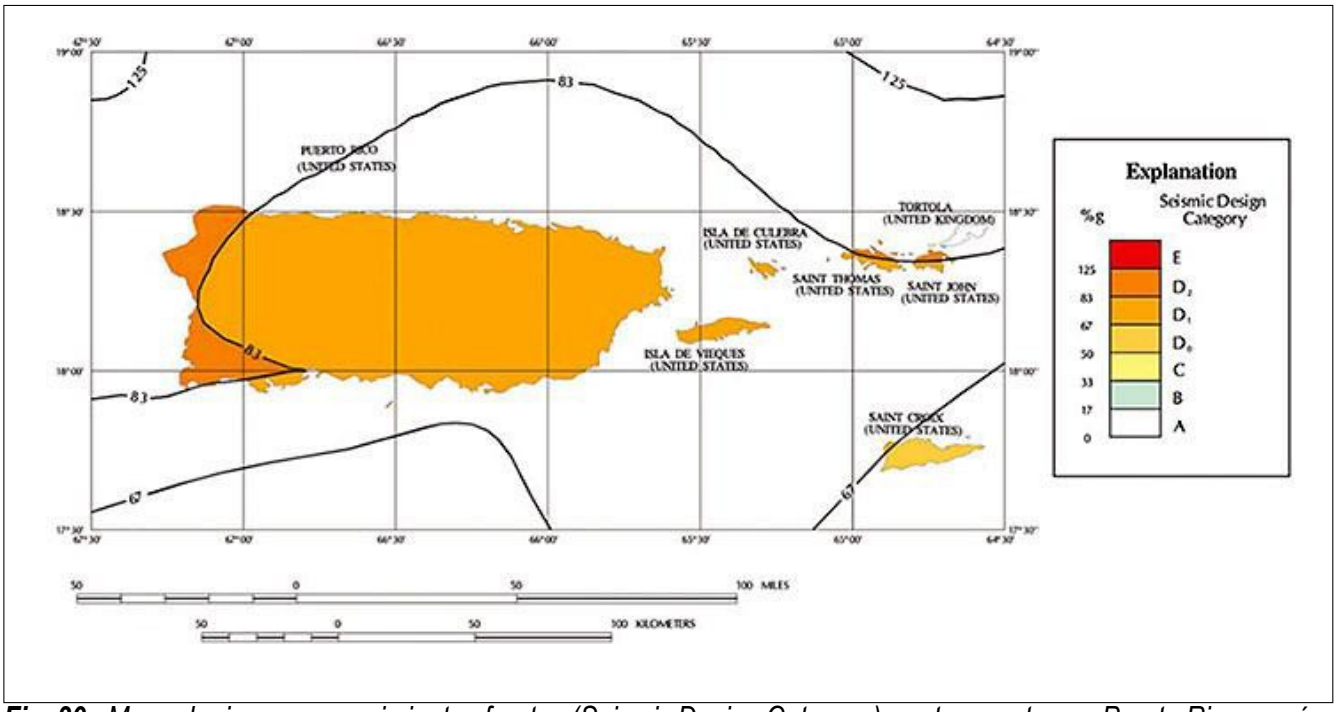


Fig. 30. *Mapa de riesgos a movimientos fuertes (Seismic Design Category) por terremotos en Puerto Rico, según datos de FEMA.*

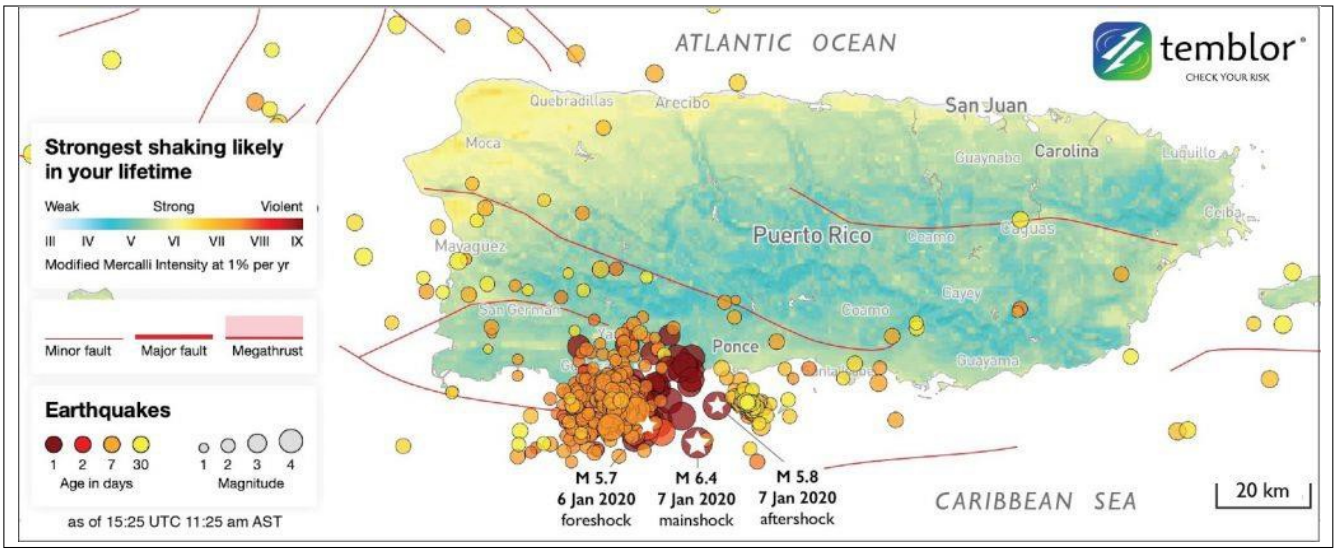


Fig. 31. *Actividad sísmica de diciembre 2019 a enero 2020 en el suroeste de Puerto Rico. Se observa los epicentros de los terremotos del 6 y 7 de enero del 2020 (según López et al., 2020).*

Fig. 32. *Daño en una casa residencial por el sismo de magnitud de 5.8 del 6 de enero del 2020. Municipio de Guánica. Tomada de López (2020).*

Fig. 33. *Daño provocado en el antiguo faro español de Guánica, construido en 1892. Foto tomada el 6 de enero del 2020, después del sismo de magnitud 5.8. Tomada de López (2020).*

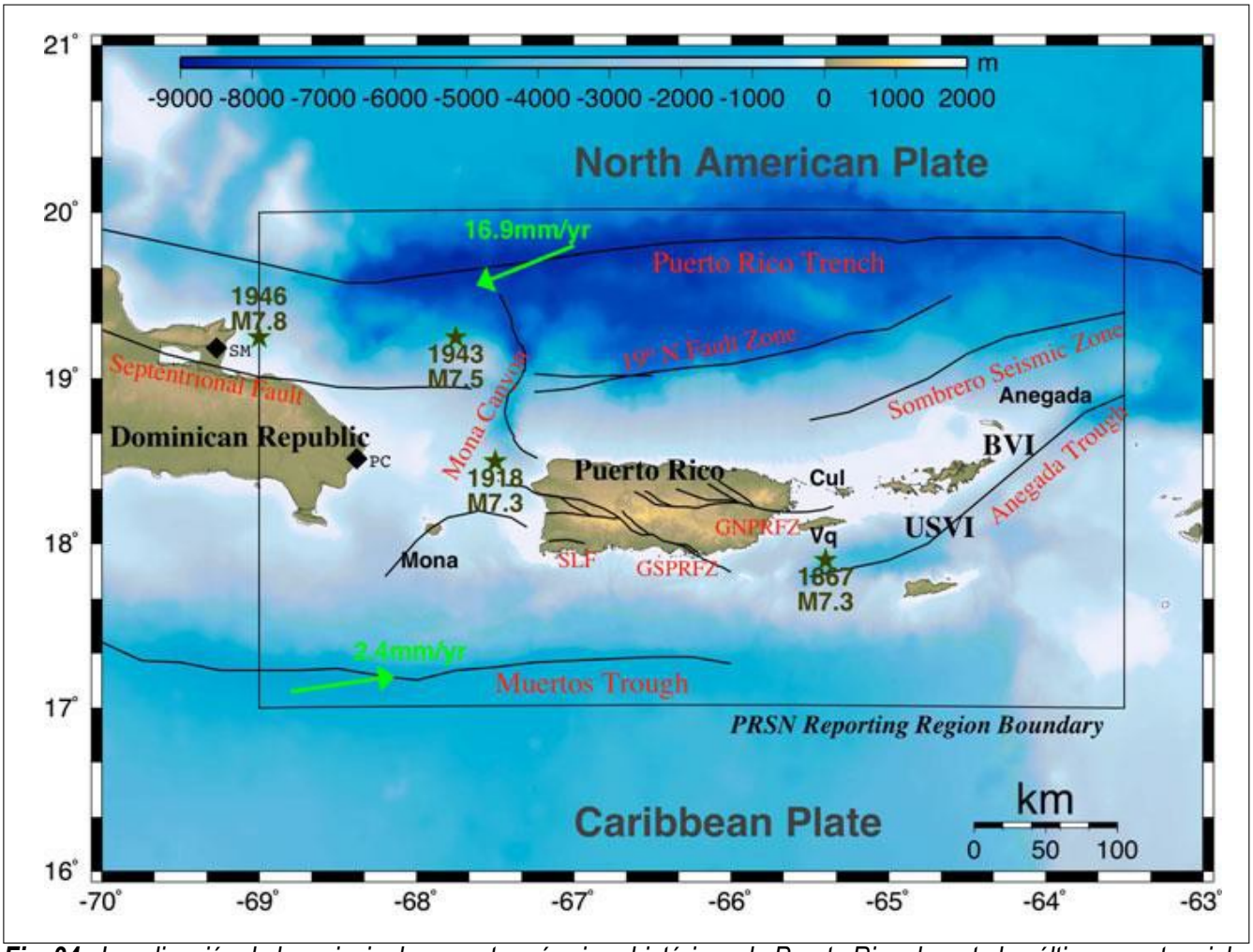


Fig. 34. *Localización de los principales eventos sísmicos históricos de Puerto Rico durante los últimos cuatro siglos.*

Los datos de sismos sentidos y terremotos históricos de Puerto Rico (Tabla 2) muestran que se trata de diversas fuentes tectónicas y, posiblemente, neotectónicas. Se destacan los terremotos originados en la trinchera de Puerto Rico, al norte de la isla, así como la zona de la Mona y los terremotos originados en República Dominicana. El sur de la isla de Puerto Rico, particularmente el suroeste, también se destaca como una fuente de sismicidad importante, como lo deja ver la actividad del 2019–2020 (ver Figura 31). También es relevante la sismicidad originada en el sistema transtensivo de las Islas Vírgenes (ver Tabla 2).

En la Tabla 2, en la columna de la derecha, se realizó una interpretación, según los datos del registro histórico, referente a las fuentes sismotectónicas que se presentan en este segmento de arco de las islas de Puerto Rico. A partir de esa interpretación, y a fin de visualizar de una forma más clara los datos de sismicidad histórica, se realizó la gráfica que se muestra en la Figura 35. Aunque la información es aproximada y se basa en los datos de sismicidad histórica, es posible derivar las siguientes observaciones relevantes:

Tabla 2.
Eventos sísmicos históricos de Puerto Rico (según datos de la Red Sísmica)

Fecha	Intensidad IMM	Magnitud Mw	Descripción	Potencial fuente (interpretación):
8 de septiembre de 1615		-	**República Dominicana** que causó daños en Puerto Rico.	Tectonismo de La Española
15 de agosto de 1670	-	-	Daños en **San Germán y San Juan**	Trinchera de Puerto Rico (subducción de placas)
1717	-	-	Iglesia San Felipe en Arecibo y la casa parroquial en San Germán fueron destruidas (A).	Trinchera de Puerto Rico (subducción oblicua de placas)
20 de agosto de 1740	VII	-	La Iglesia de Guadalupe en la Villa de Ponce fue destruida (A). Intensidad VII; sólo hay informes de Ponce que el sismo fue sentido; ausencia de informes de San Germán, y los informes de Yauco y Lajas sugieren un sismo superficial cerca a Ponce (G).	Suroeste de Puerto Rico (posiblemente un fallamiento local).
2 de mayo de 1787	VII-VIII	8.0	Este es el terremoto de mayor magnitud en la historia de Puerto Rico. Se estima que fue de magnitud 8.0, en algún lugar de la trinchera de Puerto Rico. El terremoto se sintió fuertemente en toda la isla y se reportaron daños, excepto en el sur, aunque se agrietaron las paredes de la Iglesia Guadalupe en Ponce (G). En la isleta de San Juan hubo daños considerables y se derrumbaron varias estructuras (DH, según informes del Cabildo de San Juan, 1787). El terremoto destruyó la catedral de Arecibo junto con las ermitas del Rosario y la Concepción. Sufrieron daños las iglesias en Bayamón, Toa Baja y Mayagüez. Incluso hubo daños considerables a los castillos San Felipe del Morro y San Cristóbal en el Viejo San Juan, donde se rompieron casas de guardias, cisternas y murallas.	Trinchera de Puerto Rico (subducción oblicua de placas)
16 abril de 1844	VII-VIII	-	El epicentro estuvo localizado al norte de la isla y fue sentido en Puerto Rico (VII-VIII, (RF)) y St. Thomas. Varios edificios se agrietaron y colapsaron. Se agrietó una torre de la iglesia de Isabela. Fue sentido por hasta 30 segundos (RT). En San Juan casi todas las casas de piedra se agrietaron (Periódico Barbadian, 25 de mayo de 1844). Intensidad de VII en San Juan (SL).	Trinchera de Puerto Rico (subducción oblicua de placas)
5 de mayo de 1844	-	-	Se sintió un temblor de tierra fuerte en Ponce. Estuvo acompañado por un fuerte ruido subterráneo y fue un terremoto terrible en toda la isla (G). Asencio (1980) también lo incluye en su lista (pone 3 referencias). Nota: Ya que los diferentes catálogos se refieren al temblor del 16 de abril o el 5 de mayo, con la excepción de MJ que cuestionan el del 5 de mayo, puede ser que sólo ocurrió uno de estos temblores.	Suroeste de Puerto Rico (posiblemente fallamiento local).

Fecha	Intensidad IMM	Magnitud Mw	Descripción	Potencial fuente (interpretación):
28 de noviembre de 1846	VII	-	Sentido en toda la isla, más fuerza y daños en el noroeste con intensidad máxima de VII (RF). Origen probablemente en el pasaje de Mona (RT).	Sistema transtensivo de Mona (fallamiento local)
22 de febrero de 1851	-	-	Se agrietaron las paredes de la Alcaldía de San Juan (RT).	Trinchera de Puerto Rico (subducción oblicua de placas)
14 de diciembre de 1855	VI	-	Intensidad del temblor en Salinas fue VI y Aguas Buenas fue V (RF). Se dice que es el temblor más fuerte que se haya sentido en Salinas. Su origen probablemente fue al sur de la isla (RT). Díaz Hernández lo reportó como del 4 de febrero de 1855.	Sur de Puerto Rico (¿subducción oblicuade los Muertos?)
23 de octubre de 1860	VI-VII	-	Temblor de tierra fuerte con algunos daños en Mayagüez e intensidad VI-VII (RT).	Sistema transtensivo de Mona (fallamiento local)
12 de mayo de 1865	-	-	Dos temblores fuertes en St. Thomas, el segundo ocasionó daños (RT).	Sistema transtensivo de las IslasVírgenes (fallamiento local)
30 de agosto de 1865	VI		Se agrietaron iglesias en Manatí y Ponce. El origen pudo haber sido en el centro de la isla. Intensidad de VI (RF) (RT). Ocurrió en la noche, con origen probablemente en la parte central de la isla y profundo (50-100 km) (G).	Parte central de la isla de Puerto Rico (¿fallamiento local o subducción de placas?)
18 de noviembre de 1867	VIII	7.3	El epicentro de este terremoto fue localizado entre St. Thomas y Santa Cruz, en las Islas Vírgenes, con magnitud de 7.3 (PS). Produjo amplios daños en las Islas Vírgenes y Puerto Rico por la aceleración del suelo y un **tsunami**. Reid y Taber asignaron una intensidad equivalente desde un elevado VIII a IX a este terremoto. Se sintió fuerte en todo Puerto Rico, pero los efectos más severos fueron en la parte oriental. Un fuerte tsunami fue observado para este terremoto, especialmente en las Islas Vírgenes, donde la altura se estimó en unos veinte pies. El tsunami fue observado a lo largo de las costas del este y sur de Puerto Rico. Observaciones de alturas máximas para las olas en Puerto Rico fueron de tres a cinco pies, en las cercanías de Arroyo. El tsunami penetró casi 150 metros (500 pies) en las partes bajas de la costa de Yabucoa. Aunque a este terremoto se le asignó una intensidad equivalente a un elevado VIII a IX por Reid y Taber, Robson propuso que este terremoto tuvo una intensidad de VIII. Hubo más de 500 réplicas durante un periodo de seis a siete meses (PRWRA). En Ponce, 70 de las 80 chimeneas de los ingenios de azúcar colapsaron (intensidad MM = VI; SL). Este terremoto ocurrió veinte días después de la isla haber sido devastada por el huracán San Narciso.	Sistema transtensivo de las Islas Vírgenes (fallamiento local)

Fecha	Intensidad IMM	Magnitud Mw	Descripción	Potencial fuente (interpretación):
1 de diciembre de 1867	VII-VIII	-	Hubo tres réplicas del terremoto de noviembre 18, intensidad VII-VIII (RF). Daños adicionales en Puerto Rico y las Islas Vírgenes (RT).	Sistema transtensivo de las IslasVírgenes (fallamiento local)
17 de marzo de 1868.	VII-VIII	-	La réplica más grande del terremoto del 18 de noviembre de 1867. Ocurrió a unas 30 millas al suroeste del epicentro original. Daños menores principalmente en la parte oriental de la isla de Puerto Rico (PRWRA). Intensidad, RG de VII - VIII (RT).	Sistema transtensivo de las Islas Vírgenes (fallamiento local)
17 de septiembre de 1869	-	-	Terremoto en St. Thomas casi igual de fuerte como el del 18 de noviembre de 1867 (RT).	Sistema transtensivo de las Islas Vírgenes (fallamiento local)
26 agosto de 1874	V-VI	-	Fuerte temblor (V-VI) registrado en Puerto Rico. Se informó de casas destruidas (DH). En San Juan, la vibración duró dos minutos, las casas se movieron de lado a lado, los habitantes se alarmaron y no se reportaron víctimas. Intensidad de VI (SL).	Trinchera de Puerto Rico (subducción oblicua de placas)
8 de diciembre de 1875	VII-VIII	-	El sismo posiblemente ocurrió cerca de Arecibo. Se reportaron pocos daños, excepto en una iglesia que tuvo bastantes. Originalmente se le había asignado una intensidad de VII-VIII (RF), pero Reid y Taber concluyeron que era demasiada alta, ya que se reportó daño en un sólo sitio (PRWRA). En Ponce se sintió con fuerza. El foco seguramente en la isla con 50-100 km de profundidad. (G).	Trinchera de Puerto Rico (subducción oblicua de placas)
15 agosto de 1890	V-VI	-	Un sismo violento se reportó en diferentes pueblos de la isla. En Arecibo repicaron las campanas de la iglesia y en Ponce la cárcel municipal sufrió daños (DH). En Ponce el evento duró unos 8 a 10 segundos (G).	Trinchera de Puerto Rico (subducción oblicua de placas)
13 de mayo de 1902	V-VI	-	Sentido muy fuerte (V-VI) en St. Thomas (RT).	Sistema transtensivo de las Islas Vírgenes (fallamiento local)
27 de septiembre de 1906	VI	-	El epicentro de este sismo se estimó a unos 50 km al norte de la Isla. La intensidad máxima fue de VI en San Juan, donde se observaron grietas en la Catedral y en muchas casas. La intensidad en el resto de la Isla fue de IV - V. No se reportó un tsunami. Fue sentido desde Santo Domingo hasta St. Thomas, lo cual es una distancia de 500 km (RT). Además de SanJuan, otros pueblos reportaron daños (DH)	Trinchera de Puerto Rico (subducción oblicua de placas)
20 de octubre de 1906	IV-VI	-	Sentido en casi toda la isla. Intensidad IV-VI (RF) reportado desde San Juan y Las Cruces (PRWRA; DH; RT).	Trinchera de Puerto Rico (subducción oblicua de placas)
4 de agosto de 1908	VI	-	Temblor fuerte (VI, (RF)) en Ponce donde hubo algunos daños. Sentido también en Alto de la Bandera, Yauco, Arecibo y San Germán (RT). Su origen probablemente fue en la parte sur-central de la Isla (G).	Suroeste de Puerto Rico (posiblemente fallamiento local).

13 de agosto de 1908	-	-	Fuerte temblor sentido en Ponce. El Edificio de Correos sufrió daños. Fue un movimiento vertical, muy raro en esta zona. Leve en	Suroeste de Puerto Rico (posiblemente fallamiento local).

Fecha	Intensidad IMM	Magnitud Mw	Descripción	Potencial fuente (interpretación):
			Carmelita. Origen probable cerca de Ponce (RT).	
17 de febrero de 1909	-	-	Temblor sentido en las Islas Vírgenes y casi todo Puerto Rico. En St. Thomas y Culebra una intensidad de hasta VI (RF). Epicentro alrededor de 90 km al NNE de Vieques (RT).	Sistema transtensivo de las Islas Vírgenes (fallamiento local)
11 de octubre de 1918	VIII-IX	7.3	El epicentro estuvo localizado a unos 35 km al noroeste de Aguadilla, P.R., en el cañón de Mona. La magnitud estimada fue de 7.3 (PS). Reid y Taber asignaron una intensidad máxima de IX (equivalente a VIII - IX en MM) en la parte occidental de la Isla y de V - VI en Guayama. Este terremoto generó un **tsunami** que alcanzó 20 pies en Punta Agujereada (8 personas se reportaron como ahogadas), 12 pies en Aguadilla (32 personas murieron ahogadas), 5 pies en Mayagüez (116 personas murieron a causa del terremoto, incluyendo las 40 víctimas del maremoto). Las pérdidas por daños a la propiedad se estimaron en más de $4,000,000 (RT). Por varios meses se siguieron sintiendo réplicas de este terremoto, las más fuertes siendo las del 24 de octubre y 12 de noviembre. Se observó amplia **licuefacción** en las planicies inundables de Añasco y Mayagüez, regiones que hoy día están con gran densidad poblacional.	Sistema transtensivo de Mona (fallamiento local)
24 de octubre de 1918	VII	-	Réplica del terremoto del 11 de octubre. Intensidad máxima en la Isla fue VII (RF).	Sistema transtensivo de Mona (fallamiento local)
12 de noviembre de 1918	VI	-	Otra réplica del terremoto del 11 de octubre. Intensidad máxima en la Isla fue VI (RF, RT).	Sistema transtensivo de Mona (fallamiento local)
10 de febrero de 1920	VI	-	Temblor sentido en todo Puerto Rico. Intensidad máxima en la Isla fue VI (DH), M=6.5.	No determinada.
18 de diciembre de 1922	VI	6.3	Temblor sentido en todo Puerto Rico. Intensidad máxima en la Isla fue VI (DH), M=6.3.	No determinada.
12 de junio de 1939	VI	-	Sentido en toda la Isla. Intensidad máxima de VI (DH).	No determinada.
28 de julio de 1943	V	7.5	Ocurrió al noroeste de Puerto Rico. Su magnitud fue de 7.5 (PS). Fue sentido por muchas personas, pero no causó daños.	Sistema transtensivo de Mona (fallamiento local)
4 de agosto de 1946	VI	7.8	Este terremoto de magnitud 7.8 (PS) ocurrió fuera de la costa nororiental de la República Dominicana. Se reportaron muchos daños y un **tsunami** en Haití y la República Dominicana. Este terremoto fue sentido con una intensidad de hasta VI en la isla de Mona yla costa occidental de Puerto Rico. En el resto de la Isla se reportó una intensidad de V. Se observó un tsunami de 2 pies en la costa occidental y norte de la Isla (PRWRA). Se	Tectonismo de La Española

Fecha	Intensidad IMM	Magnitud Mw	Descripción	Potencial fuente (interpretación):
			reportaron daños menores en todo Puerto Rico (DH).	
8 de agosto de 1946	-	7.4	Terremoto en República Dominicana (M=7.4, PS). Maremoto de poca altura entre Mayagüez y Aguadilla.	Tectonismo de La Española
23 de marzo de 1979	VI	6.1	Fuerte temblor sentido en toda el área del Caribe, en Puerto Rico con una intensidad de VI. Se reportó en Haití, Colombia, Venezuela y República Dominicana (DH). Epicentro fue al sur de la República Dominicana, 17.89N, 68.97W, y 73 km de profundidad, M=6.1 (USGS).	Tectonismo de La Española
24 de agosto de 1981	-	-	Fuerte temblor sentido en todo Puerto Rico, M=5.7. Epicentro en el canal de la Mona. Hubo ligeros daños en Guayanilla (DH).	Sistema transtensivo de Mona (fallamiento local)
30 de mayo de 1987	VI	-	Fuerte temblor sentido en el suroeste de la isla, M=4.6, intensidad VI. Epicentro fue cerca de Boquerón. Hubo daños leves (USGS).	Suroeste de Puerto Rico (posiblemente fallamiento local).
16 de mayo de 2010	VI	5.8	La Red Sísmica de Puerto Rico (RSPR) registró un temblor moderado y no representó peligro de tsunami para PuertoRico e Islas Vírgenes. El temblor tuvo una localización en el municipio de Moca, en la latitud 18.40 N y en la longitud de 67.07 O, conuna profundidad de 113 km. Este sismo moderado tuvo una magnitud de 5.8 y una intensidad máxima (Escala Mercalli Modificada)de VI en los municipios de Añasco, Hormigueros, Lares, Ponce, Salinas, entre otros. Este temblor fue sentido ampliamente entodo Puerto Rico e Islas Vírgenes, recibiéndoseademás algunos reportes de la República Dominicana. Se registraron aproximadamente 5,000 reportes de intensidad para este sismo. No se reportaron daños mayores, pero sí algunas casas agrietadas en los municipios de Vega Baja y Florida. A la altura del km 12.2 de la Carretera 111, entre Utuado y Lares, se reportaron deslizamientos. Luego de la revisión de rigor de los datos, se encontró una sola réplica con magnitud de 3.2.	Sistema transtensivo de Mona (fallamiento local)
24 de diciembre de 2010	VI	5.4	La Red Sísmica de Puerto Rico (RSPR) registró un temblor moderado, pero no representó peligro de tsunami para Puerto Rico e Islas Vírgenes. El temblor fue localizado en el municipio de Agua Buenas, en la latitud 18.26 N y en la longitud de 66.14 O, con una profundidad de 102 km. Este sismo moderado tuvo una magnitud de 5.4 y una intensidad máxima (Escala Mercalli Modificada) de VI en los municipios de Aguas Buenas, Bayamón, San Lorenzo y Caguas, entre otros. Este temblor fue sentido ampliamente en todo Puerto Rico e Islas Vírgenes. Se recibieron aproximadamente 4,000 reportes de intensidad	Trinchera de Puerto Rico (subducción oblicua de placas)

Fecha	Intensidad IMM	Magnitud Mw	Descripción	Potencial fuente (interpretación):
			asociados al mismo. Se reportaron daños leves en varios municipios. Comparando este temblor con otros sismos ocurridos en la región en los últimos años, éste tuvo mayor impacto en la ciudadanía debido a que su epicentro se ubicó dentro de la isla grande. Sismos con magnitudes mayores a 5.0 son poco usuales en la región de Puerto Rico e Islas Vírgenes.	
28 de noviembre de 2011	-	5.2	El temblor tuvo una magnitud de 5.2 y la intensidad máxima reportada fue de IV en el municipio de Mayagüez. También fue reportado como sentido en Adjuntas, Añasco, Cabo Rojo, Carolina, Moca y Ponce. El epicentro fue ubicado a 61.93 km al norte-noroeste de Quebradillas, a 62.54 km al norte de Camuy y a 66.74 km al norte-noroeste de Arecibo. Tuvo una profundidad de 41 km.	Trinchera de Puerto Rico (subducción oblicua de placas)
17 de diciembre de 2011	-	5.1	Se registraron varios temblores, pero los más significativos ocurrieron entre las 2:06 y 2:09 de la madrugada. El primero fue de magnitud 5.1, con una profundidad de 14 km (8.7 millas). El segundo temblor fue de 5.3 con profundidad de 17 km (10.6 millas). Ambos eventos ocurrieron prácticamente en las costas de Mayagüez. Mucha gente reaccionó a un posible desalojo y eso fue positivo porque según la Red Sísmica "uno de los mensajes es que la gente actúe de forma natural". Debido a la poca profundidad del temblor fue que se sintieron tan fuertes.	Sistema transtensivo de Mona (fallamiento local)
28 diciembre 2019 – 7 de enero 2020		6,0 y 6,4	Daños en el suroeste de Puerto Rico. Numerosas réplicas.	Suroeste de Puerto Rico (posiblemente fallamiento local).

