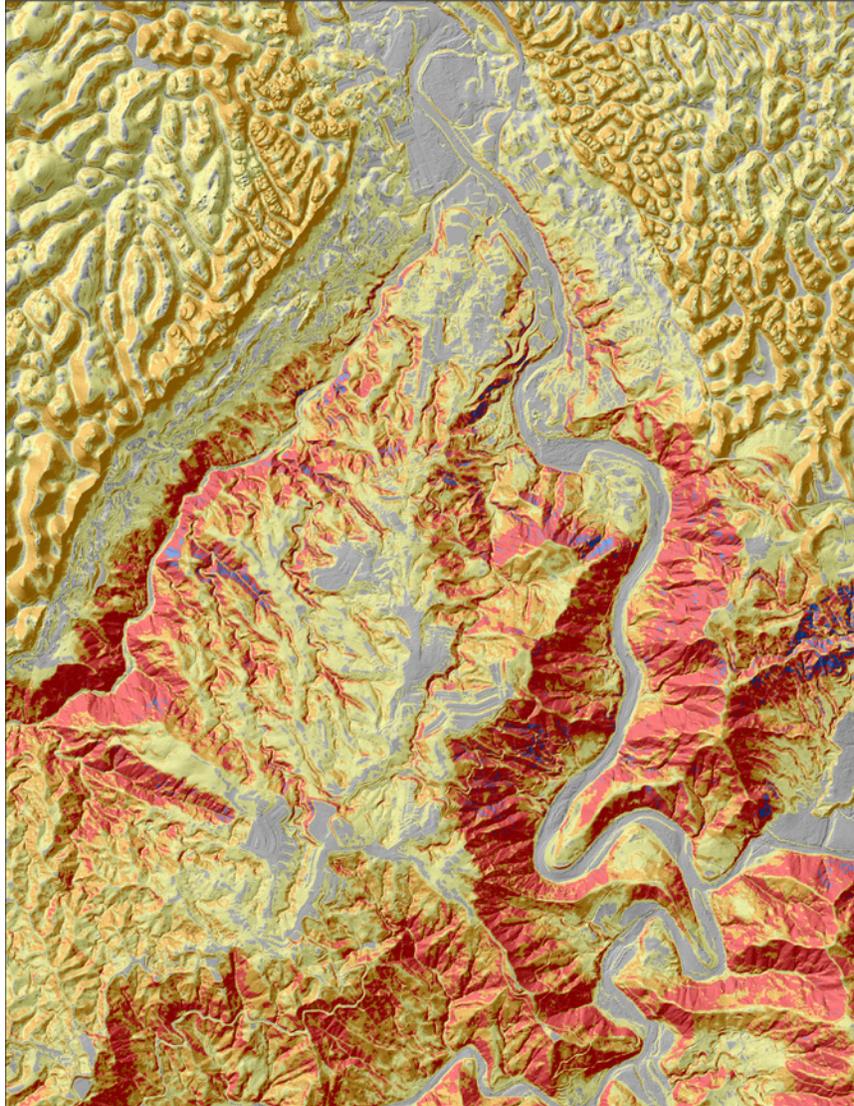


Programa de Peligros de Deslizamientos de Tierra

Mapa de Susceptibilidad a Deslizamientos de Tierra Desencadenados por Precipitación Intensa en Puerto Rico



Reporte de Archivo Abierto 2020–1022

Portada. Vista del mapa de susceptibilidad a deslizamientos de tierra (placa 1) a lo largo del límite entre los municipios de Ciales y Morovis, Puerto Rico.

Mapa de Susceptibilidad a Deslizamientos de Tierra Desencadenados por Precipitación Intensa en Puerto Rico

Por K. Stephen Hughes y William H. Schulz

Programa de Peligros de Deslizamientos de Tierra

Preparado en cooperación con la Universidad de Puerto Rico Recinto Universitario
de Mayagüez

Reporte de Archivo Abierto 2020–1022

**Departamento del Interior de los Estados Unidos
Servicio Geológico de los Estados Unidos**

Departamento del Interior de los Estados Unidos
DAVID BERNHARDT, Secretario

Servicio Geológico de los Estados Unidos
James F. Reilly II, Director

Servicio Geológico de los Estados Unidos, Reston, Virginia: 2020

Para más información sobre el USGS—la Fuente Federal para las ciencias de la Tierra, sus recursos naturales y vivientes, peligros naturales y el ambiente—visite <https://www.usgs.gov/> o llame al 1-888-ASK-USGS (1-888-275-8747).

Para obtener detalles sobre los productos de información del USGS, incluyendo mapas, imágenes y publicaciones visite <https://store.usgs.gov/>.

Cualquier uso de nombres comerciales, empresas o productos es solamente para fines descriptivos y no implica el endoso del gobierno de los Estados Unidos.

Aunque este producto de información, en su mayor parte, está en el dominio público, puede también contener materiales protegidos por derechos de autor. Para reproducir el contenido protegido por derechos de autor se debe asegurar el permiso del dueño de los derechos de autor.

Nota aclaratoria: La versión en español de este informe se tradujo de la versión en inglés por una estudiante graduada y facultad de la Universidad de Puerto Rico, Recinto Universitario de Mayagüez y un empleado de la Junta de Planificación de Puerto Rico.

Citación sugerida:

Hughes, K.S., and Schulz, W.H., 2020, Map depicting susceptibility to landslides triggered by intense rainfall, Puerto Rico: U.S. Geological Survey Open-File Report 2020-1022, 94 p., 1 plate, scale 1:150000, <https://doi.org/10.3133/ofr20201022>.

Datos asociados para esta publicación:

Hughes, K.S., and Schulz, W.H., 2020, Results from frequency-ratio analyses of soil classification and land use related to landslide locations in Puerto Rico following Hurricane María: U.S. Geological Survey data release, <https://www.sciencebase.gov/catalog/item/5e2f53f5e4b0a79317d42330>.

Agradecimientos

Los autores agradecen a todos los colegas y socios por su apoyo directo e indirecto en este proyecto. K. Stephen Hughes (KSH) reconoce la dedicación de un estupendo grupo de estudiantes en el Departamento de Geología de la Universidad de Puerto Rico, Recinto Universitario de Mayagüez, que trabajó de manera diligente para identificar manualmente decenas de miles de escarpes de deslizamientos en fotografías aéreas tomadas en Puerto Rico luego del huracán María. Algunos de estos estudiantes son Sahira Cancel, Xavier García, Selena González, Edwin Irizarry, Raquel Lugo, Priscilla Ortiz, César Rodríguez, Amos Santiago, Yanira Santiago, Stephanie Soto, y Karla Torres. Apoyo adicional fue provisto por Luis Aponte, Brendaly Rodríguez y Misha Vargas, personal del Servicio de Conservación de Recursos Naturales del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos. Un agradecimiento especial a Desireé Bayouth y Gabriel Martínez, miembros del equipo y quienes realizaron la tediosa verificación final de todos los deslizamientos de tierra a lo largo de la isla. KSH le agradece a Chiara Lepore por compartir sus datos previos del análisis de susceptibilidad. KSH también le agradece al colega James Joyce por su útil asesoramiento en el tema, además al Colegio de Artes y Ciencias de la UPRM por proveer tiempo libre para dedicar al proyecto. KSH y William H. Schulz le agradecen a Arleen Reyes Rodríguez y Félix Rivera Santiago de la Junta de Planificación de Puerto Rico por sus sugerencias y asistencia durante el desarrollo del mapa de susceptibilidad. Ambos autores también desean agradecer a Jim Hibbard y Félix Rivera Santiago por su consideración y revisión constructiva del informe. Se agradece a Desireé Bayouth por traducir el informe al español. Ambos autores también agradecen a Rex Baum, Jeffrey Coe, Eric Jones y Robert Schmitt del Servicio Geológico de los Estados Unidos por sus sugerencias y ayuda durante el desarrollo del mapa de susceptibilidad. Se agradece también a Rex Baum y Jeffrey Coe por su atenta y constructiva revisión del reporte.

Contenidos

Agradecimientos.....	iii
Resumen Ejecutivo	1
Resumen.....	1
Introducción.....	2
Trasfondo.....	2
Movimientos de Masa en Puerto Rico	2
Geología General de Puerto Rico.....	11
Fenómenos Naturales que Provocan Deslizamientos de Tierra en Puerto Rico	11
Perturbaciones Topográficas Antropogénicas.....	11
Estudios Previos de Susceptibilidad a Deslizamientos de Tierra para Puerto Rico.....	12
Conjunto de Datos y Metodología.....	15
Resultados y Discusión.....	39
Rendimiento de Factores.....	40
Rendimiento del Mapa	51
Uso y Limitaciones del Mapa de Susceptibilidad a Deslizamientos de Tierra	66
Conclusión.....	67
Referencias Citadas	67
Apéndice 1. Clave para las Abreviaturas de los Municipios	75
Apéndice 2. Resultados de los Análisis de Cobertura del Terreno.....	76
Apéndice 3. Resultados de los Análisis de Clase de Suelo	78

Figuras

1. Mapa que ilustra la topografía de Puerto Rico, territorio de los EE. UU.....	3
2. Fotografía del escarpe y cuerpo del deslizamiento de tierra masivo en Mameyes, Ponce, Puerto Rico, en el 1985.....	4
3. Fotografía de un deslizamiento de tierra masivo a lo largo de la carretera PR-9 en Ponce, Puerto Rico	5
4. Fotografía de un deslizamiento de tierra masivo a lo largo de un segmento incompleto de la carretera PR-385 en Peñuelas, Puerto Rico	6
5. Fotografía de flujos de escombros desencadenados por el huracán Georges a lo largo del Río Grande de Arecibo en Utuado, Puerto Rico.....	6
6. Fotografía de un deslizamiento de tierra a lo largo de la carretera PR-4131 en el municipio de Lares, Puerto Rico.....	7
7. Fotografía de movimientos de masa y flujos de escombros abuntables y poco profundos en el lado este del tramo superior del Lago Caonillas, Puerto Rico	8
8. Fotografía de un deslizamiento de tierra que evolucionó a flujo de escombros a lo largo de la carretera PR-143 en Barranquitas, Puerto Rico.....	9
9. Fotografía de un deslizamiento poco profundo en la cuenca hidrográfica del Río Blanco de Naguabo, Puerto Rico.....	10
10. Mapa de susceptibilidad a deslizamientos de tierra dibujado a mano, adaptado de Monroe (1979)	13

11. Mapa de susceptibilidad a deslizamientos de tierra, adaptado de Lepore y otros (2012)	14
12. Mapa del inventario de deslizamientos de tierra provocados por el huracán María.....	16
13. Mapa que ilustra la densidad de lugares con deslizamientos de tierra, del inventario del evento del huracán María.....	17
14. Diagrama de flujo que muestra el proceso seguido para desarrollar el ráster del SIA_m	19
15. Mapa de pendiente para la isla de Puerto Rico	21
16. Mapa que muestra los valores de curvatura calculados a partir del modelo digital de elevación derivado de lidar para la isla de Puerto Rico.....	22
17. Mapa que muestra las zonas que faltaron para el estudio de lidar aéreo de Puerto Rico de 2015–2016	27
18. Mapa que muestra las carreteras pavimentadas en la isla de Puerto Rico	28
19. Ráster de sombreado de un modelo digital de elevación derivado de lidar y una fotografía aérea de una densa e improvisada red de carreteras en una granja que no está digitalizada como parte del shapefile de carreteras TIGER de la Oficina del Censo de los EE. UU.	29
20. Mapa que muestra las unidades digitalizadas del mapa geológico de Puerto Rico a una escala de 1:20,000.....	30
21. Mapa que muestra la precipitación media anual en Puerto Rico.....	31
22. Mapa de canales fluviales para Puerto Rico del archivo de la base de datos geoespacial del “National Hydrography Dataset”	34
23. Mapa del conjunto de datos de cobertura del terreno del Proyecto de Análisis Gap de Puerto Rico.....	35
24. Mapa de clasificación del suelo para la isla de Puerto Rico del Servicio de Conservación de Recursos Naturales del Departamento de Agricultura de los EE. UU.	36
25. Mapa que muestra los datos sin procesar de “Soil Moisture Active Passive” de la humedad del suelo en la zona radicular para el 21 de septiembre de 2017 a las 9:30 a. m. Hora Estándar del Atlántico.....	37
26. Mapa que muestra los datos interpolados de SMAP de la humedad del suelo en la zona radicular para el 21 de septiembre de 2017 a las 9:30 a. m. Hora Estándar del Atlántico.....	38
27. Mapa y una representación gráfica de los resultados del análisis del Índice de Susceptibilidad (SI) para la pendiente	42
28. Mapa y una representación gráfica de los resultados del análisis del Índice de Susceptibilidad (SI) para la curvatura.....	43
29. Mapa y una representación gráfica de los resultados del análisis del Índice de Susceptibilidad para el factor de proximidad a las carreteras.....	44
30. Mapa que muestra los resultados del Índice de Susceptibilidad para los terrenos geológicos.....	45
31. Mapa y una representación gráfica de los resultados del análisis del Índice de Susceptibilidad (SI) para la precipitación media anual.....	46
32. Mapa y representación gráfica de los resultados del análisis del Índice de Susceptibilidad (SI) para el factor de proximidad al canal fluvial.....	47
33. Mapa de los resultados del análisis de los valores del Índice de Susceptibilidad para las 66 clases únicas de cobertura del terreno	48

34. Mapa de los resultados del análisis del Índice de Susceptibilidad para 697 clases de suelos	49
35. Mapa de los resultados del análisis del Índice de Susceptibilidad de los datos de "Soil Moisture Active Passive"	50
36. Gráfica de los análisis del área bajo la curva de la característica operativa del receptor para diferentes combinaciones de resultados de datos.	52
37. Mapa compuesto del Índice de Susceptibilidad de los siete conjuntos de datos distintos a la pendiente y "Soil Moisture Active Passive" utilizados en el análisis	53
38. Mapa de los valores residuales del modelo final del Índice de Susceptibilidad de este estudio comparado con el modelo final de la razón de frecuencia de un estudio previo	54
39. Ejemplo del modelo final del Índice de Susceptibilidad para el derrumbe del mogote de Santa Ana en la Urbanización Villa España en el municipio de Bayamón, Puerto Rico, incluidos un ráster de sombreado del estudio de lidar de 2016, vista aérea de la misma localización, conjunto de datos del mapa de susceptibilidad final superpuesto en el ráster de sombreado, conjunto de datos del mapa de susceptibilidad final superpuesto en la imagen aérea, fotografía aérea oblicua del lugar en el 2013 y mapa que muestra la ubicación del área	57
40. Ejemplo del modelo final del Índice de Susceptibilidad para el derrumbe de la Urbanización Las Lomas en el municipio de Ceiba, Puerto Rico, incluidos un ráster de sombreado del estudio de lidar de 2016, vista aérea de la misma localización, conjunto de datos del mapa de susceptibilidad final superpuesto en el ráster de sombreado, conjunto de datos del mapa de susceptibilidad final superpuesto en la imagen aérea, fotografía del escarpe y mapa que muestra la ubicación del área	59
41. Ejemplo del modelo final del Índice de Susceptibilidad para el lugar del derrumbe en la carretera PR-143 kilómetro 56.2 en el municipio de Barranquitas, Puerto Rico, incluidos un ráster de sombreado del estudio de lidar de 2016, vista aérea de la misma localización, conjunto de datos del mapa de susceptibilidad final superpuesto en el ráster de sombreado, conjunto de datos del mapa de susceptibilidad final superpuesto en la imagen aérea, fotografía del escarpe y mapa que muestra la ubicación del área	61
42. Ejemplo del modelo final del Índice de Susceptibilidad para un derrumbe provocado por el huracán María en el centro urbano de Utuado, Puerto Rico, incluidos un ráster de sombreado del estudio de lidar de 2016, vista aérea de la misma localización, conjunto de datos del mapa de susceptibilidad final superpuesto en el ráster de sombreado, conjunto de datos del mapa de susceptibilidad final superpuesto en la imagen aérea, fotografía del lugar y mapa que muestra la ubicación del área	63
43. Ejemplo del modelo final del Índice de Susceptibilidad para un derrumbe a lo largo de la carretera PR-2 kilómetro 209.3 en el municipio de Guayanilla, Puerto Rico, incluidos un ráster de sombreado del estudio de lidar de 2016, vista aérea de la misma localización, conjunto de datos del mapa de susceptibilidad final superpuesto en el ráster de sombreado, conjunto de datos del mapa de susceptibilidad final superpuesto en la imagen aérea, fotografía del lugar y mapa que muestra la ubicación del área	65

Tablas

1. Ejemplos hipotéticos de un conjunto de valores de la razón de frecuencia y los valores correspondientes del Índice de Susceptibilidad para un grupo dado de cualquier factor19
2. Datos utilizados en los análisis de la razón de frecuencia20
3. Resultados de los análisis de la razón de frecuencia para factores que contribuyen potencialmente a deslizamientos de tierra.....23
4. Valores del Índice de Susceptibilidad para factores que contribuyen potencialmente a deslizamientos de tierra39
5. Resultados de la comparación entre el mapa de susceptibilidad y las ubicaciones de los deslizamientos en el inventario del huracán María51
6. Factores considerados en los mapas cuantitativos de susceptibilidad a deslizamientos de tierra en Puerto Rico55
7. Comparación entre el rendimiento de los mapas de susceptibilidad a deslizamientos de tierra en Puerto Rico y el inventario del huracán María55

Factores de Conversión

Sistema anglosajón de unidades al Sistema Internacional de Unidades

Multiplica	Por	Para obtener
	Área	
acre	0.004047	kilómetro cuadrado (km ²)

Sistema Internacional de Unidades al sistema anglosajón de unidades

Multiplica	Por	Para obtener
	Largo	
centímetro (cm)	0.3937	pulgada (in.)
milímetro (mm)	0.03937	pulgada (in.)
metro (m)	3.281	pie (ft)
kilómetro (km)	0.6214	milla (mi)
	Área	
kilómetro cuadrado (km ²)	247.1	acre
	Volumen	
metro cúbico (m ³)	264.2	galón (gal)
metro cúbico (m ³)	0.0002642	millón de galones (Mgal)
metro cúbico (m ³)	35.31	pie cúbico (ft ³)
metro cúbico (m ³)	1.308	yarda cúbica (yd ³)

Datum

La información de las coordenadas horizontales está referenciada al “World Geodetic System” de 1984 (WGS84).

Abreviaturas

°	grado
AUC	área bajo la curva
DEM	modelo digital de elevación
FR	razón de frecuencia
GAP	Proyecto de Análisis Gap de Puerto Rico
KSH	K. Stephen Hughes
lidar	detección y alcance de luz
MUKEY	clave de la unidad de mapa
NASA	Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio
<i>SI</i>	Índice de Susceptibilidad
<i>SIA</i>	valor agregado del <i>SI</i>
SIA_m	el valor final modificado del <i>SI</i> en cada píxel de 5 m en toda la isla
SMAP	“Soil Moisture Active Passive”
USGS	Servicio Geológico de los Estados Unidos

Mapa de Susceptibilidad a Deslizamientos de Tierra Desencadenados por Precipitación Intensa en Puerto Rico

Por K. Stephen Hughes¹ y William H. Schulz²

Resumen Ejecutivo

Puerto Rico es vulnerable a los deslizamientos de tierra. Este reporte resume la creación de un nuevo modelo de alta resolución de susceptibilidad a deslizamientos de tierra inducidos por precipitación para la isla principal. La isla principal de Puerto Rico se clasificó en una escala de píxeles de 5 metros en las categorías de susceptibilidad Baja, Moderada, Alta, Muy Alta y Extremadamente Alta a deslizamientos de tierra durante y poco después de una precipitación intensa, como la que se produce durante ciclones tropicales. Los datos del mapa pueden descargarse como archivos georreferenciados en múltiples formatos por el público o agencias del gobierno y pueden utilizarse en una plataforma de sistemas geográficos de información. El modelo está diseñado para el uso en planificación, desarrollo y manejo de emergencias. El mapa resalta áreas susceptibles a deslizamientos de tierra que puedan requerir una evaluación adicional de lugares específicos por profesionales licenciados.

Este mapa resalta una importante colaboración entre el Servicio Geológico de los Estados Unidos y el Departamento de Geología en la Universidad de Puerto Rico, Recinto Universitario de Mayagüez, que se materializó luego de los destructivos huracanes Irma y María en septiembre de 2017. Un inventario de más de 70,000 derrumbes causados por el huracán María (Hughes y otros, 2019) representa uno de los productos iniciales de esta colaboración y fue un conjunto de datos esencial para el modelo descrito en este reporte. Las características de los derrumbes identificados en el inventario se analizaron estadísticamente para producir valores del Índice de Susceptibilidad para varios factores geoespaciales combinados para formar el nuevo mapa. El modelo final muestra cómo se pueden utilizar los datos obtenidos luego de un desastre para entender mejor los riesgos y peligros futuros. El proyecto se benefició de diversa retroalimentación entre colegas en el Servicio Geológico de los Estados Unidos, la Universidad de Puerto Rico, Recinto Universitario de Mayagüez, y agencias de gobierno en Puerto Rico. Además, el inventario y estudio actual satisfacen las secciones (a), (b), (c), (d) e (i) del Artículo 4 de la Ley Número 24 del 2008: Ley del Protocolo para la Mitigación de Riesgos por Deslizamientos de Terreno de Puerto Rico. El mapa de susceptibilidad también representa un paso importante para entender la erosión, sedimentación y peligros que surgen a consecuencia de lluvias fuertes en Puerto Rico y los trópicos.

Resumen

Los deslizamientos de tierra en Puerto Rico van de eventos con pocos efectos a eventos mortales. La modificación agrícola y urbana en el paisaje durante siglos ha perturbado muchas laderas inestables en la isla tropical. Uno de los desencadenantes principales del movimiento de masa en la isla es la precipitación intensa asociada con sistemas atmosféricos tropicales. La posición geográfica y topografía rugosa de Puerto Rico hacen que millones de residentes sean vulnerables a extensos eventos de deslizamientos de tierra. En este estudio se utilizó el método de la razón de frecuencia para producir un modelo de alta resolución (5 metros) y de susceptibilidad a deslizamientos de tierra inducidos por precipitación de alta intensidad. Los conjuntos de datos utilizados en el modelo incluyeron un inventario de deslizamientos de tierra de la isla entera creado a partir de imágenes obtenidas luego de que los huracanes Irma y María impactaran la isla durante septiembre de 2017, inclinación de la pendiente, curvatura de la superficie, tipo de suelo, terreno geológico, precipitación media anual, uso del terreno, humedad del suelo y distancia a carreteras y cuerpos de agua. El producto final de los datos (Placa 1) es una representación estadísticamente viable del lugar estimado del comienzo de los derrumbes durante o poco después de una precipitación intensa, con un valor robusto de 0.87 del área bajo la curva característica operativa del receptor. Los valores de píxel del ráster del modelo de salida se agruparon en grupos de 100 cuantiles de igual área, y luego se clasificaron en clases de susceptibilidad Baja, Moderada, Alta, Muy Alta y Extremadamente Alta. La clasificación de susceptibilidad Extremadamente Alta representa el 1 por ciento más vulnerable de la isla, mientras que las clasificaciones de susceptibilidad Muy Alta, Alta, Moderada y Baja comprenden el 9, 20, 30 y 40 por

¹Departamento de Geología, Universidad de Puerto Rico - Recinto Universitario de Mayagüez.

²Servicio Geológico de los Estados Unidos.

2 Mapa de Susceptibilidad a Deslizamientos de Tierra Desencadenados por Precipitación Intensa en Puerto Rico

ciento de la isla, respectivamente. El mapa de susceptibilidad tiene como propósito ser de asistencia en futura planificación de desarrollo, medidas de mitigación y respuesta de emergencia luego de un evento; sin embargo, no es un sustituto para evaluaciones de estabilidad de taludes hechas en lugares específicos por geólogos e ingenieros licenciados. Además, este mapa no presenta las zonas donde el material del deslizamiento de tierra puede viajar luego de moverse, y que puedan estar en alto peligro; tampoco representa necesariamente las zonas en donde los deslizamientos de tierra pueden ocurrir durante terremotos o movimientos de masa desencadenados por precipitación prolongada y de intensidad relativamente baja.

Introducción

Puerto Rico (18.25°N., 66.50°W.) es un territorio caribeño de los Estados Unidos con un área aproximada de 9,000 kilómetros cuadrados (km²), y es la isla más al este del archipiélago de las Antillas Mayores. El hogar de más de 3 millones de ciudadanos, la densidad poblacional del archipiélago es la cuarta más alta de cualquier estado de los Estados Unidos o jurisdicción estatal equivalente, superada solo por el Distrito de Columbia, Nueva Jersey y Rhode Island (U.S. Census Bureau, 2010). A diferencia de estos lugares, la mayoría del paisaje puertorriqueño es montañoso, como consecuencia de su ubicación en el margen tectónicamente activo de las placas de Norteamérica y el Caribe. Una ancha y discontinua planicie costera rodea un interior rugoso en donde los picos más altos de la isla principal sobrepasan los 1,300 metros (m) sobre el nivel del mar y se encuentran a 150 kilómetros de (km) de la trinchera de Puerto Rico, cuya profundidad es mayor de 8,000 m y marca el límite de la placa tectónica. El terreno de la isla está demarcado por la Cordillera Central orientada de este a oeste (fig. 1), la cual es la principal división fluvial de norte a sur, y la Sierra de Luquillo que se encuentra en la zona noreste del territorio. Debido a la topografía rugosa de alto relieve que cubre la mayor parte de la superficie de la tierra y el relativamente alto riesgo de condiciones climáticas o tectónicas que pueden inducir deslizamientos de tierra, los millones de residentes en Puerto Rico tienen una probabilidad desproporcional y más alta de sufrir los efectos de los movimientos de masa que sus contrapartes en los Estados Unidos continentales (Jibson, 1987).

El propósito del mapa de susceptibilidad a deslizamientos de tierra presentado en este reporte (Placa 1) es proveer datos de peligro de alta resolución (píxel de 5 m) que puedan ser utilizados directamente por ciudadanos y agencias del gobierno para evaluar y planificar efectivamente para futuros eventos de precipitación extrema que causen extensas fallas de taludes en la isla principal del territorio. Dado que los pronósticos de ciclones tropicales a largo plazo predicen eventos de alta intensidad a mayor frecuencia que muy probablemente afectarán directamente a Puerto Rico en el futuro (Knutson y otros, 2010; Jennings y otros, 2014; Keellings y Hernández Ayala, 2019; Ramos-Scharrón y Arima, 2019), este mapa de susceptibilidad a deslizamientos de tierra puede utilizarse como una herramienta para evitar potencialmente la pérdida de vidas y propiedades.

Trasfondo

Movimientos de Masa en Puerto Rico

Los movimientos de masa presentan peligros persistentes en Puerto Rico. Los derrumbes, caídas de rocas, asentamientos, flujos y otros movimientos de masa son responsables de las pérdidas de vida humana, propiedad privada, rutas de transporte, infraestructura de utilidades y aislamiento temporero de comunidades remotas a través de esta isla caribeña densamente poblada y rugosa (por ejemplo, Jibson, 1987; Larsen, 2012; Bessette-Kirton y otros, 2019). En este reporte se utilizan los términos “deslizamiento de tierra” o “derrumbe” para incluir y referirse a todo tipo de fallas de taludes. El interior montañoso de la isla está en mayor riesgo a deslizamientos de tierra; sin embargo, los deslizamientos de tierra también presentan riesgos en el extenso terreno del carso y zonas costeras marcadas por acantilados empinados y terrazas. El desastre del deslizamiento de tierra de Mameyes en Ponce en 1985 (fig. 2), que acabó con al menos 129 vidas, sirve como un recordatorio de la vulnerabilidad a derrumbes en la isla y continúa siendo el evento de deslizamiento de tierra más fatal que ha ocurrido en una jurisdicción de los Estados Unidos (Jibson, 1986; Silva-Tulla, 1986). Grandes deslizamientos de tierra como el ejemplo de Mameyes existen en otros lugares alrededor de la isla (figs. 3 y 4), entre ellos, Cerca del Cielo (Wang, 2012, 2013; Rivera Santiago, 2015), la represa del lago Guajataca (Monroe, 1967; Silva-Tulla y otros, 2018), El Yunque (Wang y otros, 2013), la carretera PR-10 en Utuado (Rodríguez-Pérez y otros, 1988; Deere y otros, 1989), la carretera PR-9 en Ponce (García López, 2018) y dispersos a lo largo del escarpe cársico del sur (Monroe, 1964). Los movimientos de tierra poco profundos usualmente se movilizan en flujos canalizados que proveen sedimentos directamente a la red fluvial y ocurren a mayor frecuencia y extensión (figs. 5-9; Campbell y otros, 1985; Jibson, 1986, 1989; Larsen y Simon, 1990, 1993; Simon y otros, 1990; Larsen y Torres Sánchez, 1992; Larsen y Santiago Román, 2001; Pando y otros, 2005; Larsen, 2012; Hughes y Morales Vélez, 2017; Morales Vélez y Hughes, 2018; Silva-Tulla y otros, 2018; Bessette-Kirton y otros, 2019). La entrada de sedimento liberado en un sistema de río también tiene consecuencias negativas relacionadas a la sedimentación, particularmente en cuencas hidrográficas con embalses confinados (por ejemplo, Soler-López, 2000; Rodríguez Feliciano y otros, 2019).

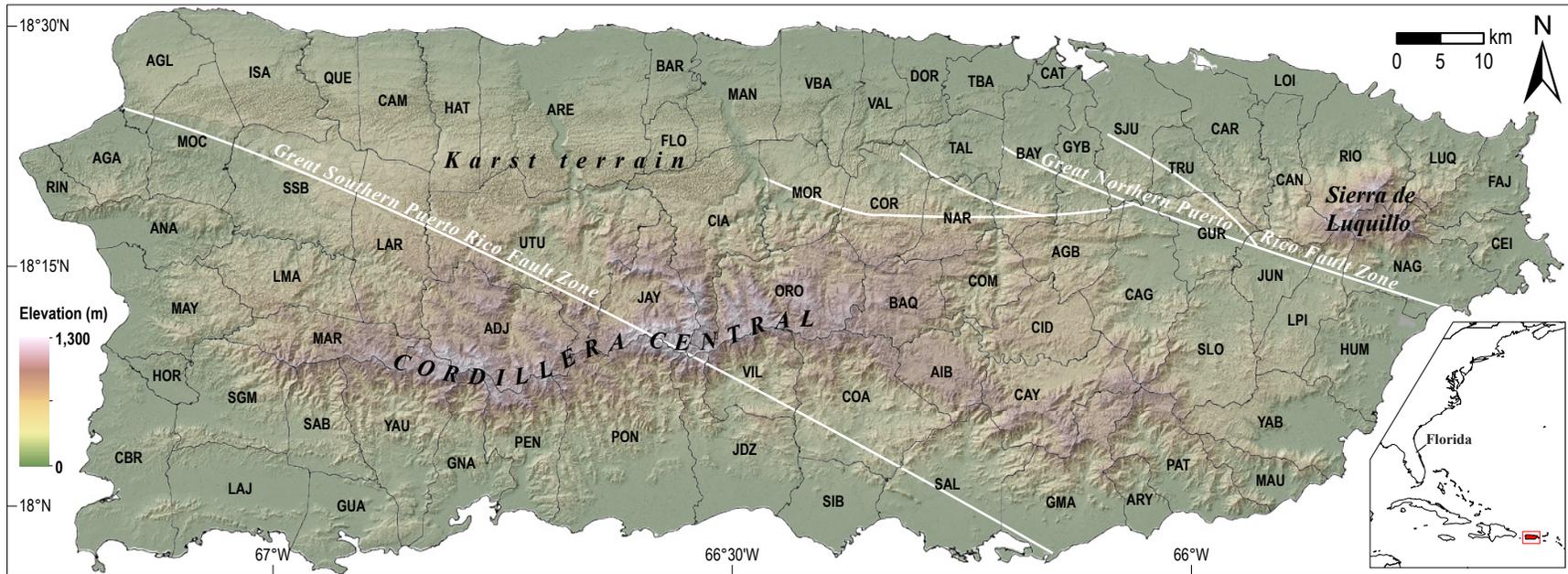


Figura 1. Topografía de Puerto Rico, territorio de los Estados Unidos (U.S. Geological Survey, 2017). La Cordillera Central que va de este oeste es la característica topográfica principal en la isla. Sobrepasa los 1,300 metros (m) sobre el nivel del mar y es la división de drenaje principal entre los ríos al norte que desembocan en el océano Atlántico y aquellos al sur que desembocan en el Mar Caribe. El terreno del carso norteño cubre aproximadamente 20 por ciento de la superficie de la isla. El Bosque Nacional El Yunque se encuentra en la prominente Sierra de Luquillo al este de Puerto Rico. Puerto Rico es la región más oriental del archipiélago de las Antillas Mayores y se encuentra aproximadamente a 1,600 kilómetros (km) al sureste del estado de Florida (ver mapa complementario). Las localizaciones aproximadas de la Gran Zona de Falla del Norte de Puerto Rico y la Gran Zona de Falla del Sur de Puerto Rico (GNPRFZ y GSPRFZ respectivamente, por sus siglas en inglés) son adaptadas de Zachariasen y von Hillebrandt-Andrade (2005). La explicación de las abreviaturas de los municipios se encuentra en el apéndice 1.



Figura 2. Escarpe y cuerpo del deslizamiento de tierra masivo de Mameyes en Ponce, Puerto Rico, en 1985 (18.024, -66.619). Fotografía tomada en octubre de 1985 por James Joyce, Universidad de Puerto Rico, Recinto Universitario de Mayagüez, utilizada con autorización. Vista al oeste.



Figura 3. Deslizamiento de tierra masivo a lo largo de la carretera PR-9 en Ponce, Puerto Rico (18.032, -66.636). Fotografía tomada el 4 de septiembre de 2018 por Stephen Hughes, Universidad de Puerto Rico, Recinto Universitario de Mayagüez. Vista al sureste.



Figura 4. Deslizamiento de tierra masivo a lo largo de un segmento incompleto de la carretera PR-385 en Peñuelas, Puerto Rico (18.051, -66.724). Fotografía tomada el 20 de noviembre de 2005 por la Autoridad de Carreteras y Transportación de Puerto Rico. Vista al sur.



Figura 5. Flujos de escombros (estructuras lineales de color claro en las laderas) desencadenados por el huracán Georges a lo largo del Río Grande de Arecibo en Utuado, Puerto Rico (18.222, -66.717). Fotografía tomada el 1 de octubre de 1998, cortesía de Cheryl Hapke, Servicio Geológico de los Estados Unidos. Vista al norte.



Figura 6. Deslizamiento de tierra a lo largo de la carretera PR-4131 en el municipio de Lares, Puerto Rico (18.250, -66.884). Fotografía tomada el 15 de octubre de 2017 por la Patrulla Aérea Civil (2017). Vista al oeste.



Figura 7. Movimientos de masa y flujos de escombros abundantes y poco profundos en el lado este del tramo superior del Lago Caonillas, Puerto Rico (18.252, -66.644). Fotografía tomada el 17 de octubre de 2017 por la Patrulla Aérea Civil (2017). Vista al noreste.



Figura 8. Deslizamiento de tierra que evolucionó a flujo de escombros a lo largo de la carretera PR-143 en Barranquitas, Puerto Rico (18.176, -66.338). Fotografía tomada el 12 de octubre de 2017 por la Patrulla Aérea Civil (2017). Vista al oeste.



Figura 9. Deslizamiento de tierra poco profundo en la cuenca hidrográfica del Río Blanco de Naguabo, Puerto Rico (18.266, -65.789). Fotografía tomada el 26 de marzo de 2018 por Stephen Hughes, Universidad de Puerto Rico, Recinto Universitario de Mayagüez. Vista al este-sureste.

Geología General de Puerto Rico

La geología de la isla es compleja. En su más simple conceptualización, dos componentes principales incluyen (1) un complejo de basamento de arco antiguo y del Eoceno (Jolly y otros, 1998) que está discordantemente cubierto por (2) una secuencia de carbonatos del Oligoceno tardío al Plioceno (Monroe, 1980a; Ortega-Ariza y otros, 2015). Las rocas del basamento incluyen unidades volcánoclasticas, plutones de granodiorita, serpentinita y otros tipos de roca. Desde el Plioceno, la isla ha experimentado levantamiento, el cual continúa hasta el presente (Taggart y Joyce, 1989; Brocard y otros, 2015); el ajuste a esta fuerza tectónica ha provocado un desequilibrio topográfico. La incisión fluvial en superficies de bajo relieve expuestas a la erosión ha dado forma a un paisaje profundamente disectado donde las pendientes son muy empinadas y las divisorias de drenaje son susceptibles a la captura fluvial. En muchos lugares, la erosión también está controlada por la geología local de la roca madre. Por ejemplo, la carstificación de rocas de carbonato que subyacen alrededor del 20 por ciento de la isla ha resultado en una expresión topográfica distinta a la de otras unidades geológicas en la isla. En estas zonas del carso, el movimiento de agua es mayormente subterráneo, pero en el resto de las zonas, los procesos fluviales superficiales han explotado la abundancia de contactos de fallas en el antiguo complejo de basamento de arco de la isla. Los sistemas de valles pronunciados marcan la Gran Zona de Falla del Norte y Sur de Puerto Rico. Los sistemas de fallas clásicos de grabens y semigrabens están también expresados en la topografía del oeste de Puerto Rico (Grindlay y otros, 2005; Mann y otros, 2005; Prentice y Mann, 2005; Moul-Bogunovic, 2019). La meteorización química es acelerada en la mayor parte del territorio debido al prevalente clima húmedo y tropical.

Fenómenos Naturales que Provocan Deslizamientos de Tierra en Puerto Rico

La isla está particularmente expuesta a la actividad de ciclones tropicales por su latitud y entorno oceánico. Los eventos atmosféricos más devastadores que afectan a Puerto Rico se originan usualmente cerca de las islas de Cabo Verde, en el este del océano Atlántico, y viajan de oeste a noroeste hacia las Antillas Menores y Mayores (Ramos-Scharron y Arima, 2019). Los huracanes más destructivos que han afectado a Puerto Rico desde la ocupación estadounidense en el 1898 son San Ciriaco (1899) y María (2017). Debido a las diferencias en el ambiente político y social de la isla durante cada evento, hacer una comparación directa del impacto de las dos tormentas es difícil. No obstante, ambas tormentas causaron inundaciones históricas, destrucción de infraestructura, pérdida extensiva de tierras cultivadas y pérdidas de vida. El huracán San Ciriaco tuvo como consecuencia la muerte de más de 3,000 residentes y dejó a más de 200,000 residentes de un total de población de aproximadamente 950,000 sin hogar y enfrentando hambruna (Sanger y otros, 1900; Schwartz, 1992). El huracán María también causó la muerte de cerca de 3,000 ciudadanos y la emigración del 8 por ciento (alrededor de 280,000 personas) de la población de la isla en los meses después de la tormenta (Milken Institute School of Public Health, 2018).