Fuente: *https://ecoexploratorio.org/amenazas-naturales/terremotos/terremotos-en-puerto-rico*

- Es claro y evidente que, a pesar de que se desarrolla una subducción oblicua, tanto en la trinchera norte y sur (de los Muertos), se producen eventos sísmicos fuertes (magnitudes mayores a 5.0) e incluso, mayores a 7.0.
- Dichos sismos tienen un origen tectónico por subducción oblicua y también por fallamiento transtensivo de tipo "local".
- Se distinguen cinco fuentes sismogénicas principales, dentro de las que se incluyen los eventos sísmicos fuertes que ocurren en La Española, originados por subducción o por fallamiento local.
- Los datos generales de sismicidad histórica para los siglos XVIII y XIX indican que se producen al menos 12 eventos sísmicos fuertes o terremotos por siglo. Algo que parece corroborarse en el presente siglo.
- Es importante aclarar que no todos los sismos fuertes o terremotos han sido destructivos (ver Tabla 1), sin embargo, es claro que representa un tema que, inevitablemente, debe ser tomado en cuenta en el análisis de riesgo. Esto debido a que este tipo de evento detona otro tipo de efectos, como los deslizamientos, agrietamientos del suelo, tsunamis y flujos de sedimentos en áreas relativamente

amplias.

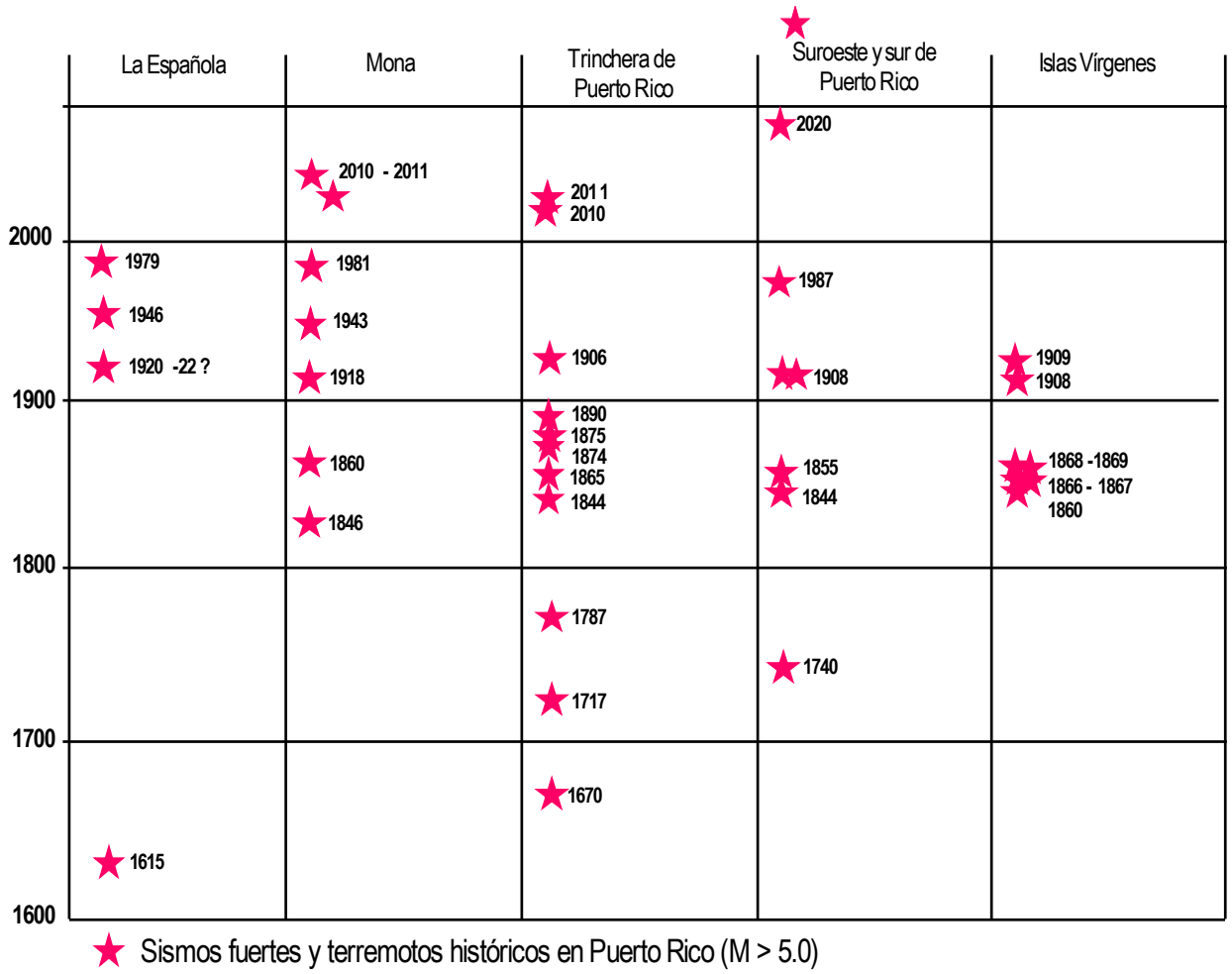


Fig. 35. *Gráfico de visualización de la sismicidad histórica de Puerto Rico para los últimos cuatro siglos. Fuente: datos de la Tabla 2 de este documento.*

- Se registra al menos un evento fuerte en la parte central de la Isla, pero su origen no está claro ya que se ha asociado a la subducción de placas.
- La sismicidad del sur de Puerto Rico se asocia principalmente al fallamiento local asociado a sistemas transtencionales. No obstante, esto requiere de mayor investigación.
- Debido a la dimensión de las fuentes sismotectónicas no resulta sencillo establecer un periodo de recurrencia claro para determinar en qué rango de tiempo se espera un sismo fuerte o terremoto en Puerto Rico.
- Resulta claro, sin embargo, que sí existe la probabilidad real de que ocurra un evento sísmico fuerte o un terremoto en el futuro, dentro del rango estadístico de eventos sucedidos durante, al menos, los dos últimos siglos para la isla de Puerto Rico. Este aspecto es relevante para ser considerado en términos demedidas estratégicas para incrementar la resiliencia humana y de infraestructura, incluyendo el tema de seguros contra desastres y reaseguros.

Como resultado de este análisis y la integración de los datos de IFA Geoaptitud litopetrofísica, de

geodinámica externa, de hidrogeología y de estabilidad de ladera, fue posible derivar el mapa de IFA Geoaptitud por factor de amenaza por eventos sísmicos que se presenta en la Figura 36.

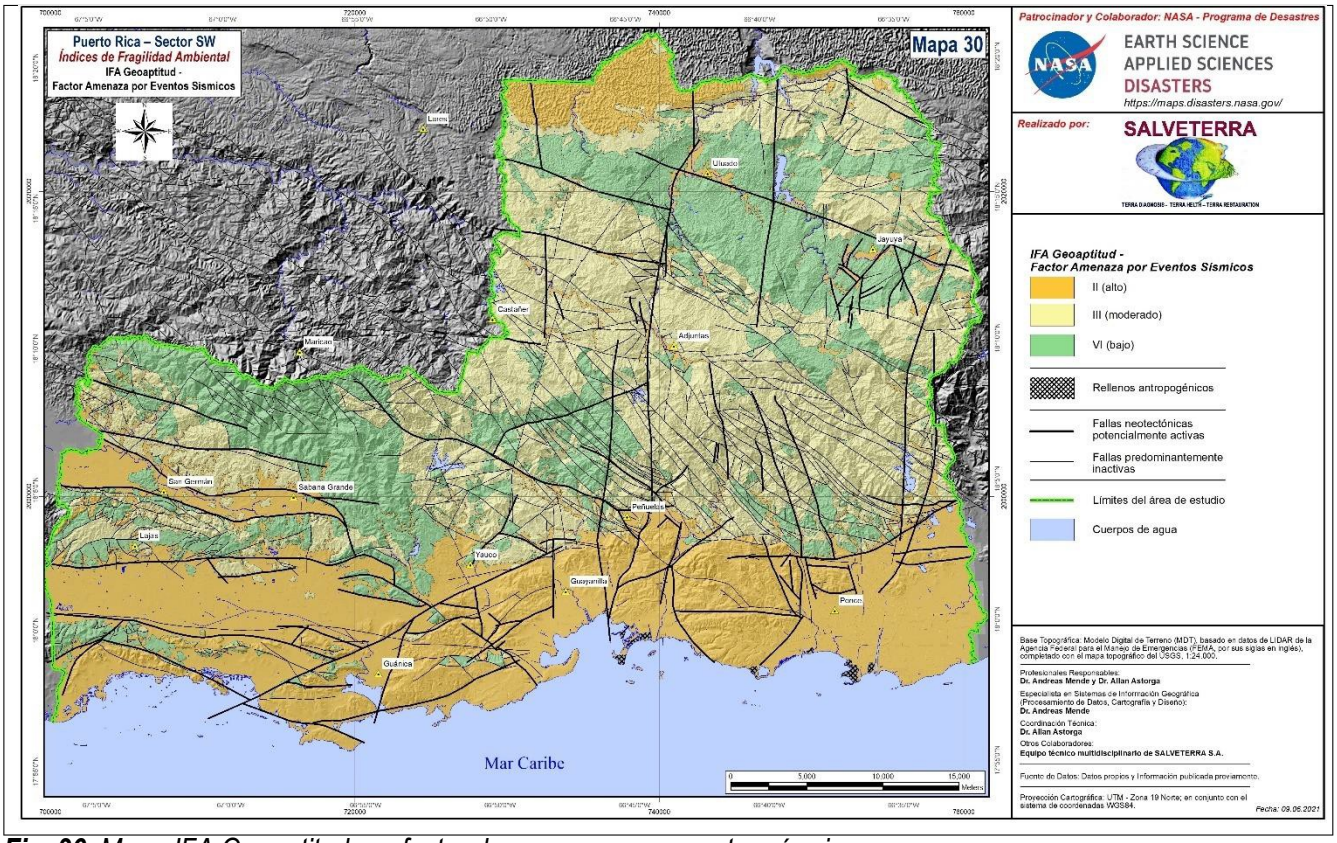


***Fig. 36**. Mapa IFA Geoaptitud por factor de amenaza por eventos sísmicos.*

7.2 NEOTECTÓNICA

En la Figura 37 se muestra el mapa IFA Geoaptitud por factor neotectónico. Sobre el modelo digital de terreno se presenta el conjunto de fallas geológicas identificadas por el USGS como parte del mapa Geológico de Puerto Rico, las que, en su gran mayoría, califican como fallas inactivas. Como se mencionó en el Apartado 2.2 de este documento, el análisis realizado como parte de este estudio derivó un hallazgo inicial de una serie de estructuras (fallas o alineamientos) que se observan en el área de estudio y otras áreas de la Isla, algunas de las cuales se califican aquí como fallas neotectónicas potencialmente activas. Se consideran preliminarmente de esa forma, a modo de hipótesis inicial sujeta a verificación más precisa, con trabajo geológico–neotectónico más específico y para áreas de estudio más reducidas y con ese fin específico.

Como se explicó en el contexto tectónico–neotectónico regional y subregional del área de estudio, el análisis realizado resultó en la existencia de una zona de deformación transtensional a la que se le designó como **Sistema Transtensional de Guayanilla**. De acuerdo con este estudio, este sistema estaría conformado por una serie de fallas de desplazamiento de rumbo con una dirección aproximada de norte–sur. El sistema de fallamiento se extendería desde la zona de Guayanilla en el área de estudio, hacia el norte en la zona de Arecibo. Incluso esta estructuración parece tener continuidad hacia el talud interno de la trinchera de los Muertos, al sur de Guayanilla.

En la Figura 38 se encuentra la interpretación de dos perfiles sísmicos del talud interno de la trinchera de los Muertos al sur de Puerto Rico. Dicha interpretación proviene de Granja et al. (2015) sobre un estudio acerca de la estructura y geomorfología del margen marino del sur de Puerto Rico.

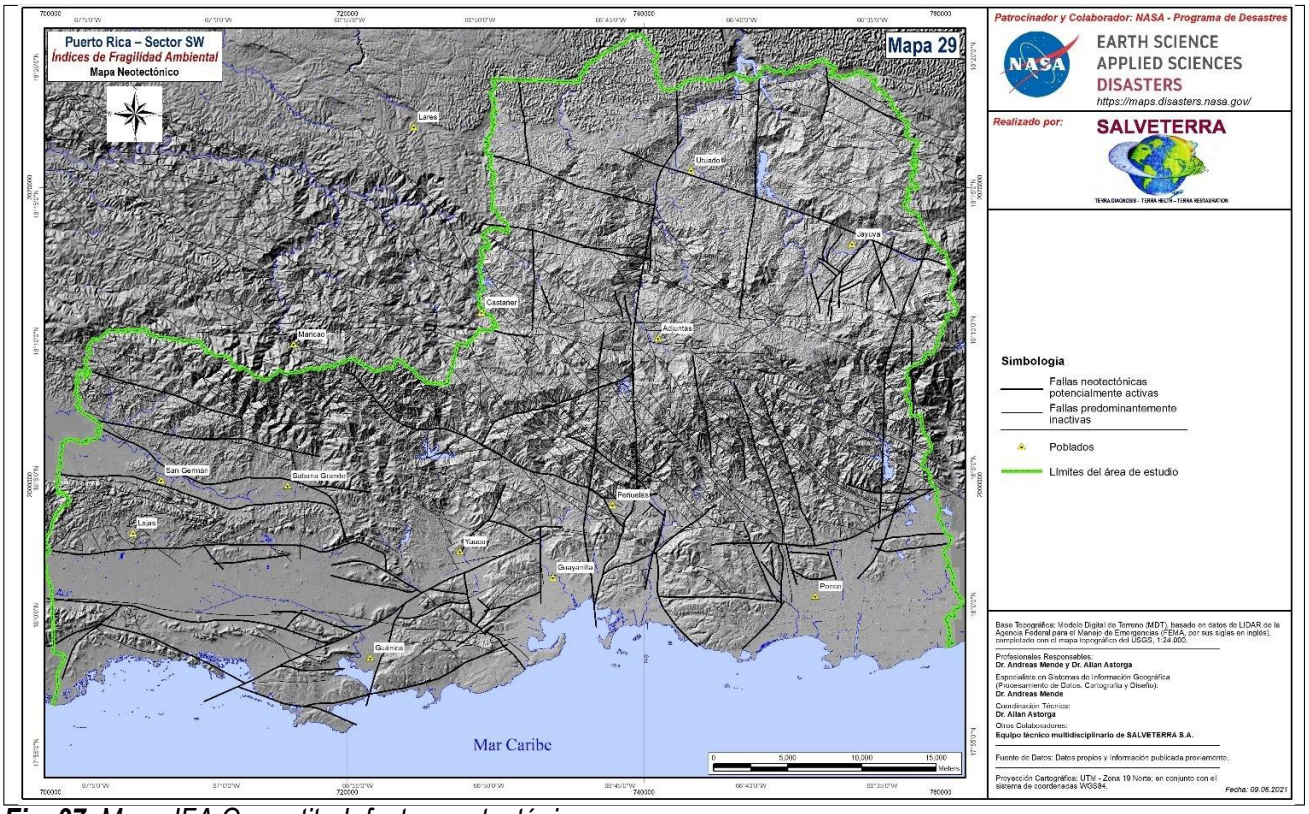


***Fig. 37**. Mapa IFA Geoaptitud- factor neotectónico.*

En el Perfil B, se observa en vista perpendicular la estructura que presenta la zona de subducción oblicua. Se denota una estructura de bloques tectónicos en un contexto compresivo. Por su parte, en el Perfil A, que es perpendicular al Perfil B, se observa un control tectónico– neotectónico de tipo transtensivo, con el desarrollo de cuencas sedimentarias colgantes y de alta estructura de tipo *pull apart*. Es criterio de los autores que este tipo de estructura podría ser similar al que se presenta en el área de estudio y explicaría la existencia del sistema transtensivo de Guayanilla.

Finalmente, sobre este tema, en la Figura 38 se muestra una imagen del sector marino del suroeste de Puerto Rico, con la ubicación de los epicentros del ciclo sísmico 2019–2020. En esta imagen, se observa la serie de cañones submarinos que cortan el talud a la altura de Guayanilla y Ponce. La configuración de los alineamientos de los cañones submarinos parece simular una estructura en flor en un sistema transtensivo, como el que, hipotéticamente, se ha interpretado en la parte insular.

Como ya se indicó, la corroboración de la existencia del sistema transtensivo de Guayanilla requiere de estudios algo más profundos: análisis de los mecanismos focales, paleosismicidad de trazas de fallas con desarrollo de trincheras y perfiles de suelos detallados, cartografía neotectónica de mayor detalle, así como mayor control geomorfológico, entre otras investigaciones. Por esto, las fallas indicadas como “potencialmente activas”, en el mapa de la Figura 37, se establecen a modo preliminar y sujetos a mayor investigación geológica.

El establecimiento de la existencia de fallas geológicas activas es importante desde el punto de vista de que se pueda generar rupturas en la superficie y con ellas afectarse la infraestructura. También es importante crear zonas de seguridad para el desarrollo futuro de una infraestructura estratégica que pueda ser desarrollada sobre la línea de falla o en sus alrededores.

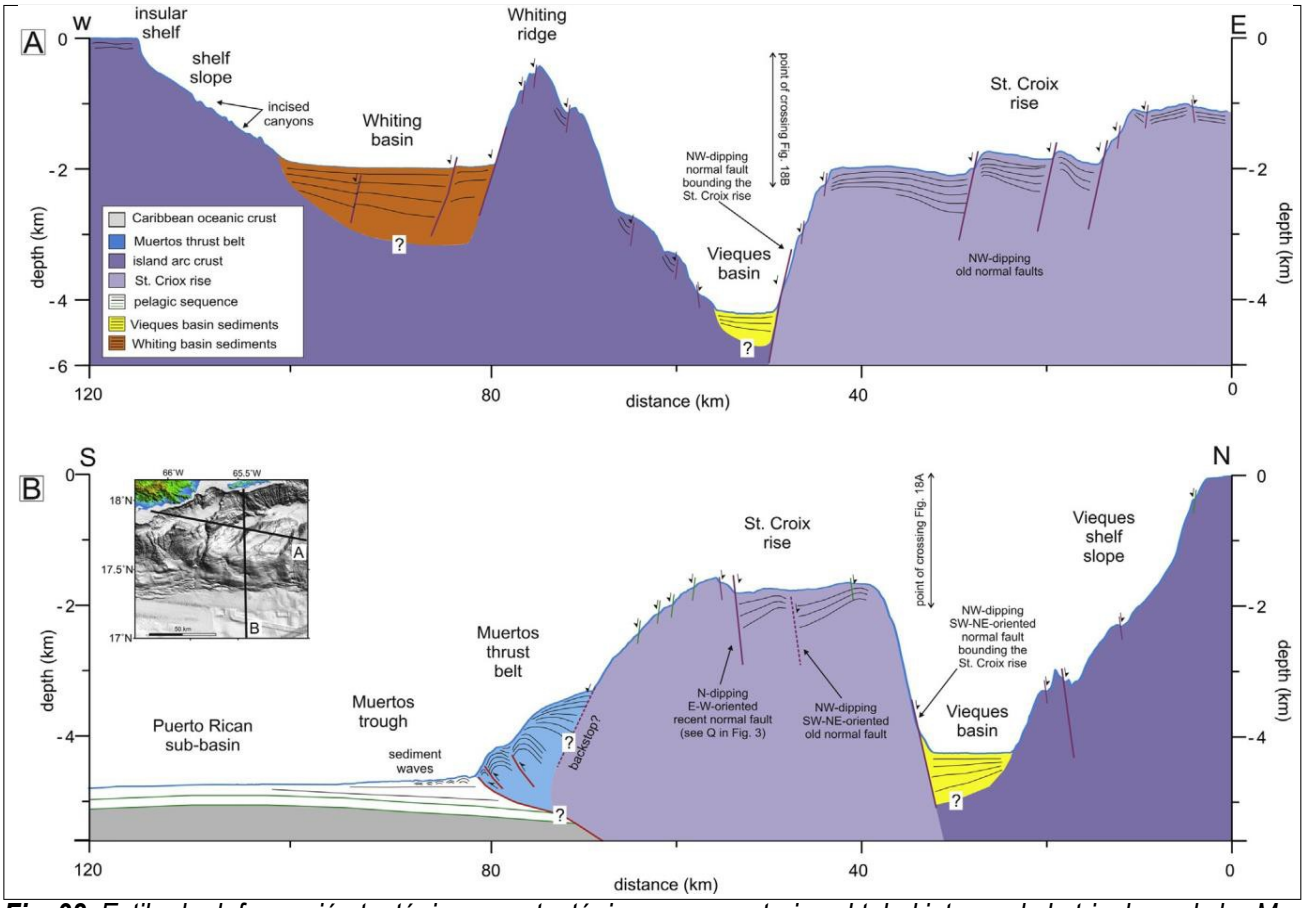


***Fig. 38**. Estilo de deformación tectónica y neotectónica que caracteriza el talud interno de la trinchera de los Muertos al sur de Puerto Rico (tomado de GRANJA et al., 2015).*

7.3 LICUEFACCIÓN

La licuefacción es un proceso geológico (sedimentológico), por medio del cual los terrenos localizados sobre formaciones superficiales no consolidadas o litificadas, a causa de la saturación de agua y particularmente en sedimentos recientes como arena o gravilla fina, pierden su firmeza y fluyen como resultado de los esfuerzos provocados, en su mayoría, por sismos.

En la Figura 40 se presenta el mapa de IFA Geoaptitud por factor de amenaza por licuefacción del área de estudio. Como se puede observar, se muestran en las áreas de llanuras costeras o aluviales donde hay sedimentos aluviales o marinos. Estos materiales, dado que no están consolidados y presentan granulometrías arenosas saturadas en agua, son susceptibles a este fenómeno geológico que ocurre particularmente cuando se dan eventos sísmicos de alta energía. Las rocas duras que forman gran parte del subsuelo de la zona montañosa o de las áreas donde hay presencia de calizas del Terciario, por su naturaleza litopetrofísica, no son susceptibles a la licuefacción.

Es importante aclarar que el desarrollo de construcciones sobre estas zonas es posible siempre que se tenga en cuenta las limitaciones geológicas y geotécnicas y que se apliquen medidas tecnológicas que minimicen los efectos de la licuefacción.

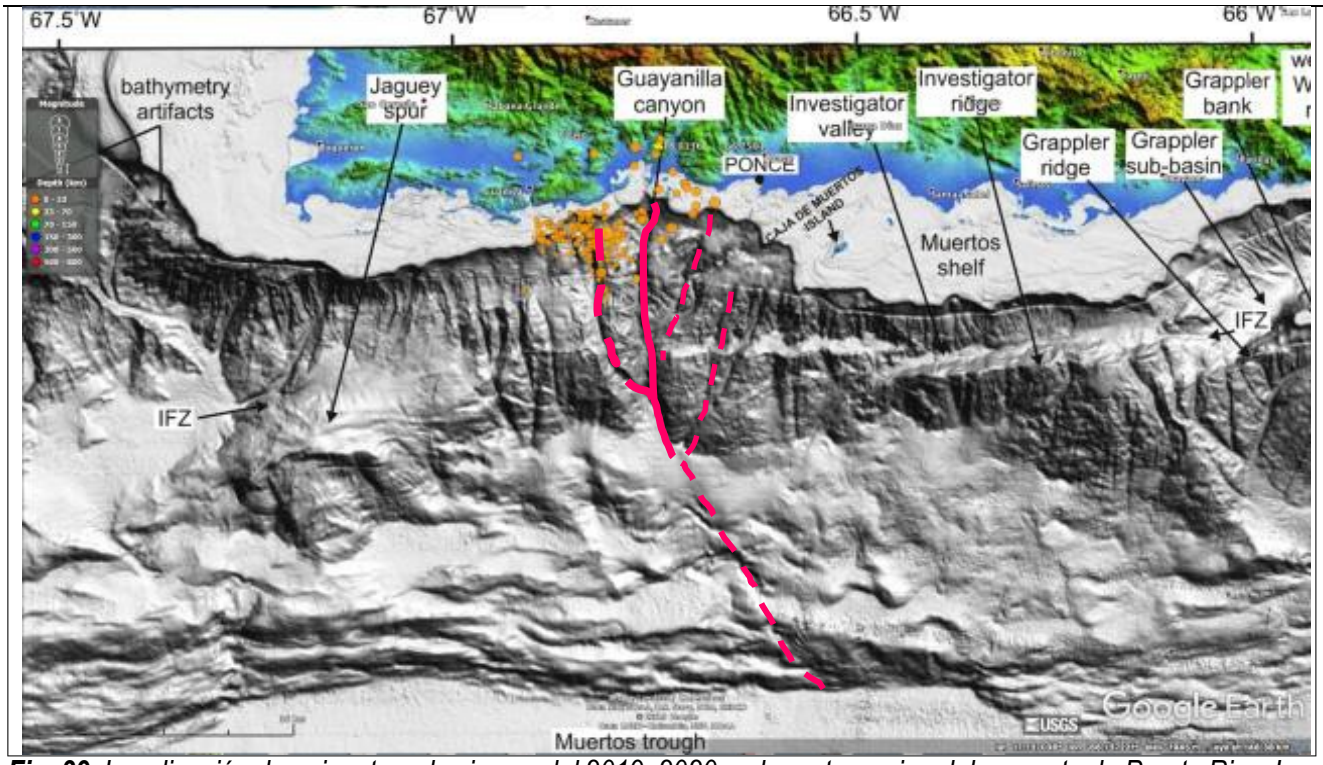


***Fig. 39**. Localización de epicentros de sismos del 2019–2020 en la parte marina del suroeste de Puerto Rico. Las líneas rojas representan la interpretación de una posible estructura submarina que podría conformar una estructura en flor asociada al supuesto sistema transtensivo de Guayanilla (Modificado de LAO, 2020).*

7.4 INUNDACIÓN Y FLUJOS DE SEDIMENTOS

Las inundaciones fluviales son un fenómeno hidrometeorológico común en los países tropicales. Se dan como respuesta a un proceso de precipitación intensa dentro de las cuencas hidrográficas. Una lluvia intensa y persistente de varias horas puede provocar un exceso de agua que desciende por los cauces y desbordar los ríos hacia las áreas aledañas que todavía se circunscriben dentro de su valle de inundación inmediata. Dicho valle o llanura de inundación, dependiendo de la geomorfología del terreno, puede comprender un área de decenas, cientos o miles de pies de ancho, particularmente si se trata de llanuras aluviales costeras.

Los flujos de sedimento son también llamados avalanchas. Se trata de mezclas de sedimentos (rocas grandes, troncos de árboles y otras partículas, incluyendo arena y lodo) y agua que bajan por el cauce del río como un flujo turbulento que puede provocar un proceso erosivo fuerte y daño a la infraestructura que se encuentre sobre el cauce (como puentes, por ejemplo) o en las cercanías de este. Estos flujos se pueden originar como consecuencia de deslizamientos que ocurren en la parte alta de la cuenca, por la retención de sedimentos que luego se liberan súbitamente o por una combinación de ambos procesos.

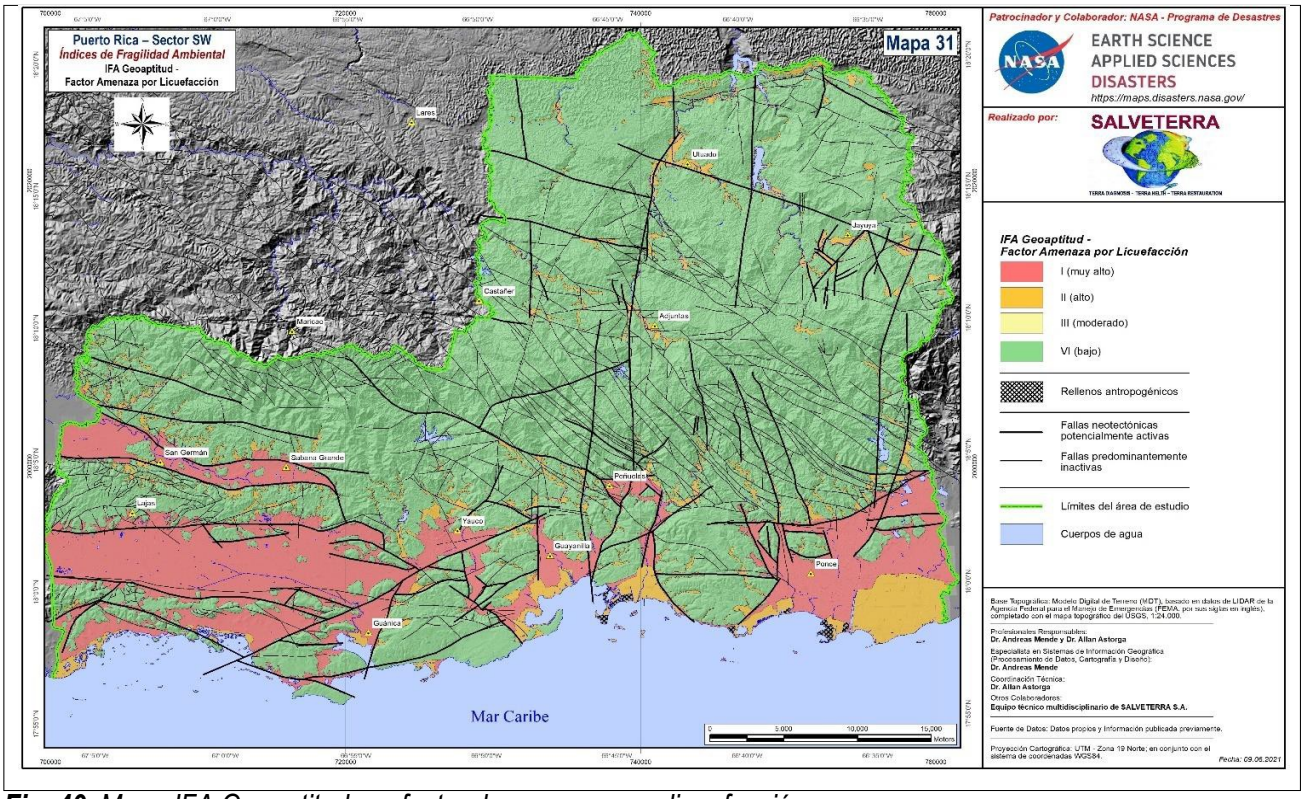


***Fig. 40**. Mapa IFA Geoaptitud por factor de amenaza por licuefacción.*

En la Figura 41 se encuentra el mapa de IFA Geoaptitud por factor de amenaza por inundación fluvial o paso de flujos de sedimentos para el área de estudio. Como se puede observar, en la zona montañosa, estos son comunes en el fondo de los valles intramontañosos y en las zonas de llanuras costeras debido a su topografía plana; la capacidad de desbordamiento de los ríos puede ser muy amplia. El desarrollo de estos fenómenos responde a eventos cíclicos vinculados con el clima, especialmente en los últimos años, con los efectos del cambio climático, estos se han hecho cada vez más frecuentes.

7.5 TSUNAMIS Y ASCENSO RELATIVO DEL NIVEL MAR

Tsunami: término japonés que significa "ola" (*nami*) "en puerto" (*tsu*). Serie de ondas de longitud y periodos sumamente largos, normalmente generados por perturbaciones asociadas con terremotos que ocurren bajo el fondo oceánico o cerca de él. También llamado ola sísmica y, de manera incorrecta, ola de marea. Asimismo, las erupciones volcánicas, los deslizamientos de tierra submarinos, los derrumbes costeros de montañas y el impacto en el mar de un meteorito de gran tamaño, también pueden dar origen a la generación de un tsunami. Estas ondas pueden alcanzar dimensiones significativas y viajar por toda la cuenca oceánica perdiendo poca energía. Se propagan como olas de gravedad normales con un periodo típico de entre 10 a 60 minutos.

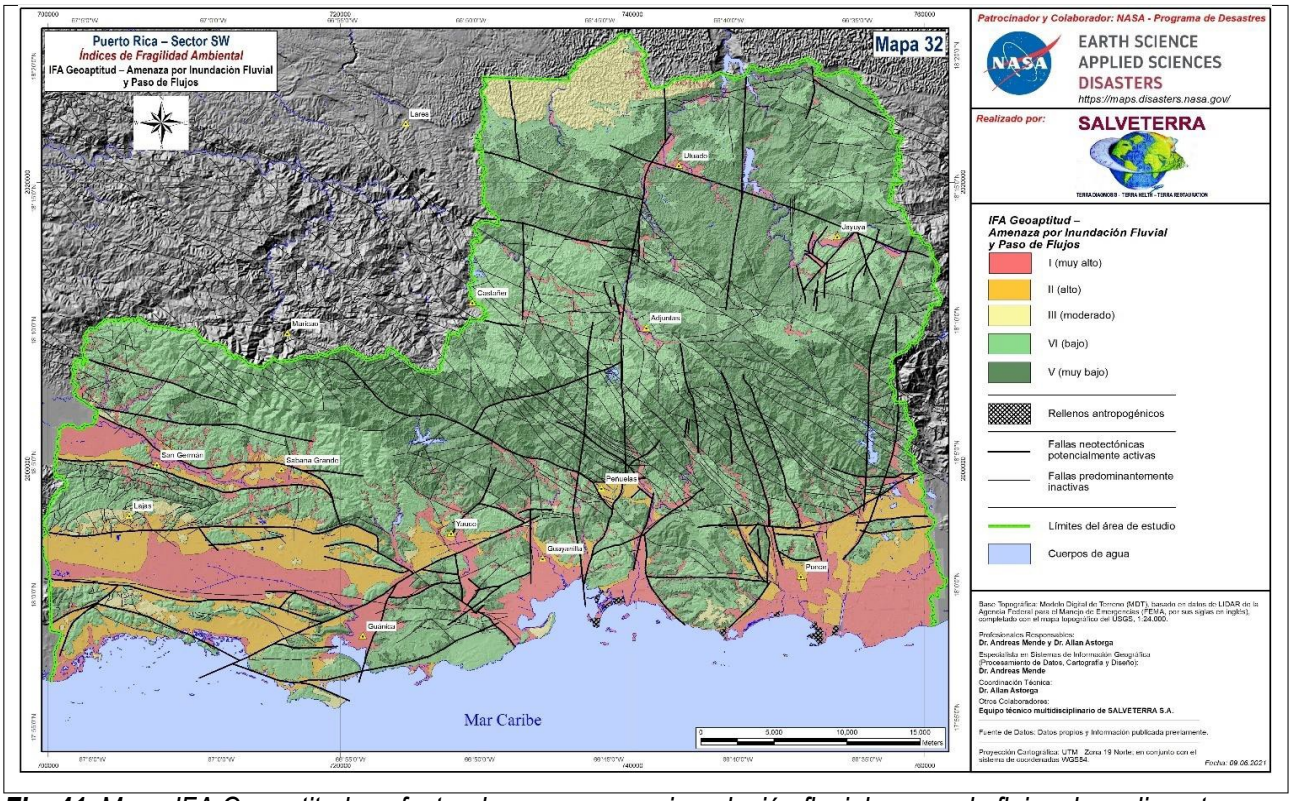


***Fig. 41**. Mapa IFA Geoaptitud por factor de amenaza por inundación fluvial y paso de flujos de sedimentos.*

Al acercarse a aguas poco profundas, las olas del tsunami se amplifican y aumentan de altura, inundando áreas bajas; donde la topografía submarina local provoca amplificación extrema de las olas, estas pueden romper y causar daños importantes. Los tsunamis no guardan relación con las mareas.[2]

Los cambios relativos en el nivel mar ocurren como respuesta de una zona litoral costera a los efectos del cambio eustático del nivel del mar, la subsidencia neotectónica y el aporte sedimentario que proviene de las áreas de origen. Por lo general, el cambio eustático se confunde con el cambio relativo en el nivel del mar, pero, sin embargo, son dos conceptos diferentes. El cambio relativo del nivel de mar depende de esos tres factores mencionados y, por lo tanto, tiene que analizarse localmente, en cada segmento litoral, pues la velocidad de cambio puede ser diferente dependiendo de las condiciones neotectónicas locales y del aporte de sedimento. Esto es particularmente relevante en zonas de márgenes convergentes donde la velocidad de los procesos geológicos puede ser mucho más rápida que en los márgenes pasivos.

Debido al cambio climático acelerado que afecta al planeta desde hace casi dos siglos y al aumento rápido de la temperatura de la atmósfera, el hielo en zonas polares y montañosas altas se está derritiendo, por lo que el nivel eustático del mar está aumentando. De esta manera, si la subsidencia y el aporte sedimentario se consideran como estables o constantes, es de esperar que en todos los litorales del mundo se dé, durante el siglo XXI, un proceso de aumento gradual del nivel relativo del mar. Existen algunas

[2] *Fuente de información: Glosario de la IOC/UNESCO*

proyecciones que no son del todo precisas, debido a las variables involucradas que indican que ese aumento relativo puede ser de varias pulgadas a varios pies durante el siglo XXI.

Este ascenso relativo del nivel del mar ocurre a lo largo de los añosy décadas, erosionando la línea costera y provocando su retroceso hacia la tierra, lo que se denomina una transgresión costera. Puede tener efectos significativos en ciudades costeras localizadas cerca del nivel mar, además puede provocar cambios que dañen la infraestructura costera como puertos, muelles, marinas, carreteras y otros. Como tal, se debe considerar apropiadamente para la infraestructura ya existente, como también para la planificación de uso del suelo en zonas y llanuras costeras.

En la Figura 42 se presenta el mapa de IFA Geoaptitud por factor de amenaza por tsunamis y ascenso relativo del nivel del mar para el área de estudio. Las zonas de fragilidad muy alta representan diferencias de altura de aproximadamente 0 a 16 pies y las de fragilidad alta de 17 a 33 pies sobre el nivel de mar. Es importante señalar que las zonas costeras del área de estudio tienen un fuerte control neotectónico, por lo que la estimación precisa de los efectos del aumento relativo del nivel del mar durante el siglo XXI (como consecuencia de la crisis climática planetaria) requeriría ajustarse localmente para mayor precisión.

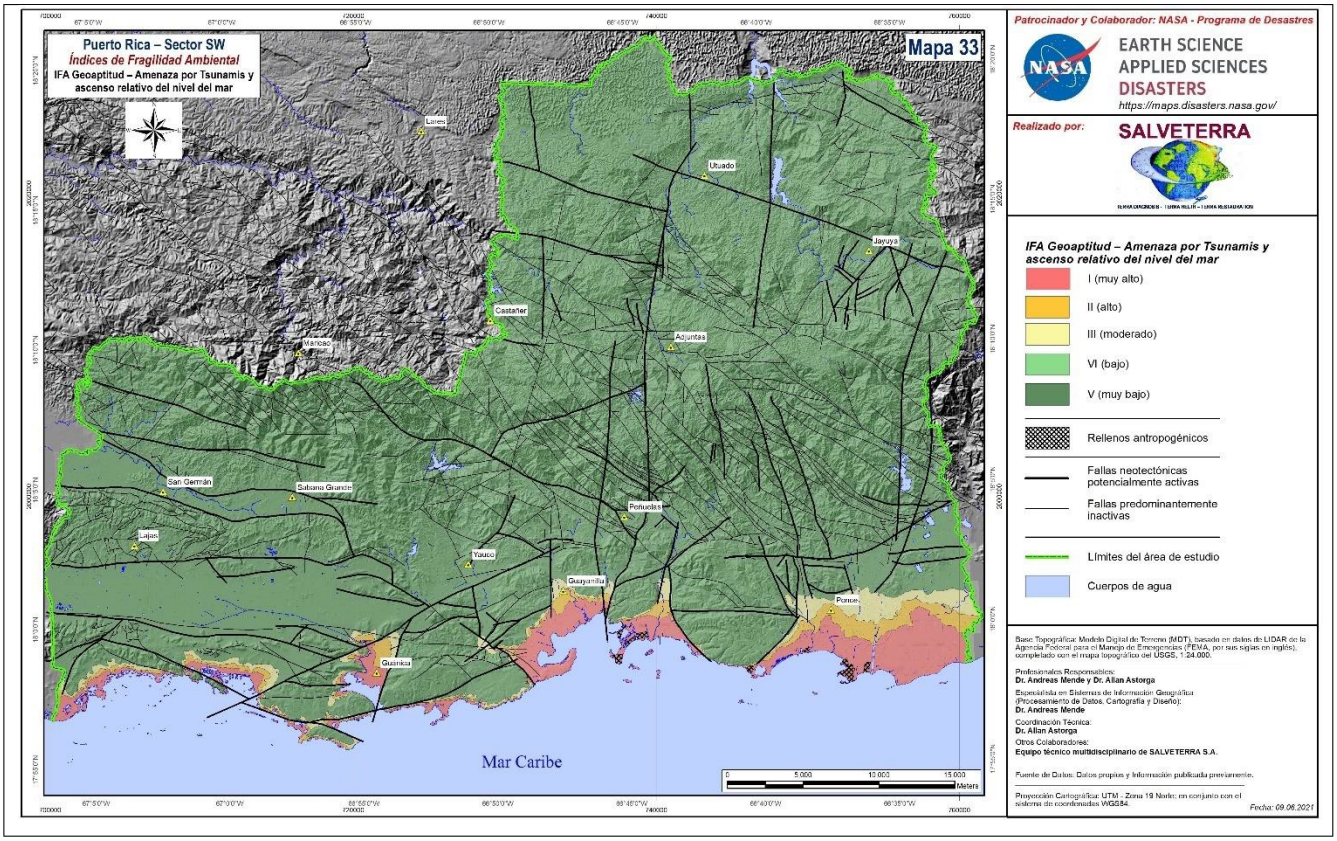


***Fig. 42**. Mapa IFA Geoaptitud por factor de amenaza por tsunamis y ascenso relativo del nivel del mar.*

7.6 AMENAZAS NATURALES INTEGRADAS

Las amenazas naturales cartografiadas para el área de estudio, sin incluir deslizamientos, se muestran en el mapa de la Figura 43. En este se incluyen: sismicidad, licuefacción, inundaciones y flujos, así como tsunamis y cambios relativos del nivel del mar. Las zonas calificadas como de alta y muy alta fragilidad ambiental por amenazas naturales que se señalan en este mapa resultan de gran importancia. Como se puede observar, se ven afectadas las zonas de llanuras, llanuras costeras, meseta insular del norte, valles intramontañosos y costas.

Por otra parte, en la Figura 44 se presenta el mapa de IFA Geoaptitud por factor de amenazas naturales integradas para el área de estudio. Se incluyen las zonas de amenaza alta y muy alta para todos los factores de amenaza natural, incluyendo la susceptibilidad a deslizamientos. Este mapa es de gran importancia para la realización del análisis de riesgo que se efectúa más adelante en este documento.

Las condiciones geológicas, geomorfológicas, neotectónicas y climáticas del área de estudio se derivan del hecho de que la gran mayoría del territorio bajo análisis está sujeto a condiciones de amenaza natural de tipo alto a muy alto. Incluso, hay algunas zonas que presentan susceptibilidad alta a muy alta a varios tipos de amenazas. Respecto a esto, es importante señalar que esta identificación de una condición de amenaza no debe interpretarse como un factor de alarma para la población, al contrario, es una forma de acercarse a un proceso correcto de aumento de la resiliencia humana y de infraestructura.

Es completamente común que una zona geológica activa —como es el caso del suroeste de Puerto Rico, que está localizado en una zona tropical, con parte de su territorio en una zona costera o de relieve montañoso conspicuo— tenga un resultado como el obtenido en este trabajo.

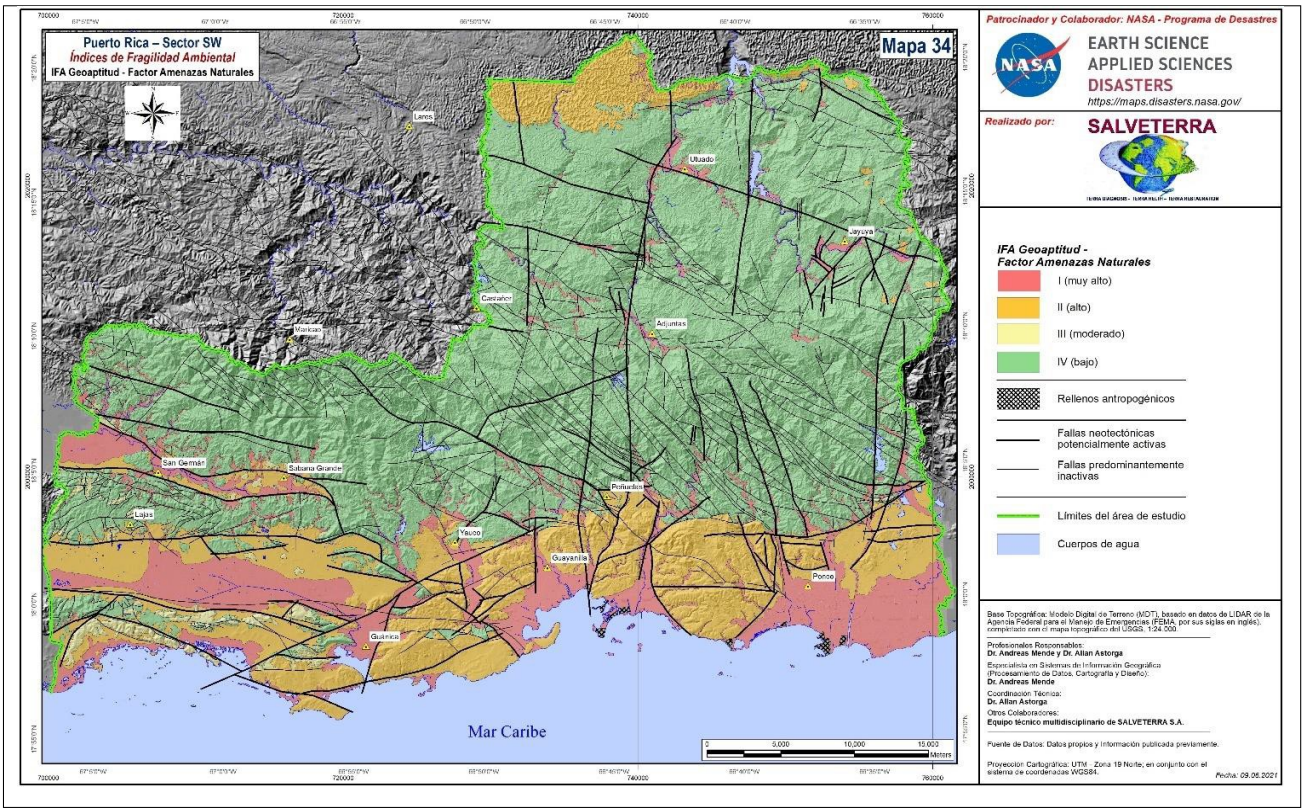


***Fig. 43**. Mapa IFA Geoaptitud por factor de amenazas naturales (no incluye laderas inestables).*

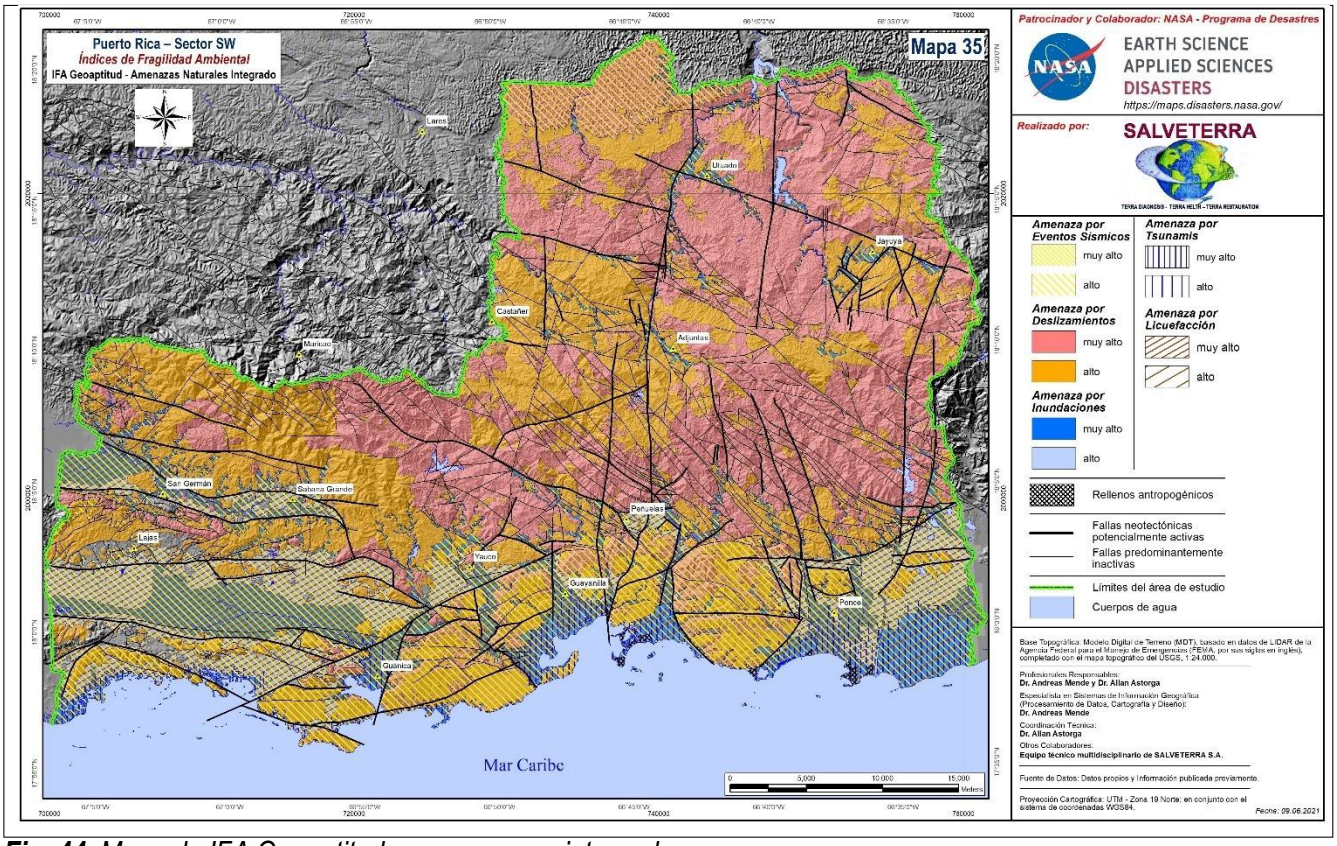


***Fig. 44**. Mapa de IFA Geoaptitud por amenazas integrado.*

9. IFA Geoaptitud integrado

El mapa de IFA Geoaptitud integrado resultante para el suroeste de Puerto Rico se puede apreciar en la Figura 45. Hay que recordar que este es uno de los cuatro ejes de la metodología de IFA modificada (SALVETERRA, feb. 2020). En este caso no se elaboraron las IFA para bioaptitud, antropoaptitud y edafoaptitud, cuyo mapa final tiene una gran utilidad para la planificación ambientalmente sustentable del uso del suelo y para la recuperación de ecosistemas, entre otras aplicaciones estratégicas (SALVETERRA, julio 2020).