El archipiélago se encuentra en la interfase sísmicamente activa de las placas tectónicas de Norteamérica y el Caribe. Las extensas fallas de talud también pueden ser desencadenadas por sacudidas sísmicas. Un enjambre sísmico con un evento de magnitud máxima de 6.4 ocurrió desde diciembre de 2019 a enero de 2020, generalmente fuera de la costa del municipio de Guánica (fig. 1), y desencadenó caída de rocas desde pendientes empinadas en roca caliza cerca de la zona epicentral (López y otros, 2020). Previo a esto, el terremoto de magnitud 7.2 de 1918 que ocurrió en el Pasaje de la Mona (Doser y otros, 2005) provocó mayormente caída de rocas, generalmente reportadas en áreas sustentadas por unidades de roca caliza en el noroeste de la isla, cerca de la inferida zona epicentral en el mar (Red y Taber, 1919).

Perturbaciones Topográficas Antropogénicas

Desde la colonización a finales del siglo XV, diversos factores sociales han contribuido a un incremento en la susceptibilidad de falla de laderas en Puerto Rico, muchas de las cuales ya eran naturalmente vulnerables. Durante el siglo XIX, bajo el dominio español, se desarrolló casi todo el paisaje puertorriqueño disponible para utilizarse en cultivos agrícolas tales como caña de azúcar, café y plátanos (Dietz, 1986). En las décadas luego de la adquisición por los Estados Unidos en 1898 ocurrió un cambio hacia la industrialización y en los últimos 60 años del siglo XX la cobertura de bosques en la isla incrementó de un 10 por ciento a más de un 40 por ciento (Grau y otros, 2003). Esta estadística representa el abandono de las prácticas agrícolas para la mayoría de la población y un movimiento hacia la urbanización. Tanto las fases agrícolas e industriales de prácticas de uso de terrenos han involucrado extensas redes de carreteras. Durante la fase agraria, se desarrolló una densa y complicada red de carreteras improvisadas a través de plantaciones montañosas y durante la fase de urbanización se expandió la construcción de densas comunidades residenciales hacia las colinas y montañas alrededor de los centros poblacionales. La excavación y relleno asociados a la construcción de carreteras durante el desarrollo de la isla han llevado a un incremento en la susceptibilidad a deslizamientos de tierra a lo largo y cerca de las carreteras (por ejemplo, Larsen y Torres-Sánchez, 1992).

Estudios Previos de Susceptibilidad a Deslizamientos de Tierra para Puerto Rico

Puerto Rico ha sido el enfoque de muchas investigaciones relacionadas a deslizamientos de tierra dado que es una jurisdicción geográfica, topográfica y climatológicamente única bajo el control de los Estados Unidos. Se han derivado empíricamente umbrales de precipitación intensa en Puerto Rico para tormentas históricas que desencadenaron movimientos de masa extensos (Larsen y Simon, 1993; Pando y otros, 2005). En el pasado, se han llevado a cabo estimados de zonas de alta vulnerabilidad a deslizamientos de tierra en la isla a escalas de 1:240,000 y 1:60,000 (Monroe, 1979; Kamal, 2008; Lepore y otros, 2012). El mapa dibujado a mano de Monroe (1979) se desarrolló en función a un mapeo extenso de la superficie y roca madre a través de toda la isla, y muestra zonas susceptibles a fallas grandes y profundas de la roca madre a lo largo de los escarpados prominentes de la región de carbonatos al norte de la isla (fig. 10). La gran mayoría del interior de la isla se clasificó como moderadamente susceptible, sin mucha diferenciación. Kamal (2008) y Lepore y otros (2012) utilizaron un sólido método estadístico bivariado e inventarios parciales de deslizamientos de tierra disponibles para el centro y este de Puerto Rico para derivar un modelo de susceptibilidad (fig. 11) superior al mapa de Monroe (1979). Para este estudio se utilizó el mismo enfoque general bivariado con modificaciones.

Se han preparado algunos mapas regionales de susceptibilidad a deslizamientos de tierra para municipios individuales, como Ponce (PON; Larsen y otros, 2004) y Comerío (COM; Larsen y Parks, 1998), a escalas de 1:30,000 y 1:20,000, respectivamente. Ambos mapas fueron preparados utilizando una metodología de matriz subjetiva e inventarios de movimientos de masa regionales. Además, se prepararon mapas de susceptibilidad a deslizamientos de tierra desencadenados por actividad sísmica para siete municipios en el área metropolitana de San Juan (TBA, CAT, BAY, SJU, GYB, CAR, and TRU; Santiago y Larsen, 2001).

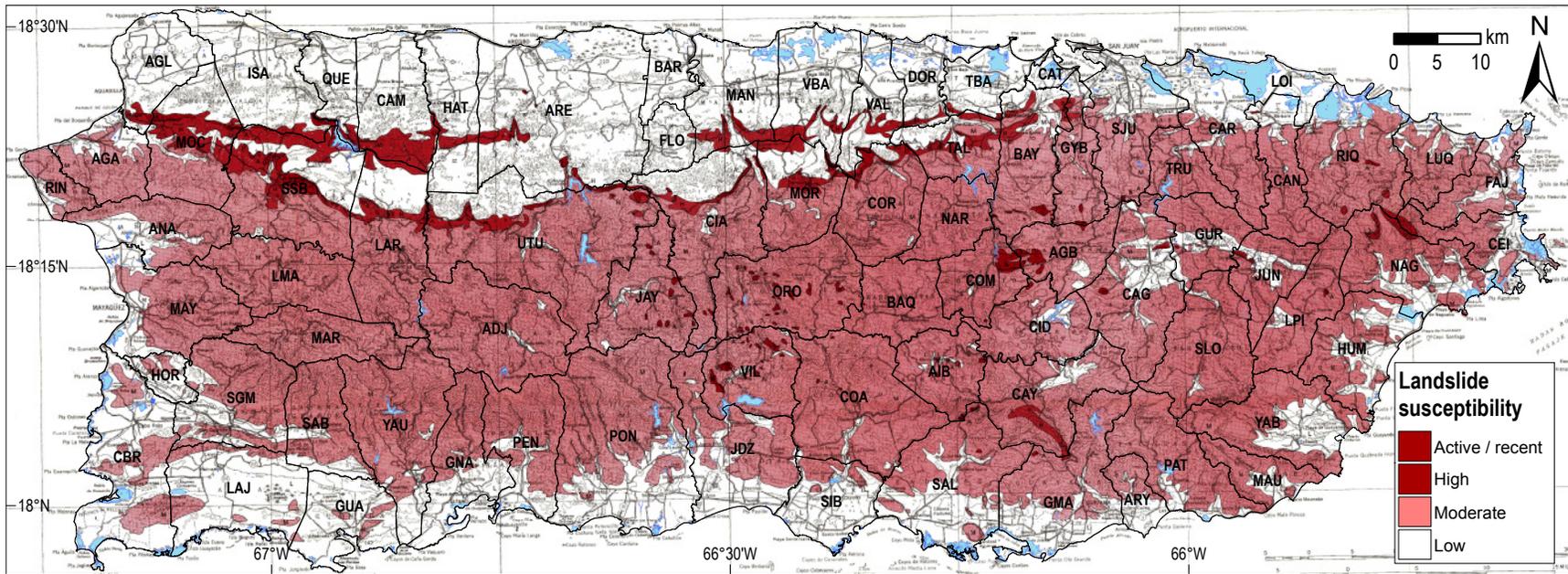


Figura 10. Mapa de susceptibilidad a deslizamientos de tierra dibujado a mano (1:240,000), adaptado de Monroe (1979). La mayoría de las zonas de movimiento activo y alta susceptibilidad se encuentran dentro y en el margen de la provincia norteña de carbonatos. La explicación de las abreviaturas de los municipios se encuentra en el apéndice 1. (km, kilómetro)

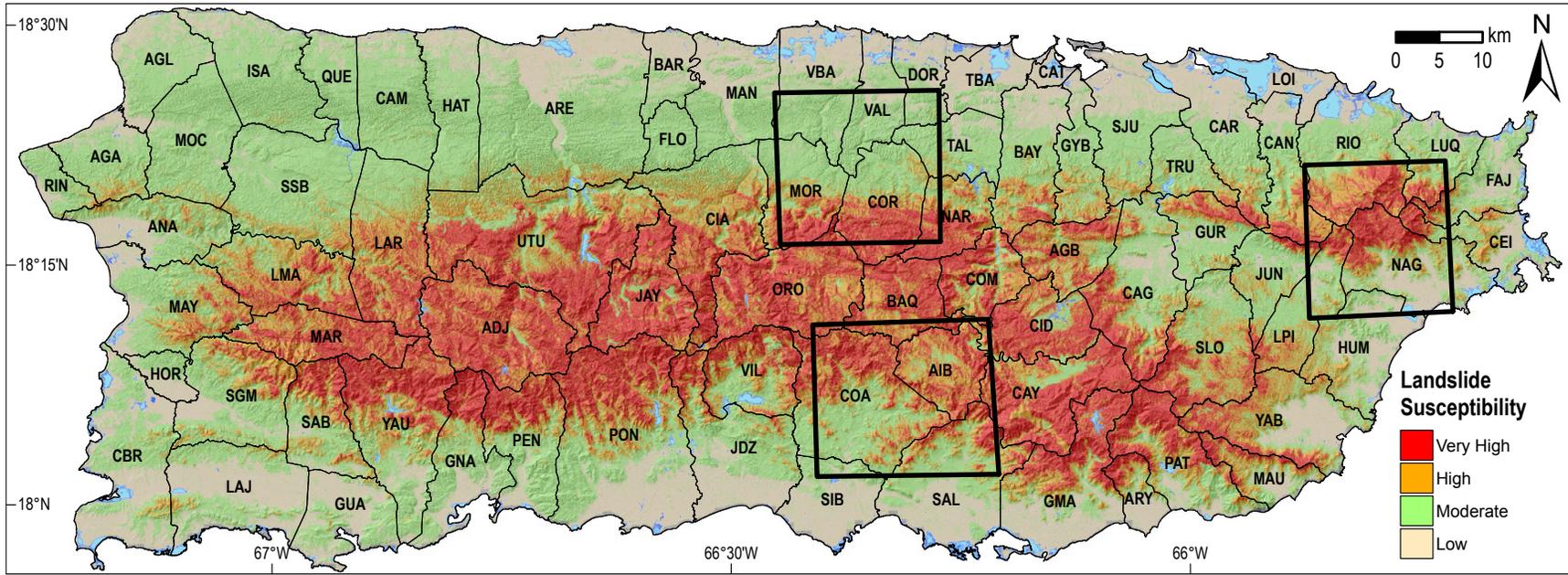


Figura 11. Mapa de susceptibilidad a deslizamientos de tierra, adaptado de Lepore y otros (2012). Las áreas del inventario utilizadas para informar su modelo están delineadas por las tres casillas. La explicación de las abreviaturas de los municipios se encuentra en el apéndice 1. (km, kilómetro)

Conjunto de Datos y Metodología

El modelo de susceptibilidad a deslizamientos de tierra descrito en este reporte utiliza el inventario digital de deslizamientos de tierra del huracán María (figs. 12 y 13; Hughes y otros, 2019), así como un sinnúmero de datos geoespaciales. El inventario incluye 71,431 puntos que corresponden a los centros de los escarpes formados en las áreas donde comienzan los deslizamientos de tierra. Estos últimos fueron identificados manualmente utilizando imágenes aéreas y satelitales de alta resolución y georreferenciadas, tomadas luego del evento. Hasta la fecha, el conjunto de datos parece representar el inventario más grande de fallas de talud causadas por precipitación. Los municipios de Culebra y Vieques, que se encuentran fuera de la isla principal, no se incorporaron en el modelo ya que no presentan áreas considerables para fallas de talud y no hubo deslizamientos de tierra en estas islas en el inventario posterior al evento del huracán María (Hughes y otros, 2019). Además, otras islas menores fuera de la costa de Puerto Rico, entre ellas, Caja de Muertos, Desecheo, Mona y Monito, no se incluyeron en este análisis.

Varios datos en este estudio se clasifican por su correlación con los lugares donde ocurrieron fallas de talud a consecuencia del huracán María y se combinan en un modelo comprensivo. El método implementado es el acercamiento bivariado de la razón de frecuencia (FR) (Lee y Pradhan, 2006; Lee y otros, 2007; He y Beighley, 2008; Lepore y otros, 2012; Chalkias y otros, 2014). Al igual que otras evaluaciones empíricas, el análisis de la FR asume que es muy probable que los deslizamientos de tierra ocurran en ubicaciones con condiciones muy similares a donde ocurrieron deslizamientos de tierra previamente (Brabb, 1984; Varnes, 1984; Sidle y Ochiai, 2006). El uso de modelaje con la FR requiere que los factores cuantitativos de interés (tales como pendiente, curvatura, orientación del terreno, etc.) se clasifiquen en rangos o grupos. Luego, el porcentaje del área total de estudio cubierta por ese rango de intervalo se compara con el porcentaje total de los eventos (en este caso, deslizamientos de tierra) de algún conjunto de datos empírico que coincida geoespacialmente con las ubicaciones donde existe el rango en el área de estudio. Un valor de la FR para cada grupo (i) de cada factor (f) se calcula utilizando la ecuación 1 (modificada de He y Beighley, 2008; Lepore y otros, 2012; Chalkias y otros, 2014):

$$FR_{fi} = \frac{N_{Lfi} / N_L}{A_{fi} / A}, \quad (1)$$

donde:

- FR_{fi} es el valor de la razón de frecuencia para cada grupo (i) de cada factor (f);
- N_{Lfi} / N_L es la razón de la cantidad de deslizamientos de tierra en un grupo (por ejemplo, pendiente de 0 grados [°]–5°) a la cantidad total de deslizamientos de tierra; y
- A_{fi} / A es la razón de cualquier área con el mismo grupo del factor al área total de estudio.

Se interpreta que un valor de la FR_{fi} mayor de 1 indica una alta correlación del conjunto de datos del evento al conjunto de datos del factor geoespacial. Los valores de la FR_{fi} no pueden ser 0 o negativos. La ecuación 2 se utilizó para convertir los valores de la FR_{fi} en valores del Índice de Susceptibilidad (SI), ya que los valores igualmente opuestos de la FR_{fi} no están simétricamente distribuidos alrededor de un valor neutral de 1:

$$SI_{fi} = \ln (FR_{fi}), \quad (2)$$

donde:

- SI_{fi} es el valor del SI para cada grupo (i) de cada factor (f).

Una vez convertidos a valores del SI , el valor neutral es 0, los números negativos representan no correlación y los positivos representan correlación entre el conjunto de datos del evento y el conjunto de datos del factor geoespacial. La Tabla 1 muestra un ejemplo de valores hipotéticos de la FR_{fi} convertidos a valores del SI_{fi} . El uso de los valores del SI_{fi} permite la simple suma de conjuntos de datos ráster de factores clasificados en el modelo final.

Solo un 75 por ciento aleatorio del inventario de fallas de talud del huracán María (Hughes y otros, 2019) se utilizó para calcular los valores del SI para el modelo de susceptibilidad a deslizamientos de tierra. El 25 por ciento restante sirvió para examinar la viabilidad del modelo mediante una curva de la característica operativa del receptor (ROC) (ver sección de “Resultados y discusión”). Aunque se crearon inventarios de deslizamientos de tierra después de otros eventos (Jibson, 1989; Larsen y Torres-Sánchez, 1992), no pudimos obtener versiones georreferenciadas de estos inventarios con los cuales probar nuestro modelo. Intentamos georreferenciar los inventarios de dichas publicaciones, pero los resultados indicaron localizaciones incorrectas

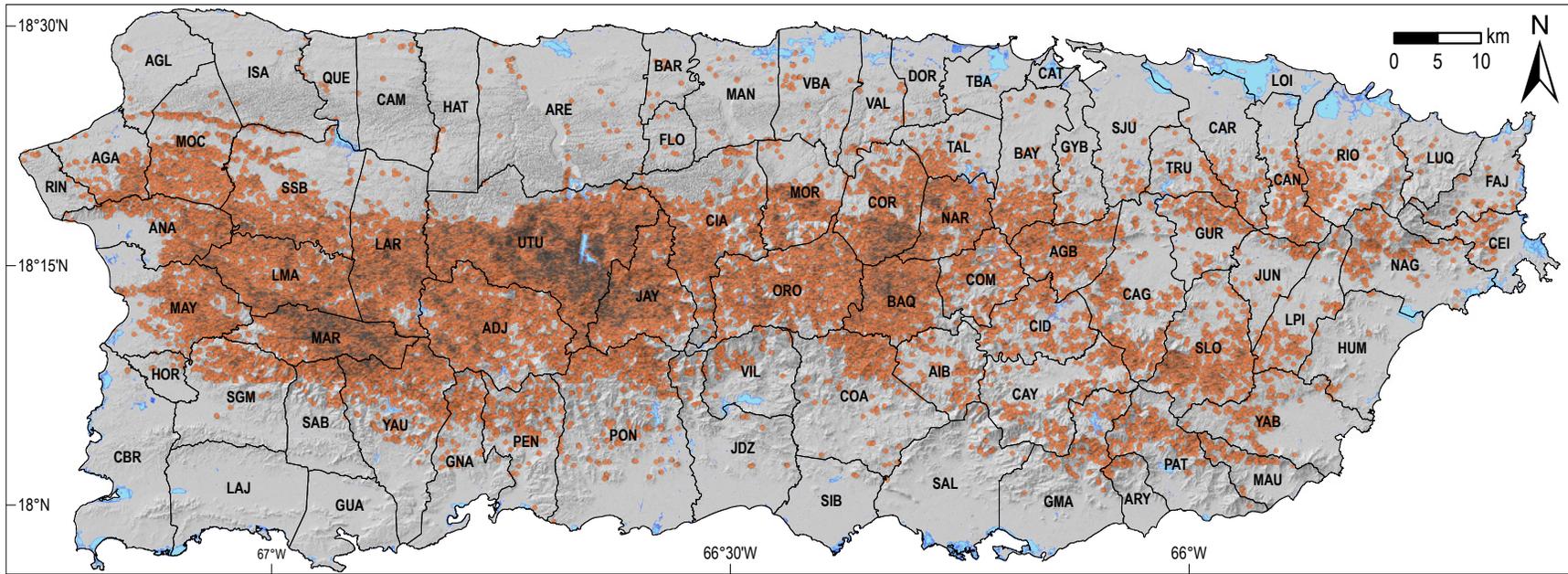


Figura 12. Inventario de deslizamientos de tierra causados por el huracán María (Hughes y otros, 2019). Cada círculo pequeño representa un lugar donde ocurrió un deslizamiento de tierra. Hay 71,431 lugares en el inventario. La explicación de las abreviaturas de los municipios se encuentra en el apéndice 1. (km, kilómetro)

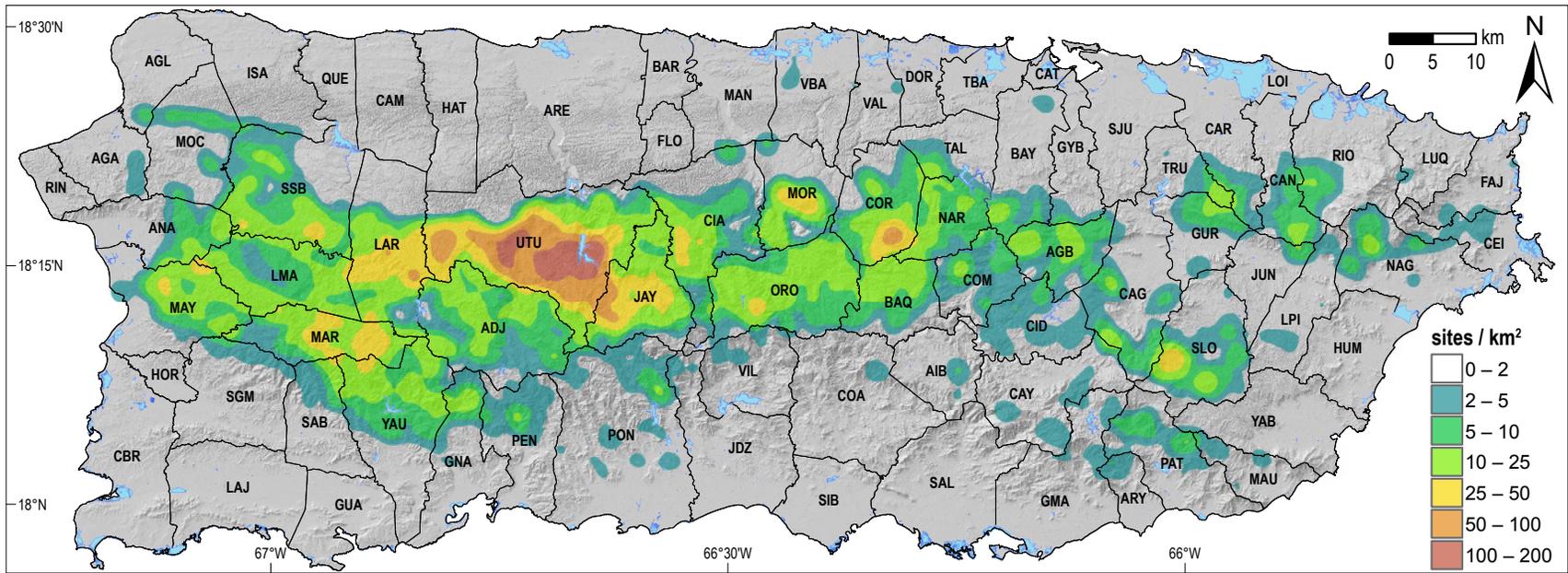


Figura 13. Densidad de lugares donde ocurrieron deslizamientos de tierra, del inventario del huracán María. Se utilizaron los datos de los puntos de Hughes y otros (2019) para determinar la densidad espacial de los puntos mostrados en la figura. La figura se creó con la técnica de densidad kernel, mediante una ventana de 2 km de diámetro. La explicación de las abreviaturas de los municipios se encuentra en el apéndice 1. (km, kilómetro; km², kilómetro cuadrado)

18 Mapa de Susceptibilidad a Deslizamientos de Tierra Desencadenados por Precipitación Intensa en Puerto Rico

e inconsistentes con grandes diferencias de hasta cientos de metros entre deslizamientos de tierra mapeados y sus aparentes verdaderas localizaciones reveladas por un modelo digital de elevación (DEM; U.S. Geological Survey [USGS], 2017) derivado de la detección y alcance de luz (lidar). Una vez los valores del SI se calcularon para cada uno de los factores descritos más adelante, se combinaron mediante la ecuación 3 para obtener un valor agregado del SI (SIA) para cada píxel a una resolución de 5 m a lo largo de la isla principal de Puerto Rico (fig. 14):

$$SIA = (SI_{f1} + SI_{f2} + SI_{f3} + SI_{f4} \dots) + X(SI_{fs}), \quad (3)$$

donde:

- SIA es el valor agregado del SI ,
- SI_{fn} es el valor del SI para el factor n distinto a la pendiente,
- X es el número de factores distintos a la pendiente, y
- SI_{fs} es el valor del SI para el factor de la pendiente.

Los factores utilizados para el análisis se documentan en la tabla 2. El modelo resultante contiene los valores de la pendiente del SI como la mitad de la entrada y los demás factores combinados como la mitad restante de la entrada. Esta ponderación de la pendiente en la entrada del modelo se seleccionó por evaluaciones de prueba y error de los efectos en regiones conocidas por tener históricamente susceptibilidad alta y baja a deslizamientos de tierra.

Dado que el modelo se derivó del inventario de un solo evento de precipitación, se intentó atenuar cualquier sesgo que resultara de las condiciones variables de precipitación y humedad del suelo únicas al evento del huracán María para que el mapa de susceptibilidad a deslizamientos de tierra pueda aplicarse a cualquier evento de precipitación intensa. Bessette-Kirton y otros (2019) encontraron que la densidad espacial de los deslizamientos de tierra desencadenados por el huracán María mostró una buena correlación con los datos de la humedad del suelo en la zona radicular de la misión “Soil Moisture Active Passive” (SMAP) de la Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio (NASA), detectados remotamente y recopilados un día después del evento (NASA, 2017), y no mostró una buena correlación con los estimados de precipitación. Mediante la ecuación 4, calculamos los valores del SI para los mismos datos de SMAP y restamos estos de los valores del SIA para tomar en consideración la variabilidad de humedad del suelo luego del huracán:

$$SIA_m = SIA - SI_{SMAP} \quad (4)$$

donde:

- SIA_m es el valor modificado y final del SI en cada píxel de 5 m en toda la isla; y
- SI_{SMAP} es el valor calculado del SI basado en el contenido estimado de la humedad del suelo en la zona radicular para el 21 de septiembre de 2017.

El conjunto de datos de SMAP y un enfoque para utilizar los futuros datos de SMAP en conjunto con el mapa de susceptibilidad a deslizamientos de tierra para mejorar los pronósticos de las localizaciones de deslizamientos de tierra desencadenados por eventos específicos se discute más adelante en el reporte (en la sección de “Usos y limitaciones del mapa de susceptibilidad a deslizamientos de tierra”).

El ángulo de la **pendiente** generalmente se considera como uno de los factores más importantes con respecto al movimiento de masa, sobre todo para deslizamientos poco profundos (por ejemplo, Carson y Petley, 1970). Para el análisis se agruparon los valores de pendiente en intervalos de 5° a una resolución de píxeles de 5 m. Todas las pendientes mayores de 45° se combinaron en un grupo. En la tabla 3 y figura 15 se presenta la distribución de las agrupaciones de la pendiente a través de Puerto Rico. Alrededor del 40 por ciento de la isla tiene una pendiente de menos de 10°, otro 40 por ciento tiene una pendiente entre 10–30°, y el 20 por ciento restante tiene una inclinación mayor de 30°. Las pendientes más bajas son generalmente costeras; sin embargo, se presentan amplios valles aluviales en algunas zonas interiores a lo largo de ríos tales como el Río Gurabo y el Río Grande de Arecibo, entre otros. La provincia del carso en la costa norte es una zona de pendientes particularmente altas a lo largo de los flancos de mogotes, sumideros, zanjones y otras estructuras de disolución. En la costa norte hay pendientes muy bajas en áreas donde el carso está cubierto por depósitos de arena. En promedio, las pendientes en el flanco sur a lo largo de la Cordillera Central son generalmente más altas debido a que los ríos que desembocan en el Mar Caribe tienen distancias más cortas para descender al nivel base desde la divisoria. Algunas estructuras topográficas relevantes con pendientes altas a través de la isla son el escarpe de Lares a lo largo del borde sur de la provincia del carso, cañones de ríos incididos en el terreno del carso (Río Guajataca, Río Camuy, Río Tanamá, Río Grande de Arecibo, Río Grande de Manatí) y el Cañón San Cristóbal. No todas las zonas con pendientes altas están confinadas al interior con elevaciones más altas, puesto que hay acantilados marinos prominentes en los extremos del noroeste y sureste de la isla, además de otras localizaciones. Aunque la mayoría de los centros urbanos se encuentran en áreas de pendientes más bajas, la densidad poblacional a través del interior rugoso se mantiene alta. Los lagos y embalses se clasificaron como áreas con pendientes de 0°.

Tabla 1. Ejemplos hipotéticos de un conjunto de valores de la razón de frecuencia (FR) y sus valores correspondientes al Índice de Susceptibilidad (SI) para un grupo (i) de cualquier factor (f). Los colores más frescos representan una correlación cada vez menor entre el grupo del factor y los lugares del inventario. Los colores más cálidos representan una correlación cada vez mayor entre el grupo del factor y los lugares del inventario. Los valores de 1 para la FR y 0 para el SI son neutrales. El SI es el logaritmo natural de la FR.

[FR_{fi}, valor de la razón de frecuencia para cada grupo (i) de cada factor (f); SI_{fi}, valor del SI para cada grupo (i) de cada factor (f).

Razón	FR _{fi}	SI _{fi}
1:5	0.2	-1.61
1:4	0.25	-1.39
1:3	0.33	-1.11
1:2	0.5	-0.69
1:1	1	0
2:1	2	0.69
3:1	3	1.1
4:1	4	1.39
5:1	5	1.61

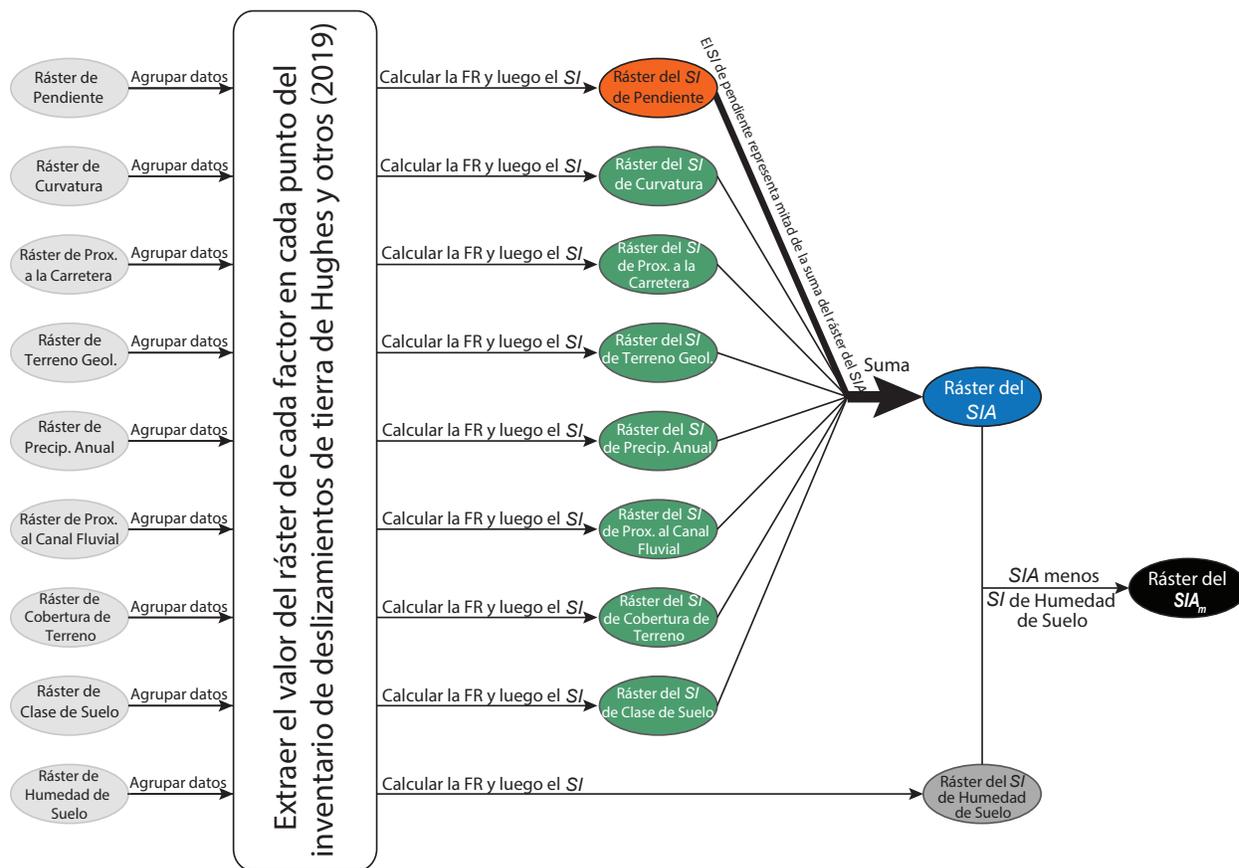


Figura 14. Diagrama de flujo que muestra el proceso para desarrollar el ráster del SIA_m, el cual constituye la base para el mapa de susceptibilidad a deslizamientos de tierra (geol., geológico; precip., precipitación; prox., proximidad; FR, razón de frecuencia; SI, Índice de Susceptibilidad; SIA, Índice de Susceptibilidad agregado; SIA_m, Índice de Susceptibilidad agregado, modificado por la humedad del suelo)

20 Mapa de Susceptibilidad a Deslizamientos de Tierra Desencadenados por Precipitación Intensa en Puerto Rico

Tabla 2. Datos utilizados en los análisis de la razón de frecuencia.¹

[USGS, Servicio Geológico de los Estados Unidos; lidar, detección y alcance de luz; NHD, “National Hydrography Dataset”; GAP, Proyecto de Análisis Gap de Puerto Rico; USDA, Departamento de Agricultura de Estados Unidos; NRCS, Servicio de Conservación de Recursos Naturales; NASA, Administración Nacional de la Aeronáutica y el Espacio]

Factor	Fuentes de datos	Resolución original	Resolución final	Interpolación
Pendiente	lidar de 2015–2016 del USGS ²	1 metro	5 metros	No
Curvatura	lidar de 2015–2016 del USGS ²	1 metro	5 metros	No
Proximidad a la superficie de carretera	Shapefile de línea Tiger de la Oficina del Censo de los Estados Unidos ³	Vector polilíneal	5 metros	No
Geología	USGS/Oficina de Gerencia y Presupuesto de Puerto Rico ⁴	1:20,000 vector poligonal	5 metros	No
Precipitación media anual	Fick y Hijmans, 2017	900 metros	5 metros	No
Proximidad al canal fluvial	Línea de flujo del USGS NHD ⁵	Vector polilíneal	5 metros	No
Cobertura de terreno	Cobertura de terreno GAP del USDA ⁶	15 metros	5 metros	No
Clasificación de suelo	USDA NRCS ⁷	Vector poligonal	5 metros	No
Humedad de suelo	“Soil Moisture Active Passive Sensor” de la NASA ⁸	9,008 metros	5 metros	Sí

¹Los factores se resaltan en “negrilla” cuando se describen por primera vez en los próximos párrafos.

²USGS, 2017.

³Oficina del Censo de los Estados Unidos, 2015.

⁴Oficina de Gerencia y Presupuesto de Puerto Rico, 2018.

⁵USGS, 2019.

⁶Gould y otros, 2008.

⁷USDA, 2018.

⁸NASA, 2017.

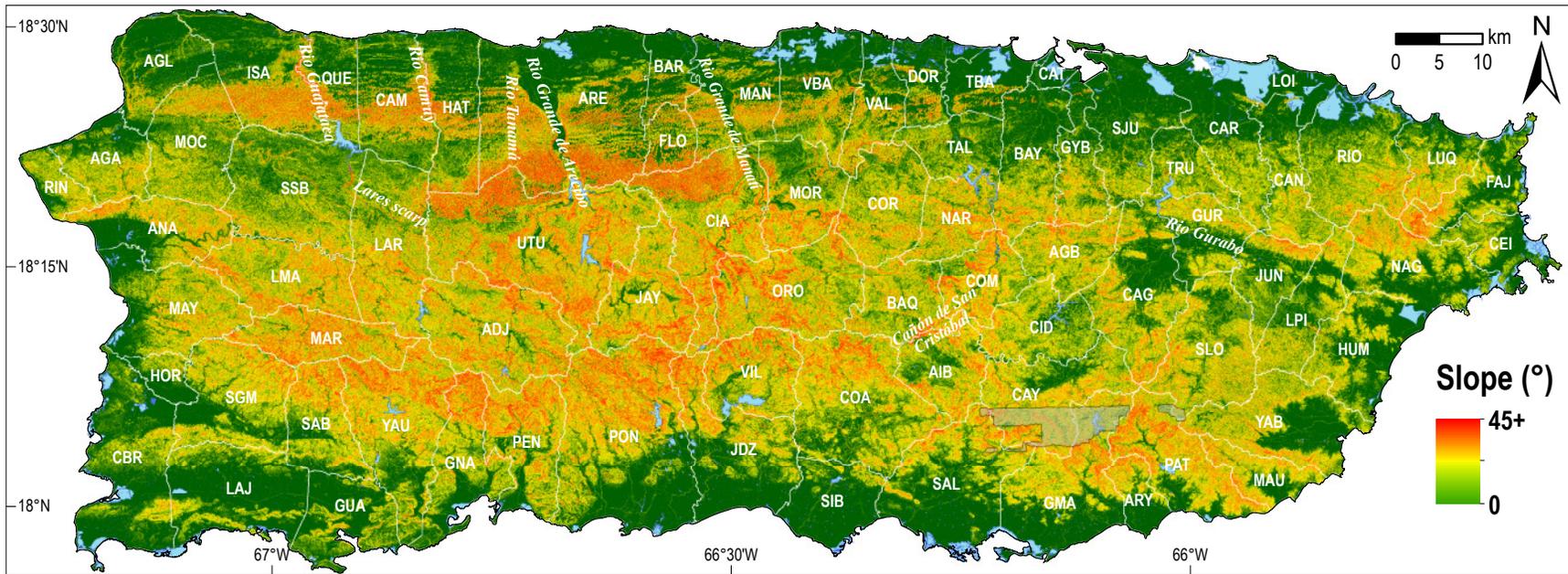


Figura 15. Mapa de pendiente para la isla de Puerto Rico. Valores calculados de un modelo digital de elevación derivado de lidar (U.S. Geological Survey, 2017). La resolución es de 5 metros. Las zonas poligonales sombreadas mayormente dentro de los municipios de Cayey (CAY) y Guayama (GMA) en el sureste se explican en el texto y se muestran en la figura 17. La explicación de las abreviaturas de los municipios se encuentra en el apéndice 1. (km, kilómetro; °, grado)

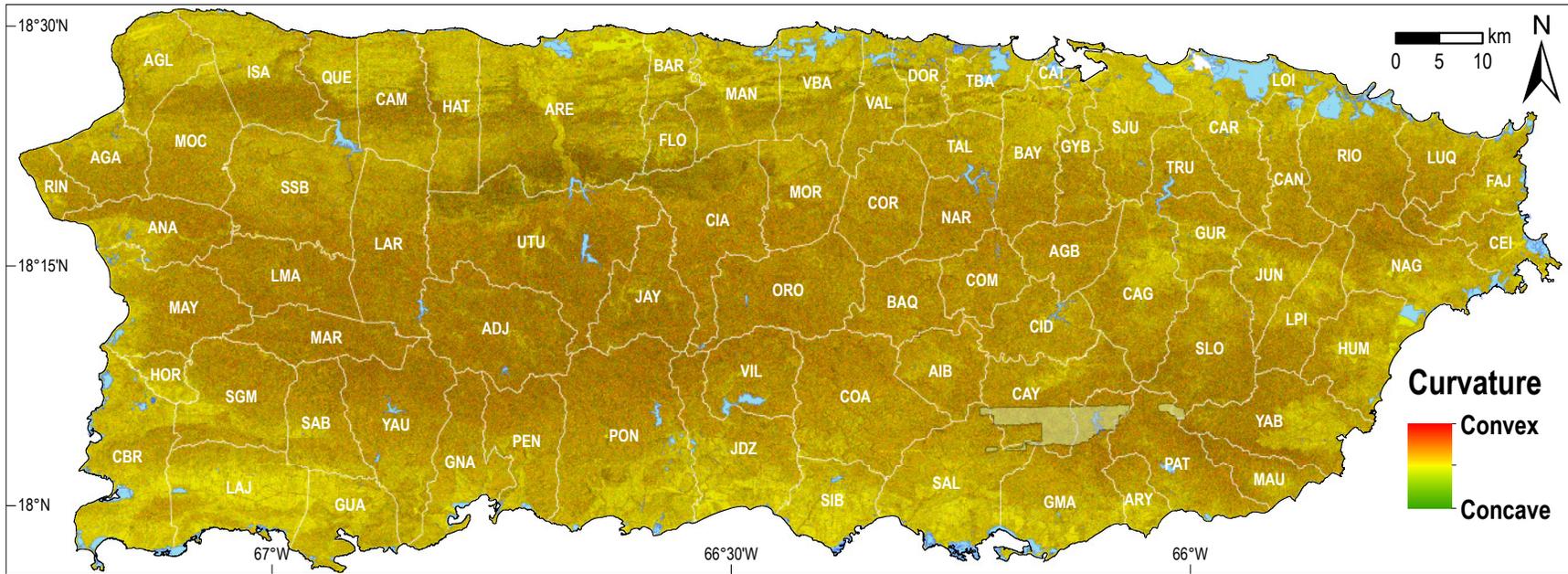


Figura 16. Valores de curvatura calculados a partir del modelo digital de elevación derivado de lidar para la isla de Puerto Rico (U.S. Geological Survey, 2017). La resolución es de 5 metros. Las zonas poligonales sombreadas en el sureste mayormente en Cayey (CAY) y Guayama (GMA) se explican en el texto y se muestran en la figura 17. La explicación de las abreviaturas de los municipios se encuentra en el apéndice 1. (km, kilómetro)

Tabla 3. Resultados de los análisis de la razón de frecuencia para factores que contribuyen potencialmente a deslizamientos de tierra.