Como se observa en el mapa de la Figura 45, la condición de fragilidad ambiental por geoaptitud que tiene el área de estudio es principalmente alta y muy alta. Esto no es obra de la casualidad y tiene que ver con la combinación de factores previamente analizados de litopetrofísica, geodinámica externa, hidrogeología, estabilidad de laderas y otras amenazas naturales.

Los datos que aporta este mapa no deben ser interpretados de forma negativa; al contrario, es una información estratégica de gran utilidad para la toma de decisiones sobre el desarrollo sustentable y seguro de las actividades humanas. Ignorar o no considerar las limitaciones técnicas es la fuente de problemas principal en el tema del manejo sostenible de proyectos y la gestión de riesgos. Las tecnologías disponibles permiten superar casi todas esas limitaciones y ese es el objetivo primordial de la metodología SALVETERRA: identificar y dar a conocer esas limitaciones para establecer medidas de corrección, mitigación o prevención para evitar daños en casos de eventos de desastre. Las zonas de condición moderada y bajatienen una buena aptitud para el desarrollo de actividades humanas de mayor impacto.

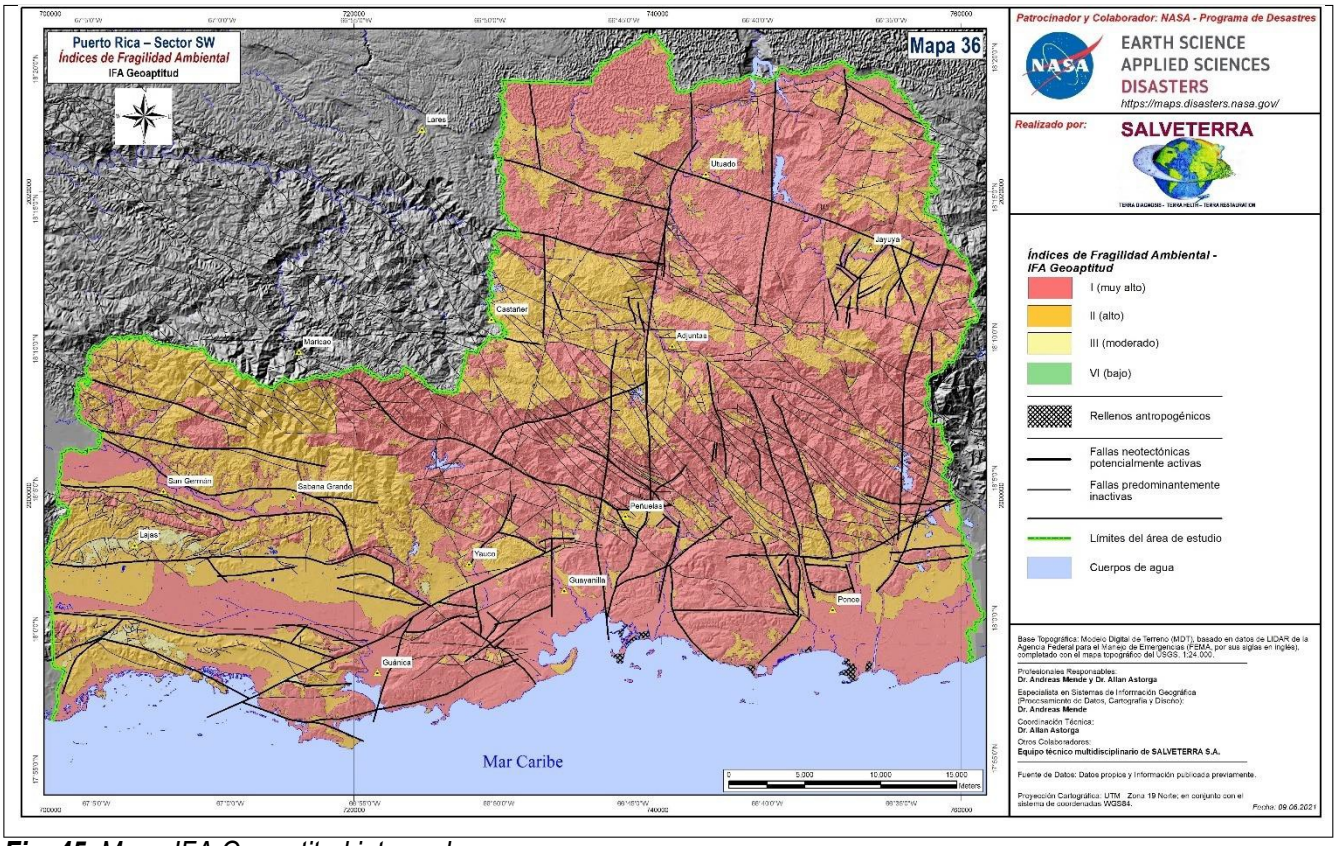


***Fig. 45**. Mapa IFA Geoaptitud integrado.*

10. Análisis de riesgo natural (Georiesgos y efectos de cambio climático)

10.1 Introducción

El análisis de riesgo a las amenazas naturales y efectos del cambio climático utiliza la información cartográfica detallada generada, particularmente, el mapa de IFA Geoaptitud de amenazas naturales con la sobreposición de los usos urbanos que se observan en las imágenes satelitales. Se hace énfasis en las zonas identificadas como de alta y muy alta amenaza, de manera que los usos antrópicos sobrepuestos a esas zonas califican automáticamente como zonas de alto y muy alto riesgo.

Para facilitar el análisis, en el caso del suroeste de Puerto Rico, dado que se presentan condiciones de multirriesgo, se realizó la evaluación para las diferentes fuentes principales de amenazas naturales, separando las categorías de alto y muy alto riesgo.

10.2 Ocupación humana e indicadores socioeconómicos

En la Figura 46 se observa la imagen satelital con la localización de los municipios del área de estudio. En la Tabla 3, se presenta el resumen de los datos socioeconómicos principales de dichos municipios. El total de habitantes en el área de estudio es de 368,229, siendo el municipio de Ponce el que tiene el mayor número de habitantes con cerca de 140 mil.

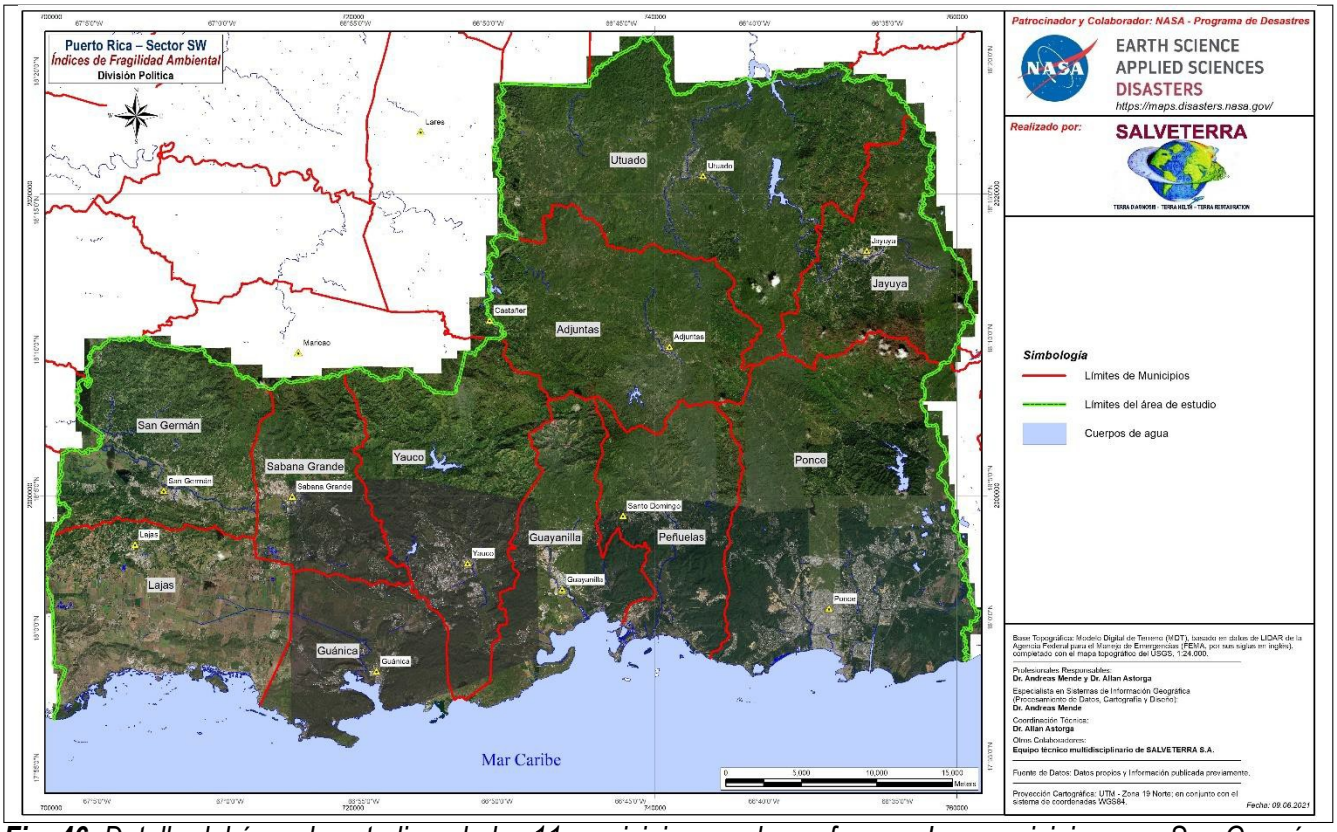


***Fig. 46**. Detalle del área de estudio y de los 11 municipios que la conforman. Los municipios son: San Germán, Lajas, Sabana Grande, Guánica, Yauco, Guayanilla, Peñuelas, Adjuntas, Utuado, Jayuya y Ponce.*

Las actividades económicas principales que se realizan en los municipios en este sector suroeste de Puerto Rico son:

- manufactura
- alojamiento y servicios de alimentos
- administración y manejo de desperdicios sólidos
- salud y asistencia social
- comercio al por menor
- construcción
- seguros de propiedad
- servicios profesionales
- venta y alquiler de propiedades

Como se puede observar en la imagen de la Figura 46, los núcleos urbanos principales en el área de estudio se encuentran al sur, cerca de la costa: Ponce, Guayanilla, Guánica, Yauco y Lajas, entre otros. También se observan algunas pequeñas concentraciones urbanas en las zonas de la montaña: San Germán, Sabana Grande, Adjuntas, Jayuya y Utuado. Además de esto, frente a la red de carreteras existente, hay numerosas construcciones de viviendas y otras estructuras de ocupación rural.

Tabla 3
Resumen de datos socioeconómicos de los municipios

No.	Municipio	Superficie (Km^2)	Población	Comunidades principales (características principales)[3]	Capital (Ingreso per cápita)[4] En dólares
1.	**San Germán**	141	31 442	• 51.4 % de la población son mujeres. • La edad promedio es 44 años. • Hay 11,722 hogares, de los cuales el 38.4 % la mujer es jefa de familia, sin pareja. • 35.10 % de la inscripción escolar es para la Escuela Elemental (1-8). • 71.60 % de la población tiene un grado secundario o de escuela superior. • 37.6 % cuenta con una subscripción de Internet de banda ancha. • Hay 15,696 unidades de vivienda, de las cuales el 74.7 % está ocupada. • 31.50 % es apta como fuerza laboral.[5] • 89.6 % se desplaza solo a su lugar de trabajo. • Las ocupaciones principales son de gestión, empresariales, científicas y artísticas con un 33.7 % • En la categoría de industria, los servicios educativos y asistencia de salud y social son los principales con 29.4 % • 65.4 % es asalariado privado (no gobierno). • El ingreso familiar promedio es 30,244 dólares. • El ingreso promedio de los hogares es de 25,855 dólares.	10535
2.	**Lajas**	155.8	22.835	• 51.4 % de la población son mujeres. • La edad promedio es 45 años. • Hay 7,665 hogares, de los cuales 40.2 % son familias con parejas casadas. • 43.90 % de la inscripción escolar es para la Escuela Elemental (1-8). • 62.70 % de la población tiene grado secundario o de escuela superior. • 22.2 % cuenta con una subscripción de Internet de banda ancha. • Hay 12,244 unidades de vivienda de las cuales el 62.60 % está ocupada. • 32.80 % es fuerza laboral. • 89.6 % se desplaza solo a su lugar de trabajo. • Las ocupaciones principales son de ventas y oficina con un 32 %.	7423

[3] Datos socioeconómicos de los municipios (2019)

[4] Ingreso per cápita: Es el ingreso generado en una economía municipal en un año dado dividido entre la población total de dicho municipio.
[5] Fuerza laboral o grupo trabajador: Número de las personas de 16 años o más en un municipio, que están trabajando o que están hábiles para trabajar buscando empleo

No.	Municipio	Superficie (Km^2)	Población	Comunidades principales (características principales)[3]	Capital (Ingreso per cápita)[4] En dólares
				• En la categoría de industria, los servicios educativos y asistencia de salud y social son los principales con 21.6 %. • 70.9 % es asalariado privado (no gobierno). • El ingreso familiar promedio es 21,475 dólares. • El ingreso promedio de los hogares es 20,096dólares.	
3.	**Sabana Grande**	93	22.560	• 53 % de la población son mujeres. • La edad promedio es 42.3 años. • Hay 7,061 hogares, de los cuales 40.2 % son familias con pareja casadas. • 36.8 % de la inscripción escolar es para la Escuela Elemental (1-8). • 74.3 % de la población tiene gradosecundario o de escuela superior. • 45.3 % cuenta con una subscripción de Internet de banda ancha. • Hay 10,842 unidades de vivienda de las cuales el 65.1 % está ocupada. • 41.10 % es fuerza laboral. • 82.8 % se desplaza solo a su lugar de trabajo. • Las ocupaciones principales son de gestión, empresariales, científicas y artísticas con un 30.5 %. • En la categoría de industria, los servicios educativos y asistencia de salud y social son los principales con 26.5 %. • 63.9 % es asalariado privado (no gobierno). • El ingreso familiar promedio es 29,831 dólares. • El ingreso promedio de los hogares es 25,961dólares.	9810

4.	**Guánica**	96.2	16.293	• 51.8 % de la población son mujeres. • La edad promedio es 42.5 años • Hay 5,515 hogares, de los cuales 36.3 % son familias con pareja casadas. • 41.7 % de la inscripción escolar es para la Escuela Elemental (1-8). • 69.9 % de la población tiene grado secundario o de escuela superior. • 41 % cuenta con una subscripción de Internet de banda ancha. • Hay 9,358 unidades de vivienda de las cuales el 58.9 % está ocupada. • 34.7 % es fuerza laboral. • 92.10 % se desplaza solo a su lugar de trabajo. • Las ocupaciones principales son de gestión, empresariales, científicas y artísticas con un 34.4 %.	7293

No.	Municipio	Superficie (Km^2)	Población	Comunidades principales (características principales)[3]	Capital (Ingreso per cápita)[4] En dólares
				• En la categoría de industria, los servicios educativos y asistencia de salud y social son los principales con 34.5 %. • 62.6 % es asalariado privado (no gobierno). • El ingreso familiar promedio es 21,489 dólares. • El ingreso promedio de los hogares es17,873 dólares.	
5.	**Yauco**	177.5	35.428	• 52.1 % de la población son mujeres. • La edad promedio es 43.9 años. • Hay 10,990 hogares, de los cuales 41.9 % son familias con pareja casadas. • 36.1 % de la inscripción escolar es para la Escuela Elemental (1-8). • 73.4 % de la población tiene grado secundario o de escuela superior. • 47.8 % cuenta con una subscripción de Internet de banda ancha. • Hay 17,521 unidades de vivienda de las cuales el 62.70 % está ocupada. • 36.1 % es fuerza laboral. • 83.8 % se desplaza solo a su lugar de trabajo. • Las ocupaciones principales son de gestión, empresariales, científicas y artísticas con un 34.7 %. • En la categoría de industria, los servicios educativos y asistencia de salud y social son los principales con un 27.4 %. • 66.2 % es asalariado privado (no gobierno). • El ingreso familiar promedio es 26,446 dólares. • El ingreso promedio de los hogares es 21,722 dólares.	8404

6.	**Guayanilla**	109.9	18.514	• 52.4 % de la población son mujeres. • La edad promedio es 41.3 años. • Hay 6,510 hogares, de los cuales 36.50 % son familias con pareja casadas. • 40.90 % de la inscripción escolar es para la Escuela Elemental (1-8). • 76.9 % de la población tiene grado secundario o de escuela superior. • 67 % cuenta con una subscripción de Internet de banda ancha. • Hay 8,233 unidades de vivienda, de las cuales el 79.1 % está ocupada. • 40.4 % es fuerza laboral. • 92.1 % se desplaza solo a su lugar de trabajo. • Las ocupaciones principales son de gestión, empresariales, científicas y artísticas con un 34.8 %.	9136

No.	Municipio	Superficie (Km^2)	Población	Comunidades principales (características principales)[3]	Capital (Ingreso per cápita)[4] En dólares
				• En la categoría de industria, los servicios educativos y asistencia de salud y social son los principales con 31.3 %. • 59.8 % es asalariado privado (no gobierno). • El ingreso familiar promedio es 26,051 dólares. • El ingreso promedio de los hogares es 24,024 dólares.	
7.	**Peñuelas**	44.4	20.383	• 51.5 % de la población son mujeres. • La edad promedio es 38.8 años. • Hay 6,863 hogares, de los cuales 40.1 % son familias con pareja casadas. • 41.1 % de la inscripción escolar es para la Escuela Elemental (1-8). • 73.80 % de la población tiene grado secundario o de escuela superior. • 66.8 % cuenta con una subscripción de Internet de banda ancha. • Hay 8,705 unidades de vivienda de las cuales el 78.8 % está ocupada. • 40.5 % es fuerza laboral. • 86.1 % se desplaza solo a su lugar de trabajo. • Las ocupaciones principales son de gestión, empresariales, científicas y artísticas con un 30.5 %. • En la categoría de industria, los servicios educativos y asistencia de salud y social son los principales con un 30.6 %. • 59.1 % es asalariado privado (nogobierno). • El ingreso familiar promedio es 28,874 dólares. • El ingreso promedio de los hogares es 26,177dólares.	9480

8.	**Adjuntas**	172.9	17.891	• 50.2 % de la población son mujeres. • La edad promedio es 42.1 años. • Hay 5,771 hogares, de los cuales 44.1 % son familias con pareja casadas. • 38.9 % de la inscripción escolar es para Escuela Elemental (1-8). • 65.3 % de la población tiene grado secundario o de escuela superior. • 52.9 % cuenta con una subscripción de Internet de banda ancha. • Hay 7,586 unidades de vivienda de las cuales el 76.1 % está ocupada. • 39.8 % es fuerza laboral. • 84.7 % se desplaza solo a su lugar de trabajo. • Las ocupaciones principales son de gestión, empresariales, científicas y artísticas con un 31.6 %.	7595

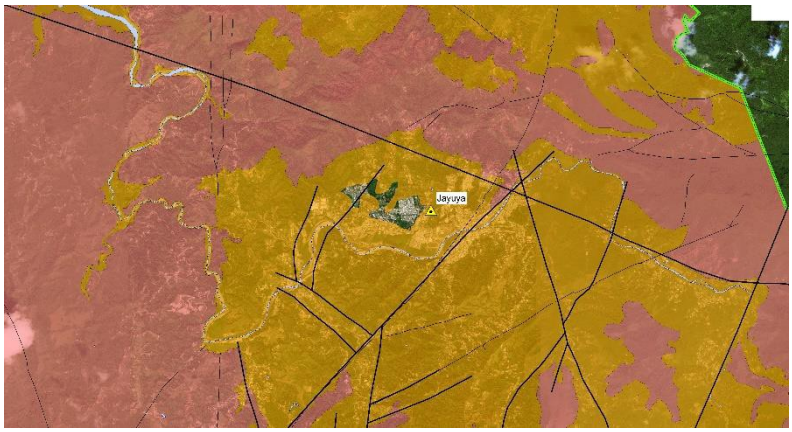
No.	Municipio	Superficie (Km^2)	Población	Comunidades principales (características principales)[3]	Capital (Ingreso per cápita)[4] En dólares
				• En el categoría de industria, los servicios educativos y asistencia de salud y social son los principales con un 29.6 % • 56.5 % es asalariado privado (no gobierno). • El ingreso familiar promedio es 22,341 dólares. • El ingreso promedio de los hogares es 20,353 dólares.	
9.	**Utuado**	299	28.676	• 51.5 % de la población son mujeres. • La mediana de edad es 43.5 años. • Hay 9,593 hogares, de los cuales 42.3 % son familias con pareja casadas. • 40.9 % de la inscripción escolar es para la Escuela Elemental (1-8). • 72.2 % de la población tiene grado secundario o de escuela superior. • 52.3 % cuenta con una subscripción de Internet de banda ancha. • Hay 13,240 unidades de vivienda de las cuales un 72.5 % está ocupada. • 37.90 % es fuerza laboral. • 86.1 % se desplaza solo a su lugar de trabajo. • Las ocupaciones principales son de gestión, empresariales, científicas y artísticas con un 26.8 %, seguido de ocupaciones de venta y oficina con 25.8 %. • En la categoría de industria, los servicios educativos y asistencia de salud y social son los principales con 24 %. • 58.3 % es asalariado privado (no gobierno). • El ingreso familiar promedio es 25,489 dólares. • El ingreso promedio de los hogares es 21,654 dólares.	8683

10.	**Jayuya**	102.1	14.539	• 50.6 % de la población son mujeres. • La edad promedio es 38.6 años. • Hay 4,837 hogares, de los cuales 39 % son familias con pareja casadas. • 42.4 % de la inscripción escolar es para la Escuela Elemental (1-8). • 75.6 % de la población tiene grado secundario o de escuela superior. • 49.9 % cuenta con una subscripción de Internet de banda ancha. • Hay 6,169 unidades de vivienda de las cuales un 78.4 % está ocupada. • 32.30 % es fuerza laboral. • 82.8 % se desplaza solo a su lugar de trabajo.	7308

No.	Municipio	Superficie (Km^2)	Población	Comunidades principales (características principales)[3]	Capital (Ingreso per cápita)[4] En dólares
				• Las ocupaciones principales son producción, transportación y actividades de transporte con un 29.3 %. • En la categoría de industria, la manufactura es la principal con un 28.7 %. • 67 % es asalariado privado (no gobierno). • El ingreso familiar promedio es 22,806 dólares. • El ingreso promedio de los hogares es 20,181 dólares.	
11.	**Ponce**	114.76	139.671	• 52 % de la población son mujeres. • La edad promedio es 41 años. • Hay 52,042 hogares, de los cuales 41 % la mujer es jefa de familia, sin pareja. • 36.1 % de la inscripción escolar es para la Escuela Elemental (1-8). • 78.1 % de la población tiene grado secundarioo de escuela superior. • 58.4 % cuenta con una subscripción de Internet de banda ancha. • Hay 65,901 unidades de vivienda de las cuales el 79 % está ocupada. • 37.4 % es fuerza laboral. • 86.1 % se desplaza solo a su lugar de trabajo. • Las ocupaciones principales son de gestión, empresariales, científicas y artísticas con un 33.5 %. • En la categoría de industria, los principales son los servicios educativos y asistencia de salud y social con un 29.2 %. • 72.6 % es asalariado privado (no gobierno). • El ingreso familiar promedio es 32,310 dólares. • El ingreso promedio de los hogares es 28,472dólares.	11393

10.3 ZONAS DE ALTO Y MUY ALTO RIESGO A DESLIZAMIENTOS

En la Figura 47 se presenta el mapa de zonas de alto y muy alto riesgo a deslizamientos sobrepuesto a la imagen satelital del área de estudio. Esto, a fin de visualizar con mayor facilidad las zonas urbanas y suburbanas, así como la infraestructura vial que se presenta en zonas de alta y muy alta susceptibilidad alos procesos de deslizamientos. Se aclara que, para ver los datos detalladamente, se debe observar en un sistema de alta resolución. La Figura 47 muestra una aproximación de la visión general. Esto ocurre dado que el área de estudio es de cerca de 2,000 km^2 y la escala de la imágenes es de 1:5,000.



Como se puede observar en el mapa de la Figura 47, existe un porcentaje importante de asentamientos urbanos en condiciones de alto y alto riesgo a fenómenos de deslizamiento. Este es el caso del norte de Lajas, sur y norte de San Germán, sur de Sabana Grande, norte de Yauco, norte de Guayanilla, norte de Peñuelas, norte y suroeste de Ponce, Adjuntas, Utuado y Jayuya. Se señala nuevamente que el establecer esta condición de riesgo tiene como fin primordial reconocer la condición de vulnerabilidad que lleven a implantar medidas de resiliencia, de manera que, en el caso de ocurrir un evento, los efectos sean los menores posibles.

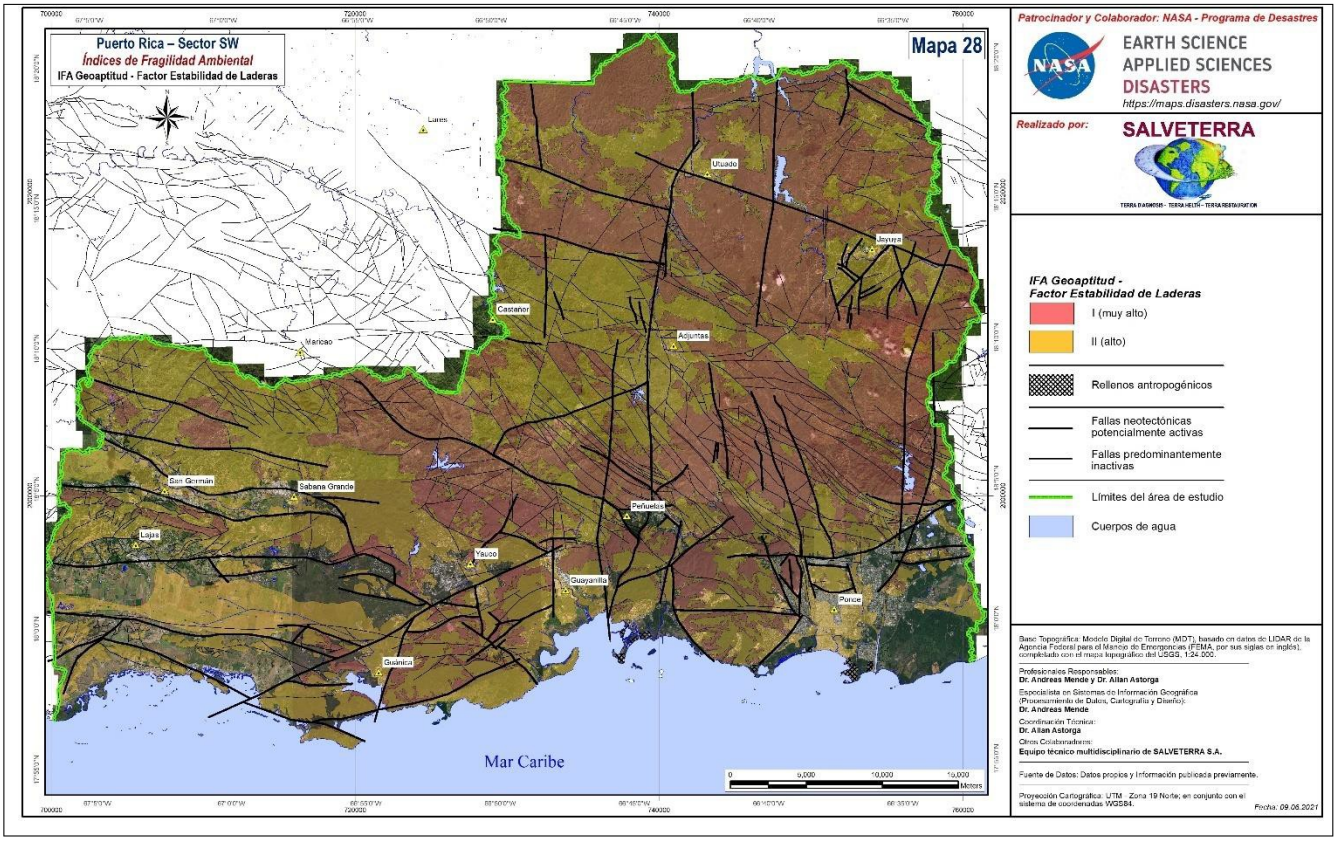


***Fig. 47**. Mapa de riesgo de poblaciones e infraestructura a condiciones de deslizamientos.*

10.4 ZONAS DE ALTO Y MUY ALTO RIESGO AL POTENCIAL DE EVENTOS SÍSMICOS

En la Figura 48 se muestra el mapa de análisis de riesgo por eventos sísmicos fuertes (terremotos) del área de estudio. Este riesgo se refiere a la posibilidad de que se desarrolle un evento sísmico de una fuente local, dentro o en las cercanías del área de estudio, o de una fuente sísmica regional como las analizadas previamente en este estudio.

Debido a la condición geológica que tiene el área de estudio, la zona de mayor riesgo, desde el punto de vista sísmico, corresponde a las zonas donde predominan las llanuras aluviales o las áreas de bajo relieve conformadas por las rocas carbonatadas del Terciario. En estas zonas

existe potencial de amplificación sísmica, es decir, que se incremente el efecto de las ondas sísmicas producidas por un terremoto y, por tanto, con mayor capacidad de generar daños en la superficie. Dentro de esta condición de alto riesgo están los siguientes centros urbanos: Guánica, Yauco, Guayanilla, Peñuelas, Ponce, Adjuntas, Utuado y Jayuya. Estas últimas debido a que se asientan sobre depósitos aluviales de valles intramontañosos.

Las zonas de montaña muestran menor condición de riesgo debido a las condiciones que presenta el subsuelo superior, donde hay rocas duras y cortezas de meteorización más cohesivas. Sin embargo, es importante señalar que, aunque desde el punto de vista sísmico presentan menor condición de riesgo, sí son susceptibles a un efecto indirecto de los mismos, como es la posibilidad de que se desarrollen deslizamientos o desprendimientos de material en zonas de taludes, particularmente aquellos que no son naturales.

Nuevamente, la intención para reconocer esta condición de riesgo está encaminada a desarrollar medidas para aumentar la resiliencia humana y de infraestructura a fin de mejorar la seguridad de las personas y las obras.

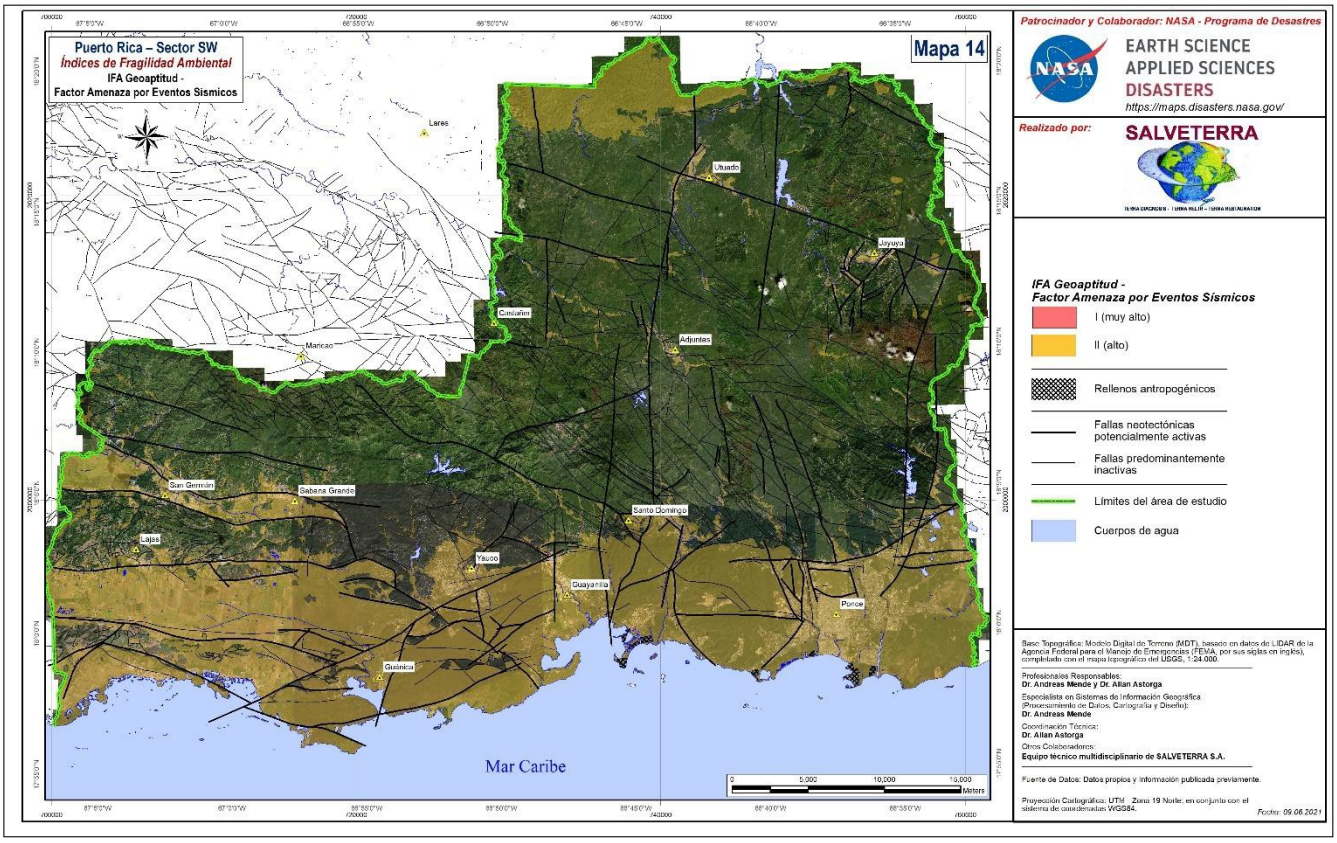


***Fig. 48**. Mapa de análisis de riesgo por eventos sísmicos.*

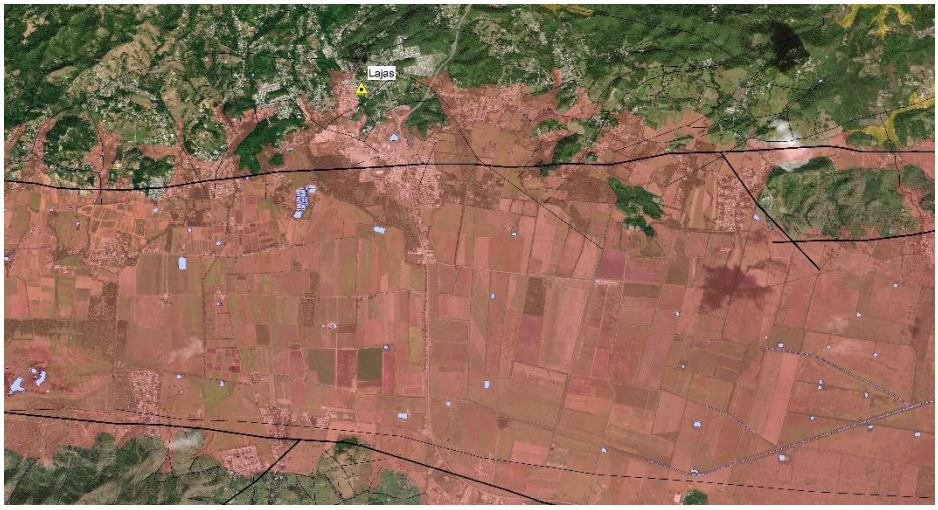
10.5 Zonas de riesgo a licuefacción

El mapa de riesgo por efectos de licuefacción del suroeste de Puerto Rico se encuentra en la Figura 49. Este efecto también está relacionado de forma indirecta con el desarrollo de un evento sísmico muy fuerte o terremoto como mecanismo detonador. El área con potencial de daños se encuentra en las zonas donde se presentan formaciones superficiales no litificadas y que poseen agua subterránea, por lo cual son susceptibles a la licuefacción ante eventos desencadenantes. Se distinguen zonas de alto y muy alto riesgo principalmente al sur del área de estudio y en algunos valles aluviales de zonas intramontañosas. Los centros urbanos que presentan este

potencial de daños son: San Germán, Sabana Grande, Guánica, Yauco, Guayanilla, Peñuelas, Ponce, Adjuntas,

Utuado y Jayuya.

Es importante resaltar que un fenómeno de licuefacción significativo para las áreas de riesgo identificadas se detonaría ante un evento sísmico de gran energía, relativamente cercano y superficial (menos de 20 Km de profundidad), razón por la cual la probabilidad de que se genere es limitada. No obstante, la consideración de este tipo de amenaza resulta importante si se toma en cuentala sismicidad histórica de la zonay la existencia de una probabilidad de que, en el futuro (digamos, algunas décadas), se podría dar un evento sísmico fuerte que afecte la isla, incluyendo el sector suroeste. Desde este punto de vista, reconocer este factor de riesgo, nuevamente, debe conducir al desarrollo de medidas para aumentar la resiliencia de la infraestructura ya existente, así como las construcciones nuevas que se desarrollen en el futuro.



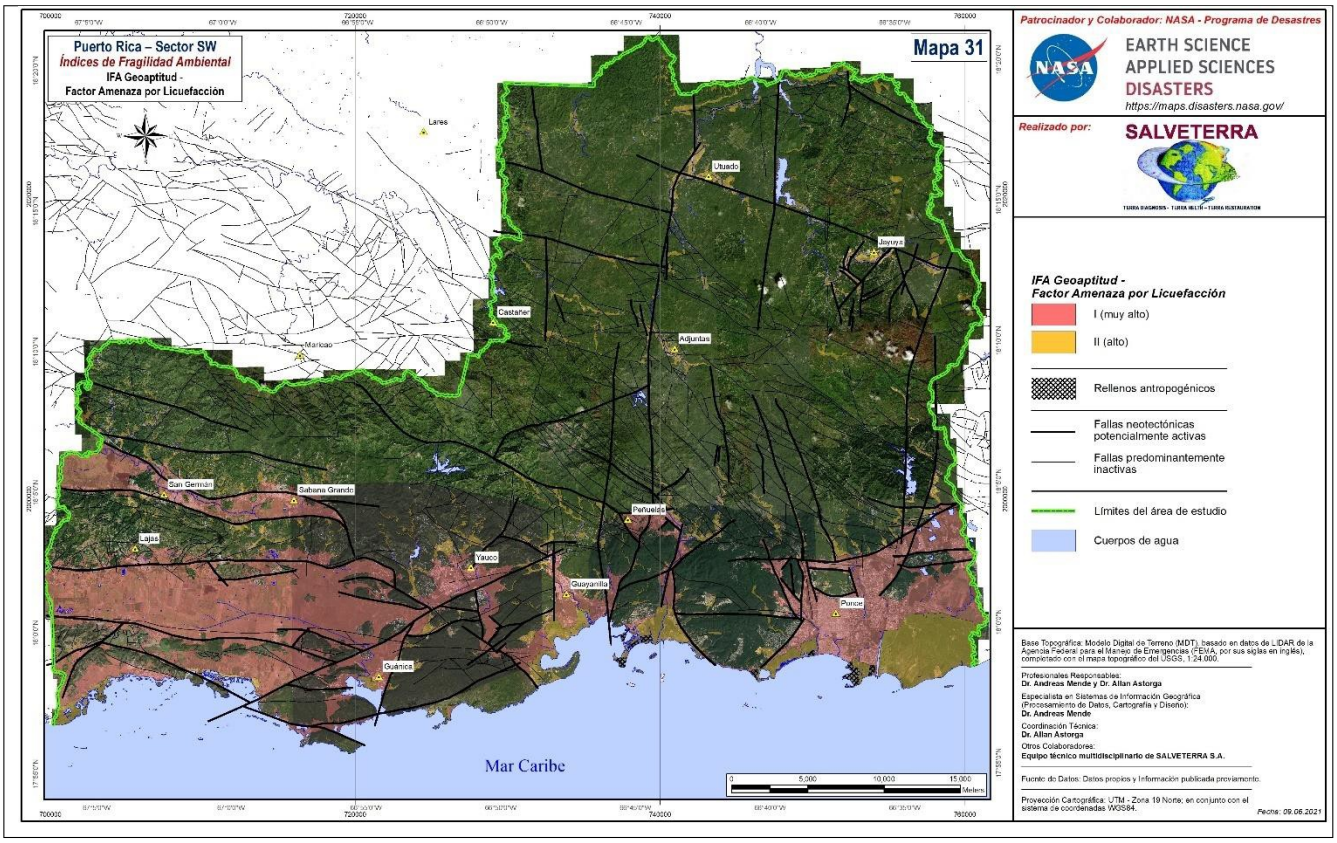
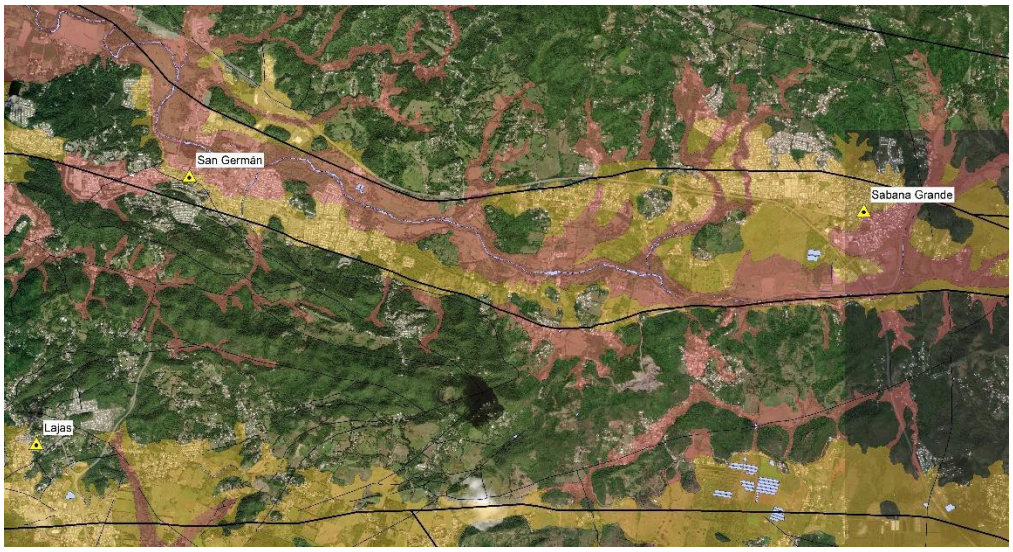


***Fig. 49**. Mapa de análisis de riesgo por licuefacción.*

10.6 ZONAS DE RIESGO A INUNDACIONES Y PASO DE FLUJOS

En la Figura 50 se puede observar el mapa de análisis de riesgo al potencial de inundaciones fluviales y al paso de flujos de sedimento en zonas de canales fluviales y áreas adyacentes. Se circunscriben dentro de zonas de llanuras aluviales y costeras, así como de valles intramontañosos. Este tipo de amenaza se asocia al desarrollo de eventos hidrometeorológicos capaces de generar precipitaciones pluviales importantes sobre el área de estudio, particularmente en las zonas montañosas.



Es claro y conocido que Puerto Rico, como todo el archipiélago de las Antillas Mayores en el Caribe, es susceptible al paso de ondas o tormentas tropicales o, en su defecto, a huracanes capaces de producir mucha lluvia durante periodos de tiempo relativamente cortos.

Esta circunstancia produce caudales fluviales significativos y su posible desbordamiento hacia zonas aledañas identificadas aquí como zonas de alta y muy alta amenaza. Por otro lado, los mismos fenómenos de lluvias intensas y saturación de suelos pueden producir deslizamientos y desprendimientos de material que, en muchos casos, van a dar a los cauces de los ríos y con su remoción pueden producir flujos de sedimento a lo largo del mismo.

Las áreas urbanas que exhiben una condición de riesgo ante esta fuente de amenaza son las siguientes: San Germán, Sabana Grande, Guánica, Yauco, Guayanilla, Peñuelas, Ponce, Adjuntas, Utuado y Jayuya.

Merece la pena recalcar que el objetivo de identificar la condición de amenaza está dirigido a desarrollar medidas que incrementen la resiliencia humana y de infraestructura para aumentar la seguridad de las personas y de las obras.

10.7 ZONAS DE RIESGO A TSUNAMIS Y ASCENSO RELATIVO DEL NIVEL DEL MAR

En la Figura 51 se muestra el mapa de riesgo de tsunamis y ascenso relativo del nivel del mar para la zona litoral costera del área de estudio. La zona de muy alto riesgo no solo representa una zona susceptible al impacto de tsunamis, sino también al ascenso relativo del nivel del mar. La diferencia es que, en el caso del ascenso relativo del nivel del mar, el proceso se daría a lo largo de décadas y sería, en duración de tiempo, permanente. En el caso de un tsunami sería un evento súbito, pero temporero.

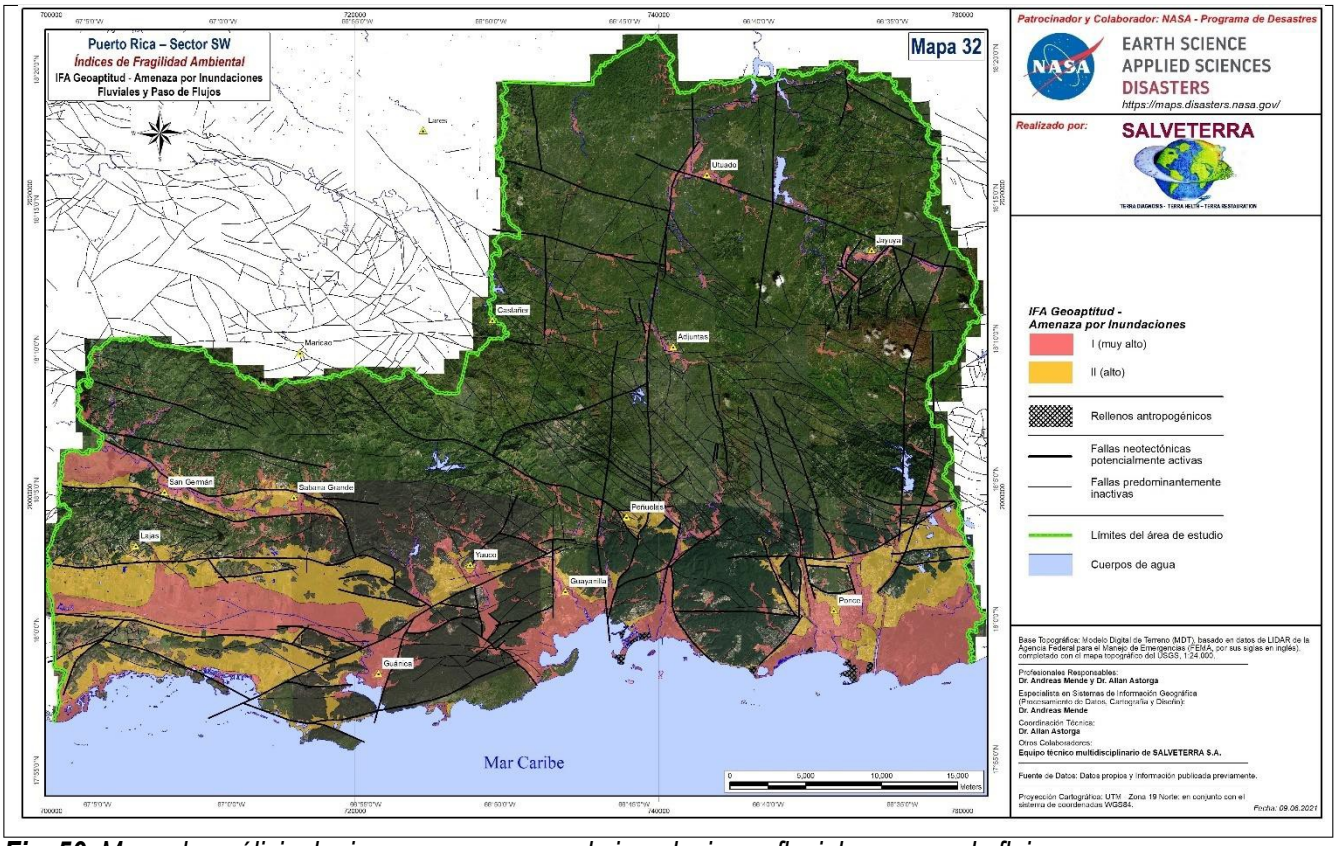
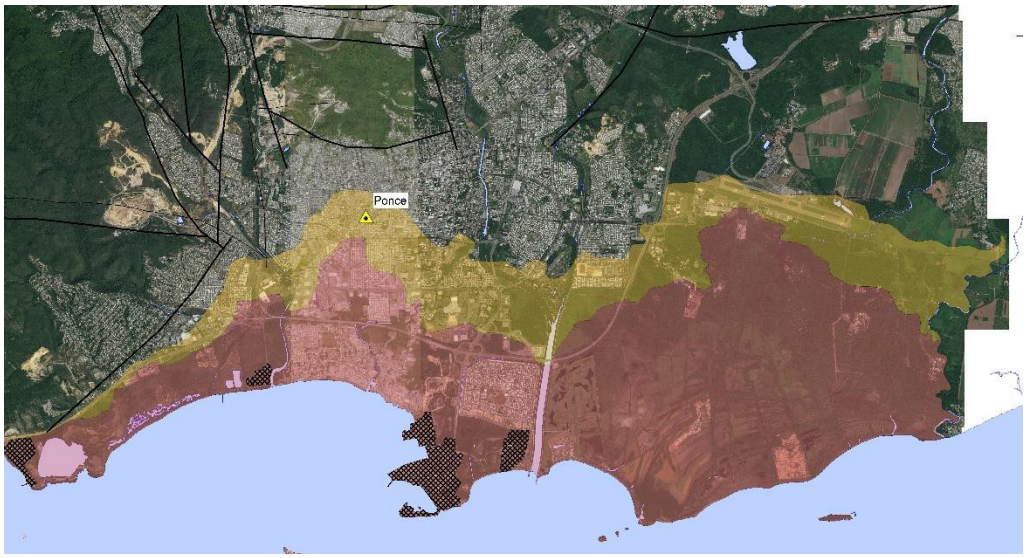


***Fig. 50**. Mapa de análisis de riesgo por amenaza de inundaciones fluviales y paso de flujos.*

Las principales comunidades en riesgo ante estas amenazas son: Guánica, la parte sur-costera de Guayanilla y el sector sur de Ponce. Las fuentes generadoras de un tsunami en el Caribe podrían corresponder a un evento sísmico potente y poco profundo en el mar Caribe o una erupción volcánica submarina. La existencia de evidencia histórica de tsunamis en Puerto Rico, particularmente en la costa sur, permiten deducir que existe la probabilidad de un evento de tsunami, aunque los datos no permiten determinar su periodo de ocurrencia aproximado.