[Los valores pueden no sumar debido al redondeo. °, grado; km², kilómetro cuadrado; %, por ciento; #, número; FR, razón de frecuencia; SI, Índice de Susceptibilidad; —, no aplica; m, metro; <, menor que; >, mayor que; K-T, Cretácico y Terciario]

Grupo	Área (km ²)	Área (%)	Derrumbes ¹ (#)	Derrumbes ¹ (%)	FR	SI
Pendiente						
0–5°	2,477.5	28.5	415	0.8	0.03	–3.60
5–10°	924.1	10.6	660	1.2	0.12	–2.15
10–15°	821.8	9.4	1,114	2.1	0.22	–1.51
15–20°	867.6	10.0	2,157	4.0	0.40	–0.91
20–25°	924.8	10.6	4,116	7.7	0.72	–0.32
25–30°	908.5	10.4	7,726	14.4	1.38	0.32
30–35°	773.5	8.9	12,403	23.2	2.61	0.96
35–40°	545.4	6.3	13,316	24.9	3.97	1.38
40–45°	282.1	3.2	8,468	15.8	4.88	1.59
45–90°	181.9	2.1	3,198	6.0	2.86	1.05
Total	8,707.2	100.0	53,573	100.1	—	—
Curvatura						
<–50 (0.01/m)	7.2	0.1	42	0.08	0.95	–0.05
–50––25 (0.01/m)	66.4	0.8	882	1.60	2.16	0.77
–25––10 (0.01/m)	446.9	5.1	6,551	12.20	2.38	0.87
–10––5 (0.01/m)	681.4	7.8	7,285	13.60	1.74	0.55
–5––1 (0.01/m)	1,845.2	21.2	8,293	15.50	0.73	–0.31
–1–1 (0.01/m)	2,489.4	28.6	4,739	8.80	0.31	–1.17
1–5 (0.01/m)	1,876.8	21.6	8,029	15.00	0.70	–0.36
5–10 (0.01/m)	785.5	9.0	7,453	13.90	1.54	0.43
10–25 (0.01/m)	462.8	5.3	9,166	17.10	3.22	1.17
25–50 (0.01/m)	38.9	0.4	1,114	2.10	4.66	1.54
>50 (0.01/m)	6.6	0.1	19	0.04	0.47	–0.76
Total	8,707.1	100.0	53,573	99.92	—	—
Proximidad a la superficie de carretera						
0–10 m	1,051.7	12.1	7,256	13.50	1.12	0.12
10–25 m	1,140.6	13.1	8,902	16.60	1.27	0.24
25–50 m	1,363.1	15.6	9,809	18.30	1.17	0.16
50–75 m	1,012.9	11.6	6,968	13.00	1.12	0.11
75–100 m	782.1	9.0	5,049	9.40	1.05	0.05
100–200 m	1,798.0	20.6	10,319	19.30	0.93	–0.07
200–400 m	1,119.3	12.8	4,471	8.40	0.65	–0.43
400–1,000 m	397.2	4.6	772	1.40	0.32	–1.15
1,000+ m	52.4	0.6	27	0.05	0.08	–2.48
Total	8,717.3	100.0	53,573	99.95	—	—

24 Mapa de Susceptibilidad a Deslizamientos de Tierra Desencadenados por Precipitación Intensa en Puerto Rico

Tabla 3. Resultados de los análisis de la razón de frecuencia para factores que contribuyen potencialmente a deslizamientos de tierra.—Continuación

[Los valores pueden no sumar debido al redondeo. °, grado; km², kilómetro cuadrado; %, por ciento; #, número; FR, razón de frecuencia; *SI*, Índice de Susceptibilidad; —, no aplica; m, metro; <, menor que; >, mayor que; K-T, Cretácico y Terciario]

Grupo	Área (km ²)	Área (%)	Derrumbes ¹ (#)	Derrumbes ¹ (%)	FR	SI
Terreno geológico						
Aluvión del Cuaternario	1,875.1	21.5	438	0.80	0.040	-3.27
Secuencia del Terciario	1,496.9	17.2	1,102	2.10	0.120	-2.12
No ígneo del Cretácico	61.1	0.7	9	0.02	0.020	-3.73
Intrusivo del Terciario	285.5	3.3	2,829	5.30	1.610	0.48
Intrusivo del Cretácico	654.2	7.5	15,149	28.30	3.760	1.33
Volcanoclástico del K-T	3,506.5	40.3	31,514	58.80	1.460	0.38
Hidrotérmico/metamórfico	112.0	1.3	588	1.10	0.850	-0.16
Basáltos, pedernales, otros	355.4	4.1	1,297	2.40	0.590	-0.52
Serpentinita/anfibolita	115.1	1.3	408	0.80	0.580	-0.55
Derrumbes del Cuaternario	53.2	0.6	232	0.40	0.710	-0.34
Agua superficial	193.8	2.2	7	0.01	0.006	5.14
Total	8,708.8	100.0	53,573	100.03	—	—
Precipitación Media Anual						
0–250 mm	0.0	0.0	0	0.000	—	—
250–500 mm	0.0	0.0	0	0.000	—	—
500–750 mm	0.0	0.0	0	0.000	—	—
750–1,000 mm	484.3	5.6	1	0.002	0.00	8.00 ²
1,000–1,250 mm	589.0	6.8	98	0.200	0.03	-3.61
1,250–1,500 mm	705.7	8.1	148	0.300	0.03	-3.38
1,500–1,750 mm	1,859.8	21.3	3,190	6.000	0.28	-1.28
1,750–2,000 mm	3,149.4	36.1	20,498	38.700	1.06	0.06
2,000–2,250 mm	1,637.9	18.8	23,469	43.800	2.33	0.85
2,250–2,500 mm	290.8	3.3	6,169	11.500	3.45	1.24
Total	8,716.9	100.0	53,573	100.502	—	—
Proximidad al canal fluvial						
0–10 m	309.9	3.6	780	1.5	0.41	-0.89
10–25 m	388.2	4.5	2,091	3.9	0.88	-0.13
25–50 m	602.6	6.9	4,941	9.2	1.33	0.29
50–75 m	578.8	6.6	4,354	8.1	1.22	0.20
75–100 m	552.6	6.3	3,930	7.3	1.16	0.15
100–200 m	1,939.6	22.3	13,916	26.0	1.17	0.15
200–400 m	2,405.4	27.6	17,694	33.0	1.20	0.18
400–1,000 m	1,333.6	15.3	5,778	10.8	0.70	-0.35
1,000+ m	605.4	7.0	89	0.2	0.02	-3.73
Total	8,716.1	100.0	53,573	100.0	—	—

Tabla 3. Resultados de los análisis de la razón de frecuencia para factores que contribuyen potencialmente a deslizamientos de tierra.—Continuación

[Los valores pueden no sumar debido al redondeo. °, grado; km², kilómetro cuadrado; %, por ciento; #, número; FR, razón de frecuencia; *SI*, Índice de Susceptibilidad; —, no aplica; m, metro; <, menor que; >, mayor que; K-T, Cretácico y Terciario]

Grupo	Área (km ²)	Área (%)	Derrumbes ¹ (#)	Derrumbes ¹ (%)	FR	SI
Cobertura de terreno³						
Pastizales húmedos	2,184.6	25.10	14,547	27.20	1.08	0.08
Monte lluvioso siempreverde, plantación de café abandonada/activa	548.9	6.30	13,920	26.00	4.12	1.42
Bosque secundario joven húmedo siempreverde de tierras bajas, no calcáreo	530.5	6.10	3,077	5.70	0.94	-0.06
Desarrollo urbano de alta densidad	522.8	6.00	38	0.10	0.01	-4.44
Bosque secundario húmedo siempreverde y semicaducifolio, de roca caliza	464.6	5.30	130	0.20	0.05	-3.09
Monte lluvioso de arbustos y árboles siempreverde, no calcáreo	241.1	2.80	5,831	10.90	3.93	1.37
Bosque secundario joven lluvioso siempreverde, no calcáreo	216.7	2.50	4,018	7.50	3.02	1.10
Monte lluvioso aluvial de arbustos y árboles	9.0	0.10	120	0.20	2.17	0.77
Monte secundario maduro lluvioso aluvial siempreverde	6.1	0.07	80	0.20	2.12	0.75
Bosque húmedo de arbustos y árboles, de serpentina	3.6	0.04	42	0.08	1.91	0.64
Total	8,713.5	100.00	53,573	100.00	—	—
Clasificación de suelo⁴						
Múcara arcilloso (326695) 40–60% de pendiente	298.9	3.40	2,154	4.0	1.17	0.16
Afloramiento Rocoso de Tanamá (326474) 12–60% de pendiente	239.4	2.80	46	0.1	0.03	-3.47
Caguabo arcilloso lómico (326645) 40–60% de pendiente	218.5	2.50	877	1.6	0.65	-0.43
Consumo arcilloso (326530) 40–60% de pendiente	157.6	1.80	4,863	9.1	5.02	1.61
Caguabo arcilloso lómico (326863) 20–60% de pendiente	128.6	1.50	297	0.6	0.38	-0.98
Pellejas arcilloso lómico (326463) 40–60% de pendiente	98.9	1.10	8,524	15.9	14.01	2.64
Maricao arcilloso (326577) 20–60% de pendiente	3.8	0.04	295	0.6	12.65	2.54
Lirios arcilloso lómico(326445) 40–60% de pendiente	59.1	0.70	3,802	7.1	10.47	2.35
Los Guineos arcilloso (326566) 20–60% de pendiente	6.9	0.08	374	0.7	8.78	2.17
Lirios arcilloso lómico(326444) 20–40% de pendiente	3.0	0.04	146	0.3	7.85	2.06
Total	8,713.8	100.00	53,573	100.0	—	—

Tabla 3. Resultados de los análisis de la razón de frecuencia para factores que contribuyen potencialmente a deslizamientos de tierra.—Continuación

[Los valores pueden no sumar debido al redondeo. °, grado; km², kilómetro cuadrado; %, por ciento; #, número; FR, razón de frecuencia; *SI*, Índice de Susceptibilidad; —, no aplica; m, metro; <, menor que; >, mayor que; K-T, Cretácico y Terciario]

Grupo	Área (km ²)	Área (%)	Derrumbes ¹ (#)	Derrumbes ¹ (%)	FR	SI
Humedad de suelo						
0.14–0.15 wv/sv	7.1	0.08	13	0.02	0.30	–1.21
0.15–0.20 wv/sv	318.4	3.65	787	1.47	0.40	–0.91
0.20–0.25 wv/sv	260.4	2.99	576	1.08	0.36	–1.02
0.25–0.30 wv/sv	1,081.4	12.41	988	1.84	0.15	–1.91
0.30–0.35 wv/sv	2,118.2	24.30	2,852	5.32	0.22	–1.52
0.35–0.40 wv/sv	3,150.9	36.15	19,051	35.56	0.98	–0.02
0.40–0.45 wv/sv	1,571.6	18.03	22,477	41.96	2.33	0.84
0.45–0.50 wv/sv	208.7	2.39	6,829	12.75	5.33	1.67
Total	8,716.7	100.00	53,573	100.00	—	—

¹Solo un 75 por ciento aleatorio del inventario de deslizamientos de tierra del huracán María se utilizó para calcular los valores de la FR y el *SI*. El 25 por ciento restante se utilizó para probar el modelo final. El número total de lugares en el inventario es 71,431.

²El valor mínimo del *SI* usado en el desarrollo del modelo fue de –5.00. Los valores del *SI* menores a este límite se ajustaron a –5.00. Esto se llevó a cabo para evitar incorporar valores del *SI* anómalamente bajos en el modelo dada la baja extensión de área para el factor.

³El conjunto de datos del Programa de Análisis Gap de Puerto Rico incluye 66 clasificaciones distintas de cobertura del terreno a través de Puerto Rico. En esta tabla solo se muestran los valores de las cinco clases más extensas y los cinco valores más importantes de la FR. Los datos y resultados completos están en el apéndice 2 y Hughes y Schulz (2020).

⁴El conjunto de datos de suelo del Servicio de Conservación de Recursos Naturales del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos incluye 697 clases con un código clave numérico de las unidades de suelo (clave de la unidad de mapa [MUKEY]) único. En esta tabla solo se muestran los valores de las cinco clases más extensas y los cinco valores de la FR más importantes. Los datos y resultados completos están en el apéndice 3 y Hughes y Schulz (2020). El número listado en paréntesis para cada clase de suelo es el MUKEY correspondiente.

La **curvatura** de las laderas se clasifica como convexa, cóncava o plana. Las crestas de montañas son generalmente convexas pero los valles pequeños son cóncavos. La curvatura se calculó a una resolución de píxeles de 5 m mediante la combinación de perfil y perfiles de plano (función de curvatura estándar). Los valores positivos representan convexidades y los valores negativos representan concavidades. La cantidad de topografía convexa versus cóncava a través de Puerto Rico es aproximadamente igual (alrededor de 35 por ciento cada una), y los píxeles clasificados como planos y casi planos representan el aproximado 30 por ciento restante (fig. 16). Los valores de curvatura están agrupados tal como se muestra en la tabla 3. Los lagos y embalses se clasifican como áreas planas.

Las métricas de la pendiente y curvatura se calculan a partir de un ráster DEM pre-María derivado de lidar con resolución de 1 m (USGS, 2017) que fue remuestreado a una resolución de 5 m. Se ha demostrado que el uso de datos de lidar para investigaciones de deslizamientos de tierra es mucho más eficaz que los DEMs tradicionales y de baja resolución generados con métodos fotogramétricos (por ejemplo, Schulz, 2007). El DEM derivado de lidar está casi completo para la isla. No existen datos para un aproximado de 55 km² (menos de 1 por ciento de la isla) localizados en las cercanías del Lago Carite en el sureste de Puerto Rico (fig. 17). Las tres zonas poligonales sin datos están mayormente en los municipios de Cayey y Guayama, con una expresión mucho menor en los municipios de Salinas, Patillas, San Lorenzo y Yabucoa. Las zonas con falta de datos dentro de estas zonas se completaron fácilmente con datos viejos, no provenientes de lidar y extraídos de un DEM con una resolución de 5 m (Puerto Rico Centro de Recaudación de Ingresos Municipales, 1998). El DEM utilizado para completar la falta de datos tuvo como resultado un producto de pendiente y curvatura menos detallado en esas áreas específicas ya que el DEM se generó mediante fotogrametría con imágenes aéreas, lo cual provee menos detalles de la superficie del suelo que un estudio de lidar.

La construcción de carreteras implica a menudo cortar y rellenar el paisaje natural. Si Puerto Rico fuera una nación independiente, su densidad de carreteras (kilómetro/kilómetro cuadrado) ocuparía la novena posición a nivel mundial (NationMaster, 2017). Larsen y Parks (1997) demostraron que la **proximidad a la superficie de la carretera** en regiones montañosas de Puerto Rico incrementa la probabilidad de movimientos de masa. Esta correlación es un resultado de la redistribución del estrés al cortar y rellenar, y la alteración de los canales de drenaje en la superficie y el subsuelo, que pueden provocar disminución en la estabilidad de taludes. Además, muchas carreteras rurales no están construidas bajo las mejores prácticas para reducir la inestabilidad de taludes (Larsen y Parks, 1997). La correlación entre los deslizamientos de tierra y la presencia de carreteras se exploró mediante el inventario del huracán María y el shapefile de línea TIGER de la Oficina del Censo de los Estados Unidos (fig. 18; U.S. Census Bureau, 2015). Se generó un ráster incorporado con distancias euclidianas a las superficies de las carreteras



Figura 17. Las zonas que faltan para el estudio de lidar aéreo de Puerto Rico de 2015–2016 (U.S. Geological Survey, 2017) se muestran como polígonos rojos en el cuadrante sureste de la isla. La falta de cobertura de datos ocurre en porciones de los municipios de Salinas (SAL), Cayey (CAY), Guayama (GMA), Patillas (PAT), San Lorenzo (SLO) y Yabucoa (YAB). La falta de datos se remedió con un modelo digital de elevación de 5 metros preexistente generado por el Centro de Recaudación de Ingresos Municipales de Puerto Rico (1998). La explicación de las abreviaturas de los municipios se encuentra en el apéndice 1. (km, kilómetro)

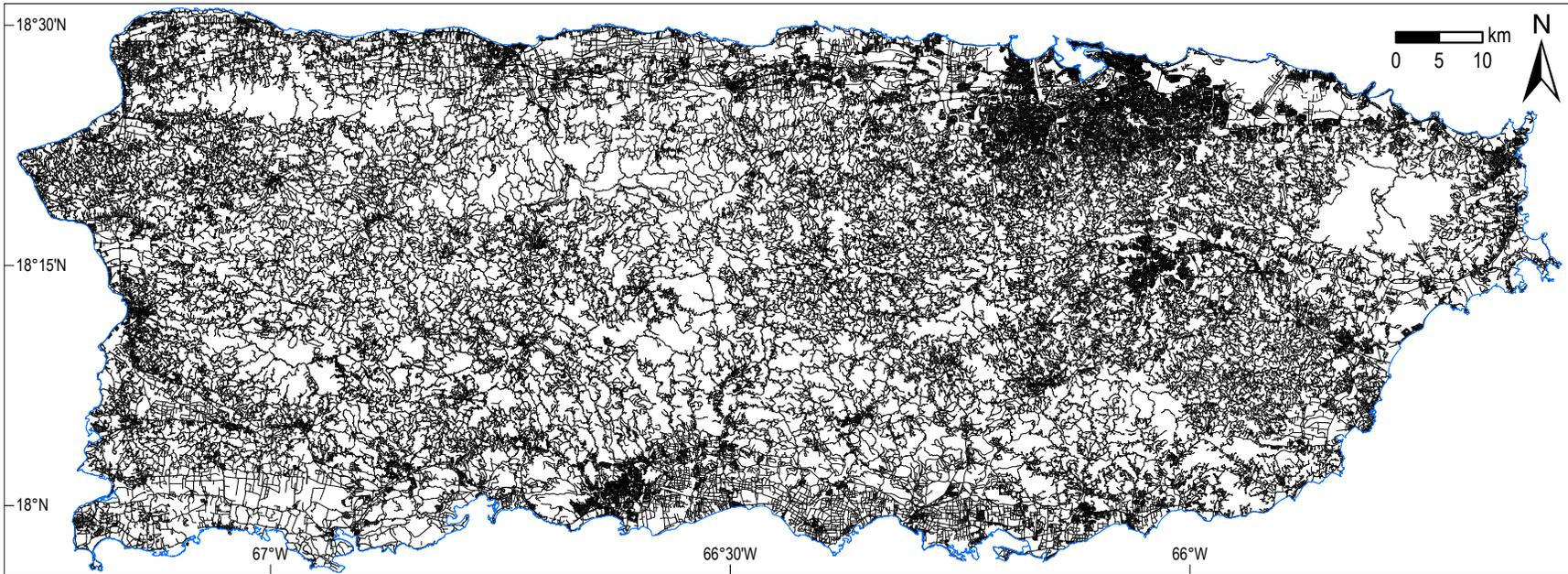


Figura 18. Carreteras pavimentadas en la isla de Puerto Rico (U.S. Census Bureau, 2015). Se resaltan los centros de población más densos de San Juan (área metro), Caguas y Ponce. Las zonas con muy pocas carreteras están en el interior cársico del noroeste y la Sierra de Luquillo (fig. 1) en el noreste de la isla. El shapefile de carreteras TIGER de la Oficina del Censo de los Estados Unidos no incluye las densas redes de carreteras en granjas (ver fig. 19). (km, kilómetro).

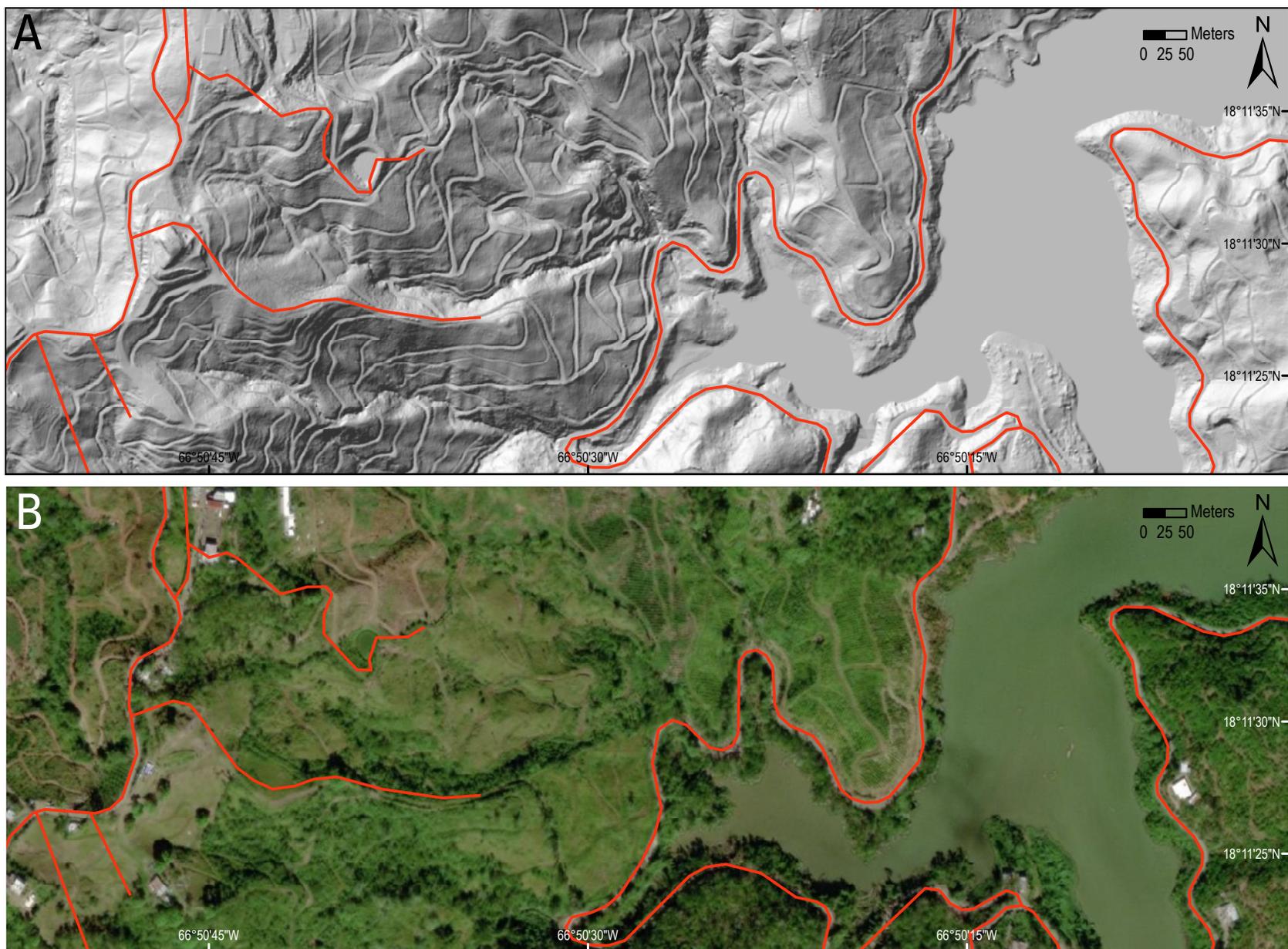


Figura 19. Ejemplo de una densa e improvisada red de carreteras en granjas que no está digitalizada como parte del shapefile de carreteras TIGER de la Oficina del Censo de los Estados Unidos (2015) (las carreteras del shapefile se muestran como líneas rojas). *A*, Ráster de sombreado de un modelo digital de elevación derivado de lidar (U.S. Geological Survey, 2017) revela caminos y senderos muy densos y sin pavimentar que se han construido a través de gran parte del interior montañoso de Puerto Rico y *B*, fotografía aérea de la misma área. La localización (18.190, -66.840) es la Hacienda Buena Vista cerca de Castañer en el extremo superior del Lago Guayo en el municipio de Lares. (m, metro)

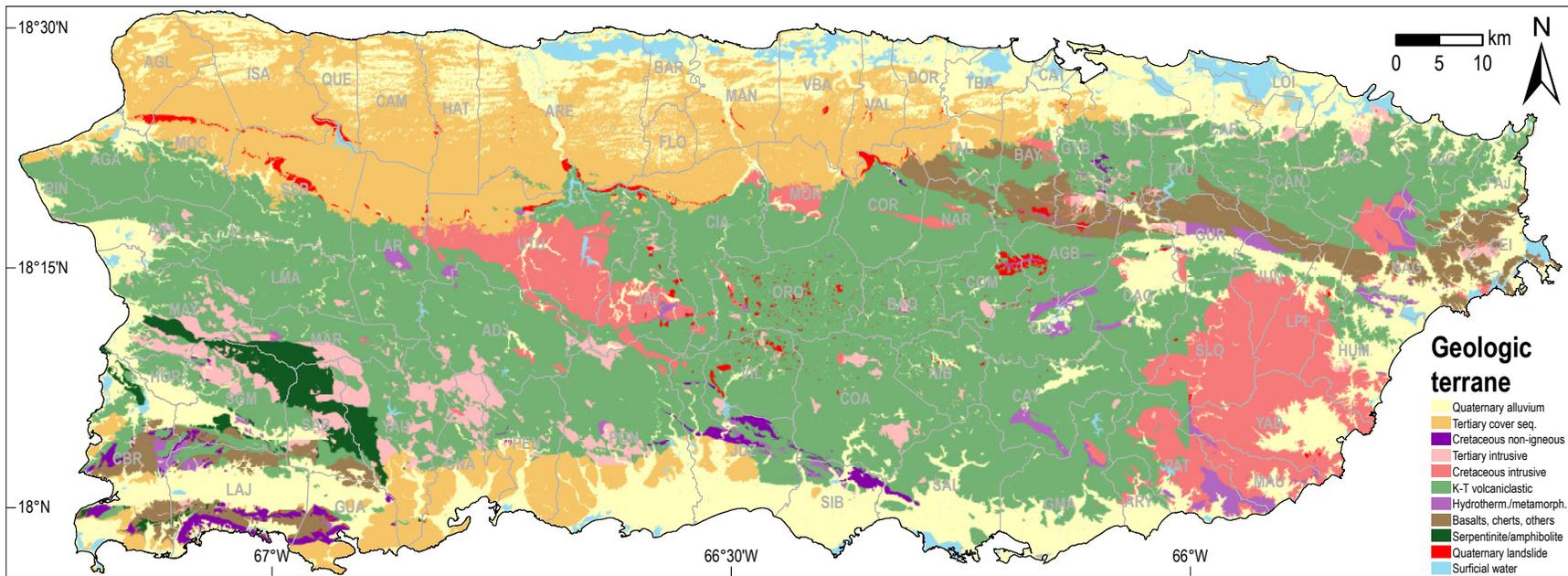


Figura 20. Unidades digitalizadas del mapa geológico de Puerto Rico a una escala de 1:20,000 (de los cuadrángulos de los mapas del Servicio Geológico de los Estados Unidos) categorizadas con el esquema de Bawiec (1998). El complejo de basamento de roca madre de la isla comprende mayormente rocas volcanoclásticas con intrusiones de plutones grandes y pequeños. En las partes norte y sur de la isla, las rocas del basamento están cubiertas discordantemente por una secuencia casi total de roca caliza. La explicación de las abreviaturas de los municipios se encuentra en el apéndice 1. (km, kilómetro; seq., secuencia; hydrotherm., hidrotermal; metamorph., metamórfica)

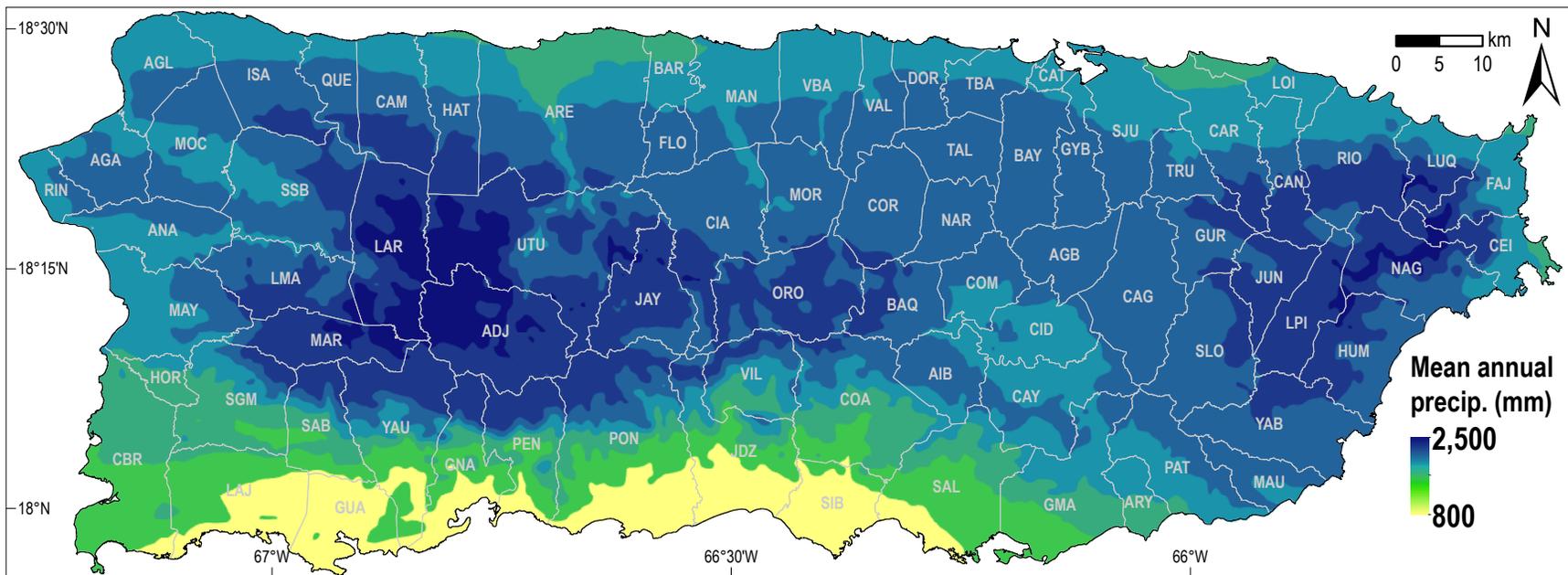


Figura 21. La precipitación media anual en Puerto Rico (modificado de Fick y Jijmans, 2017). Las mayores cantidades de precipitación anual están en la Sierra de Luquillo y en las regiones interiores del oeste de la isla. La costa sur es una zona más árida y de sombra orográfica. La explicación de las abreviaturas de los municipios se encuentra en el apéndice 1. (km, kilómetro; mm, milímetro; precip., precipitación)

a una resolución de 5 m. Los resultados de este ejercicio, resumidos en la tabla 3, revelan que más del 50 por ciento de la isla se encuentra a 75 m de una vía de tránsito y solo un 5 por ciento de la isla se encuentra a más de 400 m de una superficie de carretera. El estudio de Larsen y Parks (1997) demostró que el terreno montañoso a 85 m de una vía de tránsito es al menos 5 veces más probable a experimentar deslizamientos de tierra. Es importante destacar que el shapefile de línea TIGER no incluye muchas de las carreteras en granjas y haciendas improvisadas y densamente construidas (fig 19). A comienzos del siglo XX, Dorsey y otros (1903) describieron el interior de Puerto Rico como con “muchos senderos que penetran la isla en casi todas las direcciones” (p. 839). Se ha demostrado que estos senderos, caminos y carreteras son las fuentes primarias de erosión y sedimentación dentro de la Cordillera Central (Ramos-Scharrón y LaFevor, 2016).

La **composición de la roca madre** es muy diversa a lo largo de Puerto Rico (Jolly y otros, 1998b). El tipo de roca en combinación con los efectos variables de la meteorización química tropical dan lugar a distintos productos de regolito con susceptibilidad variable al movimiento de masa. En este estudio se utilizó una compilación digitalizada de cuadrángulos de mapas geológicos a una escala de 1:20,000 preparados por el USGS en la segunda mitad del siglo XX (Puerto Rico Oficina de Gerencia y Presupuesto, 2018). En cuanto a los cuadrángulos que no se publicaron a una escala de 1:20,000 (Rincón, Guánica y Sábana Grande), se utilizaron para la digitalización tanto los datos de los mapas no publicados a una escala de 1:20,000 y los mapas publicados a una escala de 1:100,000. Los cientos de unidades geológicas se agruparon según los 10 terrenos asignados por Bawiec (1998). Los 10 terrenos, así como el agua superficial, se muestran en la figura 20. Los datos en la tabla 3 muestran que aproximadamente el 20 por ciento de la isla se clasifica como aluvión del Cuaternario. Un área casi igual está sustentada por la secuencia de rocas del Terciario. Cerca de un 40 por ciento de Puerto Rico se compone del complejo de basamento volcánico-lástico, con casi un 10 por ciento adicional de rocas ígneas intrusivas del Cretácico y Terciario. Menos de 1 por ciento de la isla proyectado como derrumbes del Cuaternario incluye mayormente características de roca madre profunda mapeadas a lo largo del margen sur de la provincia del carso por Watson Monroe y asociados (Monroe, 1963, 1967, 1969a, 1969b; Berryhill, 1965; Briggs, 1965, 1968; Nelson, 1967; Nelson y Tobisch, 1968; Pease, 1968; McIntyre, 1971; Tobisch y Turner, 1971). El shapefile de polígono digitalizado a una escala 1:20,000 se rasterizó y reclasificó a terreno a una resolución de 5 m.

A pesar de solo medir 170 km x 6 km, la isla principal del archipiélago de Puerto Rico alberga varios microclimas. Las estructuras topográficas a través de la isla, tales como la Sierra de Luquillo y la Cordillera Central, junto con los vientos alisios, producen lluvias y sombras orográficas. El prominente bosque lluvioso tropical El Yunque en la región este y el interior central occidental son las zonas más húmedas con más de 2 m de precipitación anual; el bosque seco de Guánica y otras zonas de la árida costa sur reciben menos de 1 m de precipitación anualmente (fig. 21; Fick y Hijmans, 2017). Las áreas que reciben mayor **precipitación anual** son más susceptibles a experimentar meteorización química intensa en el clima tropical húmedo. El efecto de la meteorización química es importante en la descomposición de la roca madre y el desarrollo del suelo, los cuales pueden influir en la estabilidad de laderas. Además, debido a los efectos orográficos que causan mayor precipitación a mayor elevación, la precipitación puede servir parcialmente como un representante de las áreas montañosas, las cuales son más probables a tener deslizamientos de tierra. El análisis del conjunto de datos muestra que aproximadamente el 6 por ciento de la isla recibe menos de 1 m de precipitación anual, aproximadamente el 70 por ciento de la isla recibe entre 1 y 2 m de precipitación anual y un poco más del 20 por ciento recibe más de 2 m de precipitación anual (tabla 3). Para los cálculos de la FR, el conjunto de datos se agrupó en intervalos de 0.25 m. La resolución original del conjunto de datos es de 900 m, pero se remuestreó—no se interpoló o suavizó—a un tamaño de píxel de 5 m para ser consistente con los conjuntos de datos ráster de otros factores.

El principal agente erosivo en Puerto Rico es el deslizamiento de tierra (Larsen, 2012), el cual ocurre en gran parte como un ajuste topográfico a la incisión fluvial. La erosión fluvial, forzada localmente por el levantamiento tectónico, ocasiona laderas sobre-empinadas que pueden fallar. La proximidad al canal fluvial se incorpora como entrada al modelo, al igual que la distancia a la superficie de carretera. Este factor aborda la densidad de redes de drenaje y distingue entre el terreno topográfico “normal”, donde el drenaje superficial domina, y la gran provincia del carso en la región norte de Puerto Rico, donde hay una expresión muy limitada del drenaje superficial en el paisaje. El conjunto de datos utilizado para los canales fluviales es el archivo shapefile de línea de flujo del “National Hydrography Dataset” del USGS (fig. 22; USGS, 2019). Similar al shapefile de línea TIGER para carreteras, se generó la distancia euclidiana a las estructuras en el shapefile de línea de flujo a una resolución de píxeles de 5 m. El conjunto de datos ráster resultante revela que poco menos de 30 por ciento de la isla se encuentra a 100 m de un canal fluvial, según definido por el USGS, 50 por ciento de la isla está entre 100 m y 400 m de un canal fluvial, aproximadamente 15 por ciento se encuentra entre 400 m y 1,000 m de un canal fluvial y 7 por ciento de la isla está a más de 1,000 m de un canal fluvial (tabla 3). Las áreas de la isla que se encuentran más lejos de los canales fluviales están mayormente en la zona del carso norteño, donde muchas trayectorias de flujo son subterráneas. Los grupos para este conjunto de datos se definieron en el mismo intervalo que el análisis de proximidad a carreteras.

El siglo XX en Puerto Rico fue un periodo de transición prolongada de una civilización principalmente agraria, luego de 400 años de dominio español, a una más moderna y urbanizada (Dietz, 1986). El ambiente natural había sido modificado intensamente por la actividad antropomórfica antes de la adquisición de la isla por los Estados Unidos. Más recientemente, vastas extensiones de tierra cultivada han sido abandonadas y dejadas a la naturaleza, provocando la reforestación a través de la isla (Grau y otros, 2003). La **cobertura del terreno** también se integra en el análisis de la FR ya que refleja el tipo de terreno local y

los estilos de uso de tierras que pueden controlar la respuesta topográfica a amenazas ambientales (Philpott y otros, 2008). Para este proyecto se escogió el ráster de cobertura del terreno del Proyecto de Análisis Gap de Puerto Rico (GAP) (Gould y otros, 2008) y se remuestreó—no se interpoló—de una resolución de 15 m a una de 5 m para ser compatible con los otros conjuntos de datos de entrada del modelo. El ráster del GAP incluye 66 clasificaciones distintas (fig. 23), las cuales se utilizaron durante el análisis sin combinar las diferentes clasificaciones. Los datos del GAP (tabla 3; ap. 2; Hughes y Schulz, 2020) revelan que los “Pastizales húmedos” cubren el 25 por ciento de la isla y que cada una de las siguientes clasificaciones más altas de “Monte lluvioso siempre verde, plantación de café abandonada/activa”, “Bosque secundario joven húmedo siempreverde de tierras bajas, no calcáreo” y “Desarrollo urbano de alta densidad” representan alrededor del 6 por ciento del área total de la isla.

Los **suelos** en Puerto Rico son diversos e incluyen 10 de las 12 clases taxonómicas (Muñoz y otros, 2018). Los únicos suelos que no se encuentran en la isla son los suelos asociados al permafrost y volcanes activos. Los estudios detallados de suelo de la isla se comenzaron a hacer luego de la adquisición por los Estados Unidos (Dorsey y otros, 1903) y continuaron durante el resto del siglo XX hasta principios del siglo XXI (Roberts, 1942; Carter, 1965; Gierbolini, 1975; Boccheciamp, 1977, 1978; Gierbolini, 1979; Acevedo, 1982; Huffaker, 2002; Lugo-Camacho, 2008). El resultado de la compilación y digitalización de datos de suelos por el Servicio de Conservación de Recursos Naturales del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos es un conjunto de datos de alta resolución de los suelos de toda la isla. El archivo vectorial de las clases de suelos se rasterizó a una resolución de 5 m y se utilizó en el análisis de este estudio (fig. 24). El código clave numérico de las unidades de suelo (clave de la unidad de mapa [MUKEY]) sirve para definir unidades de suelo únicas ya que existen nombres y acrónimos similares para distintas clases de suelo en regiones de estudio separadas. El conjunto de datos incluye 697 valores de MUKEY únicos (tabla 3; ap. 3; Hughes y Schulz, 2020). Algunos de estos valores de MUKEY se asignan a unidades de suelo idénticas que existen en más de un área de estudio de suelo regional. Sin embargo, las distintas clases de MUKEY no se agregaron en el análisis para poder explorar lo más posible la diversidad espacial. Los suelos más extensos son el Múcara arcilloso (40–60 por ciento de pendiente), el afloramiento rocoso de Tanamá (12–60 por ciento de pendiente) y el Caguabo arcilloso lómico (40–60 por ciento de pendiente) que cubren 3.4, 2.8 y 2.6 por ciento de la isla, respectivamente. Aproximadamente 3 por ciento de la isla se clasifica como “No hay Datos Digitales Disponibles” o “No hay Información Pública”. Estas localizaciones se encuentran mayormente en áreas urbanas y (o) terrenos federales cerrados y se analizaron como unidades de suelo independientes, consistente con todos los análisis de unidades de suelo. Para propósitos de este estudio, la composición verdadera de los suelos locales no es de importancia, dado que cada área tiene una clasificación de MUKEY individual y puede analizarse para correlación con deslizamientos de tierra.

La ocurrencia a deslizamientos de tierra iniciados por precipitación intensa se correlaciona típicamente con la cantidad de precipitación acumulada, ya que la infiltración de precipitación aumenta las presiones de poros de agua, lo que por consecuencia disminuye el estrés normal efectivo y el esfuerzo de cizalla dentro de las potenciales zonas de cizalla (Terzaghi, 1950). El huracán María produjo suficientes cantidades de precipitación para desencadenar deslizamientos de tierra a través de las áreas montañosas de Puerto Rico (Bessette-Kirton y otros, 2019), lo que lo tornó en un evento oportuno para el análisis de susceptibilidad a deslizamientos de tierra. Sin embargo, las cantidades de precipitación del huracán María variaron espacialmente, al igual que las del huracán Irma alrededor de 2 semanas antes, lo cual puede crear un sesgo en los resultados de los análisis de susceptibilidad de un evento específico, tal como el descrito en este reporte. En un intento de explicar y eliminar este sesgo del mapa de susceptibilidad, se llevó a cabo un análisis de la FR del inventario de derrumbes y la **humedad del suelo** en la zona radicular (0–100 centímetros [cm] de profundidad) estimada por la misión SMAP de la NASA para el 21 de septiembre de 2017 a las 9:30 am AST (el día después del huracán María; NASA, 2017). Como se describe en la ecuación 4, los resultados del *SI* para los datos de SMAP se removieron del Índice de Susceptibilidad agregado y del mapa de susceptibilidad resultante. Debido al fallo del radar Doppler local (National Weather Service Public Information Sheet, 2017) y de muchos pluviómetros en varios momentos durante el paso de la tormenta, los estimados de precipitación para el evento varían bastante a través de la isla (Bayouth García y otros, 2018). Además, la humedad del suelo es un parámetro de la subsuperficie que representa la interceptación de la precipitación, escorrentía e infiltración y es un indicador más exacto para las condiciones de presión de poros de agua que los datos de precipitación. Bessette-Kirton y otros (2019) encontraron una correlación más alta entre la densidad de los derrumbes causados por María y los datos de SMAP que con los datos de precipitación disponibles. La figura 25 muestra los datos de SMAP, los cuales representan el contenido volumétrico de agua (volumen de agua/volumen del suelo) en cuadrículas de 9 km. Para el sensor escogido, la humedad del suelo fue generalmente más alta en el interior montañoso de la isla que cerca del perímetro, aunque también hubo altas cantidades a lo largo de la costa norte-central y noroeste. Los datos sin procesar de SMAP se remuestrearon a un tamaño de píxel de 5 m y se interpolaron mediante una convolución cúbica para proveer una distribución de valores de humedad del suelo más realística y suavizada para uso en este análisis (fig. 26).

Además de remuestrear todos los conjuntos de datos a una resolución de 5 m, todos se procesaron en la misma proyección: WGS 84/UTM Zona 19N. El producto final de los datos está también registrado en el mismo sistema de coordenadas. Algunos conjuntos de datos se analizaron, pero no se utilizaron en el modelo final. Entre otros, estos incluyen la orientación del terreno, elevación sobre el nivel del mar y proximidad a fallas. La orientación del terreno no se utilizó para evitar el sesgo de las condiciones específicas del evento. Además, un estudio piloto del conjunto de datos del inventario y un mapa de orientación de la isla

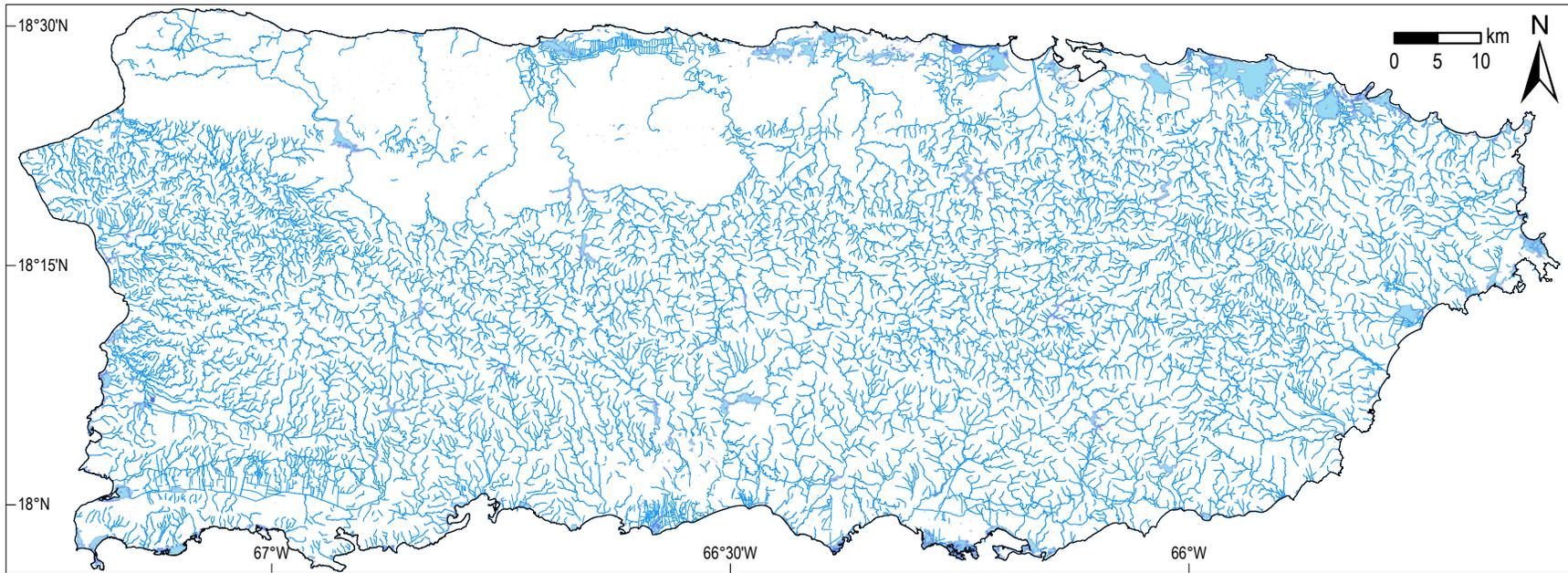


Figura 22. Canales fluviales para Puerto Rico del archivo de base de datos geoespacial del “National Hydrography Dataset” (U.S. Geological Survey, 2019). La costa norte-central/noroeste se caracteriza por corrientes influentes y flujos subterráneos a través de la región del carso. La mayor parte del resto de la isla tiene patrones de drenaje dendríticos. Los ríos siguen las zonas de fallas prominentes en varias localizaciones a través de la isla. (km, kilómetro).

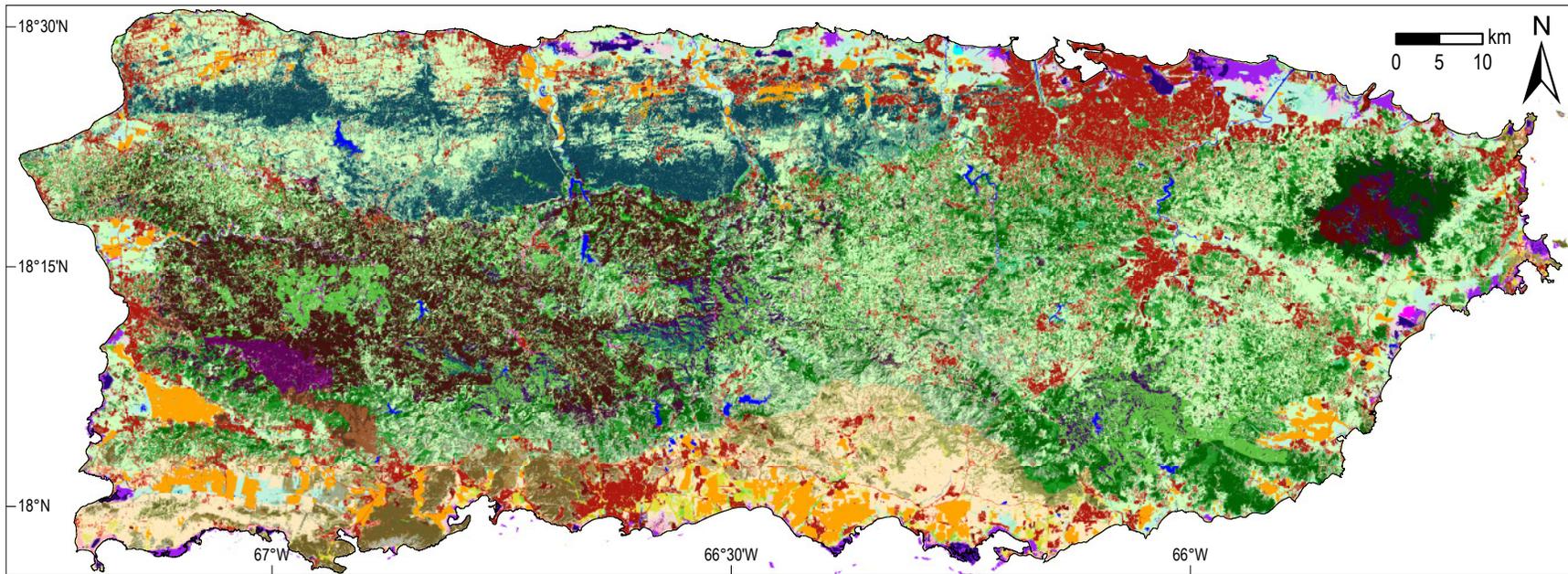


Figura 23. Conjunto de datos de cobertura del terreno del Proyecto de Análisis Gap de Puerto Rico (modificado de Gould y otros, 2008). Los datos son derivados de un análisis de Landsat e incluyen 66 clases únicas. La leyenda no se incluye puesto que el mapa busca mostrar la diversidad de clasificaciones de cobertura del terreno, no las clases exactas. (km, kilómetro)

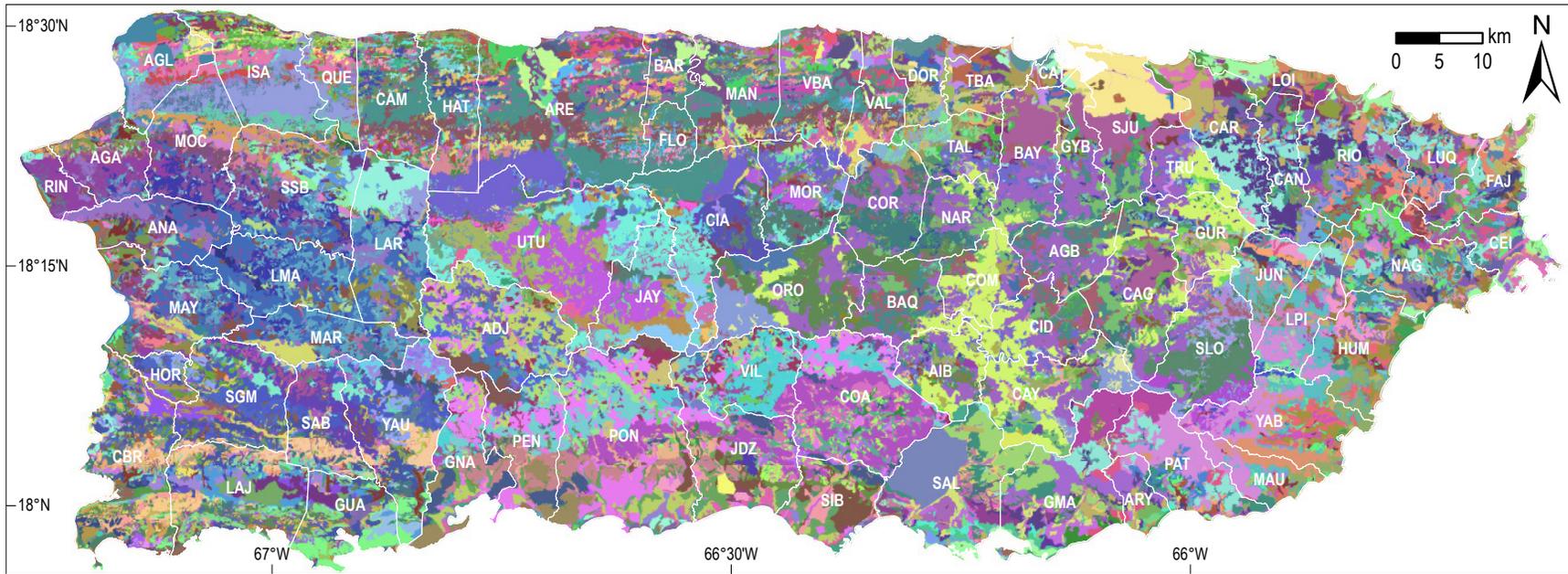


Figura 24. Mapa de clasificación del suelo para la isla de Puerto Rico del Servicio de Conservación de Recursos Naturales del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) (USDA, 2018). El color se basa en las clasificaciones de la clave de la unidad de mapa (MUKEY), las cuales rinden 697 clases únicas. Los colores similares en el mapa no indican necesariamente suelos similares. Esto se debe a la gran cantidad de clases, de las que surgen colores repetidos para unidades distintas. La explicación de las abreviaturas de los municipios se encuentra en el apéndice 1. (km, kilómetro)

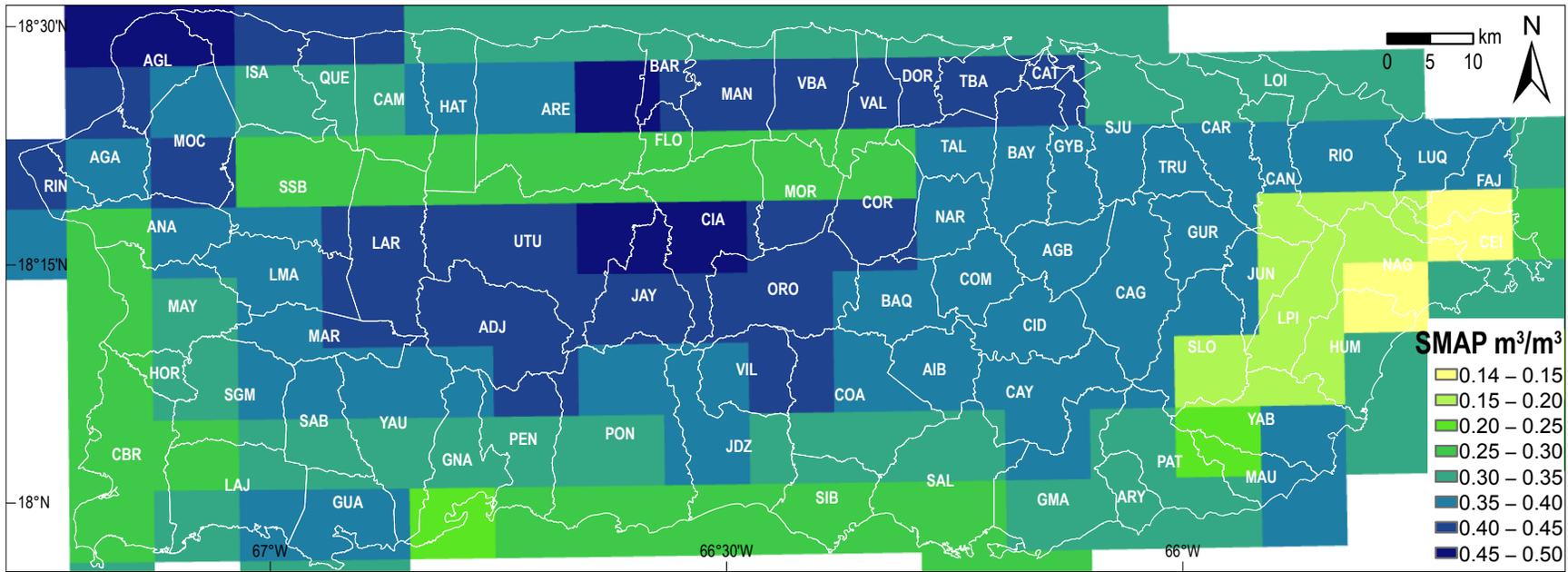


Figura 25. Datos sin procesar de la humedad del suelo en la zona radicular de “Soil Moisture Active Passive” para el 21 de septiembre de 2017 a las 9:30 a.m. Hora Estándar del Atlántico (AST, por sus siglas en inglés) (National Aeronautics and Space Administration, 2017). La humedad del suelo se reporta como el contenido volumétrico de agua (volumen de agua/volumen del suelo). La explicación de las abreviaturas de los municipios se encuentra en el apéndice 1. (km, kilómetro; m^3 , metro cúbico)

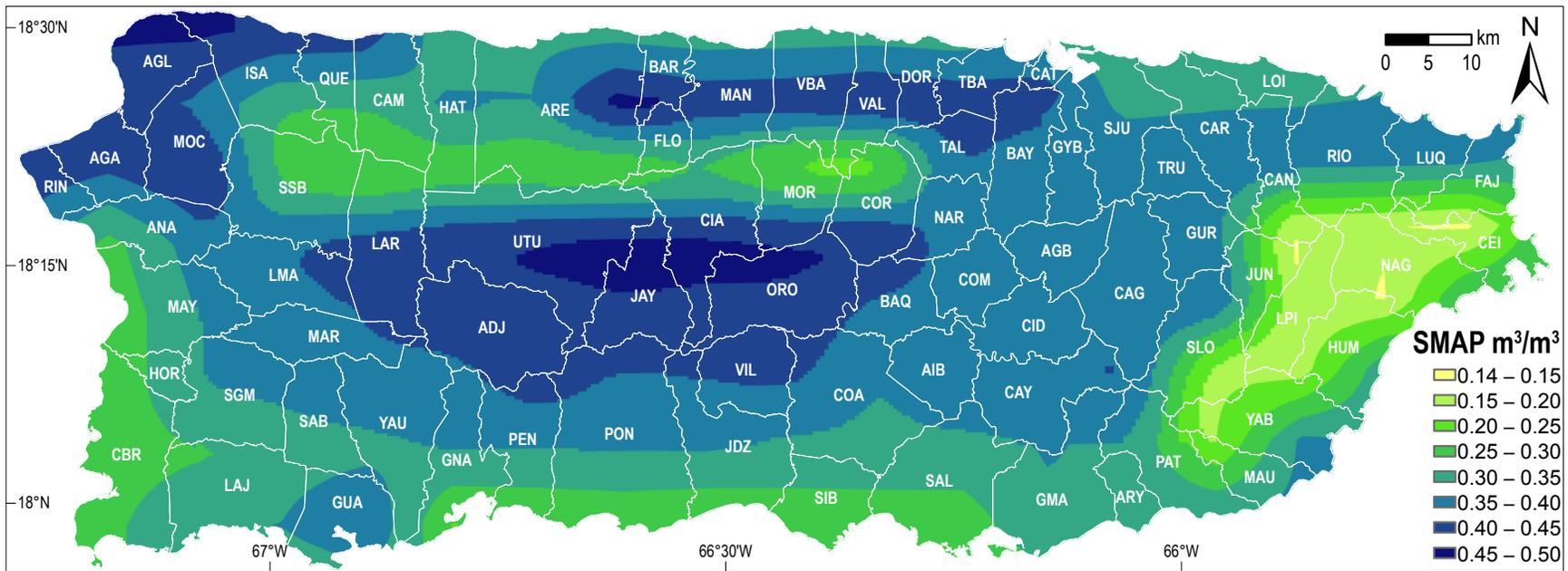


Figura 26. Datos interpolados de humedad del suelo en la zona radicular de SMAP para el 21 de septiembre de 2017 a las 9:30 a.m. Hora Estándar del Atlántico (AST, por sus siglas en inglés). La humedad del suelo se reporta como el contenido volumétrico de agua (volumen de agua/volumen del suelo). La explicación de las abreviaturas de los municipios se encuentra en el apéndice 1. (km, kilómetro; m³, metro cúbico)

entera tuvieron muy poca distinción con respecto a la orientación (Lugo Bendezú y otros, 2018). Este análisis también reveló que una cantidad casi igual de laderas está orientada en cada punto cardinal en la isla. Por lo general, los ciclones tropicales se acercan a Puerto Rico desde el este-sureste, lo cual es importante en términos de los efectos del viento a través de las cimas de las montañas. Sin embargo, los datos utilizados en este estudio no demuestran que la dirección de la precipitación tuvo algún efecto en el control de las fallas de pendientes. La elevación se rechazó como entrada del modelo ya que hay zonas de bajo relieve notables en las regiones montañosas (Lobeck, 1922; Meyerhoff, 1927; Monroe, 1980b; Brocard y otros, 2015; Santiago-Pérez y otros, 2019) tanto como áreas con acantilados costeros a lo largo de la isla; el aumento o la disminución en altitud no tiene control por sí solo en el potencial de deslizamientos de tierra. Se exploraron los rásters de relieve con varios radios, pero esta métrica tampoco se incluyó como entrada al modelo dado que el relieve a cualquier distancia no representa las condiciones de laderas en lugares específicos, al igual que la inclinación de la pendiente. La proximidad a la traza de una falla no se incorporó en el modelo debido a la variabilidad de mapeo de las fallas de cuadrángulo a cuadrángulo y la precisión posicional desconocida de las fallas mapeadas.

Resultados y Discusión

Los resultados de los análisis de la FR y los valores correspondientes del *SI* de los deslizamientos de tierra se reportan en la tabla 3; apéndices 2 y 3 y las figuras 27–35. En la tabla 4 se muestra un resumen de los valores del *SI* y *SI_m* acumulativo. En general, los resultados confirman las correlaciones esperadas para los factores, los cuales actúan como una forma independiente de verificación de la calidad del inventario utilizado. El esquema de color del *SI* para las figuras 27-35 es consistente con un rango de 5.00 a –5.00, de manera que el 0 se encuentra en un color neutral. La saturación de color máxima y mínima total está en los valores de 2.00 y –2.00 del *SI*. El valor más alto calculado del *SI* para cualquier grupo es 2.64 (unidad de suelo Pellejas arcilloso lómico) y los valores más bajos del *SI* se limitaron a –5.00. Estos criterios se utilizaron para atenuar los efectos de (1) valores extremadamente negativos del *SI* que pudieron haber surgido de áreas de grupos muy pequeñas o (2) grupos que tuvieron un valor de la FR de 0.

Tabla 4. Valores del Índice de Susceptibilidad (*SI*) para factores que contribuyen potencialmente a deslizamientos de tierra.

[máx, máximo; mín, mínimo; desv. est., desviación estándar; *SI_m*, valor final modificado del *SI* en cada pixel de 5 m en toda la isla]

Factor	<i>SI</i> máx	<i>SI</i> mín	<i>SI</i> rango	<i>SI</i> media	<i>SI</i> desv. est.
Pendiente	1.59	–3.60	5.19	–0.32	1.62
Curvatura	1.54	–1.17	2.71	0.24	0.80
Proximidad a la superficie de carretera	0.24	–2.48	2.72	–0.38	0.85
Terreno geológico	1.33	¹ –3.73	¹ 5.06	¹ –0.85	¹ 1.57
Precipitación media anual	1.24	² –8.00	² 6.24	² –1.59	² 2.26
Proximidad al canal fluvial	0.29	–3.73	4.02	–0.46	1.21
Cobertura de terreno	1.42	(³)	³ 6.42	³ –2.78	³ 2.25
Clasificación de suelo	2.64	(³)	³ 7.64	³ –3.00	³ 2.20
Humedad de suelo	1.67	–1.91	3.58	–0.51	1.16
<i>SI_m</i> acumulativo	1.97	–4.84	6.81	–1.36	1.74

¹El valor de –5.14 para la categoría de cuerpos de agua superficiales no está incluido.

²Los valores del *SI* menores de –5.00 se ajustaron a –5.00 para minimizar la influencia estadística de subfactores que cubren áreas muy pequeñas y (o) incluyen muy pocos deslizamientos de tierra. El rango, la media y la desviación estándar presentados en la tabla anterior se calcularon con –5.00 como un valor mínimo.

³Algunas categorías de cobertura del terreno y clasificación del suelo incluyeron lugares donde no hubo deslizamientos de tierra. El valor resultante de la razón de frecuencia es 0 y el logaritmo natural de 0 se extiende a negativo infinito. En estos casos, el valor del *SI* se ajustó a –5.00. El rango, la media y la desviación estándar presentados en la tabla anterior se calcularon con –5.00 como un sustituto para todos los resultados de negativo infinito. Los resultados de los datos se encuentran más detallados en la tabla 3 y apéndices 2 y 3.

Rendimiento de Factores

Los resultados de los análisis de la inclinación de la pendiente y del inventario de deslizamientos de tierra (tabla 3, fig. 27A y 27B) muestran que los derrumbes fueron más numerosos a medida que la inclinación de la pendiente incrementó a 45°. Los valores de la pendiente menores de 25° tienen valores del *SI* menores de 0, lo que indica que es menos probable que en estos ocurran fallas de taludes. Las pendientes entre 25° y 45° muestran un incremento lineal en el *SI* (incremento logarítmico en la FR) a un valor máximo de 1.59 para el grupo de 40–45°. Las pendientes entre 45° y 90° representan solamente el 2 por ciento de la isla y tienen un valor menor del *SI* de 1.05. El *SI* menor en este grupo de mayor pendiente puede ser un resultado de la combinación del mecanismo de falla y potencial de identificación de deslizamientos de tierra en lugares muy empinados. A medida que aumenta la pendiente, la profundidad de suelo susceptible a deslizamientos de tierra disminuye y el potencial de caídas de roca se vuelve más alto que el potencial de asentamientos, deslizamientos o flujos. Las caídas de rocas son a menudo menos evidentes que los flujos de escombros cuando se utilizan fotografías aéreas para catalogar lugares con deslizamientos de tierra. Otro factor que contribuye potencialmente al valor más bajo del *SI* para pendientes mayores de 45° es que los acantilados de roca caliza verticales o casi verticales en la provincia del carso norteño representan una gran parte de los valores de grupos para la isla, y los deslizamientos de tierra en esta región fueron poco comunes (Hughes y otros, 2019). Los resultados específicos del análisis de substratos geológicos se discuten en los siguientes tres párrafos.

Los resultados del análisis de la curvatura (tabla 3, fig. 28A y 28B) muestran que las áreas planas o casi planas tienen la correlación más baja con deslizamientos de tierra en el inventario. Los píxeles que se clasificaron como planos o casi planos tienen un valor del *SI* de -1.17, el más bajo para el factor. Para las pendientes que son más cóncavas (+) o más convexas (-), los valores del *SI* aumentan a máximos de 1.54 y 0.87, respectivamente, lo cual indica que ocurrieron comúnmente deslizamientos de tierra en valles y cordilleras. Los valores más extremos de concavidad y convexidad tienen valores del *SI* que van desde neutrales a negativos (tabla 3).

Similar a los resultados de Larsen y Parks (1997), el análisis del inventario de deslizamientos de tierra con respecto a la **proximidad a las superficies de carretera** muestra que lugares a 100 m de una carretera tuvieron mayor probabilidad de correlacionarse con los deslizamientos de tierra que aquellos a mayor distancia. Los valores más altos del *SI* son 0.12 y 0.24 y se correlacionan con grupos que representan píxeles a 0–10 m y 10–25 m, respectivamente, de una superficie de carretera pavimentada. Los resultados se tabulan en la tabla 3 y se presentan visualmente en la figura 29A y 29B.

Los resultados del análisis del sustrato geológico (tabla 3, fig. 30) muestran que la geología local fue importante para la susceptibilidad a movimientos de masa durante el huracán María. De las 11 clasificaciones de terreno (incluyendo el agua superficial), solo 3 muestran una correlación positiva con el inventario de deslizamientos de tierra. La categoría de rocas intrusivas del Cretácico muestra la mayor correlación y tiene un valor del *SI* de 1.33. La mayor parte de esta categoría se compone de los cuerpos plutónicos de granodiorita de Utuado y San Lorenzo. El terreno volcánico del Cretácico-Terciario, el cual es la clasificación geológica más extensa en Puerto Rico, tiene un valor positivo del *SI* de 0.38. La mayoría de las clases se correlacionan negativamente, entre ellas, la secuencia del Terciario (-2.12) y el aluvión del Cuaternario (-3.27). La clasificación de cuerpo de agua superficial (-5.14) incluye siete lugares (menos del 0.01 por ciento del conjunto de datos del inventario) en el catálogo de movimientos de masa. Estos lugares representan ubicaciones en el límite lateral de los cuerpos de agua donde el mapeo geológico extendió demasiado el alcance de la cobertura de agua. Las zonas mapeadas como derrumbes del Cuaternario dan como resultado un valor del *SI* del -0.34, indicando que estas zonas de movimientos de masa profundos, mapeadas mayormente por Monroe (1979), no produjeron deslizamientos de tierra frecuentemente durante el huracán María. La correlación más alta de deslizamientos de tierra para la clasificación de rocas intrusivas del Cretácico se relaciona con la respuesta de estas rocas plutónicas a la meteorización química en Puerto Rico, la cual se ha demostrado que se encuentra entre las más rápidas del mundo (White y Blum, 1995). Específicamente, a medida que la granodiorita se meteoriza químicamente en el ambiente tropical húmedo, muchos minerales experimentan disolución o hidrólisis y se transportan en solución por aguas subterráneas (White y otros, 1998; Porder y otros, 2015). Sin embargo, el cuarzo abundante en la roca madre se mantiene poco alterado en su mayoría y produce un residuo arenoso (Mattson, 1968). Este producto tiene una cohesión muy baja y es más vulnerable a la movilización cuando la saturación del agua de lluvia (u otra) aumenta la presión de poros del agua. El regolito generado por otros tipos de roca distintos a la granodiorita es generalmente más cohesivo y abundante en arcilla.

La precipitación media anual muestra una correlación fuerte con los lugares donde se registraron deslizamientos de tierra. Solo un lugar donde ocurrió un derrumbe se catalogó en las zonas que reciben menos de 1,000 milímetros (mm) de precipitación anualmente. El grupo de 1,750–2,000 mm es casi neutral con un valor del *SI* de 0.06 y el grupo máximo de 2,250–2,500 mm tiene el valor más alto del *SI* de 1.24. En general, las áreas que reciben más precipitación son más propensas a las fallas en las laderas debido a las altas tasas de meteorización química y (o) incisión fluvial como resultado de mayores cantidades de precipitación. Estos resultados se resumen en la tabla 3 y se presentan gráficamente en la figura 31A y 31B.

El análisis de **proximidad al canal fluvial** (tabla 3, fig. 32A y 32B) revela que lugares donde se registraron deslizamientos de tierra dentro de 25 m y a más de 400 m de una línea de flujo representando cada canal son estadísticamente menos probables a experimentar movimientos de masa. Los grupos entre 25 m y 400 m de distancia muestran una correlación con lugares donde ocurrieron derrumbes. Los valores bajos del *SI* para lugares dentro de 25 m de canales fluviales se interpretan como resultado de que parte de esta distancia es el canal en sí (los datos hidrográficos proveen una línea cerca de los ejes del canal) y terrenos inundables de susceptibilidad baja que están asociados con muchos canales fluviales. La mayor parte de la isla que se encuentra a más de 400 m de un canal fluvial está en la región topográficamente compleja de roca caliza y carso norteño donde ocurrieron pocos deslizamientos de tierra durante el huracán María (Hughes y otros, 2019).

El análisis de cobertura del terreno muestra variabilidad entre las 66 categorías distintas clasificadas como parte del conjunto de datos GAP (tabla 3; fig. 33; ap. 2; Hughes y Schulz, 2020). La clase “Monte lluvioso siempreverde, plantación de café abandonada/activa” produce el valor más alto del *SI* de 1.42. Esta alta correlación probablemente se debe a la perturbación de pendientes naturales durante siglos de actividad agrícola, específicamente el desarrollo de carreteras improvisadas y rudimentarias en granjas a través de las áreas montañosas donde se cultiva el café (Philpott y otros, 2008; Ramos-Scharrón y LaFevor, 2016). La categoría “Monte lluvioso de arbustos y árboles siempreverde, no calcáreo” tiene un valor similar del *SI* de 1.37. Veintitrés clases de cobertura del terreno no incluyeron lugares con deslizamientos de tierra; generalmente estas comprenden las categorías de humedales, playas, agua y áridas.

La clase de **suelo** (tabla 3; fig. 34; ap. 3; Hughes y Schulz, 2020) es tal vez el mejor factor distinto a la pendiente para distinguir las zonas susceptibles al movimiento de masa. Además, los valores más altos del *SI* para cualquier factor del estudio se relacionan a tipos de suelo específicos. Las clases de Pellejas arcilloso lómico (40–60 por ciento de pendiente) y Maricao arcilloso (20–60 por ciento de pendiente) resultan en valores del *SI* mayores de 2.5. Otras 28 clases de suelo tienen valores del *SI* mayores de 1.0 y 58 clases adicionales tienen valores del *SI* mayores de 0. Del total de 697 clases, 317 no se asocian con ningún deslizamiento de tierra en el inventario. La clasificación detallada de suelos es una entrada de importancia para el modelo y actúa como un discriminante efectivo dentro de zonas que se encuentran en la misma clasificación del terreno geológico.

El análisis de la **humedad del suelo** (tabla 3; fig. 35) muestra que los dos grupos más húmedos (0.40–0.45 metros cúbicos [m³] y 0.45–0.50 m³) se correlacionan mejor con el conjunto de datos del inventario del huracán María. Esta alta correlación se debe a que gran parte de los datos más húmedos de SMAP se registraron en los municipios centrales de Utuado, Jayuya, Ciales y Orocovis, donde ocurrieron muchos deslizamientos de tierra. Una comparación con el mapa de densidad en la figura 13 resalta esta correlación, específicamente en las cercanías del Lago Caonillas en el centro-este de Utuado. En general, estos resultados concuerdan con el análisis de Bessette-Kirton y otros (2019). Sin embargo, la relación de la FR entre los valores de SMAP y lugares donde ocurrieron derrumbes no sigue una tendencia consistente (tabla 3) considerando valores de la humedad del suelo menores de 0.25; el *SI* aumenta a medida que incrementa la humedad del suelo mayor de 0.25. Esto sugiere que se requirió una humedad del suelo de 0.25 o más para comenzar deslizamientos de tierra extensos.