Referente al ascenso relativo del nivel del mar, como se indicó previamente, es conocido que, como consecuencia de la crisis climática planetaria originada por el calentamiento global de la atmósfera, se está dando un ascenso eustático del nivel del mar en una tasa estimada de 3 a 16.5 pies hasta el 2100. Esta tasa, como ya se explicó, se puede incrementar en el caso

del control neotectónico de la línea de costa y el aporte sedimentario. Este aspecto es muy importante de tomarlo en cuenta a fin de realizar estudios locales específicos que permitan determinar la tasa de ascenso y proyectar las medidas correspondientes respecto al uso de suelo en la costa. En el área de estudio, son prioritarios los estudios en las zonas urbanas costeras señaladas previamente.

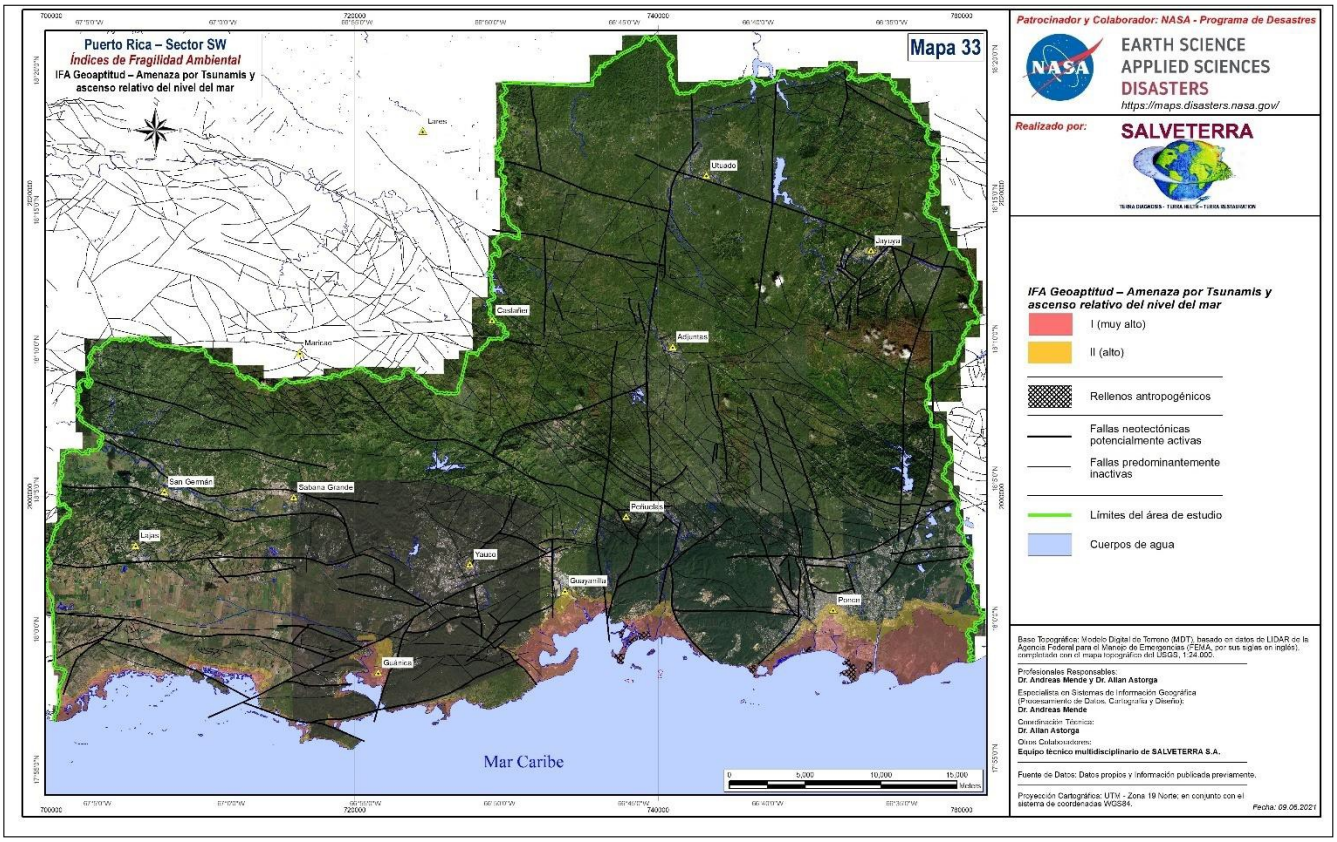


Fig. 51. *Mapa de análisis de riesgo por amenaza por tsunamis y ascenso relativo del nivel del mar.*

10.8 Riesgos asociados a eventos sísmicos y a efectos del cambio climático

Como se ha explicado antes, algunas fuentes de amenazas naturales pueden tener mecanismos generadores primarios diferentes. Por ejemplo, algunos deslizamientos se pueden producir como consecuencia del movimiento gravitacional en masa de un suelo saturado por lluvias intensas y persistentes. Por otro lado, sin la existencia de lluvia, un sismo potente puede producir y activar deslizamientos en un radio amplio en zonas de relieve. De esta manera, una misma amenaza puede tener dos fuentes generadoras diferentes.

De acuerdo con esa lógica de generación de eventos, las amenazas naturales identificadas en el área de estudio se han agrupado en dos mapas integradores distintos que, a su vez, sirven de fuente para el análisis de riesgo, según el uso que se le dé al terreno.

En la Figura 52 se muestra el mapa de riesgo potencial para distintos tipos de amenazas asociadas al desarrollo de un sismo fuerte o un terremoto en el área de estudio. El grado de amenaza se clasifica como alto y muy alto. Además, se integran las siguientes amenazas: a) sismicidad, b) deslizamientos, c) licuefacción y d) potencial de efecto de un tsunami.

Por otra parte, en la Figura 53 se observa el mapa de riesgo potencial para diferentes tipos de amenazas asociadas al desarrollo de un evento hidrometereológico o el efecto del cambio climático. En él se incluyen las siguientes amenazas: a) deslizamientos, b) inundación y paso de flujos y c) ascenso relativo del nivel del mar.

La separación de estos dos tipos de mapas de riesgo potencial es importante para establecer medidasde resiliencia humana y de infraestructura y, en particular, para la definición de parámetros críticos en el desarrollo de seguros paramétricos (ver más adelante).

11. Lineamientos sobre el aumento de la resiliencia

11.1 El concepto de la resiliencia

Desde el punto de vista psicológico, la resiliencia es la capacidad que tiene una persona o un grupo de personas, como una comunidad, de recuperarse frente a la adversidad para seguir proyectando el futuro. Desde un punto de vista más amplio y ecológico, la resiliencia se refiere a aquellas comunidades que pueden superar los cambios momentáneos en el entorno sin modificar su forma de interactuar con él. Dentro de esta misma idea de supervivencia, otras variantes del concepto en la ecología son la capacidad que tiene un sistema para autogestionarse y organizarse. Desde esta perspectiva, el sistema reuniría las herramientas que necesita para enfrentarse a los cambios sin que estos generen una transformación en las bases de dicho espacio.[6] Desde la perspectiva de la gestión del riesgo, la resiliencia está condicionada por una serie de factores (ver Figura 54).

Uno de los elementos esenciales de la gestión de la resiliencia corresponde al conocimiento del riesgo, incluyendo como parte de este, el riesgo originado por amenazas naturales (georiesgos) y efectos del cambio climático.

La resiliencia está determinada por una serie de factores diversos, como lo son: institucional (recursos, planificación, capacidad de respuesta, rendición de cuentas, estado de derecho), política (liderazgo, participación, representación), cultural (transferencia de conocimiento, sistema de creencias, costumbres de la población y sus variantes), social (comunicaciones, redes de apoyo, organización, inclusión, resolución de conflictos), medioambiental (uso de la tierra, acceso a recursos naturales, sostenibilidad), humana (seguridad alimentaria, salud, educación), económica (seguridad de los ingresos, acceso a mercados y empleo, diversidad y flexibilidad de los medios de vida, servicios financieros) y física (infraestructura, suministro de agua, saneamiento). En este contexto, la equidad también es un elemento clave de la gestión de la resiliencia.

La gestión de la resiliencia en un ámbito preventivo requiere de la preparación del sistema a partir de un conocimiento efectivo del riesgo para que este pueda soportar los efectos de un evento (como un desastre natural) y superarlo en el mejor tiempo posible sin que se dé un efecto altamente negativo y duradero la sociedad ysus distintos componentes (ver Figura 54). Como puede verse, la resiliencia se debe gestionar antes,durante y después de un evento. La atención *ex post* de un evento no es suficiente, pues es indispensable quetodos los componentes del sistema estén preparados ante un evento de desastre. A mayor preparación *ex ante*,mayor resiliencia se obtiene. De allí la importancia de conocer las fuentes de amenaza y la condición de riesgo a que se está expuesto.

[6] Modificado de: Definición de resiliencia

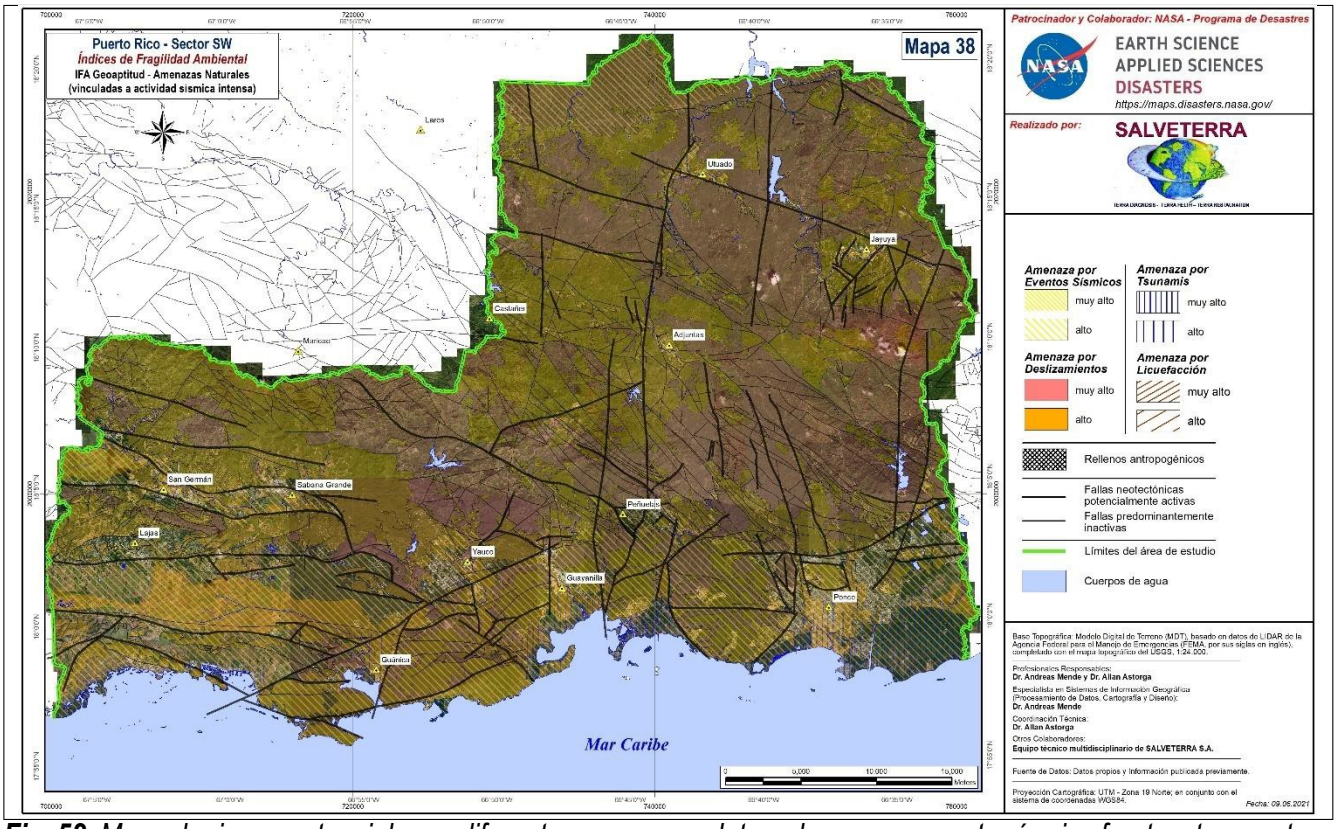


Fig. 52. *Mapa de riesgo potencial para diferentes amenazas detonadas por un evento sísmico fuerte o terremoto.*

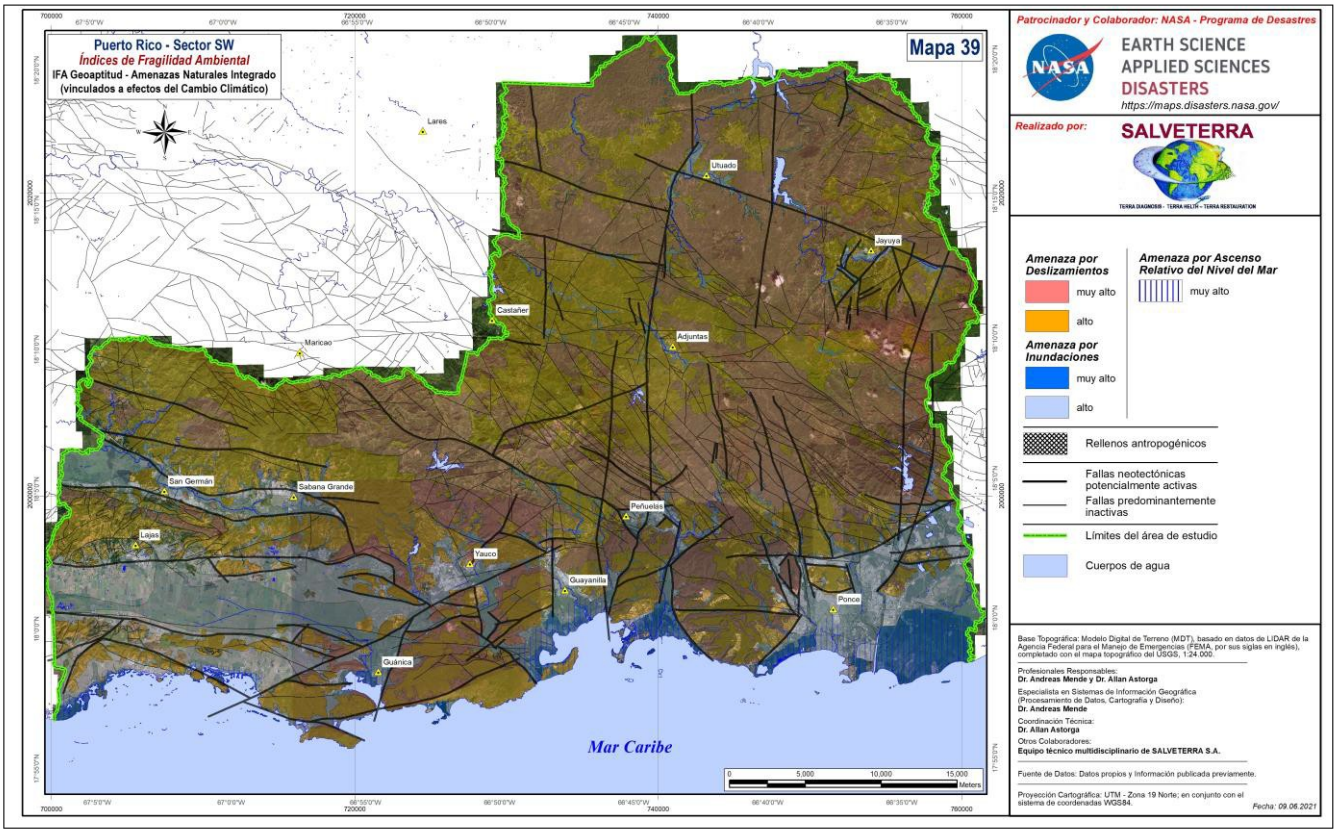


Fig. 53. *Mapa de riesgo potencial para diferentes amenazas detonadas por un evento hidrometereológico o de cambio climático.*

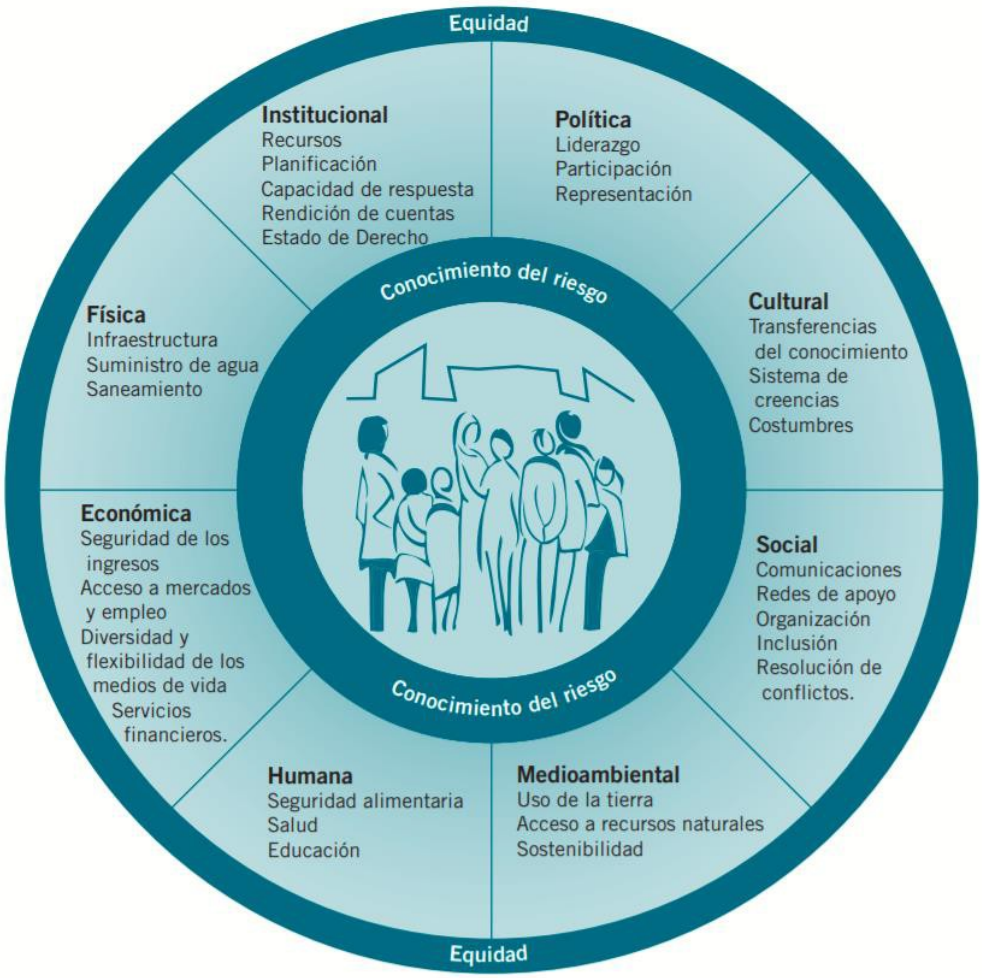


Fig. 54. *Factores que determinan la resiliencia.*

Uno de los problemas principales de Centroamérica (y también de América Latina y otros países del tercer mundo) vinculados a la resiliencia es el hecho de que, hasta hace pocos años, no se gestionaba la resiliencia *ex ante*. Por lo general, los eventos de desastre se gestionan como emergencias después de que ocurre el desastre. En muchos casos, esta circunstancia conlleva a que, ante eventos grandes, como terremotos, huracanes potentes o erupciones volcánicas, haya daños mayores a la infraestructura y, lamentablemente, una pérdida significativa de vidas. Los costos económicos de los desastres en América Latina y el Caribe son muy altos y muestran un claro crecimiento exponencial (ver Figura 55).

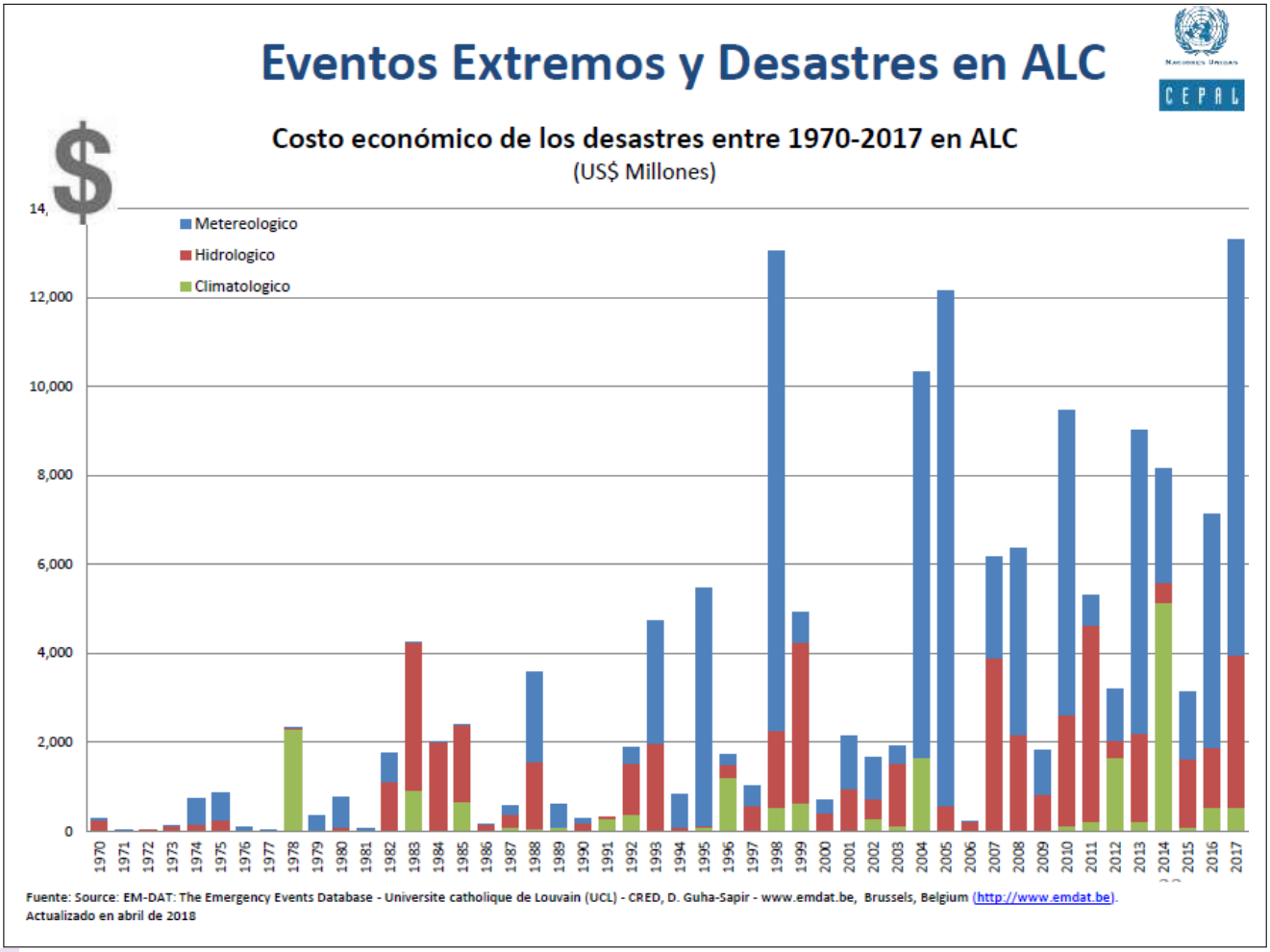
En algunos casos, el evento de desastre puede hacer retroceder al país varios años, desde el punto de vista de su crecimiento económico. Un ejemplo de un desastre para la región de Centroamérica y, particularmente, Honduras, lo es el huracán Mitch en el año 1998. Además de la pérdida de vidas humanas, los desaparecidos y los heridos, hubo millones de damnificados, así como viviendas, puentes, centros educativos, servicios de agua y de saneamiento y centros de salud afectados. Los costos de estos daños, según la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), alcanzaron un monto de $3,600 millones de dólares (77 % PIB) en Honduras y $900 millones (44 % PIB) en Nicaragua.