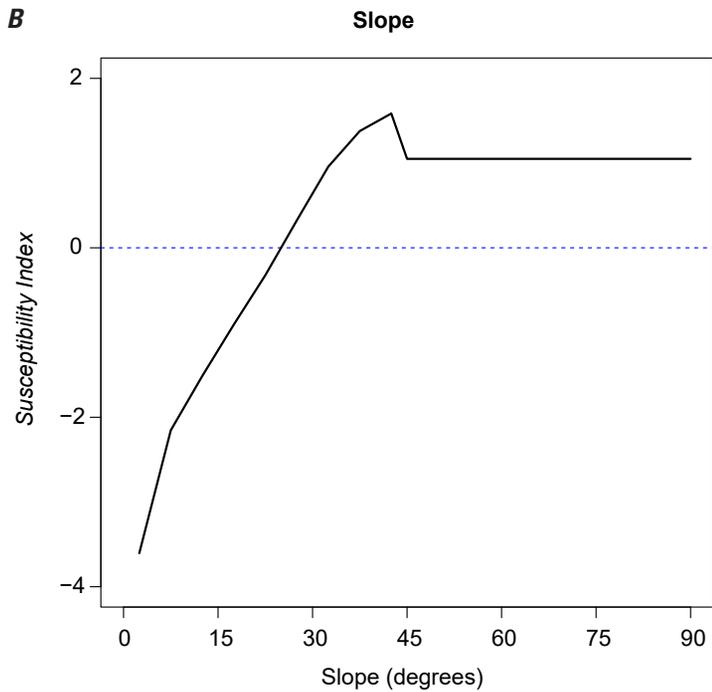
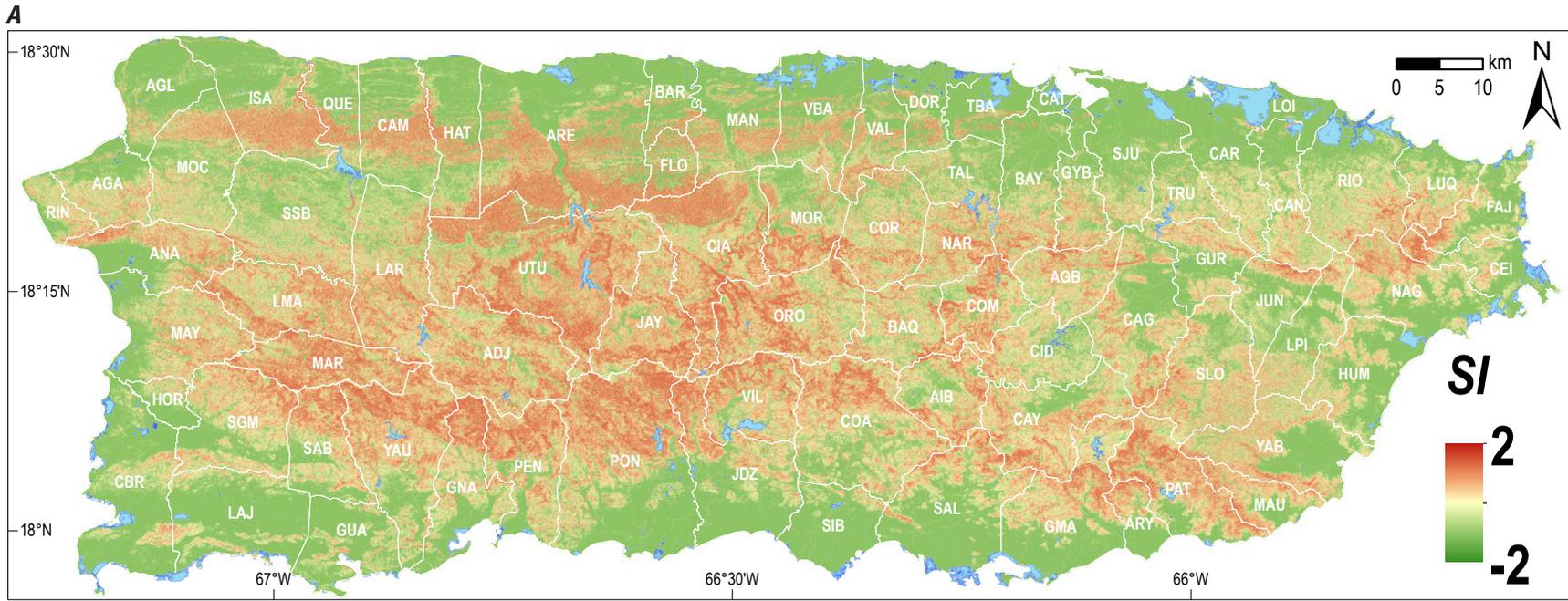


Figura 27. Resultados y representación del análisis del Índice de Susceptibilidad (SI) para la pendiente. *A*, Las pendientes más altas a través de la isla corresponden a valores más altos del SI. El rango de valores del SI para la pendiente va de -3.60 a 1.59 . La zona en el sureste de Puerto Rico, mayormente dentro de Cayey (CAY) y Guayama (GMA), para la cual faltan datos del estudio de lidar aéreo de 2015–2016, no se observa claramente en este análisis. Compare con la figura 15. La explicación de las abreviaturas de los municipios se encuentra en el apéndice 1 (km, kilómetro). *B*, Representación gráfica de los resultados del análisis del SI para el factor de pendiente.

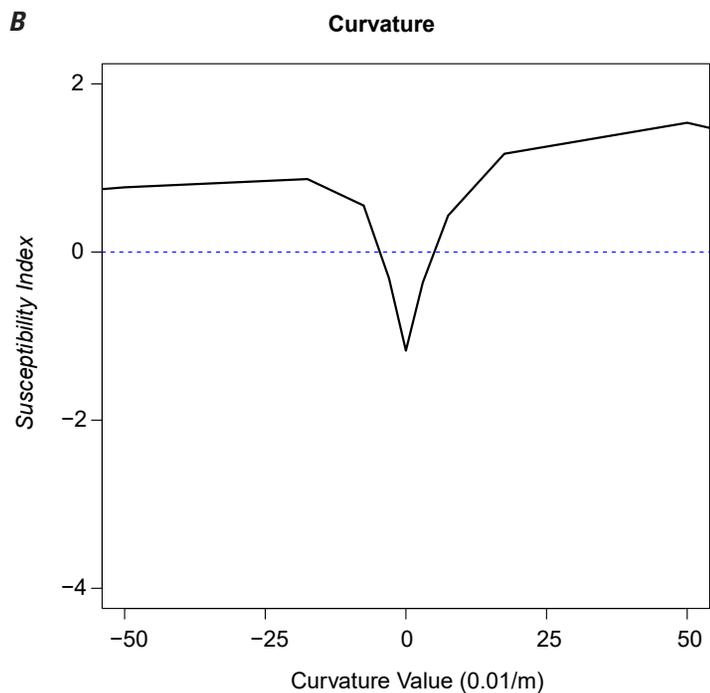
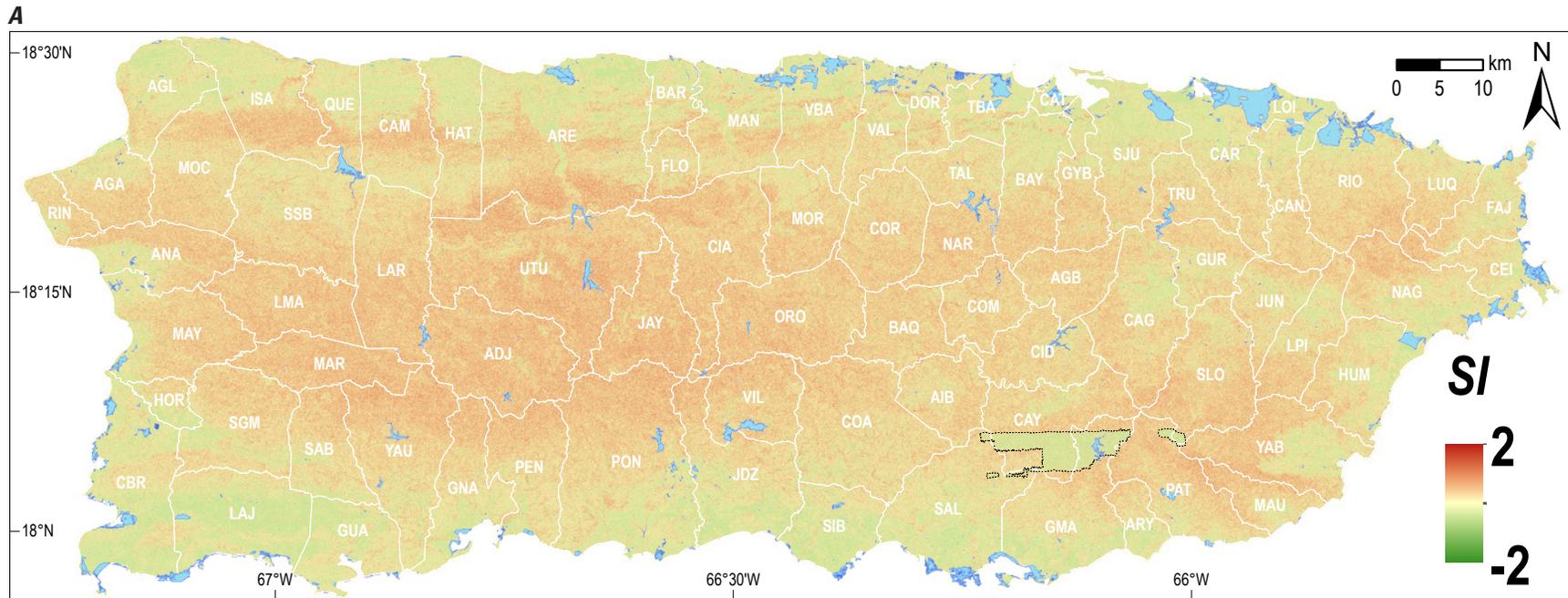


Figura 28. Resultados y representación del análisis del Índice de Susceptibilidad (SI) para la curvatura. *A*, En general, las regiones montañosas albergan más lugares cóncavos y convexos. El rango de valores para la curvatura va desde -1.17 a 1.54 . En esta salida de datos es evidente la zona sin cobertura de lidar dentro de Cayey (CAY) y Guayama (GMA) en el sureste de Puerto Rico. Dado que estas zonas sin datos se remediaron con un producto de datos de menor calidad, el modelo resulta con un terreno mucho más plano del que existe en realidad. Esto conduce a una subestimación inevitable del SI de curvatura en estas áreas poligonales. Esta subestimación se acepta ya que no se recopiló la cobertura de lidar para esta área y la entrada del SI de curvatura representa menos del 7 por ciento del valor final del SI en cada píxel. Compare con la figura 16. La explicación de las abreviaturas de los municipios se encuentra en el apéndice 1. *B*, Representación gráfica de los resultados del análisis del SI para el factor de la curvatura. (km, kilómetro; m, metro)

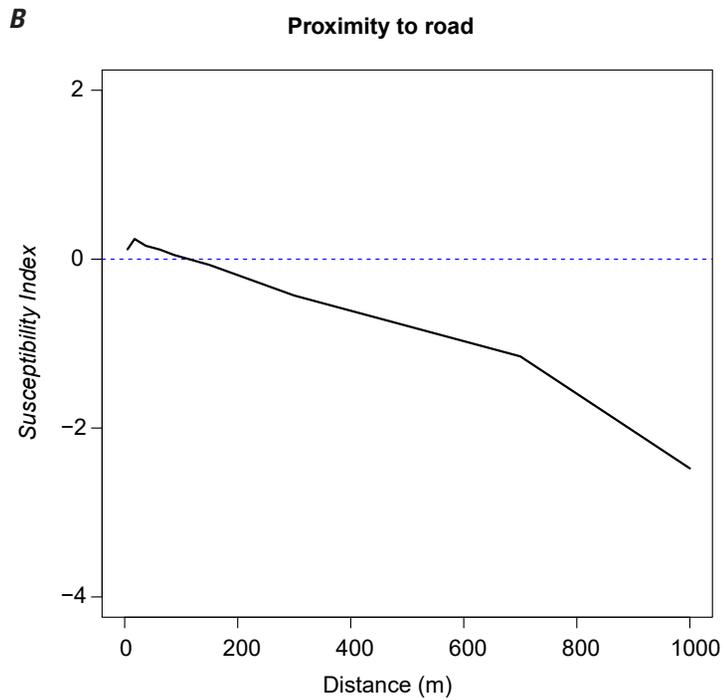
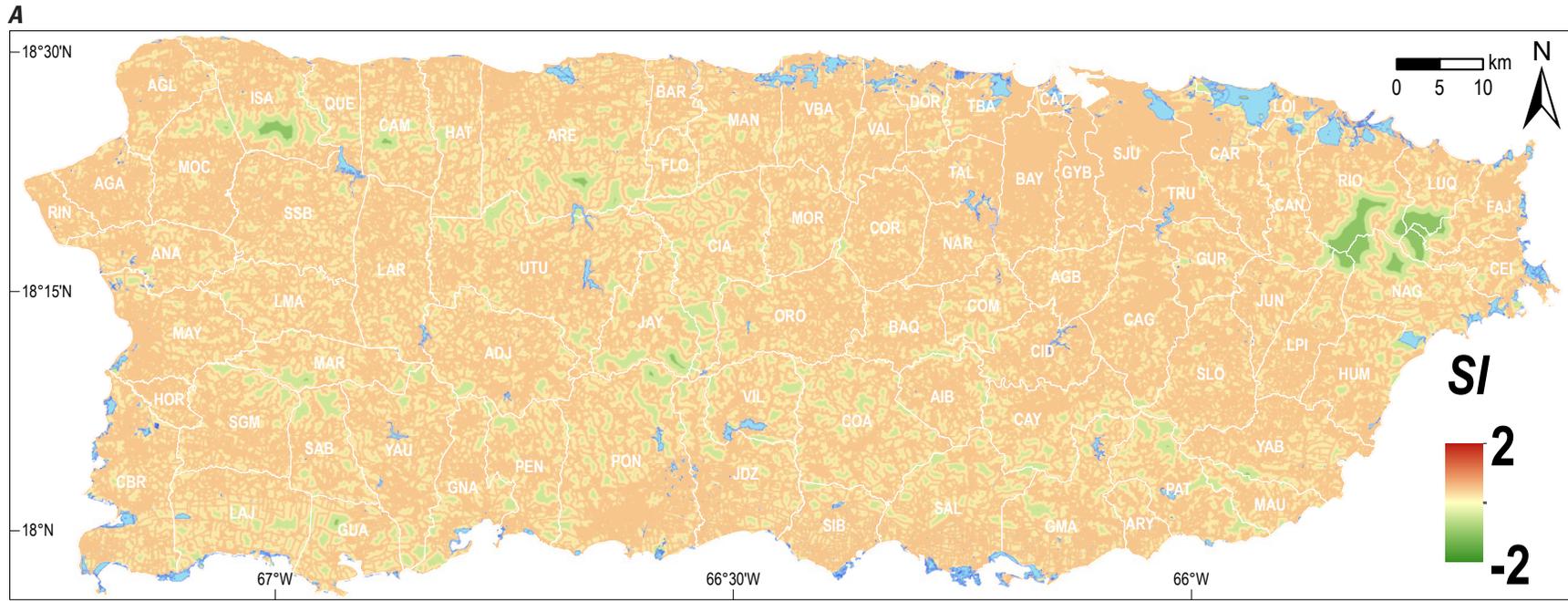


Figura 29. Resultados y representación del análisis de proximidad a las carreteras. *A*, Lugares más cerca de las superficies de carreteras resultan en valores más altos del Índice de Susceptibilidad (SI). Lugares a más de 1 kilómetro de una carretera tienen el valor más bajo del SI de -2.45 mientras que lugares a 100 metros de una carretera tienen valores del SI mayores de 0. Compare con la figura 18. La explicación de las abreviaturas de los municipios se encuentra en el apéndice 1. *B*, Representación gráfica de los resultados del análisis del SI para el factor de proximidad a las carreteras. (km, kilómetro; m, metro)

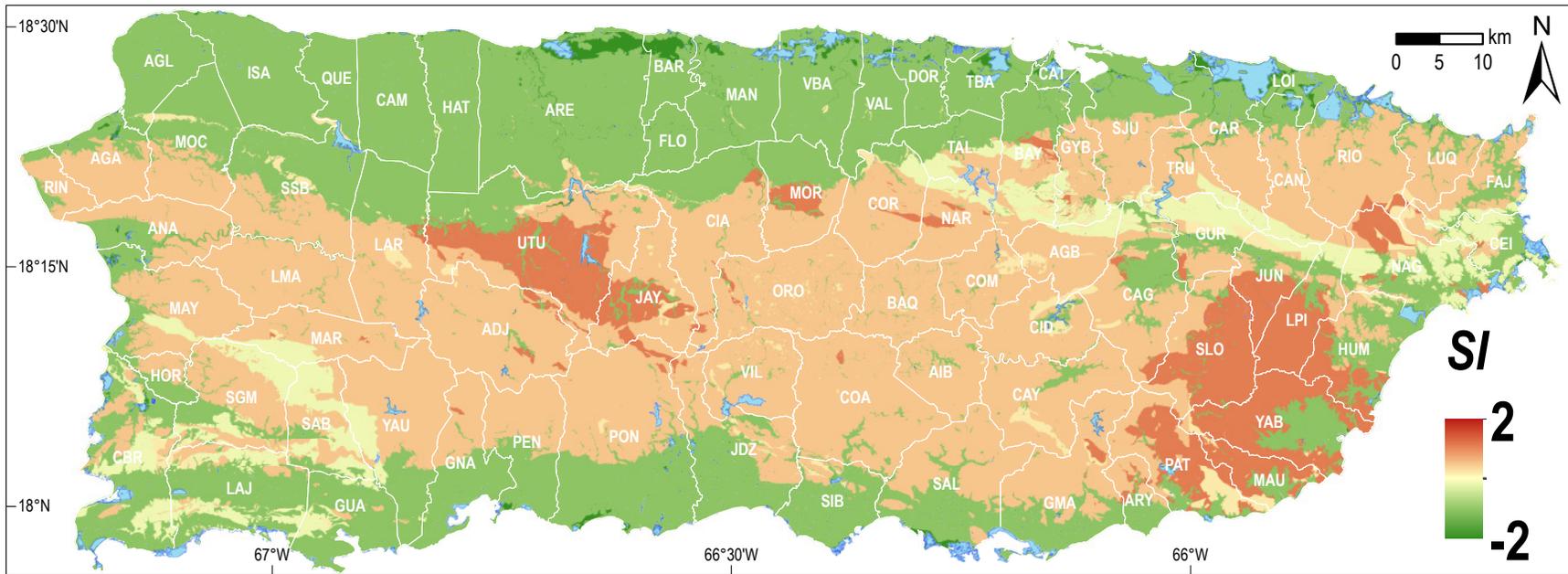


Figura 30. Resultados del Índice de Susceptibilidad (SI) para los terrenos geológicos, según definidos por Baiwec (1998). La clasificación intrusiva del Cretácico muestra la mayor correlación con el inventario de deslizamientos de tierra. El extenso terreno volcanoclástico del Cretácico–Terciario también produjo una correlación positiva. Compare con la figura 20. La explicación de las abreviaturas de los municipios se encuentra en el apéndice 1. (km, kilómetro)

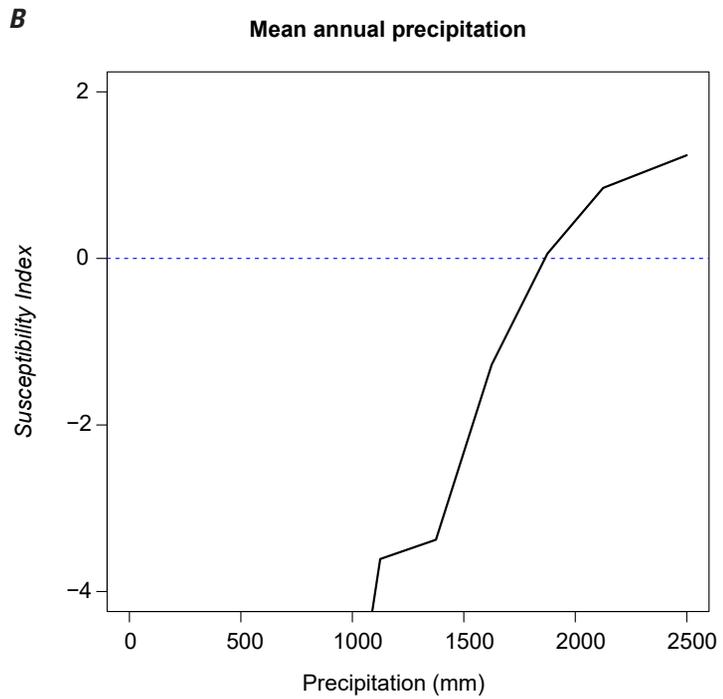
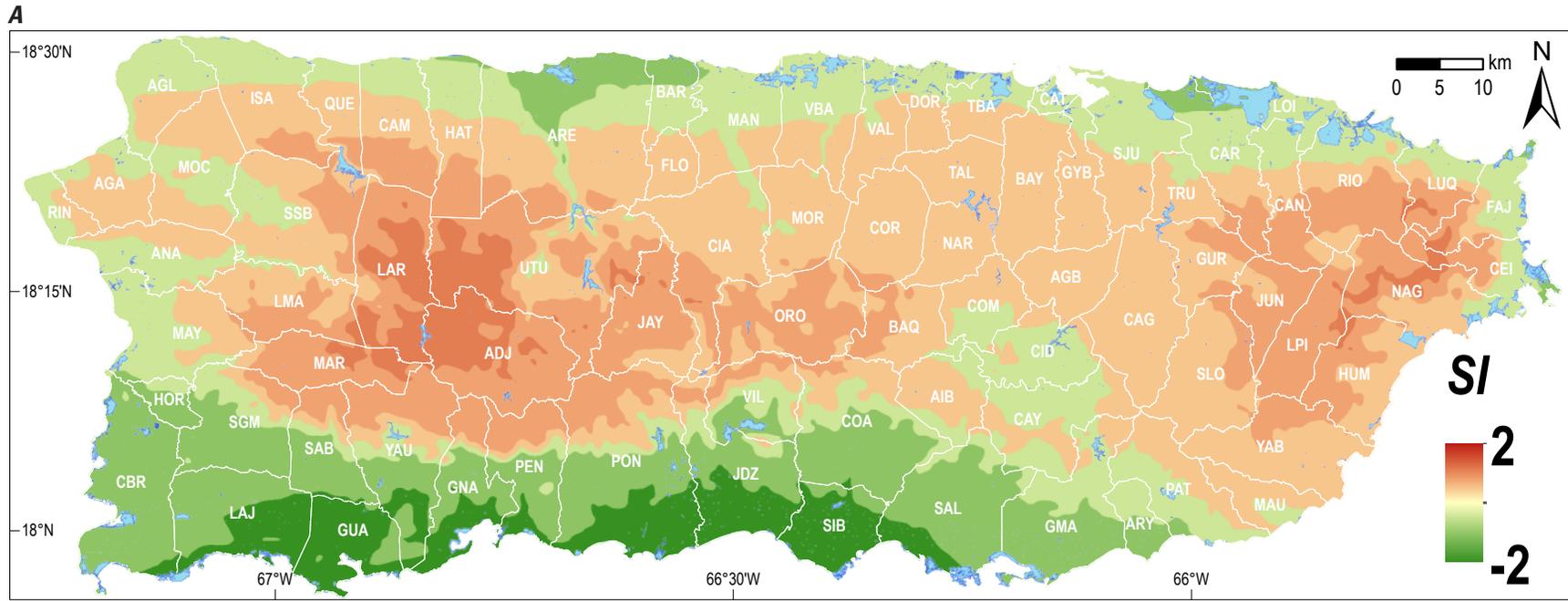


Figura 31. Resultados y representación del análisis del Índice de Susceptibilidad (SI) para la precipitación media anual. *A*, Las zonas de alta precipitación media anual se correlacionan más positivamente con lugares donde ocurre el movimiento de masa. Las zonas más húmedas en la Sierra de Luquillo y el interior occidental tienen los valores más altos del SI. La región árida de la costa sur tiene la correlación más baja con los lugares con derrumbes del inventario. Compare con la figura 21. La explicación de las abreviaturas de los municipios se encuentra en el apéndice 1. *B*, Representación gráfica de los resultados del análisis del SI para el factor de la precipitación media anual. (km, kilómetro; mm, milímetro)

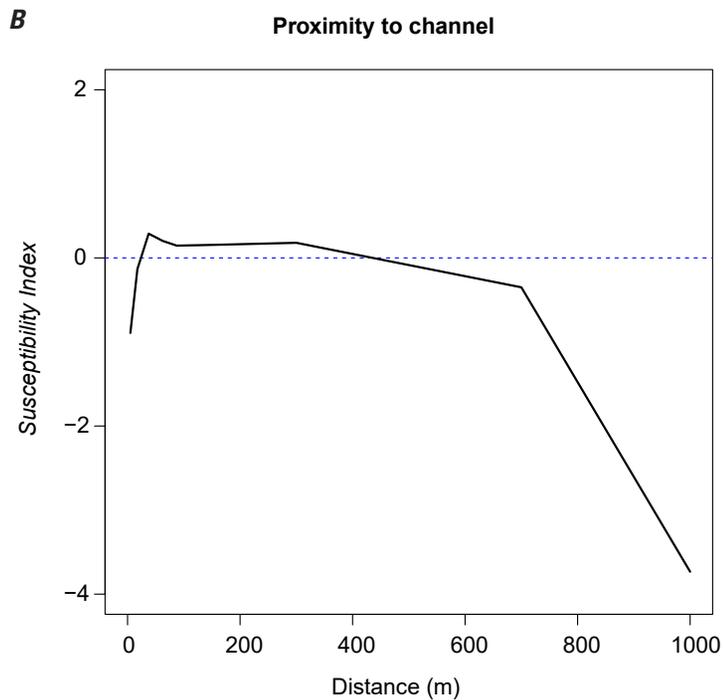
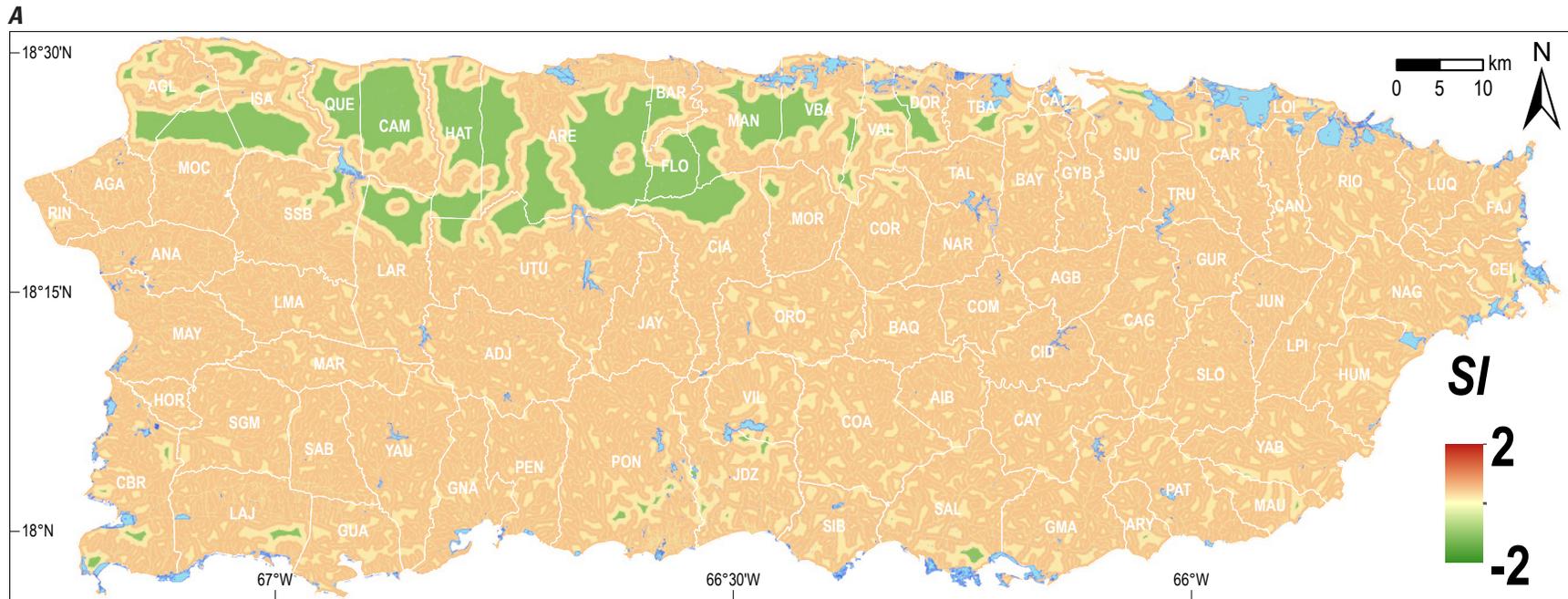


Figura 32. Resultados y representación del análisis del Índice de Susceptibilidad (SI) para la distancia a los cuerpos de agua. *A*, Los lugares a más de 400 metros (m) de canales fluviales superficiales tienen la correlación más baja con los lugares con deslizamientos de tierra. La mayoría de las otras distancias son casi neutrales excepto aquellas dentro de 25 m de las líneas de flujo, las cuales muestran una correlación negativa con las fallas de talud. Compare con la figura 22. La explicación de las abreviaturas de los municipios se encuentra en el apéndice 1. *B*, Representación gráfica de los resultados del análisis del SI para el factor de la proximidad al canal fluvial. (km, kilómetro)

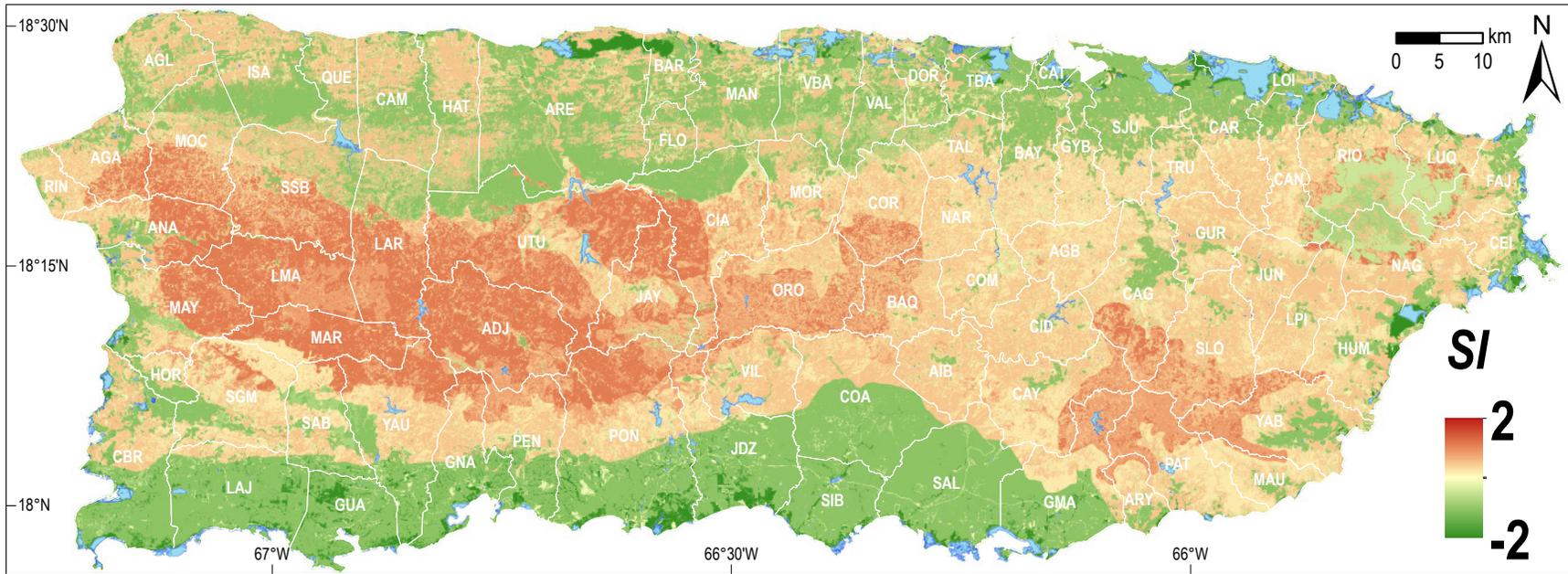


Figura 33. Resultados del análisis del Índice de Susceptibilidad (SI) para las 66 clases únicas de cobertura del terreno. El valor más alto del SI es para fincas de café abandonadas y activas, las cuales se concentran en el interior rugoso del oeste de la isla. La Sierra de Luquillo se caracteriza por tener valores desde neutrales a negativos del SI, rodeados por una zona de áreas de cobertura del terreno con valores más altos del SI. Los humedales, áreas urbanas y playas resultan en valores muy negativos del SI. Compare con la figura 23. (km, kilómetro)

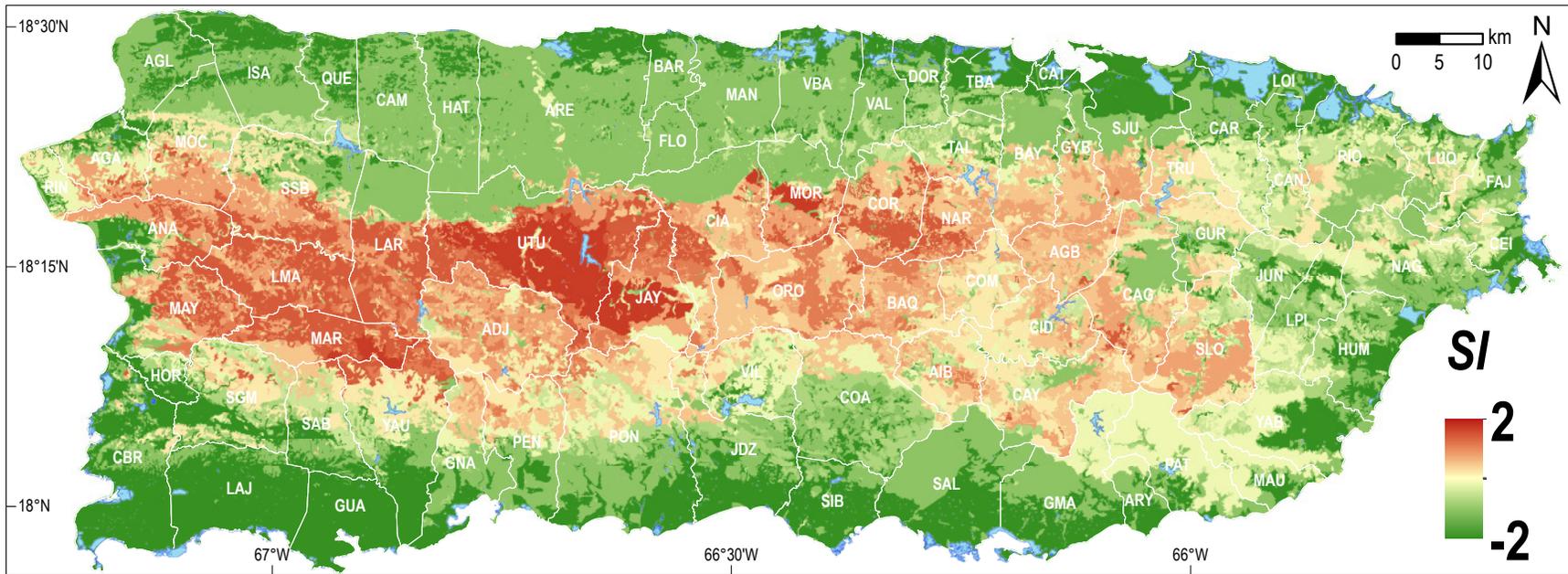


Figura 34. Resultados del análisis del Índice de Susceptibilidad (SI) para las 697 clases de suelo. El Pellejas arcilloso lómico tiene el valor más alto del SI de 2.64 para cualquier factor en el estudio y se correlaciona mayormente con el plutón de granodiorita de Utuado. Compare con la figura 24. La explicación de las abreviaturas de los municipios se encuentra en el apéndice 1. (km, kilómetro)

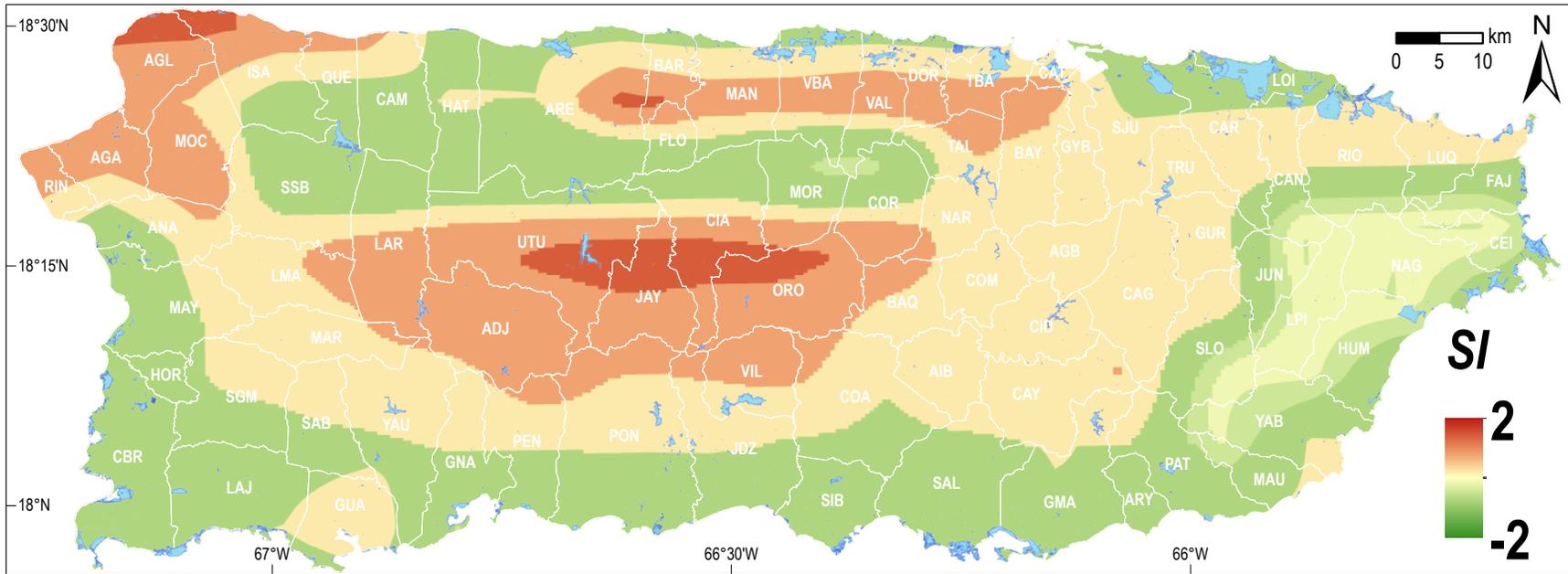


Figura 35. Resultados del análisis del Índice de Susceptibilidad (SI) para los datos de SMAP. Las áreas con la mayor humedad del suelo en la zona radicular estimadas para el 21 de septiembre de 2017 se correlacionan mejor con lugares donde ocurrieron deslizamientos de tierra. Los valores del SI para los valores de SMAP se restaron del modelo final, tal como se presenta en la ecuación 4. Esta técnica se utilizó para minimizar el efecto de utilizar un inventario de un solo evento para un modelo de susceptibilidad comprensivo. Compare con la figura 26. La explicación de las abreviaturas de los municipios se encuentra en el apéndice 1. (km, kilómetro; m³, metro cúbico)

Rendimiento del Mapa

El uso y la experiencia indican que los mapas de susceptibilidad a deslizamientos de tierra se comprenden mejor cuando la susceptibilidad se clasifica en varios grupos. Las clasificaciones de susceptibilidad Baja, Moderada, Alta, Muy Alta y Extremadamente Alta a deslizamientos de tierra se asignaron luego de agrupar los datos del ráster del SIA_m en 100 cuantiles de igual área. El esquema de categorización se muestra en la tabla 5. El 40 por ciento más bajo de los valores de píxeles para toda la isla se considera representativo de áreas de susceptibilidad baja. El rango de percentiles de 40–70 corresponde a zonas de susceptibilidad moderada. El rango de percentiles de 70–90 se clasifica como uno de susceptibilidad alta. El 10–1 por ciento más alto de los valores de píxeles se clasifica como uno de vulnerabilidad muy alta, y el 1 por ciento más alto se clasifica como uno con un potencial de fallas de pendiente extremadamente alto. El esquema de clasificación se examinó en detalle a través de la isla en lugares conocidos donde ocurrieron derrumbes y es consistente con la experiencia de los autores en el campo. El mapa final se provee como Placa 1.