Otro ejemplo es el caso de Haití y el terremoto que afectó al país en el año 2010. El evento sísmico de origen cortical, con una magnitud de 7.0, provocó más de 200 mil muertes y dejó sin vivienda a más de 2 millones de

personas. Los costos de los daños se estimaron en cerca de $14 mil millones de dólares. Este evento provocó

un daño enorme al sistema social de este país, cuyas consecuencias de todo tipo, aún 10 años después, continúan sintiéndose y se han profundizado aún más con el terremoto reciente del 2021.

Puerto Rico es también un ejemplo de esta situación, debido a los efectos y daños que provocó el huracán María en el 2017 (ver Figura 56) y que afectó prácticamente a toda la isla, dejando muchas secuelas a su paso que todavía pueden sentirse (ver Main et al., 2021).



[RSP1]

***Fig. 55**. Costos económicos de eventos meteorológicos, hidrológicos y climatológicos (no incluye georiesgos) entre 1970 y 2017 en América Latina y el Caribe. Fuente: CEPAL (2018).*

Desde un punto de vista aplicado al área de estudio, el conocer la condición de riesgo existente permite aplicar el concepto de resiliencia en el marco de dos líneas principales: a) resiliencia humana y b) resiliencia de la infraestructura.

Como se ha señalado aquí, la condición de riesgo a amenazas naturales y efectos del cambio climático del área de estudio nos muestra, en resumen, que se trata de una situación de multirriesgo y que existe una susceptibilidad a los efectos en las personas y la infraestructura. Esto, en dos perspectivas: la gestión preventiva y la gestión mitigativa.

El área de estudio, a partir del conocimiento del riesgo que se ha obtenido mediante este análisis, abre la oportunidad de realizar una gestión de la resiliencia desde un punto de vista preventivo, preparando a la población y

mejorando la infraestructura, y todo el sistema en general, para enfrentar los eventos de desastre que se podrían

dar en el futuro. Se debe considerar que, de acuerdo con el Banco Mundial y por regla general, es ocho veces más caro corregir que prevenir. Desde esta perspectiva, una gestión preventiva del riesgo con el aumento de la resiliencia es de suma importancia.

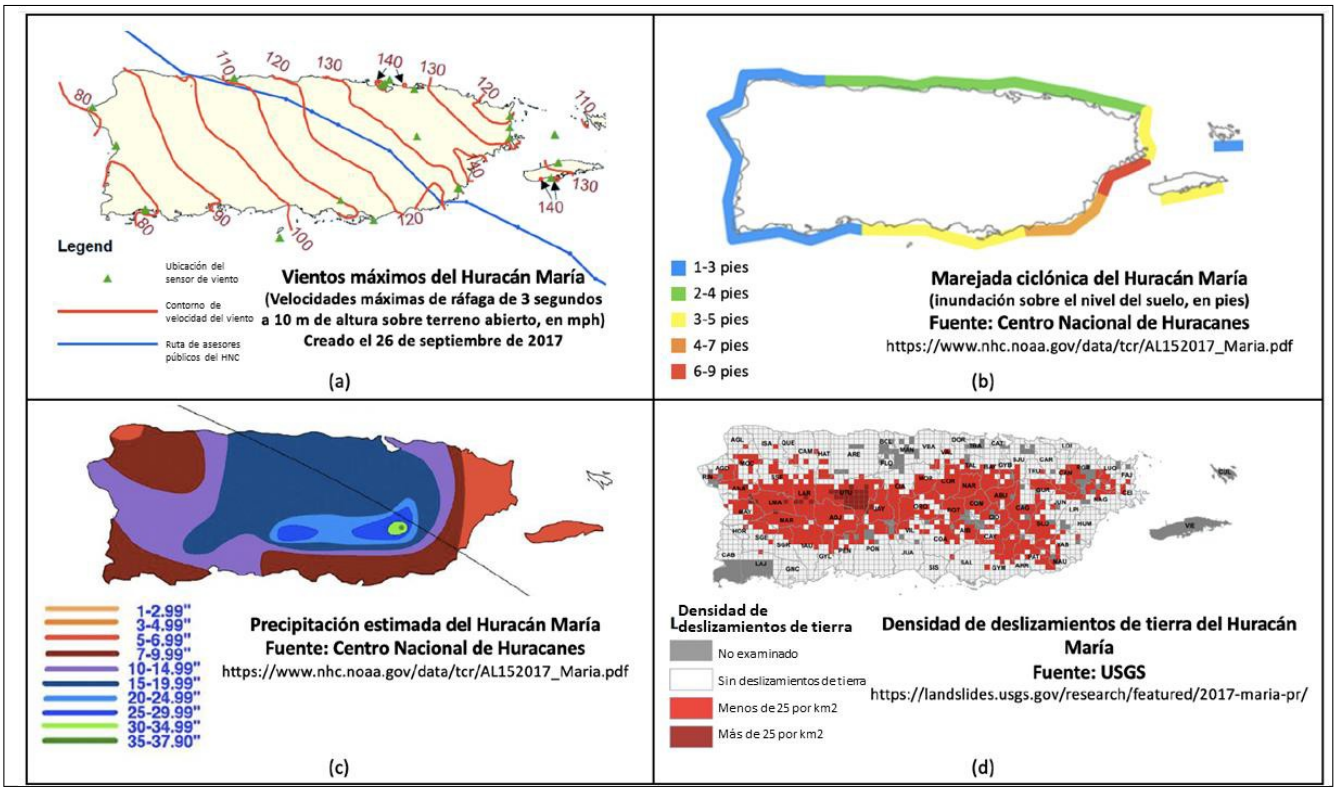


***Fig. 56**. Efectos del huracán María en Puerto Rico durante el año 2017. Fuente: Main et al. (2021).*

11.2 RESILIENCIA HUMANA

En términos de aumento de la resiliencia humana, es esencial la educación ambiental de lapoblación a través de los medios de información disponibles. Esto, en el contexto de enseñarles sobre la importancia de saber convivir con el riesgo.

Es fundamental que las personas comprendan las fuentes de amenazas que existen y cómo gestionar la información disponible para tomar las medidas preventivas.

Es un asunto común que las personas tiendan a evitar conocer sobre las amenazas naturales y los efectos negativos que pueden tener para la gente y las construcciones de diverso tipo. Sin embargo, en un territorio que presenta distintos tipos de amenazas y que es susceptible al desarrollo de detonadores de eventos de desastre, es indispensable cambiar el paradigma y generar conciencia, conocimiento y, sobre todo, desempeño efectivo ante este tipo de situaciones. En el caso de Puerto Rico, los huracanes del 2017 y otros posteriores, así como la actividad sísmica del 2019–2020, deberían permitir abordar el tema de la información ambiental y la resiliencia a todas las personas. Es muy importante el conocimiento apropiado de cómo se comporta una determinada fuente de amenaza y cómo debe gestionarse el riesgo antes y durante un evento, como respuesta de emergencia o de contingencia. La realización de simulacros periódicos es un instrumento muy útil en esta línea. No obstante, con la información detallada disponible en este estudio, es posible incrementar las acciones preventivas en términos de materia de educación ambiental para las personas. A estos efectos, es crucial

el diseño y la elaboración de planes de emergencia locales, según las condiciones de la amenaza principal que pueda afectar una comunidad determinada. Asimismo, es elemental contar con sistemas de alerta temprana cuando se trata de eventos de deslizamientos de tierra provocados por eventos climáticos.

Un elemento indispensable de la educación ambiental a llevar a cabo es que esta debe realizarse de forma proactiva y participativa, permitiendo que las mismas comunidades establezcan sus planes de emergencia locales y las estrategias de acción a seguir. Se trata de comunicar sin generar ningún tipo de temor y de que las personas cuenten con la información básica para poder actuar ante un eventual evento de desastre.

Otro aspecto de gran relevancia es el establecimiento de rutas de evacuación y la definición de lugares de encuentro seguros en caso de un terremoto o un evento climático como una tormenta tropical o un huracán. Con la debida planificación y el conocimiento de las fuentes de amenaza identificadas es posible establecer estos lugares y las rutas de movilización desde las zonas más pobladas. Esto también permitirá planificar el abastecimiento de energía, agua y alimentos hacia esas zonas de resguardo.

Un aspecto más general —desde el punto de vista de la gestión mitigativa, que debería trabajarse a una escala más amplia— corresponde al desarrollo de un seguro de resiliencia contra desastres que permita aportar recursos para superar la crisis que pueda afectar a las personas perjudicadas durante un evento de desastre. La experiencia muestra que, en muchos casos, las personas afectadas pierden todos sus recursos y tienen que "empezar de nuevo" después del desastre, pero sin recursos económicos, la situación se hace más difícil. La existencia de un fondo especial que aporte recursos básicos por un tiempo razonable podría ser estratégico para que la población afectada pueda salir de la crisis en menos tiempo y así reestablecer las condiciones de desarrollo del país o de la región o municipio en el menor plazo posible.

11.3 Resiliencia de infraestructura

Como se ha visto en este estudio técnico detallado, un porcentaje significativo (ca. 70 %) de las construcciones de diverso tipo dentro del área de estudio se ubican en condiciones de riesgo (alto a muy alto) a diferentes fuentes de amenazas naturales (deslizamientos, inundaciones y sismicidad, principalmente). Ante esto, se hace muy importante aumentar la condición de resiliencia de dichas construcciones.

Las condiciones de riesgo de las construcciones se determinan por dos factores principales: a) localización en sitio susceptible y b) la condición de resiliencia de la edificación.

En la Figura 56 se presenta el mapa de las amenazas naturales principales del área de estudio, con la indicación de las diferentes zonas en que se divide el mismo. Como se ha señalado, ese 70 % de la infraestructura del área de estudio se encuentra en alto o muy alto riesgo a algún tipo de amenaza natural por georiesgos o por efectos del cambio climático. Ante esta situación, resulta primordial atender el tema del aumento de la resiliencia de las diferentes edificaciones utilizadas por las personas.

Las medidas de aumento de la resiliencia que son vitales para incrementar la seguridad de las edificaciones existentes son las siguientes:

- Realizar, en medida de lo posible, un refuerzo estructural de las edificaciones a fin de que tengan un mejor desempeño sismorresistente.
- Contar con un seguro paramétrico que cubra cualquier tipo de edificación para que, en caso de que se afecte por un evento, se dispongan de recursos para su rehabilitación. Respecto a esto,

es importante subrayar que el presente estudio representa una base técnica útil para el establecimiento de parámetros específicos para el desarrollo de esos seguros, así como para la realización de análisis probabilísticos necesarios para definirlos con más precisión.

- En el caso de edificaciones ubicadas en sitios vulnerables a deslizamientos de tierra o desprendimientos gravitacionales masivos se debe realizar una evaluación local para establecer medidas correctivas omitigativas que reduzcan al máximo las condiciones de susceptibilidad a este tipo de eventos.
- Como parte de esas medidas, es importante el manejo de los drenajes de aguas superficiales y la estabilización de taludes.

En el caso de edificaciones nuevas, sería beneficioso que se integren los resultados de esteestudio para desarrollar una normativa que defina lineamientos específicos a incorporar en los diseños y en la planificación de obras de construcción para mejorar su condición de resiliencia desde un inicio, de acuerdo con su ubicación.

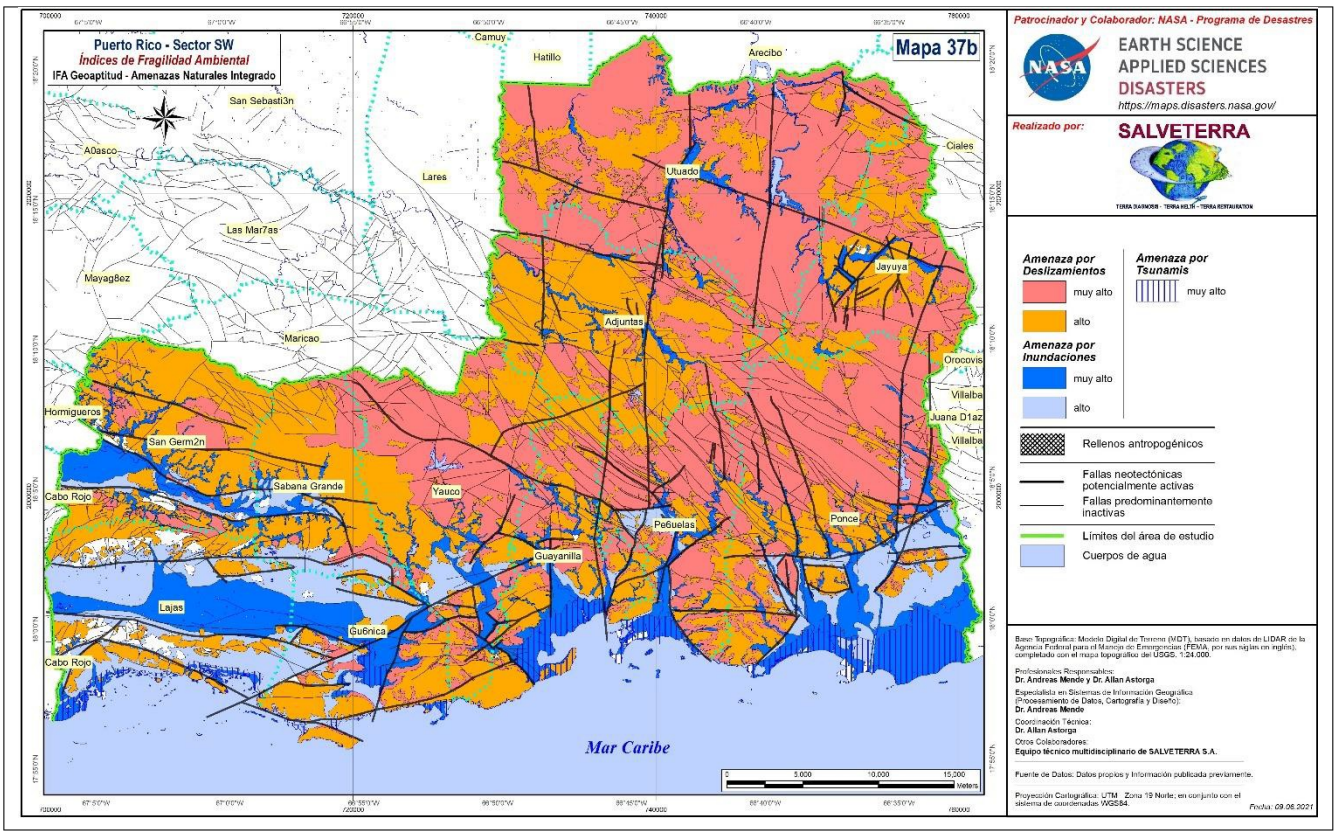


Fig. 56. *Mapa de amenazas naturales integrado con la indicación de los límites de los municipios del suroeste de Puerto Rico.*

En cuanto al seguro paramétrico, cabe señalar que, con la información disponible es posible establecer los criterios sísmicos y climáticos para fijar esos parámetros. Se considera que dada la cantidad de construcciones que requerirían este tipo de seguro, es factible desarrollar un seguro de costo bastante bajo y proporcional al costo de la obra.

La mayor importancia de este tipo de seguros paramétricos y los reaseguros es que permiten proteger las edificaciones bajo la premisa de que los desastres no ocurren todos al mismo tiempo y en una

circunstancia generalizada. De ahí la enorme importancia de que puedan ser utilizados por la mayor cantidad de usuarios.

11.4 IMPORTANCIA DE LOS SEGUROS PARAMÉTRICOS

En un documento reciente del Banco Mundial, se aclara bastante bien lo que es este tema: los seguros paramétricos ofrecen una cobertura ante riesgos catastróficos. El pago de los seguros paramétricos se basa en la intensidad del evento (por ejemplo, la velocidad de los vientos huracanados, la magnitud del terremoto, el volumen de las precipitaciones) o en el monto de la pérdida ocasionada por el evento, calculada por un modelo predeterminado. Cabe subrayar que en el caso de este estudio y como se indicó previamente, es posible derivar los valores límite que fijan la intensidad del evento, por lo que se puede afirmar que se tiene la base técnica para desarrollar este tipo de seguros en el área de estudio.

Como se indica en el documento del Banco Mundial, a diferencia de los seguros tradicionales que requieren de un avalúo *in situ* de las pérdidas individuales, el seguro paramétrico avalúa las pérdidas a través de una metodología predeterminada de variables exógenas, tanto para el asegurado como para la aseguradora.

Los seguros paramétricos ayudan a limitar el impacto financiero de eventos devastadores como ciclones tropicales, terremotos y lluvias extremas que afectan a los países. Además, ofrecen desembolsos inmediatos cuando ocurre un desastre y se activa una póliza.

Se explica además que la cobertura de seguro paramétrico se puede proveer a través de un contrato de seguro o reaseguro, así como mediante la emisión de un bono de catástrofe. Los gobiernos no necesitan entregar un listado detallado de los activos u otra información antes de que entre en vigencia el seguro;solo deben firmar un formulario durante todo el proceso de reclamo. El cálculo de las indemnizaciones es objetivo, basado en la selección de unos parámetros simples que son ampliamente divulgados al dominio público. Estos parámetros se toman de organismos mundiales especializados en su estimación, así como en un conjunto de fórmulas que constituyen parte de la póliza.

También es importante subrayar lo que indica el Banco Mundial respecto a que los pagos no están explícitamente vinculados a daños y existe el riesgo de que no haya un pago si las condiciones de activación no se cumplen. Por lo general, los seguros paramétricos son más económicos que los seguros tradicionales equivalentes. Las indemnizaciones se calculan y pagan con mayor celeridad porque el pago no depende de los avalúos de pérdidas tras el desastre, un proceso que podría tomar meses o años.

Se señala que las pólizas tienen un costo en este tipo de seguros. Las primas de las pólizas se basan en criterios de riesgo para la fijación de precios y son determinadas por el nivel deseado de cobertura en términos de probabilidad de un evento desencadenante. Por ejemplo, es más caro comprar seguros para eventos frecuentes en comparación con eventos más esporádicos. Desde este punto de vista, con la información detallada generada en este estudio, es posible implementar este tipo de seguro paramétrico en poco tiempo.

De acuerdo con el Banco Mundial, existe una opción de seguro paramétrico para Centroamérica y el Caribe conocido como la Facilidad de Seguros contra Riesgos Catastróficos en el Caribe (CCRIF, por sus siglas en inglés), un mecanismo para agrupar los riesgos catastróficos de varios países, el cual ofrece cobertura contra terremotos, ciclones tropicales y exceso de lluvias a los gobiernos del Caribe y Centroamérica. El CCRIF ayuda a mitigar los problemas de liquidez a corto plazo que sufren las pequeñas

economías en desarrollo después de grandes desastres causados por amenazas naturales. El mecanismo de seguro paramétrico del CCRIF le permite ofrecer un pago rápido para ayudar a los miembros a financiar su respuesta inicial de desastres y mantener las funciones básicas del gobierno después de un evento catastrófico.

De esta manera, el Banco Mundial apoya mecanismos para agrupar los riesgos catastróficos para varios países, específicamente a través del Programa de Aseguramiento Contra Riesgo Catastrófico en Centroamérica y el Caribe, y se espera mejorar la accesibilidad a un instrumento de transferencia de riesgos soberanos eficiente y de alta calidad ante la ocurrencia de ciclones tropicales, terremotos o excesos de lluvia para los países miembros del Consejo de Ministros de Hacienda o Finanzas de Centroamérica, Panamá y la República Dominicana (COSEFIN) y de la Comunidad del Caribe (CARICOM), y fortalecer la capacidad de los Ministerios de Finanzas para que desarrollen y ejecuten estrategias de seguros y financiación de riesgos catastróficos.

Es importante señalar que este camino no reemplaza la posibilidad de que se desarrolle un fondo especial de resiliencia contra desastres basado en un sistema de seguro solidario y reaseguros internacionales.

12. Marco Sendai, aplicación de los mapas de riesgo y fases subsiguientes

12.1 MARCO SENDAI[7]

La Oficina de Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres (UNDRR) señala que:

> El Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015-2030 (Marco de Sendai) fue el primer acuerdo principal de la agenda de desarrollo posterior a 2015 y ofrece a los Estados miembros una serie de acciones concretas que se pueden tomar para proteger los beneficios del desarrollo contra el riesgo de desastres.
>
> El Marco de Sendai va de la mano con otros acuerdos de la Agenda 2030, tales como el Acuerdo de París sobre el Cambio Climático, la Agenda de Acción de Addis Abeba sobre Financiamiento para el Desarrollo, la Nueva Agenda Urbana y los Objetivos de Desarrollo Sostenible. Este marco recibió el respaldo de la Asamblea General de la ONU después de la tercera Conferencia Mundial sobre la Reducción del Riesgo de Desastres (WCDRR, porsus siglas en inglés), celebrada en 2015, y fomenta lo siguiente:
>
> *La reducción sustancial del riesgo de desastres y de las pérdidas ocasionadas por los desastres, tanto envidas, medios de subsistencia y salud como en bienes económicos, físicos, sociales, culturales y ambientales de las personas, las empresas, las comunidades y los países.*
>
> Asimismo, el Marco de Sendai reconoce que en el Estado recae la función principal de reducir el riesgo de desastres, pero es una responsabilidad que debe compartirse con otros actores, tales como los gobiernos locales,el sector privado y otros grupos interesados.
>
> El Marco de Sendai es el instrumento sucesor del Marco de Acción de Hyogo 2005-2015: Aumento de la resiliencia de las naciones y las comunidades ante los desastres (MAH) y es el resultado de una serie de consultas con diversos grupos interesados que dieron inicio en marzo de 2012, así como de las negociaciones intergubernamentales realizadas entre julio de 2014 y marzo de 2015. A solicitud de la

Asamblea General de la ONU, este proceso contó con el apoyo de UNDRR. La ONU ha encomendado a UNDRR que preste apoyo a la implementación, el seguimiento y la revisión del Marco de Sendai.

En la Tabla 4 se presentan las prioridades del Marco SENDAI en términos de la gestión de riesgo de desastres.

[7] https://www.undrr.org/es/implementando-el-marco-de-sendai/que-es-el-marco-de-sendai-para-la-reduccion-del-riesgo-de

Tabla 4.

Prioridades del Marco SENDAI de las Naciones Unidas

Prioridad 1.	**Comprender el riesgo de desastres**	Las políticas y las prácticas para la **gestión del riesgo de desastres** deben basarse en una comprensión del riesgo de desastres en todas sus dimensiones de vulnerabilidad, capacidad, grado de exposición de las personas y los bienes, las características de las amenazas y el entorno. Ese conocimiento se puede aprovechar para la evaluación, la prevención y la mitigación del riesgo, así como para la preparación y la respuesta en caso de desastres.
Prioridad 2.	**Fortalecer la gobernanza del riesgo de desastres para gestionarlo**	**La gobernanza del riesgo de desastres** en los planos nacional, regional y mundial es de gran importancia para la prevención, la mitigación, la preparación, la respuesta, la recuperación y la rehabilitación. Se fomenta la colaboración y la formación de alianzas.
Prioridad 3.	**Invertir en la reducción del riesgo de desastres para la resiliencia**	**Las inversiones públicas y privadas** para la prevención y la reducción del riesgo de desastres mediante medidas estructurales y no estructurales son esenciales para aumentar la resiliencia, económica, social, sanitaria y cultural de las personas, las comunidades, los países y sus bienes, así como del medio ambiente.
Prioridad 4.	**Aumentar la preparación para casos de desastre a fin de dar una respuesta eficaz y "reconstruir mejor" en los ámbitos de la recuperación, la rehabilitación y la reconstrucción**	**El crecimiento constante del riesgo de desastres** pone de manifiesto la necesidad de fortalecer aún más la preparación para casos de desastres, adoptar medidas con anticipación a los acontecimientos y asegurar que se cuente con la capacidad suficiente para una respuesta y una recuperación eficaces a todo nivel. La fase de recuperación, rehabilitación y reconstrucción es una oportunidad fundamental para reconstruir mejor, entre otras cosas mediante la integración de la reducción del riesgo de desastres en las medidas de desarrollo.

***Fuente**: https://www.undrr.org/es/implementando-el-marco-de-sendai/que-es-el-marco-de-sendai-para-la-reduccion-del-riesgo-de*

En materia de metas e indicadores el Marco SENDAI se enfoca en adoptar medidas sobre las tres dimensiones del riesgo de desastre:

a) exposición a las amenazas,

b) vulnerabilidad y capacidad de respuesta a un evento de desastre y

c) características de las amenazas.

Todo esto para:

(i) poder prevenir la creación de nuevos riesgos,

(ii) para reducir los riesgos existentes y

(iii) para aumentar la resiliencia.

Las siete metas mundiales son las siguientes:

1. **Reducir considerablemente la mortalidad mundial causada por desastres** para 2030 y lograr reducir el promedio mundial para cada 100,000 personas en el decenio 2020- 2030 respecto del periodo 2005–2015.

2. **Reducir considerablemente el número de personas afectadas a nivel mundial para 2030** y lograr reducir el promedio mundial para cada 100,000 personas en el decenio 2020–2030 respecto del periodo 2005–2015.
3. **Reducir las pérdidas económicas causadas directamente por los desastres** en relación con el producto interno bruto (PIB) mundial para 2030.
4. **Reducir considerablemente los daños causados por los desastres en las infraestructuras vitales y la interrupción de los servicios básicos**, como las instalaciones de salud y educativas, incluso desarrollando su resiliencia para 2030.
5. **Incrementar considerablemente el número de países que cuentan con estrategias de reducción de riesgo de desastres** a nivel nacional y local para 2020.
6. **Mejorar considerablemente la cooperación internacional para los países en desarrollo** mediante un apoyo adecuado y sostenible que complemente las medidas adoptadas a nivel nacional para la aplicación del Marco SENDAI para 2030.
7. **Incrementar considerablemente la disponibilidad de los sistemas de alerta temprana sobre amenazas múltiples** y de la información y las evaluaciones sobre el riesgo de desastres transmitidas a las personas, y el acceso a ellos, para 2030.

En este contexto del Marco SENDAI sobre el enfoque de la amenaza, la vulnerabilidad–exposición y el riesgo, en lo que sigue destacan los principales elementos de aplicación de los mapas de amenazas (de alta resolución) que se han elaborado para el área de estudio.

12.2 Aplicación de mapas de alta resolución sobre amenazas

Como se ha visto hasta aquí, el producto principal de este estudio ha sido la elaboración de mapas de amenazas naturales vinculados a los factores de georiesgos y los efectos del cambio climático. Los mapas se han elaborado por medio de una metodología sistemática y de escala detallada que facilita el proceso del análisis del riesgo, cuando se comparan con las imágenes de uso actual del suelo, donde se puede constar la existencia de infraestructura en las zonas de amenaza alta y muy alta.

Estos mapas de amenazas representan un primer producto que requeriría ser complementado con datos nuevos para realizar un análisis de riesgo más integral. Esa información complementaria correspondería con datos de amenazas antrópicas y sobre vulnerabilidad social de las comunidades. Sin embargo, la información cartográfica de diversas amenazas naturales identificadas permite lograr un avance importante en el tema de la gestión del riesgo, tanto preventiva como de aumento de la resiliencia.

Un primer elemento que debe aclararse acerca de los mapas de amenazas detallados, como los generados en este estudio, es que no deben ser utilizados para generar pánico o preocupación por parte de las personas, comunidades y autoridades locales o nacionales.

Dichos mapas señalan las áreas en donde las condiciones naturales determinan que existe mayor potencial o probabilidad de que ocurra un evento de desastre (deslizamiento, inundación, ruptura en superficie, licuefacción, tsunami, ascenso relativo del nivel del mar, entre otros). Es importante recalcar que la identificación del terreno susceptible a un evento no significa que el evento pueda ocurrir en un determinado plazo. Solo que existe mayor probabilidad de ocurrencia, sobre todo si se da un efecto detonador como lluvias intensas o un sismo fuerte.

Desde este punto de vista, los mapas de amenazas generados tienen un doble potencial de aplicación. Por un lado, como ya se explicó, para lograr el objetivo del aumento de la resiliencia humana y de la infraestructura que se encuentra en las zonas de alta y muy alta amenaza. Por otro lado, para el uso aplicado durante situaciones de alerta establecidos por las autoridades de emergencia locales o nacionales.

En la Figura 57 se presenta un diagrama ilustrativo sobre la aplicación de los mapas de amenazas naturales de escala detallada para los casos de aplicación de sistemas de alerta emitidos por las autoridades de emergencia local o nacional. En la parte derecha del diagrama, se señalan los cuatro estados de alerta que se utilizan internacionalmente para establecer las acciones de preparativos y respuesta. Los estados de alerta se ordenan en cuatro colores: verde (información), amarillo (preparación), naranja (movilización o contención) y rojo (evacuación y respuesta). Los sistemas de alerta son establecidos por las autoridades gubernamentales de orden estatal (abarca todo el país o regiones de este) o de tipo local (municipios). Estos obedecen a diferentes fuentes detonadoras de situaciones de alerta o de emergencia como, por ejemplo, eventos hidrometeorológicos (huracanes, tormentas, depresiones tropicales), terremotos, erupciones volcánicas, tsunamis, entre otros.

Cuando se activa la alerta, estas autoridades cumplen varias acciones simultáneas. Una de ellas corresponde a la centralización de la información sobre la fuente detonadora de la situación y su monitoreo continuo. Ello, para generar boletines de comunicación con el fin de mantener a toda la población informada y que tome acciones sobre el estado de alerta que se defina y las medidas que este implica, según evolucione la situación.

En este punto, los mapas de riesgo generados en este estudio cumplen una función importante en la medida en que definen las áreas más susceptibles a la ocurrencia de un evento, como el caso de deslizamientos o inundaciones (Figura 57). Resulta de gran relevancia que la población que se encuentre o se movilice por esas zonas, se entere de la situación y sepa las acciones que debe tomar con la debida antelación.

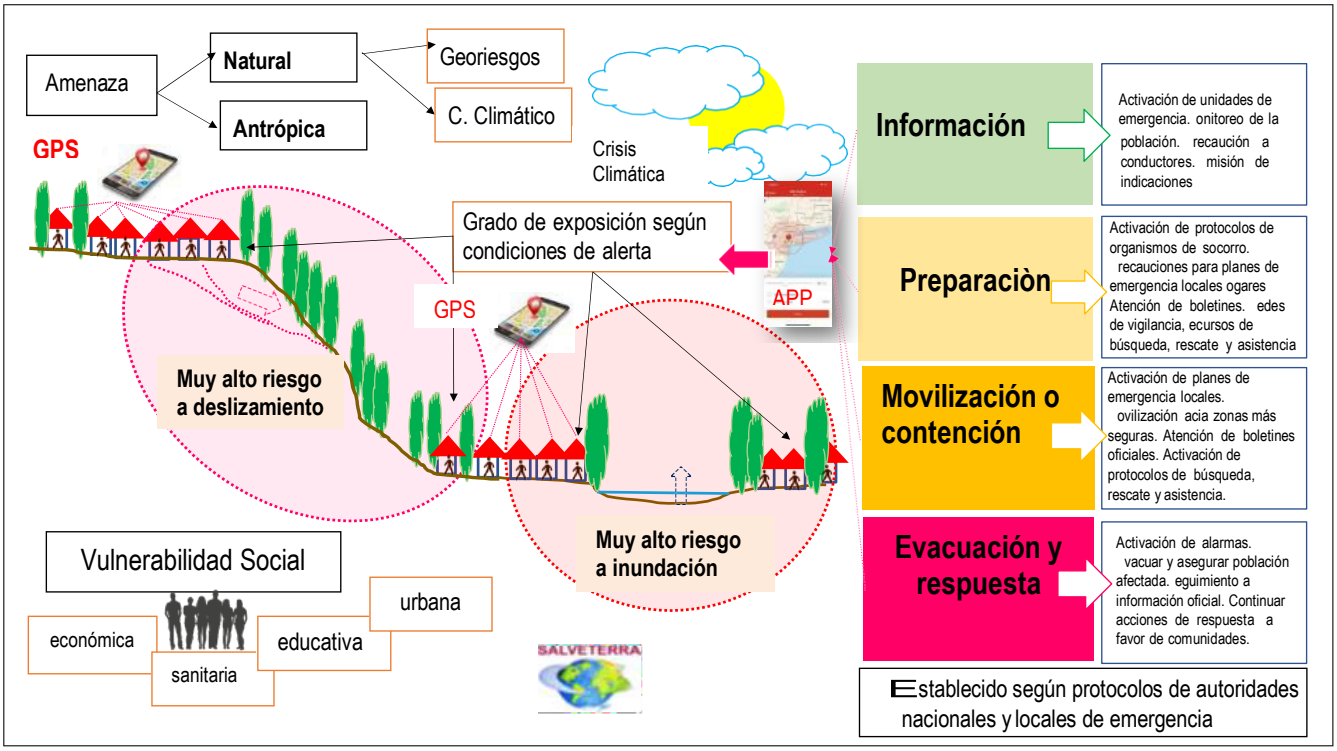


Fig. 57. *Diagrama ilustrativo sobre la aplicación de los mapas de amenazas naturales de escala detallada para los casos de aplicación de sistemas de alerta emitidos por las autoridades de emergencia local o estatal.*

Los sistemas de comunicación convencionales de las autoridades de alerta o de emergencia implican diversos medios, incluyendo el uso de dispositivos móviles. No obstante, cuando se dispone de mapas de riesgo de escala detallada, este insumo, con el uso del GPS del dispositivo móvil por medio de una aplicación (*app*), permite al usuario precisar mejor su situación. Con ello, es posible comunicar el estado de alerta y las acciones que deben tomarse, incluyendo la aplicación eventual de un plan de emergencia preelaborado y un plan de evacuación.

La aplicación es funcional no solo para las personas que viven en una zona de riesgo (alto y muy alto), sino también para quienes se movilizan por una zona de ese tipo. Además, como instrumento de información, permite abrir un canal de comunicación que facilite la comprensión de las fuentes de amenaza y su comportamiento, así como de la gestión del riesgo y su percepción, con lo cual es posible mejorar la convivencia con el riesgo y el aumento de la resiliencia.

Como se puede ver, los mapas de riesgo o amenaza de escala detallada resultan de gran utilidad en la gestión del riesgo durante un estado de alerta o de emergencia. Con ello, se hace una mejor aproximación al objetivo primordial de salvar vidas ante los desastres.

12.3 Fases subsiguientes

A fin de lograr un proceso integral de gestión del riesgo, como complemento al estudio de cartografiado realizado aquí, es necesario desarrollar otras fases.

Una de ellas, corresponde al componente de la **vulnerabilidad social**. Este tema comprende un estudio socioeconómico de la comunidad y sus características. Incluye temas como la vulnerabilidad económica, sanitaria, educativa y urbana que, a su vez, comprenden aspectos como el hacinamiento y el tipo de construcciones implicadas.

Conocer si hay poblaciones con mayor vulnerabilidad que otras y sus limitaciones es de gran importancia para afinar los planes de contingencia, emergencia y de evacuación.

No toda la población en condición de alto o muy alto riesgo puede ser tratada o atendida de la misma forma. De ahí la gran importancia de adecuar los planes de respuesta a los resultados del estudio de vulnerabilidad social. Además, esta información social también es vital utilidad para la planificación e implementación de medidas de aumento de la resiliencia, tanto humana como de infraestructura.

Otra de las fases ulteriores a desarrollar comprende el estudio de **riesgo antrópico,** que trata de identificar, localizar y caracterizar las potenciales fuentes de desastre de origen humano. Por ejemplo, la existencia de una zona industrial que utilice sustancias químicas contaminantes y peligrosas puede representar una fuente de amenaza potencial a una comunidad cercana en el caso de un accidente.

De igual forma, una planta de almacenamiento o trasiego de sustancias hidrocarburadas puede representar una fuente de amenaza por explosión e incendio a una comunidad cercana. Un pantano mal drenado y contaminado

o un vertedero de basura no controlado pueden representar fuentes de vectores que afecten la salud de una comunidad cercana.

Al igual que las fuentes de amenazas naturales, las fuentes de amenazas antrópicas pueden ser localizadas en mapas detallados y evaluadas respecto a las comunidades circunvecinas para determinar su condición de riesgo potencial. Esta información resulta de gran importancia para gestionar el riesgo a escala local, dentro de las comunidades y para planificar con mayor precisión las acciones de respuesta ante eventos de desastre.

La profundización del detalle de la información sobre las fuentes de amenazas naturales y antrópicas, así como de vulnerabilidad social, son de gran importancia para el desarrollo y mejoramiento continuo del sistema de información para la gestión del riesgo. Un sistema de información que debe tener como base determinativa el uso de una aplicación que potencie el hecho real de que los dispositivos móviles son el instrumento de información más utilizado. Este paso es de gran relevancia, ya que la gestión del riesgo y, en general, todos los alcances señalados por el Marco SENDAI se basan en que exista comunicación e información con todos los usuarios del sistema. Conforme mayor sea la información y la gestión del riesgo que se realice, más éxito se tendrá en la consecución de las metas planteadas y en un mejor plazo. Aprender a convivir con el riesgo y todas sus facetas es un paso estratégico en el desarrollo de la resiliencia y su continuo aumento.

Existen otras fases referidas aquí previamente, como lo es el desarrollo de un sistema de seguros paramétricos contra desastres y fondos de atención de desastres incluidos dentro de reaseguros (ver atrás).

En el caso de Puerto Rico, como recomendación final, sería de una enorme importancia que se promoviera una ley de resiliencia contra desastres que establezca un marco jurídico ágil y efectivo que permita integrar esfuerzos y generar recursos para el desarrollo de todo un sistema de gestión de riesgo y de fondos para la atención de los desastres.

13. Conclusiones principales y recomendaciones

El área de estudio corresponde al suroeste de Puerto Rico y tiene una superficie de 1.781 km^2, con una población cercana a los 300 mil habitantes. Está conformada por once municipios: San Germán, Lajas, Sabana Grande, Guánica, Yauco, Guayanilla, Peñuelas, Adjuntas, Utuado, Jayuya y Ponce.

El suroeste de Puerto Rico forma parte de un sistema tectónico complejo, conformado por un área ancestral de arco y antearco del Mesozoico que fue tectónicamente deformada y que ahora conforma la zona trasarco referente a la subducción actual de la trinchera de Puerto Rico, desde el periodo Terciario Superior a la actualidad. Como tal, la zona está constituida por un basamento de litosfera oceánica atrapada y representada principalmente por serpentinitas, sobre las cuales se presentan rocas volcánicas de un arco volcánico que evolucionó desde una geoquímica de arco primitivo a un arco volcánico calco-alcalino maduro. También se presentan abundantes y diversas rocas sedimentarias clásticas y carbonatadas del relleno de la cuenca antearco y, además, batolitos de rocas intrusivas ácidas que muestran la evolución y madurez del arco volcánico hacia el final del Terciario Inferior. El Terciario Superior está representado por sucesiones relativamente espesas de rocas marinas carbonatadas y poco profundas que marcan un cambio importante en la evolución tectónica del arco de islas de Puerto Rico.

El análisis de identificación de amenazas naturales para el área de estudio, a escala 1:5,000 y el análisis de riesgo multifactorial aplicado permiten concluir que el área de estudio es una zona multirriesgo y que cerca del 60 al 70 % de las edificaciones de esta se encuentran en condiciones de alto a muy alto riesgo a diferentes fuentes de amenazas naturales (georiesgos) y efectos del cambio climático.

Entre las fuentes de amenaza principales se encuentran los terremotos, que provienen de cinco fuentes diferentes: a) la subducción de placas en la trinchera de Puerto Rico, b) el sistema transtensivo de Mona, c) la

subducciòn oblicua de la trinchera de los Muertos, d) el sistema transtensivo de las Islas Vírgenes y e) las fallas geológicas del suroeste de Puerto Rico, asociadas aquí de forma preliminar con el denominado sistema transtensivo de Guayanilla. Los datos de la sismicidad histórica de Puerto Rico indican que, por siglo, se pueden producir aproximadamente una docena de eventos con magnitudes mayores a 5.0, por lo que es de esperar que se presenten eventos de este tipo en el futuro. Otra de las fuentes de amenaza importantes corresponde al desarrollo potencial de deslizamientos. Ello se debe al relieve notable que conforma gran parte del territorio bajo estudio y de las fuertes fracturas que presentan las unidades de roca, así como el desarrollo de cortezas de meteorización susceptibles a deslizamientos. Estos pueden ser detonados por eventos climáticos como lluvias persistentes, tormentas tropicales o huracanes, o bien, por eventos sísmicos o una combinación de los dos.

Por las características geológicas que tiene Puerto Rico, desde el final del Terciario Inferior hasta la actualidad y, en particular, por el tipo de subducción oblicua de placas que se presenta tanto en la trinchera de Puerto Rico como en la de Muertos, no existe potencial para el desarrollo de actividad volcánica en la isla. Desde este punto de vista, no se presenta esta fuente de amenaza en el área de estudio.

Se presentan, además, otras fuentes de amenazas naturales, tales como: las inundaciones y el paso de flujos desedimentos, la licuefacción, los tsunamis y el ascenso relativo del nivel del mar, este último originado por los efectos del calentamiento global durante los últimos dos siglos.

La identificación de las condiciones de riesgo observadas para el área de estudio tiene como fin primordial el establecimiento de información útil para el aumento de la resiliencia humana y de la infraestructura.

Desde el punto de vista de resiliencia humana, es de suma importancia promover la educación ambiental en la población, partiendo del concepto de aprender a convivir y gestionar el riesgo. Es fundamental que, en función de la fuente de amenaza, se promueva el desarrollo de planes de emergencia local y de mitigación en caso de un desastre. A la par con esta acción, también resulta importante establecer o definir los sitios seguros de reunión y de gestión de la emergencia durante un evento de desastre. Asimismo, es necesario el desarrollo de un Seguro de Resiliencia contra Desastres a fin de que el Estado cuente con recursos económicos en caso de un evento catastrófico.

En cuanto a la resiliencia de infraestructura y basándonos en los resultados del estudio de análisis de riesgo realizado, es relevante que se establezcan medidas concretas para incrementar la resiliencia de las edificaciones y, a su vez, aumentar su condición de seguridad. De igual forma, es muy importante el desarrollo de un sistema generalizado de seguros paramétricos y reaseguros que permitan cubrir daños, aunque sea parcialmente, en caso de un desastre.

Un capítulo especial requiere el aumento de la resiliencia de la infraestructura estratégica, como las líneas de electricidad, de agua y de transporte, así como de las edificaciones esenciales como la infraestructura de instituciones hospitalarias y educativas, entre otras.

Finalmente, es de particular importancia destacar que, dadas las condiciones geológicas y de geoaptitud del área de estudio, sería muy relevante poder extender el análisis realizado a toda la isla de Puerto Rico, especialmente a las zonas más urbanizadas como San Juan. Esto a fin de amplificar y detallar las medidas de Gestión Preventiva del Riesgo y del aumento de la resiliencia. Además, desde el punto de vista de planificación territorial, es recomendable completar la aplicación de la metodología empleada en el estudio (SALVETERRA) para generar las bases de un ordenamiento ambiental territorial que brinde a los municipios instrumentos para un desarrollo urbano más sostenible, así como otros datos importantes como las fuentes de agua, el tratamiento de

aguas residuales, el desarrollo de una agricultura y ganadería sustentables, el desarrollo geoturístico, el potencial de energía geotérmica, el desarrollo de bosques y la recuperación de ecosistemas como forma de mitigar el cambio climático y el daño a la ecosfera terrestre.

14. Referencias principales

ÁLVAREZ, J.A., HENAR, A. & MARTÍNEZ, J.L. (2019): Evolución tectónica de Centroamérica. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra.* AEPECT 27.3.2019. 350-5 p

ASTORGA, A., (1997): *El puente-istmo de América Central y la evolución de la Placa Caribe (con énfasis en el Mesozoico)*. Profil 12: 1-212, Stuttgart.

ASTORGA, A. (2020): *Caracterización del recurso geotérmico.* Proyecto de redacción de una ley para el uso de la energía geotérmica de baja y media entalpía en Costa Rica, 10 p.

COTILLA, M.O. & CORDOBA, D. (2010): Análisis morfotectónico de la Isla Puerto Rico, Caribe. *Revista Geofísica* 62: 79 – 123.

DEMETS, C., GORDON, R. & ARGUS, D. (2010). Geologically current plate motions. *Geophysical Journal International*, 181: 1 – 80.

GIUNTA, G. & **ORIOLI S.** (2011): "The Caribbean Plate Evolution: Trying to Resolve a Very Complicated Tectonic Puzzle." *New Frontier in Tectonic Research: General Problems, Sedimentary Basins and Island Arcs*, edited by Evgenii V. Sharkov, 2011. 23 p.

GURNIS, M., **HALL, C. & LAVIER, L.** (2004): Evolving force balance during incipient subduction. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. Volume 5, Number 7, 10 July. 31 p.

GRANJA-BRUNA, J.L. (2005): *Geodinámica del borde noreste de la Placa Caribe*. Trabajo de investigación de tercer ciclo. Programa de doctorado: Geología dinámica y ambiental. Universidad Complutense de Madrid. 127 p.

GRANJA-BRUÑA, J.L., TEN BRINK, U.S., MUÑOZ-MARTIN, A., CARBÓ-GOROSABEL, A. & LLANES ESTRADA, P. (2015): Shallower structure and geomorphology of the southern Puerto Rico offshore margin. *Marine and Petroleum Geology*, 67: 30 – 56 p.

GRINDLAY, N., **MANN, P., DOLAN J.F. & VAN GESTEL, J.P**. (2005): Neotectonics and subsidence of the northern Puerto Rico – Virgin Islands margin in response to the oblique subduction of high-standing ridges. *Geological Society of America*, 385: 31 – 60.

LEWIS, J.F., Draper, G., Proenza, J.A., Espaillat, J. & Jimenez, J. (2006): Ophiolite – Related Ultramafic Rocks (Serpentinites) in the Caribbean Region: A Review of their Occurrence, Composition, Origin, Emplacement and Ni-Laterite Soil Formation. *Geologica Acta*, Vol. 4. N° 1 – 2: 237 – 263.

LEWIS, J.F. & DRAPER, G. (1990): Geology and tectonic evolution of the northern Caribbean margin. En: DENGO, G. & CASE, J.E.: *The Geology of North America.* Vol. H.: The Caribbean region. The Geological Society of America: 77 – 140.

LÓPEZ, A. M., HUGHES, S., VANACORE, E. (2020): Puerto Rico's Winter 2019-2020 Seismic Sequence Leaves the Island on Edge, Temblor, http://doi.org/10.32858/temblor.064.

MAIN, J.A., DILLARD, M, KULIGOWSKI, E., DAVIS, B, DUKES, J., HARRISON, K., HELGESON, J., JOHNSON, K., LEVITAN, M.,MITRANI-REISER, J., WEAVER, S., HUN YEO, D., APONTE-BERMUDEZ, L.D., CLINE, J. & KIRSCH T. (2021): Aprendiendo del impacto del huracán María en Puerto Rico: Un informe de progreso. Publicación especial NIST 1262, 77 P.

MATTSON, P.H. (1967): Cretaceous and lower Tertiary stratigraphy in west–central Puerto Rico. *Geological Survey Bulletin*. 1254 – B. 42 p.

PÉREZ-ESTAUN, A., TAVARES, I., GARCÍA-CORTÉZ, A. & HERANAIZ-HUERTA, P.P. (2002): Evolución geológica del margen Norte de la Placa del Caribe, República Dominicana. *Acta Geológica Hispánica*, Vol. 37, Núm. 2, p. 79- 80.

RIEDEL, W. (1929): Zur Mechanik geologischer Brucherscheinungen. - Zentralblatt fuer Mineralogie, Geologie und Palaeontologie p.354-368 Stuttgart.

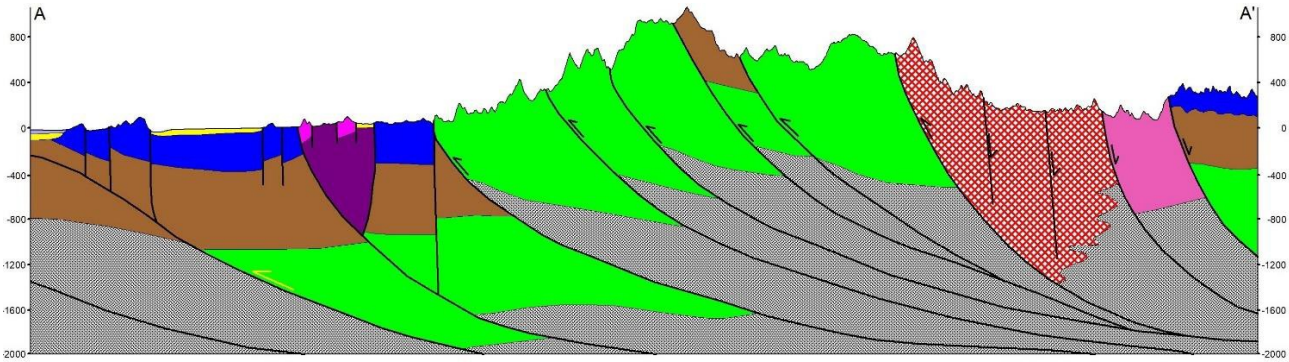
ROSS, M. & **SCOTESE, C.R**. (1988): A hierarchical tectonic model of the Gulf of Mexico and Caribbean region. *Tectonophysics*, 155: 139 – 168.

SALVETERRA (febrero 2020): SALVETERRA: Análisis sistemático de variables para la planificación territorial estratégica y la evaluación de riesgos. Documento técnico, 38 p. (www.salveterra.life).

SALVETERRA (julio 2020): Estrategia de mitigación del cambio climático y la degradación de la ecosfera terrestre por medio de un sistema multifactorial y multiescala. 24 p. (www.salveterra.life).

VAN GESTEL J.P, MANN, P., GRINDLAY, N.R. & DOLAN, J.F. (1999): Three-phase tectonic evolution of the northern margin of Puerto Rico as inferred from an integration of seismic reflection, well, and outcrop, *Marine Geology*, 161: 257 – 286.

SALVETERRA

www.salveterra.life

Contacto: a.astorga.g@gmail.con /+506 88268551