Los valores finales del modelo del SIA y SIA_m se calcularon con solo el 75 por ciento del inventario de deslizamientos. El 25 por ciento restante de lugares con deslizamientos se utilizó para probar independientemente la validez del modelo. Los datos se utilizaron para generar gráficas ROC para calcular los valores del área bajo la curva (AUC), los cuales se utilizan comúnmente para evaluar el modelaje de peligro de las pendientes (por ejemplo, Lepore y otros, 2012; Xu y otros, 2012; Li y otros, 2016; Regmi y Poudel, 2016). Las gráficas ROC se generaron en incrementos de 5 para el rango completo (–50 a 20) de valores del SIA/SIA_m . La razón de verdadero positivo para un límite dado de valores del SIA/SIA_m fue el número de deslizamientos con valores del SIA/SIA_m mayores que cualquier incremento dado (verdaderos positivos) dividido entre el número total de deslizamientos. La razón de falso positivo para un incremento dado de valores del SIA/SIA_m fue el número total de píxeles en el ráster del SIA/SIA_m , del cual se restaron el número de deslizamientos (verdaderos positivos) y número de píxeles con valores más bajos que el límite, y esta diferencia se dividió entre el número total de píxeles en el ráster del SIA/SIA_m . Los valores del AUC pueden variar desde 0.5 a 1.0 y cuantificar las predicciones falsas contra las ciertas de un modelo. Un valor de 1.0 indica un rendimiento perfecto del modelo y un valor de 0.5 corresponde a un modelo que es equivalente a una predicción aleatoria (Fawcett, 2006). El valor del AUC para el SIA y SIA_m se comparó con el AUC solamente para el factor de la pendiente (fig. 36). El análisis de la pendiente produce únicamente un valor del AUC de 0.83. Las AUC son mayores para el SIA y SIA_m , con valores de 0.88 y 0.87, respectivamente. El AUC del SI compuesto para los factores distintos a la pendiente y SMAP (figs. 36 y 37) es 0.94. Esta verificación indica que el modelo es estadísticamente viable y proporciona una predicción mejorada en comparación con un modelo que solo incluye la pendiente. La pendiente representa casi el 50 por ciento del modelo final. Los factores distintos a la pendiente y SMAP también representan casi el 50 por ciento del modelo final de susceptibilidad, y en conjunto producen el valor más alto del AUC del análisis. Un mapa compuesto de estos siete factores (curvatura, proximidad a la superficie de carretera, terreno geológico, precipitación media anual, proximidad al canal fluvial, cobertura del terreno y clasificación del suelo) muestra que las zonas de mayor correlación se encuentran en la región interior occidental (fig. 37). El modelo compuesto del SI de factores distintos a la pendiente no se adoptó como el modelo preferido, aunque tiene un valor del AUC mucho más alto (0.94), dado que la importancia de la pendiente no puede descartarse de ningún modelo de movimiento de masa (por ejemplo, Carson y Petley, 1970). El bajo rendimiento del conjunto de datos que involucra únicamente la pendiente, indicado por el valor más bajo del AUC, se debe probablemente a la abundancia de pendientes muy altas en los flancos de los mogotes, sumideros, zanjones y cañones en el terreno del carso que no tienden a experimentar los mismos procesos de meteorización y movimiento de masa que el resto de la isla, y debido a factores descritos previamente que se capturan mediante la inclusión de factores distintos a la pendiente y SMAP. La disminución en el AUC de SIA a SIA_m muestra que la incorporación de los datos de SMAP en el modelo disminuye levemente su rendimiento ante el inventario del evento del huracán María, tal como se esperaba. El factor de SMAP se incorporó en el SIA_m con la intención de atenuar el efecto de las condiciones de lugares específicos relacionadas al único evento utilizado para desarrollar este mapa. La incorporación de los datos SMAP también permite evaluar la humedad del suelo variable de futuros eventos y sus efectos en los derrumbes, tal como se describe en la sección de “Uso y Limitaciones del Mapa de Susceptibilidad a Deslizamientos de Tierra”.

Tabla 5. Resultados de la comparación entre el mapa de susceptibilidad y las ubicaciones de los deslizamientos en el inventario del huracán María.

[SI , Índice de Susceptibilidad; km², kilómetro cuadrado; %, por ciento; #, número; —, no aplica]

Clasificación de Susceptibilidad	Rango aproximado del SI	Percentil	Área (km ²)	Área (%)	Deslizamientos en la categoría (#) ¹	Deslizamientos en la categoría (%) ¹	Densidad (deslizamientos/km ²) ¹
Baja	–4.84–1.6	0–40	3481.2	40	843	1.2	0.2
Moderada	–1.6–0.1	40–70	2609.3	30	7,108	10.0	2.7
Alta	0.1–0.9	70–90	1740.5	20	20,988	29.4	12.1
Muy Alta	0.90–1.40	90–99	782.7	9	31,850	44.6	40.7
Extremadamente Alta	1.40–1.97	99–100	86.5	1	10,642	14.9	123.0
Total	—	—	8700.2	100	71,431	100.1	—

¹Valores calculados utilizando el inventario del evento del huracán María (Hughes y otros, 2019).

El modelo generado en este estudio se comparó con el modelo de Lepore y otros (2012) y el producto del modelo ráster fue provisto por C. Lepore (comunicación escrita, 2018). La resolución de píxel del estudio de Lepore y otros (2012) fue de 30 m, mientras que la resolución de nuestro modelo es de 5 m, lo cual es ventajoso por su mayor resolución y es posible por la reciente disponibilidad de un DEM de lidar de alta resolución para la isla. Para comparar los modelos cuantitativamente, el modelo final de Lepore y otros (2012) se agrupó en 100 clases de cuantiles de igual área, de la misma manera que nuestro conjunto de datos. En la figura 38 se muestra un ráster de salida de la diferencia del valor cuantil de nuestro modelo y su modelo. Dentro del intervalo de confianza de 2 desviaciones estándar (σ), la similitud entre estos dos modelos es tan buena como ± 37 cuantiles. Esta métrica indica que la diferencia entre estos dos modelos es considerable. La tabla 6 presenta un desglose de los factores que se utilizaron para generar cada modelo. Dado que la elevación no se incorporó en nuestro modelo, el modelo de Lepore y otros (2012) tiende a clasificar los píxeles de mayor elevación con una susceptibilidad mucho más alta que nuestro modelo. Este efecto es más notable en el altiplano en las cercanías de los municipios de Cidra, Cayey, Aibonito y Barranquitas (fig. 38). Además, la metodología de Lepore y otros (2012) no calculó los valores del SI tomando el logaritmo natural de los números de la FR. Su modelo final produjo una suma de valores de la FR, que de manera desigual otorga más peso a los factores que se correlacionan positivamente que a los factores que se correlacionan negativamente. Muchas áreas en la figura 38, donde nuestro modelo clasifica una susceptibilidad más alta que Lepore y otros (2012), son el resultado de valores más altos del SI para la pendiente, que son casi la mitad de la entrada de nuestro modelo pero solo constituyen un 12 por ciento de la entrada del modelo de Lepore y otros (2012).

La tabla 7 proporciona un resumen de la densidad de deslizamientos de tierra del inventario del huracán María (Hughes y otros, 2019) para cada rango de clasificación de susceptibilidad de los mapas de susceptibilidad producidos para la isla entera (Monroe, 1979; Lepore y otros, 2012; este estudio). Los valores de densidad en las categorías de Baja, Moderada y Alta para este estudio y de Lepore y otros (2012) son sorprendentemente similares; sin embargo, el modelo de este estudio actual muestra una densidad mucho más alta en la categoría de susceptibilidad Muy Alta y también incluye una categoría de Extremadamente Alta, la cual fue bien representada por la densidad espacial de los deslizamientos desencadenados por el huracán María. Además, el modelo presentado en este reporte indica una susceptibilidad Baja en un área del doble de grande que el área correspondiente de

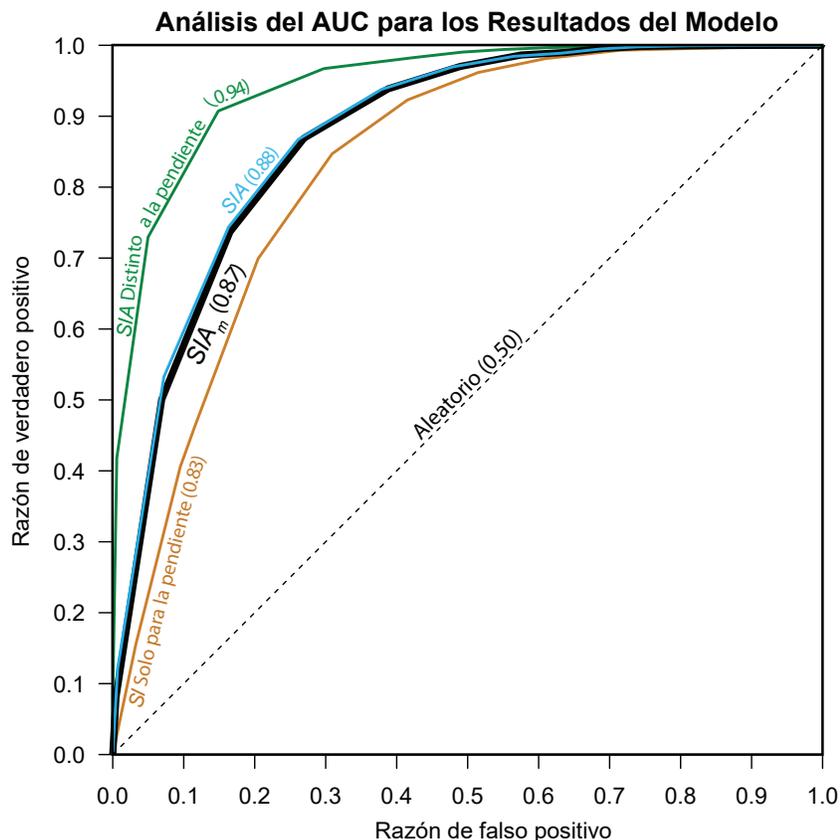


Figura 36. Análisis del área bajo la curva (AUC) de la característica operativa del receptor (ROC) para distintas combinaciones de resultados de datos. El SI indica el Índice de Susceptibilidad, S/A indica el Índice de Susceptibilidad agregado y S/A_m indica el Índice de Susceptibilidad agregado modificado por la humedad del suelo. La salida del S/A_m se escogió como modelo final.

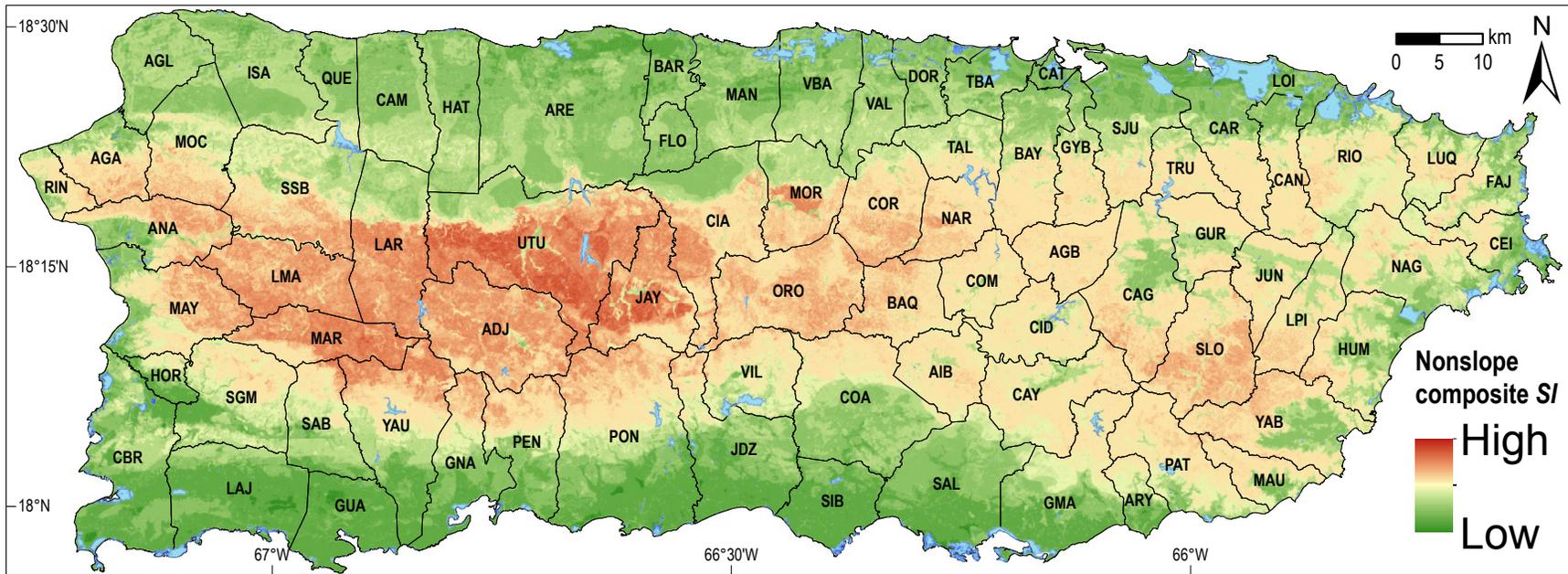


Figura 37. Mapa compuesto del Índice de Susceptibilidad (SI) de los siete conjuntos de datos distintos a la pendiente y "Soil Moisture Active Passive" utilizados en el análisis. Un valor neutral de 0 para el SI se muestra como el color neutral bronceado. La combinación de estos factores produce un valor más alto para el área bajo la curva (AUC) que la pendiente solamente (fig. 36). La explicación de las abreviaturas de los municipios se encuentra en el apéndice 1 (km, kilómetro)

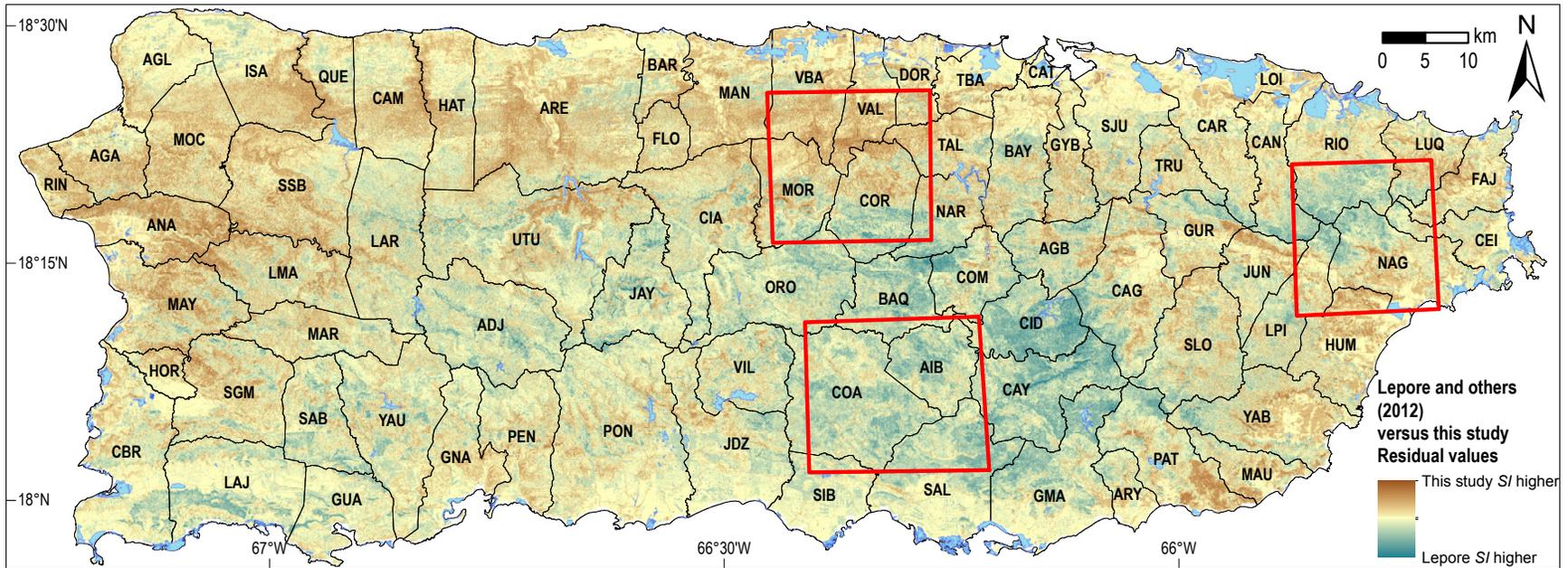


Figura 38. Valores residuales del modelo final del Índice de Susceptibilidad (SI) de este estudio comparado con el modelo final de la razón de frecuencia de Lepore y otros (2012). Las áreas azules (distintas a los cuerpos de agua) representan zonas donde los valores normalizados del modelo de Lepore son al menos un 10 por ciento más altos que nuestros valores normalizados. Los píxeles anaranjados representan áreas donde nuestros valores normalizados fueron al menos un 10 por ciento más altos que los valores de Lepore y otros (2012). Para comparar los modelos, ambos se estandarizaron con cuantiles. Las tres áreas rojas delineadas muestran el alcance de los inventarios de derrumbes que Lepore y otros (2012) utilizaron para guiar su modelo de susceptibilidad para toda la isla. La explicación de las abreviaturas de los municipios se encuentra en el apéndice 1 (km, kilómetro)

Lepore y otros (2012), y una susceptibilidad desde Muy a Extremadamente Alta en un área que es aproximadamente la mitad del tamaño del área de susceptibilidad de Lepore y otros (2012).

Algunos lugares específicos donde ocurrieron deslizamientos de tierra notables se presentan aquí como ejemplos de cómo el modelo de susceptibilidad representa la susceptibilidad a una escala local:

- En la Urbanización Villa España en el municipio de Bayamón ocurrió un deslizamiento de tierra en el flanco sur de un mogote en agosto de 2013 (fig. 39). El desprendimiento de la roca caliza causó que varias casas se declararan inhabitables y eventualmente se demolicieran. En el estudio actual, el análisis de este lugar muestra que el área se clasifica como una de susceptibilidad Alta a deslizamientos de tierra.
- Durante octubre de 2015, la Urbanización Lomas en el municipio de Ceiba sufrió un deslizamiento de tierra (fig. 40) que dejó varias casas parcialmente suspendidas sobre el nuevo escarpe. Este derrumbe se estudió por la campaña de lidar de 2015–2016, y el modelo de susceptibilidad a deslizamientos de tierra que se desarrolló en este estudio clasifica el lugar actual con susceptibilidad Alta a Muy Alta a deslizamientos de tierra. Es probable que el talud estable y previo al derrumbe se hubiese clasificado como uno de susceptibilidad Alta, dada la clasificación de las pendientes adyacentes al derrumbe.
- Durante el paso del Huracán María en septiembre de 2017, un deslizamiento de tierra masivo evolucionó a un flujo de escombros en la carretera PR-143 km 56.2 en el municipio de Barranquitas (figs. 8 y 41). El modelo final de susceptibilidad de este estudio muestra que previo al huracán el lugar tenía un potencial Muy Alto a Extremadamente Alto a deslizamientos de tierra.
- En el centro urbano del pueblo de Utuado, un derrumbe provocado por el huracán María en un banco de erosión entre dos casas ocasionó la muerte de tres hermanas de edad avanzada (fig. 42; Irizarry Álvarez, 2017). El modelo final muestra que previo al huracán este lugar tenía una susceptibilidad Muy Alta a Extremadamente Alta a deslizamientos de tierra.
- En diciembre de 2017, un talud se desprendió en la carretera PR-2 km 209.8 en el municipio de Guayanilla y causó que esta se cerrara temporalmente y se desviara el tráfico por varios meses (fig. 43). En este estudio, el análisis del modelo muestra que esta localización se registra con un potencial de susceptibilidad Moderada a Alta.

Tabla 6. Factores considerados en los mapas cuantitativos de susceptibilidad a deslizamientos de tierra en Puerto Rico.

[x, factor considerado en el estudio, —, factor no considerado en el estudio]

Factor	Este estudio	Estudio de Lepore y otros (2012)
Pendiente	x	x
Orientación de terreno	—	x
Elevación	—	x
Curvatura	x	x
Distancia de fallas	—	x
Distancia de carreteras	x	x
Distancia de ríos	x	—
Geología	x	x
Suelos	x	—
Cobertura de terreno	x	x
Precipitación anual	x	—
Humedad de suelo para el evento	x	—

Tabla 7. Comparación entre el rendimiento de los mapas de susceptibilidad a deslizamientos de tierra en Puerto Rico y el inventario del huracán María.

[km², kilómetro cuadrado; —, no aplica]

Clasificación	Densidad de deslizamientos de tierra del huracán María (derrumbes/km ²) ¹					
	Monroe (1979)		Lepore y otros (2012)		Este estudio	
	Área (km ²)	Densidad	Área (km ²)	Densidad	Área (km ²)	Densidad
Baja	5,051	0.3	1,617	0.1	3,481	0.2
Moderada	3,472	19.7	3,561	2.6	2,609	2.7
Alta	272	4.0	1,649	12.8	1,741	12.1
Muy Alta	78	6.8	1,764	23.3	783 (² 870)	40.7 (² 48.9)
Extremadamente Alta	—	—	—	—	87	123.0

¹Deslizamientos de tierra del huracán María del inventario de Hughes y otros (2019).

² Este valor es la combinación de las clasificaciones de Muy Alta y Extremadamente Alta para el estudio actual.

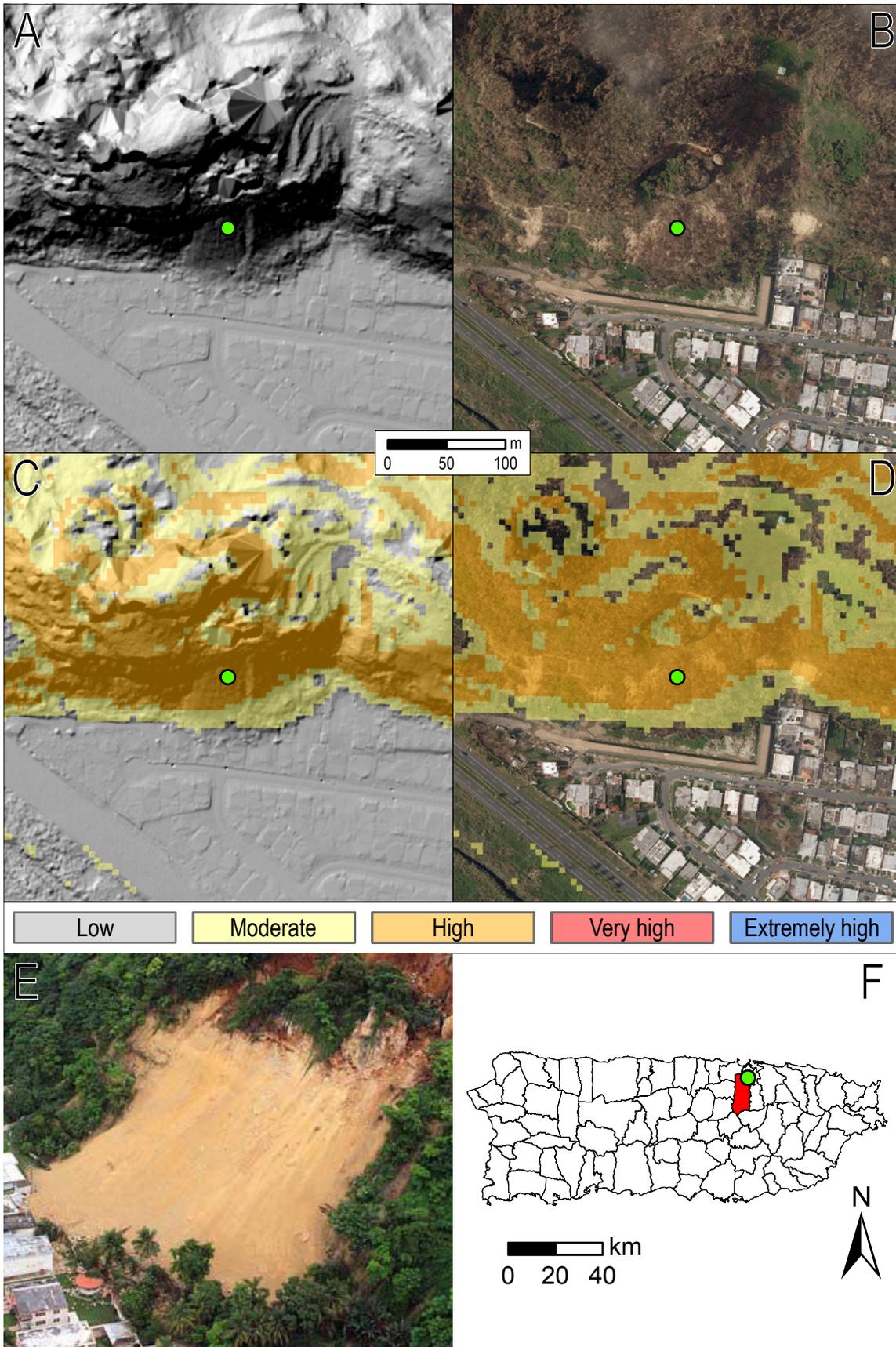


Figura 39 (página anterior). Ejemplo del modelo final del Índice de Susceptibilidad para el derrumbe del mogote de Santa Ana en la Urbanización Villa España en el municipio de Bayamón, Puerto Rico. Este derrumbe (18.405, -66.144) ocurrió el 20 de agosto de 2013. Los cuadros A–D muestran el mismo alcance. El marcador verde se presenta en el centro de cada imagen y no corresponde necesariamente con ninguna estructura del derrumbe. *A*, Ráster de sombreado de los datos del estudio de lidar de 2016. *B*, Vista aérea de la misma localización. La imagen se adquirió el 8 de octubre de 2017 y muestra la presencia de una berma de mitigación que se construyó en el lugar luego de demoler varias casas. *C*, Conjunto de datos del mapa de susceptibilidad final superpuesto en el ráster de sombreado. Este lugar se clasifica con susceptibilidad Alta a deslizamientos de tierra. *D*, Conjunto de datos del mapa de susceptibilidad final superpuesto en la imagen aérea. *E*, Fotografía aérea oblicua del lugar en el 2013, poco después del derrumbe (Vazquez Torres, 2013). *F*, Mapa que muestra la ubicación del área con el municipio de Bayamón resaltado en rojo y la ubicación del derrumbe de Villa España denotada por el marcador verde. (m, metro; km, kilómetro)

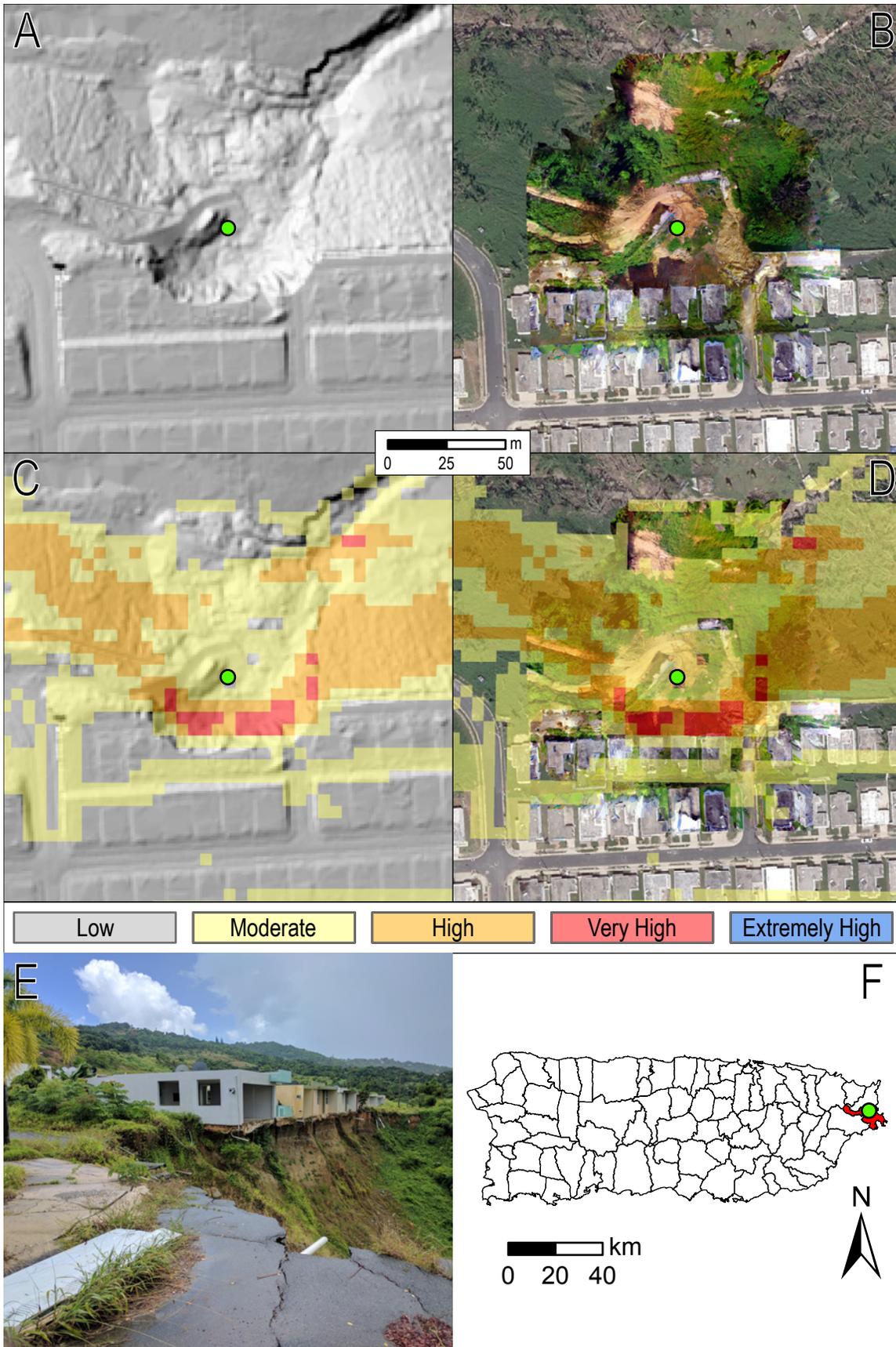


Figura 40 (página anterior). Ejemplo del modelo final del Índice de Susceptibilidad para el derrumbe de la Urbanización Las Lomas (18.2708, -65.6615) en el municipio de Ceiba, Puerto Rico. Los cuadros A–D muestran el mismo alcance. El marcador verde se presenta como el centro del área y no corresponde necesariamente con ninguna estructura del derrumbe. *A*, Ráster de sombreado de los datos del estudio de lidar de 2016. El escarpe donde el material de relleno colapsó el 4 de octubre de 2015 y socavó varias propiedades es visible. *B*, Vista aérea de la misma localización. La imagen en el centro proviene de un estudio de dron hecho por K.S. Hughes el 5 de febrero de 2017 y la imagen en el exterior proviene de la Agencia Federal para el Manejo de Emergencias, tomadas el 27 de octubre de 2017. *C*, Conjunto de datos del mapa de susceptibilidad final superpuesto en el ráster de sombreado. El escarpe del derrumbe de 2015 se registró como una zona de susceptibilidad Muy Alta y los taludes adyacentes y estables se registraron con una susceptibilidad alta; es muy probable que esta zona de susceptibilidad alta se hubiera extendido a través del área del derrumbe antes de que este ocurriera. *D*, Conjunto de datos del mapa de susceptibilidad final superpuesto en las imágenes aéreas. *E*, Fotografía del escarpe tomada por K.S. Hughes el 17 de junio de 2017. *F*, Mapa que muestra la ubicación del área con el municipio de Ceiba resaltado en rojo y la ubicación del derrumbe de Las Lomas denotada por el marcador verde. (m, metro; kilómetro)

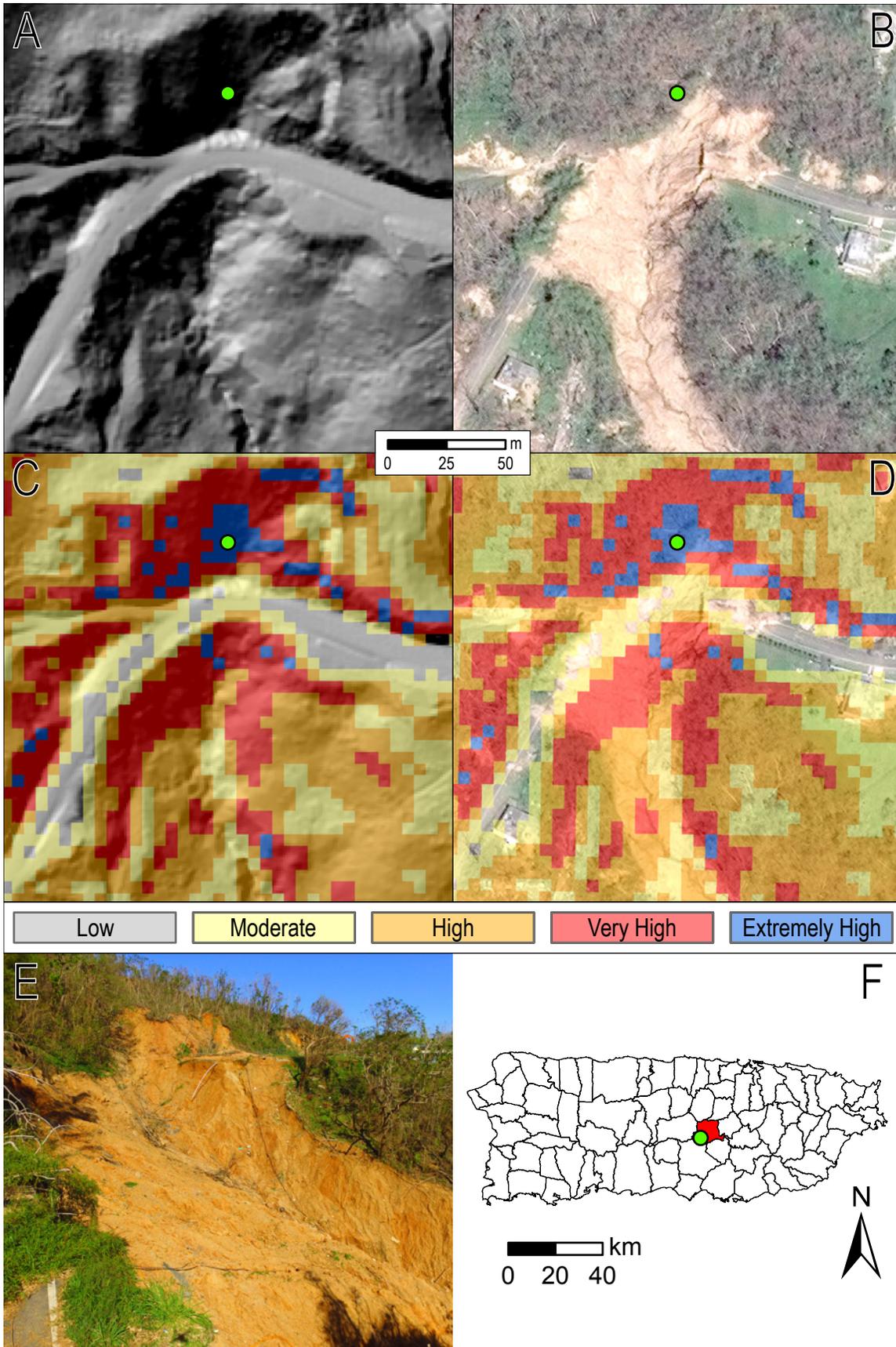


Figura 41 (página anterior). Ejemplo del modelo final del Índice de Susceptibilidad para el derrumbe en la carretera PR-143 kilómetro 56.2 en el municipio de Barranquitas, Puerto Rico. Este derrumbe (18.176, -66.338) ocurrió durante el huracán María (20 de septiembre del 2017). Los cuadros A–D muestran el mismo alcance. El marcador verde se presenta en la misma ubicación en cada imagen y no corresponde necesariamente con ninguna estructura del derrumbe. *A*, Ráster de sombreado de los datos del estudio de lidar de 2016. *B*, Vista aérea de la misma localización. La imagen es un mosaico de fotos adquiridas mediante un estudio de dron aéreo por K.S. Hughes el 2 de marzo de 2018. *C*, Conjunto de datos del mapa de susceptibilidad final superpuesto en el ráster de sombreado. El lugar donde ocurrió el derrumbe se clasifica como uno de susceptibilidad Muy Alta a Extremadamente Alta a deslizamientos de tierra. *D*, Conjunto de datos del mapa de susceptibilidad final superpuesto en las imágenes satelitales. *E*, Fotografía tomada por K.S. Hughes el 1 de noviembre de 2017, con vistas al este a través del escarpe. El tubo blanco en el centro superior de la imagen estaba aproximadamente a unos 80 metros del fotógrafo. *F*, Mapa que muestra la ubicación del área con el municipio de Barranquitas resaltado en rojo y la ubicación del derrumbe en la carretera PR-143 kilómetro 56.2 denotada por el marcador verde. Este derrumbe también se muestra en la figura 8. (m, metro; km, kilómetro)

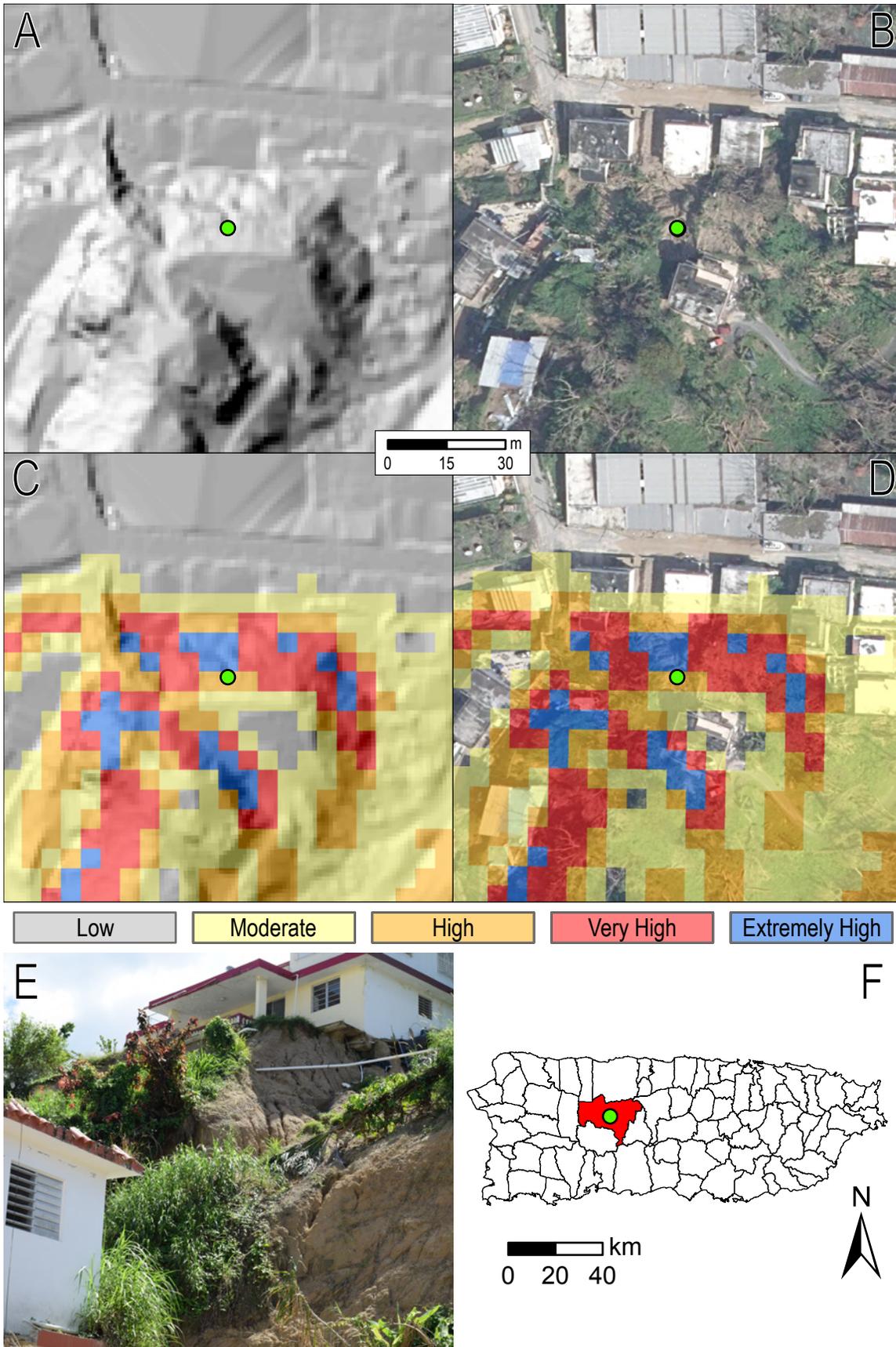


Figura 42 (página anterior). Ejemplo del modelo final del Índice de Susceptibilidad para un derrumbe en el centro urbano de Utuado, Puerto Rico, causado por el huracán María el 20 de septiembre de 2017. Este derrumbe (18.264, -66.698) causó la muerte de tres residentes cuando el banco de erosión detrás de su casa se movilizó y rellenoó parte del nivel bajo de la estructura. Los cuadros A–D muestran el mismo alcance. El marcador verde se presenta en el centro de cada imagen y no corresponde necesariamente con ninguna estructura del derrumbe. *A*, Ráster de sombreado de los datos del estudio de lidar de 2016. *B*, Vista aérea de la misma localización. La imagen se adquirió el 12 de octubre de 2017 y muestra el escarpe del derrumbe entre la casa superior (sur) y la casa inferior (norte). *C*, Conjunto de datos del mapa de susceptibilidad final superpuesto en el ráster de sombreado. El lugar donde ocurrió el derrumbe se clasifica como uno de susceptibilidad Muy Alta a Extremadamente Alta a deslizamientos de tierra. *D*, Conjunto de datos del mapa de susceptibilidad final superpuesto en la imagen aérea. *E*, Fotografía del derrumbe tomada por el Dr. Daniel Pradel (foto utilizada con autorización) el 2 de noviembre de 2017. *F*, Mapa que muestra la ubicación del área con el municipio de Utuado resaltado en rojo y la ubicación del derrumbe denotada por el marcador verde. (m, metro; kilómetro)

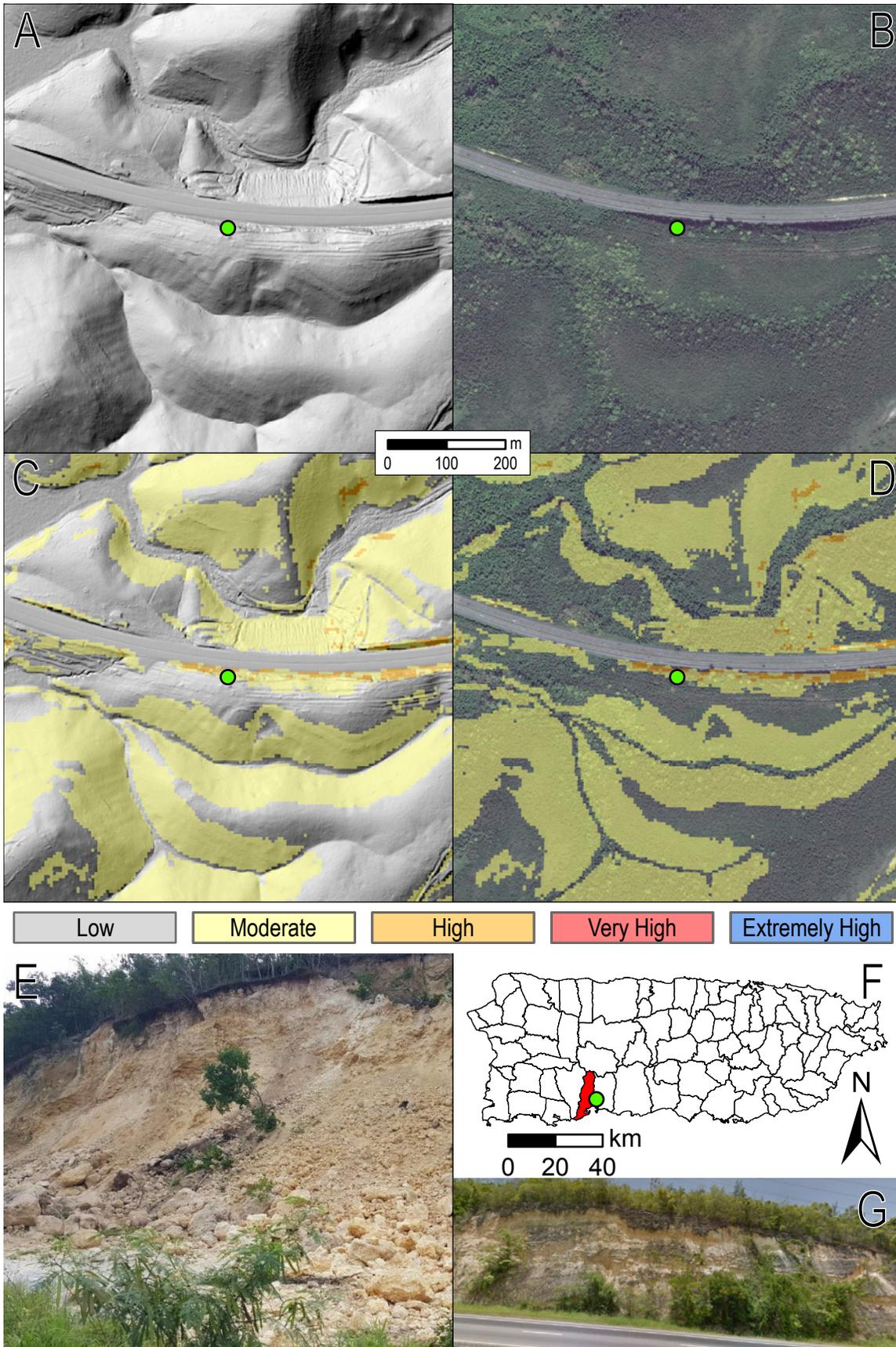


Figura 43 (página anterior). Ejemplo del modelo final del Índice de Susceptibilidad para un derrumbe que ocurrió a lo largo de la carretera PR-2 kilómetro 209.3 en el municipio de Guayanilla, Puerto Rico el 6 de diciembre de 2017. El derrumbe (18.0112, -66.7569) provocó el cierre temporero de la autopista regional y el escarpe de este estaba muy cerca de una torre de transmisión de un sistema de distribución eléctrica. Los cuadros A–D muestran el mismo alcance. El marcador verde se presenta en el centro de cada imagen y no corresponde necesariamente con ninguna estructura del derrumbe. *A*, Ráster de sombreado de los datos del estudio de lidar de 2016. *B*, Vista aérea de la misma localización. La imagen se adquirió de DigitalGlobe entre octubre y diciembre de 2017. *C*, Conjunto de datos del mapa de susceptibilidad final superpuesto en el ráster de sombreado. El lugar donde ocurrió el derrumbe se clasifica como uno de susceptibilidad Moderada a Alta a deslizamientos de tierra. *D*, Conjunto de datos del mapa de susceptibilidad final superpuesto en la imagen aérea. *E*, Fotografía del derrumbe tomada el 6 de diciembre de 2017 (Metro Puerto Rico, 2017). *F*, Mapa que muestra la ubicación del área con el municipio de Guayanilla resaltado en rojo y la ubicación del derrumbe denotada por el marcador verde. *G*, Imagen de la futura zona del derrumbe en mayo de 2016, obtenida de Google Street View (m, metro; km, kilómetro)

Uso y Limitaciones del Mapa de Susceptibilidad a Deslizamientos de Tierra

La Placa 1 y los archivos de sistemas de información geográfica (GIS) que acompañan este reporte (Hughes y Schulz, 2020) muestran la susceptibilidad relativa estimada a la ocurrencia de deslizamientos de tierra durante o poco después de una precipitación intensa, como la que se produce durante tormentas tropicales, incluyendo huracanes. Los datos buscan ilustrar el peligro potencial relativo de los deslizamientos de tierra para proveer un marco de referencia para evaluaciones de susceptibilidad a deslizamientos de tierra en lugares específicos y planificar para futuros desarrollos y eventos extensos de deslizamientos de tierra. Por ejemplo, localizaciones con susceptibilidad alta a deslizamientos de tierra pueden (1) ser excluidas de futuros desarrollos; (2) requerir estudios de estabilidad de taludes previo al desarrollo, nivelación, cimentación, diseño de drenaje y construcción que tomen en consideración el potencial de inestabilidad de taludes; (3) ser objeto de evaluación y mitigación de condiciones potencialmente adversas; (4) ser monitoreadas para detectar signos de inicio de deslizamientos de tierra, tales como grietas en carreteras y estructuras, postes y árboles inclinados y líneas de agua y alcantarillados rotos; y (o) (5) ser consideradas para desalojo previo a la precipitación pronosticada conducente a deslizamientos de tierra y para esfuerzos de respuesta de emergencia luego de dicha precipitación. El mapa no es un sustituto de investigaciones de lugares específicos y estabilidad de taludes por geólogos e ingenieros licenciados. Además, muchos deslizamientos de tierra en Puerto Rico se mueven lejos de las localizaciones de donde se originan y pueden destruir estructuras, lastimar a personas y ocasionar pérdidas de vida a medida que avanzan cuesta abajo; el mapa no muestra este peligro significativo como resultado de la movilidad de deslizamientos de tierra. Finalmente, las ubicaciones de deslizamientos de tierra desencadenados por terremotos o precipitación prolongada y de intensidad relativamente baja pueden diferir considerablemente de ubicaciones en el mapa con susceptibilidad Alta, Muy Alta y Extremadamente Alta.

Para un mejor uso durante la respuesta de emergencia a eventos de precipitación específicos, el mapa debe evaluarse junto a las condiciones de precipitación específicas del evento, siendo los deslizamientos de tierra más probables donde ocurren mayores cantidades de precipitación en localizaciones con mayor susceptibilidad a deslizamientos de tierra. Como se describe en el reporte, la humedad del suelo en la zona radicular estimada por la misión SMAP de la NASA tuvo una buena correlación con la ubicación de los derrumbes durante el huracán María, y los profesionales pueden utilizar la humedad del suelo específica a un evento para evaluar cuantitativamente las potenciales ubicaciones de deslizamientos de tierra que puedan resultar de futuras precipitaciones. Tal uso requiere experiencia y conocimiento en la manipulación de datos de sistemas geográficos de información (GIS). Los profesionales interesados pueden obtener los datos de la humedad del suelo en la zona radicular de la misión SMAP de la NASA (<https://smap.jpl.nasa.gov/>, accedido por última vez el 26 de diciembre de 2019), asegurarse que la proyección de los datos corresponda con la de los archivos *SI_raster_for_SMAP* disponibles con este reporte, reclasificar los datos de SMAP de la NASA a los valores apropiados del *SI* provistos en la tabla 3, sumar el *SI_raster_for_SMAP* y los datos reclasificados de la SMAP de la NASA y reclasificar la suma por el área percentil para obtener las clasificaciones de susceptibilidad tal como se proveen en la tabla 5.

La mayoría de los deslizamientos de tierra desencadenados por precipitaciones intensas en Puerto Rico son poco profundos (hasta varios metros de profundidad) y ocurren en material no consolidado (suelo y saprolita) sobre roca (por ejemplo, Jibson, 1989; Larsen y Torres Sánchez, 1992; Bessette-Kirton y otros, 2019). Estos son los tipos de movimientos de masa mejor representados por el mapa de susceptibilidad a deslizamientos de tierra ya que este se produjo utilizando un inventario de deslizamientos de tierra desencadenados por el huracán María (Hughes y otros, 2019) y muchos de estos deslizamientos de tierra fueron poco profundos. El huracán María también provocó deslizamientos de tierra en roca y algunos alcanzaron profundidades de aproximadamente 30 m (Bessette-Kirton y otros, 2019), por lo que el mapa también muestra la susceptibilidad a deslizamientos de tierra más profundos y en roca. Sin embargo, este tipo de movimiento de masa está pobremente representado por el mapa de susceptibilidad dado que relativamente pocos fueron provocados por el huracán María y por ende, no proveyeron medidas estadísticamente sólidas con las cuales pueden pronosticarse deslizamientos de tierra similares. El trágico deslizamiento que ocurrió en Mameyes en el municipio de Ponce en 1985 que acabó con la vida de más de 129 personas (Silva-Tulla, 1986) es un ejemplo de un tipo de deslizamiento de tierra probablemente poco representado por el mapa de susceptibilidad. Además, muchos deslizamientos en todo el mundo se desencadenan por actividad humana, tal como la nivelación de laderas y redirección del drenaje. Dichas actividades locales no pueden contemplarse en el mapa.

Común a casi todos los intentos de modelaje, la exactitud del mapa de susceptibilidad a deslizamientos de tierra se basa en cuán exactos y completos son los datos de entrada empleados para su desarrollo. Anticipamos que las siguientes omisiones y condiciones afectan la exactitud del mapa, entre otros: (1) variabilidad de la resistencia del basamento rocoso y propiedades hidrológicas, orientación y condición de discontinuidades dentro de terrenos geológicos dados; (2) variabilidad de la resistencia del suelo y propiedades hidrológicas dentro del tipo de suelo; (3) consideración de solo algunas partes de la red de carreteras, como omisiones de la mayoría de las carreteras, caminos y senderos de granjas no documentadas; y (4) el uso de un modelo topográfico de 2015–2016, previo a los deslizamientos de tierra causados por el huracán María y otros cambios topográficos.

Conclusión

Los deslizamientos de tierra ocurren comúnmente en Puerto Rico, con casi dos eventos extensos de deslizamientos de tierra por año durante las últimas décadas (por ejemplo, Pando y otros, 2005; Bessette-Kirton y otros, 2019). La susceptibilidad alta a deslizamientos de tierra en Puerto Rico resulta principalmente del desequilibrio topográfico de la isla, de la meteorización rápida de la roca madre, de eventos de precipitación intensa y alta frecuencia y de las intensas prácticas agrarias y de urbanización durante los siglos pasados. La alta densidad poblacional de Puerto Rico sitúa a muchos de sus ciudadanos y gran parte de su infraestructura en riesgo a deslizamientos de tierra, como bien ilustraron los más de 70,000 derrumbes desencadenados por el huracán María durante septiembre de 2017.

Para desarrollar un mapa que muestra la susceptibilidad relativa a la ocurrencia de deslizamientos de tierra durante y luego de futuros eventos de precipitación intensa, se utilizó un inventario digital de estos derrumbes (Hughes y otros, 2019) junto con datos geoespaciales que incluyeron la pendiente y curvatura de la superficie calculada a partir de un DEM de lidar (USGS, 2017), la precipitación media anual (Fick y Hijmans, 2017), la proximidad a carreteras (U.S. Census Bureau, 2015) y canales fluviales (USGS, 2019), el terreno geológico (Puerto Rico Oficina de Gerencia y Presupuesto, 2018), la clasificación del suelo (U.S. Department of Agriculture, 2018), la cobertura del terreno (Gould y otros, 2008) y la humedad del suelo estimada inmediatamente luego del huracán María (NASA, 2017). Mediante el enfoque estadístico de la razón de frecuencia se identificaron las relaciones entre la ubicación de los deslizamientos y atributos de los datos geoespaciales y se desarrolló el mapa. Los resultados del análisis de la humedad del suelo se utilizaron para intentar generalizar el mapa al remover los efectos de la humedad variable del suelo como resultado del huracán María. El análisis que utiliza el 25 por ciento del inventario de deslizamientos de tierra que no se incluyó en el desarrollo del mapa muestra que el mapa es estadísticamente viable. Los resultados de los análisis de estos factores específicos para Puerto Rico pueden adaptarse potencialmente a otras regiones tropicales con clima, topografía y geología comparables.

El producto del mapa final muestra la susceptibilidad a la ocurrencia a deslizamientos de tierra como Baja (40 por ciento de la isla principal), Moderada (30 por ciento), Alta (20 por ciento), Muy Alta (9 por ciento) y Extremadamente Alta (1 por ciento). Las áreas donde los deslizamientos de tierra pueden transportarse luego de que ocurran no se presentan en el mapa, aunque el peligro en estas áreas puede ser extremadamente alto. El mapa busca servir como guía general para la planificación del desarrollo, evaluaciones de posibles derrumbes y estrategias de mitigación a través de grandes áreas y planificación de emergencias. El mapa no es un sustituto de evaluaciones de lugares específicos y estabilidad de taludes por geólogos e ingenieros licenciados.

Referencias Citadas

- Acevido, G., 1982, Soil survey of Arecibo area of northern Puerto Rico: U.S. Department of Agriculture Soil Conservation Service, 169 p. [Also available at https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_MANUSCRIPTS/puerto_rico/PR682/0/Arecibo.pdf.]
- Bawiec, W.J., 1998, Geologic terranes of Puerto Rico, in Bawiec, W.J., ed., Geology, geochemistry, geophysics, mineral occurrences and mineral resource assessment for the Commonwealth of Puerto Rico: U.S. Geological Survey Open-File Report 98-038, p. 59–71, accessed February 28, 2020, at <https://pubs.usgs.gov/of/1998/of98-038/>.
- Bayouth García, D., Rodríguez Feliciano, C.A., and Hughes, K.S., 2018, Event-specific and annual precipitation controls on mass wasting sites in Puerto Rico after the passage of Hurricane María, in Geological Society of America Annual Meeting, Indianapolis, Ind., 2018, Abstracts with Programs: Boulder, Colo., Geological Society of America, Paper 171-12, v. 50, no. 6, accessed February 28, 2020, at <https://doi.org/10.1130/abs/2018AM-320596>.
- Berryhill, H.L., Jr., 1965, Geology of the Ciales quadrangle, Puerto Rico: U.S. Geological Survey Bulletin 1184, 116 p., 3 pls. [Also available at <https://doi.org/10.3133/b1184>.]
- Bessette-Kirton, E.K., Cerovski-Darriau, C., Schulz, W.H., Coe, J.A., Kean, J.W., Godt, J.W., Thomas, M.A., and Hughes, K.S., 2019, Landslides triggered by Hurricane María—Assessment of an extreme event in Puerto Rico: GSA Today, v. 29, no. 6, p. 4–10. [Also available at <https://www.geosociety.org/gsatoday/science/G383A/article.htm>.]
- Boccheciamp, R.A., 1977, Soil survey of the Humacao area of eastern Puerto Rico: U.S. Department of Agriculture Soil Conservation Service, 103 p. [Also available at https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_MANUSCRIPTS/puerto_rico/PR689/0/Humacao.pdf.]
- Boccheciamp, R.A., 1978, Soil survey of San Juan area of Puerto Rico: U.S. Department of Agriculture Soil Conservation Service, 141 p. [Also available at https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_MANUSCRIPTS/puerto_rico/PR686/0/San_Juan.pdf.]

- Brabb, E.E., 1984, Innovative approaches to landslide hazard and risk mapping, *in* Fourth International Symposium on Landslides, Toronto, Ontario, Canada, 1984, Proceedings: Toronto, Canadian Geotechnical Society, v. 1, p. 307–324.
- Briggs, R.P., 1965, Geologic map of the Barceloneta quadrangle, Puerto Rico: U.S. Geological Survey Miscellaneous Geologic Investigations Map I-421, scale 1:20,000. [Also available at <https://doi.org/10.3133/i421>.]
- Briggs, R.P., 1968, Geologic map of the Arecibo quadrangle Puerto Rico: U.S. Geological Survey Miscellaneous Geologic Investigations Map I-551, scale 1:20,000. [Also available at <https://doi.org/10.3133/i551>.]
- Brocard, G.Y., Willenbring, J.K., Scatena, F.N., and Johnson, A.H., 2015, Effects of a tectonically-triggered wave of incision on riverine exports and soil mineralogy in the Luquillo Mountains of Puerto Rico: *Applied Geochemistry*, v. 63, p. 586–598. [Also available at <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2015.04.001>.]
- Campbell, R.H., Herd, D.G., and Alonso, R.M., 1985, Preliminary response activities and recommendations of the USGS Landslide Hazard Research Team to the Puerto Rico landslide disaster of October 7, 1985: U.S. Geological Survey Open-File Report 85–719, 13 p. [Also available at <https://doi.org/10.3133/ofr85719>.]
- Carson, M.A., and Petley, D.J., 1970, The existence of threshold hillslopes in the denudation of the landscape: *Translations of the Institute of British Geographers*, v. 49, p. 71–95. [Also available at <http://doi.org/10.2307/621642>.]
- Carter, O.R., 1965, Soil survey of the Lajas Valley area, Puerto Rico: U.S. Department of Agriculture Soil Conservation Service, Series 1961, no. 23, 170 p. [Also available at https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_MANUSCRIPTS/puerto_rico/lajasPR1965/Lajas.pdf.]
- Chalkias, C., Kalogirou, S., and Ferentinou, M., 2014, Landslide susceptibility, Peloponnese Peninsula in south Greece: *Journal of Maps*, v. 10, no. 2, p. 211–222. [Also available at <https://doi.org/10.1080/17445647.2014.884022>.]
- Civil Air Patrol, 2017, CAP imagery—Hurricane María: Civil Air Patrol web page, accessed January 13, 2020, at <https://www.arcgis.com/home/webmap/viewer.html?webmap=3218d1cb022d4534be0c7d6833c0adfl>.
- Deere, D.U., Jimenez, P., and Hernandez, D., 1989, Complex landslides at plateau margins with an example from Puerto Rico, chap. 19 *of* Cording, E.J., Hall, W.J., Haltiwanger, J.D., Hendron, A.J., Jr., and Mesri, G., eds., *The art and science of geotechnical engineering—At the dawn of the twenty-first century—A volume honoring Ralph B. Peck*: Englewood Cliffs, N.J., Prentice-Hall, p. 349–366.
- Dietz, J.L., 1986, *Economic history of Puerto Rico—Institutional change and capitalist development*: Princeton, N.J., Princeton University Press, 337 p.
- Dorsey, C.W., Mesmer, L., and Caine, T.A., 1903, Soil survey from Arecibo to Ponce, Porto Rico: U.S. Department of Agriculture Bureau of Soils Field Operation 1902 Report no. 4, p. 793–839. [Also available at https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_MANUSCRIPTS/puerto_rico/areciboponcePR1902/areciboponcePR1902.pdf.]
- Doser, D.I., Rodríguez, C.M., and Flores, C., 2005, Historical earthquakes of the Puerto Rico-Virgin Islands region (1915–1963), *in* Mann, P., ed., *Active tectonics and seismic hazards of Puerto Rico, the Virgin Islands, and offshore areas*: Geological Society of America Special Paper 385, p. 103–114. [Also available at <https://doi.org/10.1130/0-8137-2385-X.103>.]
- Fawcett, T., 2006, An introduction to ROC analysis: *Pattern Recognition Letters*, v. 27, no. 8, p. 861–874. [Also available at <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2005.10.010>.]
- Fick, S.E., and Hijmans, R.J., 2017, WorldClim 2—New 1 km spatial resolution climate surfaces for global land areas: *International Journal of Climatology*, v. 37, no. 12, p. 4302–4315. [Also available at <https://doi.org/10.1002/joc.5086>.]
- García López, X.A., 2018, Lidar and RTK GPS SfM monitoring of the PR-9 landslide in Ponce, Puerto Rico (2016–2018): University of Puerto Rico at Mayagüez, Undergraduate research thesis, 23 p.
- Gierbolini, R.E., 1975, Soil survey of Mayaguez area of western Puerto Rico: U.S. Department of Agriculture Soil Conservation Service, 296 p. [Also available at https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_MANUSCRIPTS/puerto_rico/PR684/0/Mayaguez.pdf.]
- Gierbolini, R.E., 1979, Soil survey of the Ponce area of southern Puerto Rico: U.S. Department of Agriculture Soil Conservation Service, 80 p. [Also available at https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_MANUSCRIPTS/puerto_rico/PR688/0/Ponce.pdf.]

- Gould, W.A., Alarcón, C., Fevold, B., Jiménez, M.E., Martinuzzi, S., Potts, G., Quiñones, M., Solórzano, M., and Ventosa, E., 2008, Puerto Rico 2000 GAP Land Cover: U.S. Geological Survey web page, accessed September 12, 2019, at <https://www.sciencebase.gov/catalog/item/560c3b2de4b058f706e5411e>.
- Grau, H.R., Aide, T.M., Zimmerman, J.K., Thomlinson, J.R., Helmer, E., and Zou, X., 2003, The ecological consequences of socioeconomic and land-use changes in postagriculture Puerto Rico: *BioScience*, v. 53, no. 12, p. 1159–1168. [Also available at [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2003\)053\[1159:TECOSA\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2003)053[1159:TECOSA]2.0.CO;2).]
- Grindlay, N.R., Abrams, L.J., Del Greco, L., and Mann, P., 2005, Toward an integrated understanding of Holocene fault activity in western Puerto Rico—Constraints from high-resolution seismic and sidescan sonar data, *in* Mann, P., ed., *Active tectonics and seismic hazards of Puerto Rico, the Virgin Islands, and offshore areas*: Geological Society of America Special Paper 385, p. 139–160. [Also available at <https://doi.org/10.1130/0-8137-2385-X.139>.]
- He, Y., and Beighley, R.E., 2008, GIS-based regional landslide susceptibility mapping—A case study in southern California: *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 33, no. 3, p. 380–393. [Also available at <https://doi.org/10.1002/esp.1562>.]
- Huffaker, L., 2002, Soil survey of Caribbean National Forest and Luquillo Experimental Forest, Commonwealth of Puerto Rico: U.S. Department of Agriculture Natural Resources Conservation Service, 181 p. [Also available at https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_MANUSCRIPTS/puerto_rico/caribbeanNF_PR2002/CNF.pdf.]
- Hughes, K.S., Bayouth García, D., Martínez Milian, G.O., Schulz, W.H., and Baum, R.L., 2019, Map of slope-failure locations in Puerto Rico after Hurricane María: U.S. Geological Survey data release, accessed September 12, 2019, at <https://doi.org/10.5066/P9BVM74>.
- Hughes, K.S., and Morales Vélez, A.C., 2017, Characterization of landslide sites in Puerto Rico after Hurricanes Irma and María, *in* American Geophysical Union Fall Meeting 2017, New Orleans, La., 2017, Abstracts: American Geophysical Union, Abstract NH23E-2859.
- Hughes, K.S., and Schulz, W.H., 2020, Results from frequency-ratio analyses of soil classification and land use related to landslide locations in Puerto Rico following Hurricane María: U.S. Geological Survey data release, <https://www.sciencebase.gov/catalog/item/5e2f53f5e4b0a79317d42330>.
- Irizzary Álvarez, F., 2017, Mueren tres hermanas por derrumbe en Utuado tras paso de María: Primera Hora, September 21, 2017, accessed September 12, 2019, at <https://www.primerahora.com/noticias/puerto-rico/nota/muerentreshermanaspororderumbeenutuadotraspasodeMaría-1246727/>.
- Jennings, L.N., Douglas, J., Treasure, E., and González, G., 2014, Climate change effects in El Yunque National Forest, Puerto Rico, and the Caribbean region: Asheville, N.C., U.S. Department of Agriculture Forest Service, Southern Research Station, General Technical Report SRS-193, 47 p. [Also available at <https://www.fs.usda.gov/treearch/pubs/45918>.]
- Jibson, R.W., 1986, Evaluation of landslide hazards resulting from the 5–8 October 1985 storm in Puerto Rico: U.S. Geological Survey Open-File Report 86–26, 40 p. [Also available at <https://doi.org/10.3133/ofr8626>.]
- Jibson, R.W., 1987, Landslide hazards of Puerto Rico, *in* Hays, W.W., and Gori, P.L., eds., *Proceedings of Conference XXXVI—A workshop on “Assessment of geologic hazards and risk in Puerto Rico”*: U.S. Geological Survey Open-File Report 87–008, p. 183–188. [Also available at <https://pubs.usgs.gov/of/1987/0008/report.pdf>.]
- Jibson, R.W., 1989, Debris flows in southern Puerto Rico, *in* Schultz, A.P., and Jibson, R.W., eds., *Landslide processes of the eastern United States and Puerto Rico*: Geological Society of America Special Paper 236, p. 29–55. [Also available at <https://doi.org/10.1130/SPE236-p29>.]
- Jolly, W.T., Lidiak, E.G., Dickin, A.P., and Wu, T., 1998a, Geochemical diversity of Mesozoic island arc tectonic blocks in eastern Puerto Rico, *in* Lidiak, E.G., and Larue, D.K., eds., *Tectonics and geochemistry of the northeastern Caribbean*: Geological Society of America Special Paper 322, p. 67–98. [Also available at <https://doi.org/10.1130/0-8137-2322-1.67>.]
- Jolly, W.T., Lidiak, E.G., Schellekens, J.H., and Santos, H., 1998b, Volcanism, tectonics, and stratigraphic correlations in Puerto Rico, *in* Lidiak, E.G., and Larue, D.K., eds., *Tectonics and geochemistry of the northeastern Caribbean*: Geological Society of America Special Paper 322, p. 1–34. [Also available at <https://doi.org/10.1130/0-8137-2322-1.1>.]
- Kamal, S.A., 2008, Development of a landslide hazard map for the island of Puerto Rico: Massachusetts Institute of Technology, M.S. thesis, 58 p. [Also available at <http://hdl.handle.net/1721.1/43886>.]

- Keellings, D., and Hernández Ayala, J.J., 2019, Extreme rainfall associated with Hurricane María over Puerto Rico and its connections to climate variability and change: *Geophysical Research Letters*, v. 46, no. 5, p. 2964–2973. [Also available at <https://doi.org/10.1029/2019GL082077>.]
- Knutson, T.R., McBride, J.L., Chan, J., Emanuel, K., Holland, G., Landsea, C., Held, I., Kossin, J.P., Srivastava, A.K., and Sugi, M., 2010, Tropical cyclones and climate change: *Nature Geoscience*, v. 3, p. 157–163. [Also available at <https://doi.org/10.1038/ngeo779>.]
- Larsen, M.C., 2012, Landslides and sediment budgets in four watersheds in eastern Puerto Rico, chap. F of Murphy, S.F., and Stallard, R.F., eds., *Water quality and landscape processes of four watersheds in eastern Puerto Rico*: U.S. Geological Survey Professional Paper 1789, p. 153–178. [Also available at <https://doi.org/10.3133/pp1789F>.]
- Larsen, M.C., and Parks, J.E., 1997, How wide is a road? The association of roads and mass-wasting in a forested montane environment: *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 22, no. 9, p. 835–848. [Also available at [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9837\(199709\)22:9%3C835::AID-ESP782%3E3.0.CO;2-C](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9837(199709)22:9%3C835::AID-ESP782%3E3.0.CO;2-C).]
- Larsen, M.C., and Parks, J.E., 1998, Map showing landslide susceptibility in the Comerio municipality, Puerto Rico: U.S. Geological Survey Open-File Report 98–566, 1 map sheet, scale 1:20,000. [Also available at <https://doi.org/10.3133/ofr98566>.]
- Larsen, M.C., and Santiago Román, A., 2001, Mass wasting and sediment storage in a small montane watershed—An extreme case of anthropogenic disturbance in the humid tropics, *in* Dorava, J. M., Fitzpatrick, F., Palcsak, B.B., and Montgomery, D.R., eds., *Geomorphic processes and riverine habitat*: American Geophysical Union, Water Science and Application Series, v. 4, p. 119–138. [Also available at <https://pdfs.semanticscholar.org/6c39/1b6cb4c6de01c1f0468851df37e84a0f2ced.pdf>.]
- Larsen, M.C., Santiago, M., Jibson, R., and Questell, E., 2004, Map showing susceptibility to rainfall-triggered landslides in the municipality of Ponce, Puerto Rico: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Map I-2818, 1 pl., scale 1:30,000. [Also available at <https://pubs.usgs.gov/sim/2005/2818/>.]
- Larsen, M.C., and Simon, A., 1990, Landslide processes in saprolitic soils of a tropical rain forest, Puerto Rico *in* Larue, D.K., and Draper, G., eds., *Transactions of the 12th Caribbean Conference*, August 7–11, 1989, St. Croix, V.I.: Miami Geological Society, p. 217–222.
- Larsen, M.C., and Simon, A., 1993, A rainfall intensity-duration threshold for landslides in a humid-tropical environment, Puerto Rico: *Geografiska Annaler, Series A—Physical Geography*, v. 75, no. 1-2, p. 13–23.
- Larsen, M.C., and Torres-Sanchez, A.J., 1992, Landslides triggered by Hurricane Hugo in eastern Puerto Rico, September 1989: *Caribbean Journal of Science*, v. 28, no. 3-4, p. 113–125.
- Lee, S., and Pradhan, B., 2006, Probabilistic landslide hazards and risk mapping on Penang Island, Malaysia: *Journal of Earth System Science*, v. 115, no. 6, p. 661–672. [Also available at <https://doi.org/10.1007/s12040-006-0004-0>.]
- Lee, S., Ryu, J.H., and Kim, I.S., 2007, Landslide susceptibility analysis and its verification using likelihood ratio, logistic regression, and artificial neural network models—Case study of Youngin, Korea: *Landslides*, v. 4, no. 4, p. 327–338. [Also available at <https://doi.org/10.1007/s10346-007-0088-x>.]
- Lepore, C., Kamal, S.A., Shanahan, P., and Bras, R.L., 2012, Rainfall-induced landslide susceptibility zonation of Puerto Rico: *Environmental Earth Sciences*, v. 66, p. 1667–1681. [Also available at <https://doi.org/10.1007/s12665-011-0976-1>.]
- Li, L., Lan, H., Guo, C., Zhang, Y., Li, Q., and Wu, Y., 2016, A modified frequency ratio method for landslide susceptibility assessment: *Landslides*, v. 14, no. 2, p. 727–741. [Also available at <https://doi.org/10.1007/s10346-016-0771-x>.]
- Lobeck, A.K., 1922, *The physiography of Porto Rico*: New York Academy of Sciences, *Scientific Survey of Porto Rico and the Virgin Islands*, v. 1, no. 4, p. 301–379.
- López, A.M., Hughes, K.S., and Vanacore, E., 2020, Puerto Rico’s winter 2019–2020 seismic sequence leaves the island on edge: *Temblor*, January 7, 2020, accessed January 13, 2020, at <http://doi.org/10.32858/temblor.064>. [Also available at <https://temblor.net/earthquake-insights/puerto-ricos-winter-2019-2020-seismic-sequence-leaves-the-island-on-edge-10321/>.]
- Lugo Bendezú, R., Martínez, G., Ortiz Carrero, P., Torres Angleró, K.H., and Hughes, K.S., 2018, Assessing Puerto Rico’s physical topography in relation to rainfall-induced mass wasting sites post Hurricane María, *in* Geological Society of America Annual Meeting, Indianapolis, Ind., 2018, Abstracts with Programs: Boulder, Colo., Geological Society of America, Paper 171-12, v. 50, no. 6, accessed February 28, 2020, at <https://doi.org/10.1130/abs/2018AM-320601>.

- Lugo-Camacho, J.L., 2008, Soil survey of San Germán area, Puerto Rico: U.S. Department of Agriculture Natural Resources Conservation Service, 964 p. [Also available at https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_MANUSCRIPTS/puerto_rico/PR787/0/SanGerman.pdf.]
- Mann, P., Prentice, C.S., Hippolyte, J.C., Grindlay, N.R., Abrams, L.J., and Laó-Dávila, D., 2005, Reconnaissance study of Late Quaternary faulting along Cerro Goden fault zone, western Puerto Rico, *in* Mann, P., ed., Active tectonics and seismic hazards of Puerto Rico, the Virgin Islands, and offshore areas, Geological Society of America Special Paper 385, p. 115–138. [Also available at <https://doi.org/10.1130/0-8137-2385-X.115>.]
- Mattson, P.H., 1968, Geologic map of the Adjuntas quadrangle, Puerto Rico: U.S. Geological Survey Miscellaneous Geologic Investigations Map IMAP 519, 1 pl., scale 1:20,000. [Also available at <https://doi.org/10.3133/i519>.]
- McIntyre, D.H., Geologic map of the central La Plata quadrangle, Puerto Rico: U.S. Geological Survey Miscellaneous Geologic Investigations Map IMAP 660, 1 pl., scale 1:20,000. [Also available at <https://doi.org/10.3133/i660>.]
- Metro Puerto Rico, 2017, Derrumbe en carretera de Guayanilla hacia Peñuelas: Metro Puerto Rico, December 6, 2017, accessed September 12, 2019, at <https://www.metro.pr/pr/noticias/2017/12/06/derrumbe-carretera-guayanilla-hacia-penuelas.html>.
- Meyerhoff, H.A., 1927, Tertiary physiographic development of Porto Rico and the Virgin Islands: Geological Society of America Bulletin, v. 38, no. 4, p. 557–576. [Also available at <https://doi.org/10.1130/GSAB-38-557>.]
- Milken Institute School of Public Health, 2018, Ascertainment of the estimated excess mortality from Hurricane María in Puerto Rico: Washington, D.C., George Washington University, 69 p. [Also available at <https://www.preventionweb.net/publications/view/60237>.]
- Monroe, W.H., 1963, Geology of the Camuy quadrangle, Puerto Rico: U.S. Geological Survey Map GQ-197, 1 pl., scale 1:20,000. [Also available at <https://doi.org/10.3133/gq197>.]
- Monroe, W.H., 1964, Large retrogressive landslides in north-central Puerto Rico, *in* U.S. Geological Survey, Geological Survey Research 1964—Chapter B: U.S. Geological Survey Professional Paper 501-B, p. B123–B125. [Also available at <https://doi.org/10.3133/pp501B>.]
- Monroe, W.H., 1967, Geologic map of the Quebradillas quadrangle, Puerto Rico: U.S. Geological Survey Miscellaneous Geologic Investigations Map IMAP 498, 1 pl., scale 1:20,000. [Also available at <https://doi.org/10.3133/i498>.]
- Monroe, W.H., 1969a, Geologic map of the Aguadilla quadrangle, Puerto Rico: U.S. Geological Survey Miscellaneous Geologic Investigations Map IMAP 569, 1 pl., scale 1:20,000. [Also available at <https://doi.org/10.3133/i569>.]
- Monroe, W.H., 1969b, Geologic map of the Moca and Isabela quadrangles, Puerto Rico: U.S. Geological Survey Miscellaneous Geologic Investigations Map IMAP 565, 1 pl., scale 1:20,000. [Also available at <https://doi.org/10.3133/i565>.]
- Monroe, W.H., 1979, Map showing landslides and areas of susceptibility to landsliding in Puerto Rico: U.S. Geological Survey IMAP 1148, 1 pl., scale 1:240,000. [Also available at <https://doi.org/10.3133/i1148>.]
- Monroe, W.H., 1980a, Geology of the middle Tertiary formations of Puerto Rico: U.S. Geological Survey Professional Paper 953, 1 pl., 93 p. [Also available at <https://doi.org/10.3133/pp953>.]
- Monroe, W.H., 1980b, Some tropical landforms of Puerto Rico: U.S. Geological Survey Professional Paper 1159, 1 pl., 39 p. [Also available at <https://doi.org/10.3133/pp1159>.]
- Morales-Vélez, A.C., and Hughes, K.S., 2018, Comprehensive Hurricane María mass wasting inventory and improved frequency ratio landslide hazard mapping—Status update from the University of Puerto Rico at Mayagüez: Dimension, Colegio de Ingenieros y Agrimensores de Puerto Rico, v. 1, p. 23–26. [Also available at <https://docs.google.com/a/upr.edu/viewer?a=v&pid=sites&rcid=dXByLmVkdXxnZW9sb2d5fGd4OjY5MDk0MWM0OTg0OGRIZDE>.]
- Moul-Bogunovic, M., 2019, Timing and modern character of the western Puerto Rico fault system using carbonate stratigraphy and fluvial terrace chronology for the Río Culebrinas fault valley: University of Puerto Rico at Mayagüez, M.S. thesis, 105 p. [Also available at <https://scholar.uprm.edu/handle/20.500.11801/2442>.]
- Muñoz, M.A., Lugo, W.I., Santiago, C., Matos, M., Ríos, S., and Lugo, J., 2018, Taxonomic classification of the soils of Puerto Rico, 2017: San Juan, Puerto Rico, University of Puerto Rico, Mayagüez Campus, College of Agricultural Sciences, Agricultural Experiment Station, Bulletin 313, 73 p. [Also available at <https://scholar.uprm.edu/handle/20.500.11801/817>.]

- National Aeronautics and Space Administration [NASA], 2017, SMAP L4 Global 3-hourly 9 km EASE-Grid Surface and Root Zone Soil Moisture Analysis Update, Version 4: National Snow & Ice Data Center web page, accessed September 12, 2019, at <https://nsidc.org/data/SPL4SMAU/versions/4>.
- National Weather Service, 2017, Update—Impacts of TJUA NEXRAD outage on quantitative precipitation estimates: San Juan, Puerto Rico, National Weather Service Public Information Sheet, October 3, 2017, accessed September 12, 2019, at <http://www.weather.gov/media/serfc/PNSQPESJU2.pdf>.
- NationMaster, 2017, Transport > Road density > Km of road per 100 sq. km of land area—Countries compared: NationMaster website, accessed September 12, 2019, at <http://www.nationmaster.com/country-info/stats/Transport/Road-density/Km-of-road-per-100-sq.-km-of-land-area>.
- Nelson, A.E., 1967, Geologic map of the Corozal quadrangle, Puerto Rico: U.S. Geological Survey Miscellaneous Geologic Investigations Map IMAP 473, 1 pl., scale 1:20,000. [Also available at <https://doi.org/10.3133/i473>.]
- Nelson, A.E., and Tobisch, O.T., 1968, Geologic map of the Bayaney quadrangle, Puerto Rico: U.S. Geological Survey Miscellaneous Geologic Investigations Map IMAP 525, 1 pl., scale 1:20,000. [Also available at <https://doi.org/10.3133/i525>.]
- Ortega-Ariza, D., Franseen, E.K., Santos-Mercado, H., Ramírez-Martínez, W.R., and Core-Suárez, E.E., 2015, Strontium isotope stratigraphy for Oligocene-Miocene carbonate systems in Puerto Rico and the Dominican Republic—Implications for Caribbean processes affecting depositional history: *The Journal of Geology*, v. 123, no. 6, p. 539–560. [Also available at <https://www.journals.uchicago.edu/doi/abs/10.1086/683335>.]
- Pando, M.A., Ruiz, M.E., and Larsen, M.C., 2005, Rainfall-induced landslides in Puerto Rico—An overview in Geo-Frontiers Congress 2005, Austin, Tex., 2005, Abstracts: Reston, Va., American Society of Civil Engineers, p. 2911–2925. [Also available at [https://doi.org/10.1061/40787\(166\)25](https://doi.org/10.1061/40787(166)25).]
- Pease, M.H., Jr., 1968, Geologic map of the Naranjito quadrangle, Puerto Rico: U.S. Geological Survey Miscellaneous Geologic Investigations Map IMAP 508, 1 pl., scale 1:20,000. [Also available at <https://doi.org/10.3133/i508>.]
- Philpott, S.M., Lin, B.B., Jha, S., and Brines, S.J., 2008, A multi-scale assessment of hurricane impacts on agricultural landscapes based on land use and topographic features: *Agriculture, Ecosystems & Environment*, v. 128, no. 1–2, p. 12–20. [Also available at <https://doi.org/10.1016/j.agee.2008.04.016>.]
- Porder, S., Johnson, A.H., Xing, H.X., Brocard, G., Goldsmith, S., and Pett-Ridge, J., 2015, Linking geomorphology, weathering and cation availability in the Luquillo Mountains of Puerto Rico: *Geoderma*, v. 249–250, p. 100–110. [Also available at <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.03.002>.]
- Prentice, C.S., and Mann, P., 2005, Paleoseismic study of the South Lajas fault—First documentation of an onshore Holocene fault in Puerto Rico, *in* Mann, P., ed., *Active tectonics and seismic hazards of Puerto Rico, the Virgin Islands, and offshore areas*, Geological Society of America Special Paper 385, p. 215–222. [Also available at <https://doi.org/10.1130/0-8137-2385-X.215>.]
- Puerto Rico Centro de Recaudación de Ingresos Municipales, 1998, Mapa base del CRIM (1996–98), accessed September 12, 2019 at http://gis.otg.pr.gov/downloads/CRIM_Basemap_Project_1996-98/DEM_CRIM.zip.
- Puerto Rico Oficina de Gerencia y Presupuesto, 2018, Geología detallada: Government of Puerto Rico, accessed September 12, 2019, at http://gis.otg.pr.gov/downloads/geology/geology20k20181031_gdb.zip.
- Ramos-Scharrón, C.E., and Arima, E., 2019, Hurricane María’s precipitation signature in Puerto Rico—A conceivable preage of rains to come: *Scientific Reports*, v. 9, no. 1, article no. 15612, accessed February 28, 2020, at <https://doi.org/10.1038/s41598-019-52198-2>.
- Ramos-Scharrón, C.E., and LaFevor, M.C., 2016, The role of unpaved roads as active source areas of precipitation excess in small watersheds drained by ephemeral streams in the northeastern Caribbean: *Journal of Hydrology*, v. 533, p. 168–179. [Also available at <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.11.051>.]
- Regmi, A.D., and Poudel, K., 2016, Assessment of landslide susceptibility using GIS-based evidential belief function in Patu Khola watershed, Dang, Nepal: *Environmental Earth Sciences*, v. 75, article no. 743, accessed February 28, 2020, at <https://doi.org/10.1007/s12665-016-5562-0>.
- Reid, H.F., and Taber, S., 1919, The Porto Rico earthquake of 1918 with descriptions of earlier earthquakes—Report of the Earthquake Investigation Commission: Washington, D.C., Government Printing Office, 74 p.

- Rivera-Santiago, F.O., 2015, High precision GPS monitoring for landslide hazard and land stability evaluation in the Cerca del Cielo urbanization, Ponce, Puerto Rico: University of Puerto Rico at Mayagüez, M.S. thesis, 144 p. [Also available at <https://scholar.uprm.edu/handle/20.500.11801/56>.]
- Roberts, R.C., 1942, Soil survey of Puerto Rico: U.S. Department of Agriculture Bureau of Plant Industry, Series 1936, no. 8, 253 p. [Also available at https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_MANUSCRIPTS/puerto_rico/PR1942/puertorico1942a.pdf.]
- Rodríguez Feliciano, C.A., Bayouth García, D., and Hughes, K.S., 2019, Volume of slope failures caused by Hurricane María in Puerto Rico using lidar and SfM, *in* Geological Society of America Annual Meeting, Phoenix, Az., 2019, Abstracts with Programs: Boulder, Colo., Geological Society of America, Paper 42-2, v. 51, no. 5, accessed February 28, 2020, at <https://doi.org/10.1130/abs/2019AM-335978>.
- Rodríguez-Pérez, C., Vázquez Castillo, L., Rodríguez-Molina, C., and Vázquez Castillo, A., 1988, A study of a road landslide in Puerto Rico, *in* Second International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, St. Louis, Mo., 1988, Proceedings: St. Louis, Mo., Missouri University of Science and Technology, Paper 2.16, p. 151–157. [Also available at <https://scholarsmine.mst.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1440&context=icchge>.]
- Sanger, J.P., Gannett, H., Willcox, W.F., and United States War Department, 1900, Report on the census of Porto Rico, 1899: Washington, D.C., Government Printing Office, 417 p.
- Santiago, M., and Larsen, M.C., 2001, Map showing susceptibility to earthquake-induced landsliding, San Juan metropolitan area, Puerto Rico: U.S. Geological Survey Open-File Report 2001–39, 2 pls., scale 1:20,000, accessed February 28, 2020, at <https://doi.org/10.3133/ofr200139>.
- Santiago-Pérez, Y., Odom, W.E., III, and Hughes, K.S., 2019, Relict Caribbean topography and tectonically triggered erosion rates in the Cordillera Central of Puerto Rico *in* Geological Society of America Annual Meeting, Phoenix, Az., 2019 Abstracts with Programs: Boulder, Colo., Geological Society of America, Paper 263-7, v. 51, no. 5, accessed February 28, 2020, at <https://doi.org/10.1130/abs/2019AM-338288>.
- Schulz, W.H., 2007, Landslide susceptibility revealed by lidar imagery and historical records, Seattle, Washington: Engineering Geology, v. 89, no. 1–2, p. 67–87. [Also available at <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2006.09.019>.]
- Schwartz, S.B., 1992, The Hurricane of San Ciriaco—Disaster, politics, and society in Puerto Rico, 1899–1901: Hispanic American Historical Review, v. 72, no. 3, p. 303–334. [Also available at <http://doi.org/10.2307/2515987>.]
- Sidle, R.C., and Ochiai, H., 2006, Landslides—Processes, prediction, and land use: Washington, D.C., American Geophysical Union, Water Resources Monograph 18, 312 p. [Also available at <http://doi.org/10.1029/WM018>.]
- Silva-Tulla, F., 1986, The October 1985 landslide at Barrio Mameyes, Ponce, Puerto Rico: Washington, D.C., National Academy Press, 14 p.
- Silva-Tulla, F., Pando, M.A., Soto, A.E., Morales, A., Pradel, D., Inci, G., Sasanakul, I., Bernal, J.R., Kayen, R., Hughes, S., Adams, T., and Park, Y., 2018, Geotechnical impacts of Hurricane María in Puerto Rico: Geotechnical Extreme Events Reconnaissance, Association Report No. GEER-057, 120 p. [Also available at http://www.geerassociation.org/administrator/components/com_geer_reports/geerfiles/180629_GEER_PR_Report_No_GEER-057.pdf.]
- Simon, A., Larsen, M.C., and Hupp, C.R., 1990, The role of soil processes in determining mechanisms of slope failure and hill-slope development in a humid-tropical forest, eastern Puerto Rico: Geomorphology, v. 3, no. 3–4, p. 263–286. [Also available at [https://doi.org/10.1016/0169-555X\(90\)90007-D](https://doi.org/10.1016/0169-555X(90)90007-D).]
- Soler-López, L.R., 2000, Sedimentation survey of Lago Dos Bocas, Puerto Rico, October 1999: U.S. Geological Survey Water Resources Investigations Report 00-4234, 19 p. [Also available at <https://pubs.usgs.gov/wri/2000/4234/report.pdf>.]
- Taggart, B.E., and Joyce, J., 1990, Radiometrically dated marine terraces on northwestern Puerto Rico, *in* Larue, D.K., and Draper, G., eds., Transactions of the 12th Caribbean Conference, August 7–11, 1989, St. Croix, V.I.: Miami Geological Society, p. 248–258.
- Terzaghi, K., 1950, Mechanism of landslides, *in* Paige, S., ed., Application of geology to engineering practice—Berkey volume: New York, Geological Society of America, p. 83–124. [Also available at <https://doi.org/10.1130/Berkey.1950>.]
- Tobisch, O.T., and Turner, M.D., 1971, Geologic map of the San Sebastián quadrangle, Puerto Rico: U.S. Geological Survey Miscellaneous Geologic Investigations Map IMAP 661, 1 pl., scale 1:20,000. [Also available at <https://doi.org/10.3133/i661>.]

- U.S. Census Bureau, 2010, 2010 Census—Population density data (text version): United States Census Bureau web page, accessed January 13, 2020, at <https://www.census.gov/data/tables/2010/dec/density-data-text.html>.
- U.S. Census Bureau, 2015, 2015 TIGER/Line Shapefiles, State, Puerto Rico, primary and secondary roads State-based Shapefile: United States Census Bureau, accessed September 12, 2019, at http://www2.census.gov/geo/tiger/TIGER2015/PRISECROADS/tl_2015_72_prisecroads.zip.
- U.S. Department of Agriculture [USDA], 2018, Web soil survey: U.S. Department of Agriculture Natural Resources Conservation Service web page, accessed September 12, 2019, at <https://websoilsurvey.sc.egov.usda.gov/App/WebSoilSurvey.aspx>.
- U.S. Geological Survey [USGS], 2017, 2015–2016 USGS Puerto Rico lidar: U.S. Geological Survey, accessed September 12, 2019, at ftp://rockyftp.cr.usgs.gov/vdelivery/Datasets/Staged/Elevation/OPR/PR_PuertoRico_2015/.
- U.S. Geological Survey [USGS], 2019, NHD 20190815 for Puerto Rico State or territory Shapefile model version 2.2.1: U.S. Geological Survey web page, accessed September 12, 2019, at <https://www.sciencebase.gov/catalog/item/5a96cdc6e4b06990606c4d7c>.
- Varnes, D.J., 1984, Landslide hazard zonation—A review of principles and practice: Paris, United Nations, Natural Hazards, no. 3, 63 p.
- Vazquez Torres, J., 2013, Tremenda desgracia en Bayamón—Fotos y videos: Primera Hora, August 21, 2013, accessed September 12, 2019, at <https://www.primerahora.com/noticias/policia-tribunales/nota/tremendadesgraciaenbayamon-fotosyvideos-947498/>.
- Wang, G., 2012, Kinematics of the Cerca del Cielo, Puerto Rico landslide derived from GPS observations: *Landslides*, v. 9, no. 1, p. 117–130. [Also available at <https://doi.org/10.1007/s10346-011-0277-5>.]
- Wang, G., 2013, Millimeter-accuracy GPS landslide monitoring using Precise Point Positioning with Single Receiver Phase Ambiguity (PPP-SRPA) resolution—A case study in Puerto Rico: *Journal of Geodetic Science*, v. 3, no. 1, p. 22–31. [Also available at <https://doi.org/10.2478/jogs-2013-0001>.]
- Wang, G., Joyce, J., Phillips, D., Shrestha, R., and Carter, W., 2013, Delineating and defining the boundaries of an active landslide in the rainforest of Puerto Rico using a combination of airborne and terrestrial lidar data: *Landslides*, v. 10, no. 4, p. 503–513. [Also available at <https://doi.org/10.1007/s10346-013-0400-x>.]
- White, A.F., and Blum, A.E., 1995, Effects of climate on chemical weathering in watersheds: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 59, no. 9, p. 1729–1747. [Also available at [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(95\)00078-E](https://doi.org/10.1016/0016-7037(95)00078-E).]
- White, A.F., Blum, A.E., Schulz, M.S., Vivit, D.V., Stonestrom, D.A., Larsen, M., Murphy, S.F., and Eberl, D., 1998, Chemical weathering in a tropical watershed, Luquillo Mountains, Puerto Rico—I. Long-term versus short-term weathering fluxes: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 62, no. 2, p. 209–226. [Also available at [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(97\)00335-9](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(97)00335-9).]
- Xu, C., Xu, X., Dai, F., and Saraf, A.K., 2012, Comparison of different models for susceptibility mapping of earthquake triggered landslides related with the 2008 Wenchuan earthquake in China: *Computers & Geosciences*, v. 46, p. 317–329. [Also available at <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2012.01.002>.]
- Zachariassen, J., and von Hillebrandt-Andrade, C.G., 2005, Holocene faulting of the Cero Goden fault, western Puerto Rico: National Earthquake Hazards Reduction Program, Final Technical Report, Grant Award Number 05HQGR0082, 27 p., accessed February 5, 2020, at https://earthquake.usgs.gov/cfusion/external_grants/reports/05HQGR0082.pdf.

El apoyo para la publicación fue provisto por el
Science Publishing Network,

Denver Publishing Service Center

Para más información sobre la investigación en este reporte contacte al

Center Director, USGS Geologic Hazards Science Center

Box 25046, Mail Stop 966

Denver, CO 80225

(303) 273-8579

O visite la página web del Geologic Hazards Science Center en

<https://www.usgs.gov/centers/geohazards>

Apéndice 1. Clave para las Abreviaturas de los Municipios

Abreviatura	Nombre	Abreviatura	Nombre	Abreviatura	Nombre
ADJ	Adjuntas	FLO	Florida	NAR	Naranjito
AGA	Aguada	GUA	Guánica	ORO	Orocovis
AGL	Aguadilla	GMA	Guayama	PAT	Patillas
AGB	Aguas Buenas	GNA	Guayanilla	PEN	Peñuelas
AIB	Aibonito	GYB	Guaynabo	PON	Ponce
ARE	Arecibo	GUR	Gurabo	QUE	Quebradillas
ARY	Arroyo	HAT	Hatillo	RIN	Rincón
ANA	Añasco	HOR	Hormigueros	RIO	Rio Grande
BAR	Barceloneta	HUM	Humacao	SAL	Salinas
BAQ	Barranquitas	ISA	Isabela	SAB	Sabana Grande
BAY	Bayamón	JAY	Jayuya	SGM	San Germán
CAG	Caguas	JDZ	Juana Díaz	SJU	San Juan
CBR	Cabo Rojo	JUN	Juncos	SLO	San Lorenzo
CAM	Camuy	LAJ	Lajas	SSB	San Sebastián
CAN	Canóvanas	LAR	Lares	SIB	Santa Isabel
CAR	Carolina	LMA	Las Marías	TAL	Toa Alta
CAT	Cataño	LPI	Las Piedras	TBA	Toa Baja
CAY	Cayey	LOI	Loíza	TRU	Trujillo Alto
CEI	Ceiba	LUQ	Luquillo	UTU	Utua
CIA	Ciales	MAN	Manatí	VAL	Vega Alta
CID	Cidra	MAR	Maricao	VBA	Vega Baja
COA	Coamo	MAU	Maunabo	VIL	Villalba
COM	Comerío	MAY	Mayagüez	YAB	Yabucoa
COR	Corozal	MOC	Moca	YAU	Yauco
DOR	Dorado	MOR	Morovis		
FAJ	Fajardo	NAG	Naguabo		

Apéndice 2. Resultados de los Análisis de Cobertura del Terreno

[km², kilómetro cuadrado; %, por ciento; #, número; FR, razón de frecuencia; SI, Índice de Susceptibilidad]

VALOR	CLASS_NAME	Área (km ²)	Área (%)	Derrumbes (#)	Derrumbes (%)	FR	SI
43	Montane wet evergreen abandoned and active coffee plantation	548.9	0.063	13920	0.2598	4.12	1.42
39	Montane wet noncalcareous evergreen shrubland and woodland	241.1	0.0277	5831	0.1088	3.93	1.37
38	Young secondary montane wet noncalcareous evergreen forest	216.7	0.0249	4018	0.075	3.02	1.1
32	Montane wet alluvial shrubland and woodland	9	0.001	120	0.0022	2.17	0.77
30	Mature secondary montane wet alluvial evergreen forest	6.1	0.0007	80	0.0015	2.12	0.75
42	Wet serpentine shrubland and woodland	3.6	0.0004	42	0.0008	1.91	0.64
29	Lowland moist abandoned and active coffee plantations	110.8	0.0127	1269	0.0237	1.86	0.62
33	Mature secondary montane wet noncalcareous evergreen forest	252.3	0.029	2672	0.0499	1.72	0.54
31	Young secondary montane wet alluvial evergreen forest	9.9	0.0011	92	0.0017	1.51	0.41
36	Mature primary Sierra Palm and secondary montane wet noncalcareous evergreen forest	119.7	0.0137	869	0.0162	1.18	0.17
50	Moist grasslands and pastures	2184.6	0.2507	14547	0.2715	1.08	0.08
28	Lowland moist noncalcareous shrubland and woodland	438.6	0.0503	2850	0.0532	1.06	0.06
27	Young secondary lowland moist noncalcareous evergreen forest	530.5	0.0609	3077	0.0574	0.94	-0.06
40	Mature secondary montane wet serpentine evergreen forest	33.8	0.0039	198	0.0037	0.95	-0.05
26	Mature secondary lowland moist noncalcareous evergreen forest	378.5	0.0434	1671	0.0312	0.72	-0.33
41	Young secondary montane wet serpentine evergreen forest	6.5	0.0007	25	0.0005	0.62	-0.47
64	Low-density urban development	369.3	0.0424	990	0.0185	0.44	-0.83
22	Lowland moist alluvial shrubland and woodland	51.2	0.0059	123	0.0023	0.39	-0.94
65	Artificial barrens	85.8	0.0098	198	0.0037	0.38	-0.98
20	Mature secondary lowland moist alluvial evergreen forest	21.3	0.0024	49	0.0009	0.37	-0.98
37	Mature primary elfin woodland and secondary montane wet noncalcareous evergreen cloud forest	15.4	0.0018	34	0.0006	0.36	-1.02
21	Young secondary lowland moist alluvial evergreen forest	66.7	0.0077	137	0.0026	0.33	-1.1
34	Mature primary Tabonuco and secondary montane wet noncalcareous evergreen forest	87.3	0.01	177	0.0033	0.33	-1.11
35	Mature primary Palo Colorado and secondary montane wet noncalcareous evergreen forest	37.2	0.0043	49	0.0009	0.21	-1.54
16	Mature secondary dry and moist serpentine semideciduous forest	18.4	0.0021	22	0.0004	0.19	-1.64
24	Young secondary moist limestone evergreen and semideciduous forest	155	0.0178	136	0.0025	0.14	-1.95
17	Young secondary dry and moist serpentine semideciduous forest	19.6	0.0023	10	0.0002	0.08	-2.49
18	Dry and moist serpentine woodland and shrubland	8.4	0.001	4	0.0001	0.08	-2.56

VALOR	CLASS_NAME	Área (km ²)	Área (%)	Derrumbes (#)	Derrumbes (%)	FR	SI
25	Moist limestone shrubland and woodland	103.4	0.0119	58	0.0011	0.09	-2.39
7	Lowland dry limestone woodland and shrubland	50	0.0057	18	0.0003	0.06	-2.84
23	Mature secondary moist limestone evergreen and semideciduous forest	464.6	0.0533	130	0.0024	0.05	-3.09
6	Young secondary lowland dry limestone semideciduous forest	39.1	0.0045	8	0.0001	0.03	-3.4
15	Lowland dry noncalcareous shrubland and woodland	104.7	0.012	21	0.0004	0.03	-3.42
13	Mature secondary lowland dry noncalcareous semideciduous forest	21.6	0.0025	3	0.0001	0.02	-3.79
14	Young secondary lowland dry noncalcareous semideciduous forest	36.1	0.0041	3	0.0001	0.01	-4.3
59	Fine to coarse sandy beaches, mixed sand and gravel beaches	6.7	0.0008	1	0	0.02	-3.71
48	Dry grasslands and pastures	406.9	0.0467	36	0.0007	0.01	-4.24
3	Lowland dry alluvial shrubland and woodland	42.4	0.0049	5	0.0001	0.02	-3.95
66	Freshwater	44.2	0.0051	5	0.0001	0.02	-4
63	High-density urban development	522.8	0.06	38	0.0007	0.01	-4.44
53	Seasonally flooded herbaceous nonsaline wetlands	182.4	0.0209	15	0.0003	0.01	-4.31
55	Hay and row crops	257.9	0.0296	16	0.0003	0.01	-4.6
5	Mature secondary lowland dry limestone semideciduous forest	93.4	0.0107	6	0.0001	0.01	-4.56
1	Mature secondary lowland dry alluvial semideciduous forest	5.1	0.0006	0	0	0	-5
2	Young secondary lowland dry alluvial semideciduous forest	28.8	0.0033	0	0	0	-5
4	Mature secondary lowland dry limestone evergreen forest	8.8	0.001	0	0	0	-5
8	Lowland dry limestone shrubland	36.8	0.0042	0	0	0	-5
10	Coastal dwarf woodland and shrubland	0.1	0	0	0	0	-5
44	Mangrove forest and shrubland	76	0.0087	0	0	0	-5
45	Freshwater Pterocarpus swamp	2.6	0.0003	0	0	0	-5
46	Lowland dry riparian forest	6.9	0.0008	0	0	0	-5
47	Lowland dry riparian shrubland and woodland	4.2	0.0005	0	0	0	-5
49	Dry cactus grassland and shrubland	2.1	0.0002	0	0	0	-5
51	Emergent herbaceous nonsaline wetlands	11	0.0013	0	0	0	-5
52	Emergent herbaceous saline wetlands	8.8	0.001	0	0	0	-5
54	Seasonally flooded herbaceous saline wetlands	48.5	0.0056	0	0	0	-5
56	Woody agriculture and plantations: Palm plantations	4.9	0.0006	0	0	0	-5
57	Rocky cliffs and shelves	1.4	0.0002	0	0	0	-5
58	Gravel beaches and stony shoreline	0.3	0	0	0	0	-5
60	Riparian and other natural barrens	4.5	0.0005	0	0	0	-5
61	Salt and mudflats	12.4	0.0014	0	0	0	-5
62	Salt production	0.2	0	0	0	0	-5
67	Salt water	32.6	0.0037	0	0	0	-5
68	Lowland moist riparian forest	9.1	0.001	0	0	0	-5
69	Lowland moist riparian shrubland and woodland	5.1	0.0006	0	0	0	-5
70	Aquiculture	1	0.0001	0	0	0	-5

Apéndice 3. Resultados de los Análisis de Clase de Suelo

[MUKEY, clave de la unidad de mapa; MUSYM, símbolo de la unidad de mapa; MUNAME, nombre de la unidad de mapa; km², kilómetro cuadrado; %, por ciento; #, número; FR, razón de frecuencia; SI, Índice de Susceptibilidad; >, mayor que]

MUKEY	MUSYM	MUNAME	Área (km ²)	Área (%)	Derrumbes (#)	Derrumbes (%)	FR	SI
326463	PeF	Pellejas clay loam, 40 to 60 percent slopes	98.9	0.0114	8524	0.1591	14.01	2.64
326577	MrF2	Maricao clay, 20 to 60 percent slopes	3.8	0.0004	295	0.0055	12.65	2.54
326445	LcF2	Lirios clay loam, 40 to 60 percent slopes, eroded	59.1	0.0068	3802	0.071	10.47	2.35
326566	LuF2	Los Guineos clay, 20 to 60 percent slopes, eroded	6.9	0.0008	374	0.007	8.78	2.17
326444	LcE2	Lirios clay loam, 20 to 40 percent slopes, eroded	3	0.0003	146	0.0027	7.85	2.06
326536	CwF	Cuchillas silty clay loam, 20 to 60 percent slopes	0.4	0	16	0.0003	7.05	1.95
1386404	MkF	Maricao clay, 20 to 60 percent slopes	11.1	0.0013	452	0.0084	6.63	1.89
326414	CoF	Consejo clay, 40 to 60 percent slopes	9.1	0.001	361	0.0067	6.42	1.86
326702	PeF	Pellejas clay loam, 40 to 60 percent slopes	2.7	0.0003	105	0.002	6.3	1.84
326437	InE	Ingenio clay loam, 20 to 40 percent slopes	1.7	0.0002	66	0.0012	6.22	1.83
1379815	CvF	Cuchillas silty clay loam, 20 to 60 percent slopes	2.3	0.0003	85	0.0016	5.92	1.78
326574	MoF2	Maresua silty clay loam, 20 to 60 percent slopes, eroded	0	0	1	0	5.71	1.74
326416	CpF	Consumo clay, 40 to 60 percent slopes	11.7	0.0013	362	0.0068	5.04	1.62
326530	CoF2	Consumo clay, 40 to 60 percent slopes	157.6	0.0181	4863	0.0908	5.02	1.61
326550	HmF2	Humatas clay, 40 to 60 percent slopes	120	0.0138	3594	0.0671	4.87	1.58
1385065	HmF	Humatas clay, 40 to 60 percent slopes	6.4	0.0007	191	0.0036	4.84	1.58
326435	HmF	Humatas clay, 40 to 60 percent slopes	82.9	0.0095	2468	0.0461	4.84	1.58
326608	RsF2	Rosario clay, 40 to 60 percent slopes, eroded	0.1	0	3	0.0001	4.77	1.56
1379812	CsF	Consumo clay, 40 to 60 percent slopes	5.6	0.0006	161	0.003	4.64	1.54
326656	CuF	Consumo clay, 40 to 60 percent slopes	68.6	0.0079	1946	0.0363	4.61	1.53
1385087	AbF	Agueybana clay, 12 to 60 percent slopes	13.1	0.0015	351	0.0066	4.35	1.47
326591	MxF	Mucara clay, 40 to 60 percent slopes	20	0.0023	475	0.0089	3.87	1.35
326382	AdF2	Adjuntas clay, 40 to 60 percent slopes, eroded	7.2	0.0008	170	0.0032	3.82	1.34
326448	LgF	Los Guineos clay, 40 to 60 percent slopes	30.8	0.0035	666	0.0124	3.52	1.26
326839	PeF2	Pellejas clay loam, 40 to 60 percent slopes, eroded	3	0.0003	62	0.0012	3.37	1.21
326687	MoF	Maricao clay, 20 to 60 percent slopes	80.2	0.0092	1553	0.029	3.15	1.15
326401	CaF	Caguabo clay loam, 20 to 60 percent slopes	4.4	0.0005	82	0.0015	3.04	1.11
326830	MkF2	Maricao clay, 20 to 60 percent slopes	34	0.0039	615	0.0115	2.94	1.08
326587	MwF2	Morado clay loam, 40 to 60 percent slopes	26.7	0.0031	466	0.0087	2.84	1.04
326447	LgE	Los Guineos clay, 20 to 40 percent slopes	9.4	0.0011	156	0.0029	2.71	1
326449	MaF2	Maraguez silty clay loam, 40 to 60 percent slopes, eroded	24.5	0.0028	393	0.0073	2.61	0.96
326511	AoF2	Anones clay loam, 40 to 60 percent slopes, eroded	10.5	0.0012	166	0.0031	2.56	0.94
326812	HmF2	Humatas clay, 40 to 60 percent slopes	66.6	0.0076	1047	0.0195	2.56	0.94
326458	MuF	Mucara clay, 40 to 60 percent slopes	54.3	0.0062	816	0.0152	2.45	0.89
326415	CpE	Consumo clay, 20 to 40 percent slopes	0.6	0.0001	9	0.0002	2.42	0.88
326517	CbF	Caguabo clay loam, 20 to 60 percent slopes	51.1	0.0059	753	0.0141	2.4	0.87
326507	AdE2	Aibonito clay, 20 to 40 percent slopes, eroded	0.5	0.0001	7	0.0001	2.39	0.87
326701	PaF	Pandura sandy loam, 40 to 60 percent slopes	52.6	0.006	697	0.013	2.16	0.77
326413	CoE	Consejo clay, 20 to 40 percent slopes	0.7	0.0001	9	0.0002	2.08	0.73
328582	NOTCOM	No Digital Data Available	1.6	0.0002	20	0.0004	2.02	0.7

MUKEY	MUSYM	MUNAME	Área (km ²)	Área (%)	Derrumbes (#)	Derrumbes (%)	FR	SI
326392	AoF2	Alonso clay, 40 to 60 percent slopes, eroded	12	0.0014	149	0.0028	2.02	0.7
326600	QuF2	Quebrada silty clay, 40 to 60 percent slopes, eroded	1.1	0.0001	13	0.0002	1.99	0.69
326446	LgD	Los Guineos clay, 12 to 20 percent slopes	3.4	0.0004	40	0.0007	1.91	0.65
326436	InD	Ingenio clay loam, 5 to 20 percent slopes	8.5	0.001	99	0.0018	1.91	0.64
326599	QuE2	Quebrada silty clay, 20 to 40 percent slopes, eroded	2.3	0.0003	27	0.0005	1.9	0.64
326668	HtF	Humatas clay, 40 to 60 percent slopes	83.8	0.0096	965	0.018	1.87	0.63
326549	HmE2	Humatas clay, 20 to 40 percent slopes	76.9	0.0088	865	0.0161	1.83	0.6
326825	LuF	Los Guineos clay, 40 to 60 percent slopes	20.4	0.0023	229	0.0043	1.83	0.6
326821	LmF2	Lirios clay loam, 40 to 60 percent slopes, eroded	2.3	0.0003	26	0.0005	1.8	0.59
326824	LuE	Los Guineos clay, 20 to 40 percent slopes	7.8	0.0009	85	0.0016	1.77	0.57
326789	AaF2	Adjuntas clay, 40 to 60 percent slopes, eroded	1.8	0.0002	19	0.0004	1.74	0.55
1887168	RuG	Rubias-Chiquito complex, 60 to 90 percent slopes	0.1	0	1	0	1.73	0.55
326698	NaF	Naranjito silty clay loam, 40 to 60 percent slopes	109.5	0.0126	1155	0.0216	1.72	0.54
326708	RpF2	Rio Piedras clay, 40 to 60 percent slopes, eroded	4.9	0.0006	51	0.001	1.7	0.53
326529	CoE	Consumo clay, 20 to 40 percent slopes	83.2	0.0096	869	0.0162	1.7	0.53
326502	VoE2	Voladora clay, 20 to 40 percent slopes, eroded	4.2	0.0005	43	0.0008	1.68	0.52
1884759	AIF	Aljibe-Guama-Indiera complex, 20 to 60 percent slopes	0.3	0	3	0.0001	1.66	0.51
326434	HmE	Humatas clay, 20 to 40 percent slopes	10.1	0.0012	102	0.0019	1.65	0.5
326422	CvF	Cuchillas-Rock outcrop complex, 40 to 60 percent slopes	5.2	0.0006	50	0.0009	1.56	0.45
326667	HtE	Humatas clay, 20 to 40 percent slopes	87.5	0.01	801	0.015	1.49	0.4
326811	HmE2	Humatas clay, 20 to 40 percent slopes	15.5	0.0018	139	0.0026	1.46	0.38
326538	DaE2	Daguey clay, 20 to 40 percent slopes, eroded	15	0.0017	129	0.0024	1.4	0.34
1386662	EcG	El Cacique-La Taina complex, 60 to 90 percent slopes	9.4	0.0011	79	0.0015	1.36	0.31
326802	CuF2	Consumo clay, 40 to 60 percent slopes	4.7	0.0005	39	0.0007	1.35	0.3
1884723	EdF	El Descanso-Hoconuco complex, 20 to 60 percent slopes	2.4	0.0003	20	0.0004	1.33	0.28
326895	HuF	Humatas-Stony land complex, 40 to 60 percent slopes	7.1	0.0008	58	0.0011	1.33	0.28
326616	So	Serpentinite outcrop	18.5	0.0021	148	0.0028	1.3	0.27
326677	LmE	Limones clay, 20 to 40 percent slopes	1.6	0.0002	13	0.0002	1.3	0.26
1379811	CsE	Consumo clay, 20 to 40 percent slopes	7.5	0.0009	58	0.0011	1.26	0.23
326639	AbE	Aibonito clay, 20 to 40 percent slopes	2.7	0.0003	21	0.0004	1.25	0.22
326421	CuF	Cuchillas silty clay loam, 40 to 60 percent slopes	2.7	0.0003	20	0.0004	1.22	0.2
326565	LuD	Los Guineos clay, 12 to 20 percent slopes	0.4	0	3	0.0001	1.2	0.18
326695	MxF	Mucara clay, 40 to 60 percent slopes	298.9	0.0343	2154	0.0402	1.17	0.16
326634	VoE2	Voladora silty clay, 20 to 40 percent slopes, eroded	14.8	0.0017	106	0.002	1.16	0.15
326658	DaC	Daguey clay, 2 to 12 percent slopes	0.4	0	3	0.0001	1.16	0.15
326837	MuF2	Mucara silty clay, 40 to 60 percent slopes, eroded	108.3	0.0124	769	0.0144	1.16	0.14
326655	CuE	Consumo clay, 20 to 40 percent slopes	8	0.0009	54	0.001	1.1	0.1
326692	MuF2	Morado clay loam, 40 to 60 percent slopes	10.5	0.0012	71	0.0013	1.1	0.1
326546	GoC	Guanajibo loam, 2 to 12 percent slopes	0.6	0.0001	4	0.0001	1.1	0.1
326450	McF	Maricao clay, 20 to 60 percent slopes	3.6	0.0004	24	0.0004	1.09	0.08
326456	MpF2	Morado clay loam, 40 to 60 percent slopes	33.1	0.0038	219	0.0041	1.07	0.07
1907042	EdG	El Descanso-Hoconuco complex, 60 to 90 percent slopes	1.5	0.0002	10	0.0002	1.07	0.06
2706232	SoE	Sonadora-Caguabo complex, 20 to 40 percent slopes	0.8	0.0001	5	0.0001	1.05	0.05
326391	AoE2	Alonso clay, 20 to 40 percent slopes, eroded	4.1	0.0005	26	0.0005	1.04	0.04

80 Mapa de Susceptibilidad a Deslizamientos de Tierra Desencadenados por Precipitación Intensa en Puerto Rico

MUKEY	MUSYM	MUNAME	Área (km ²)	Área (%)	Derrumbes (#)	Derrumbes (%)	FR	SI
1379816	CvG	Cuchillas silty clay loam, 60 to 90 percent slopes	0.5	0.0001	3	0.0001	1.03	0.03
326681	LsF	Los Guineos clay, 40 to 60 percent slopes	53.8	0.0062	338	0.0063	1.02	0.02
326697	NaE	Naranjito silty clay loam, 20 to 40 percent slopes	24	0.0027	150	0.0028	1.02	0.02
326510	AoE2	Anones clay loam, 20 to 40 percent slopes, eroded	9.6	0.0011	60	0.0011	1.02	0.02
2706238	YqE	Yunque-Los Guineos-Moteado complex, 5 to 40 percent slopes	0.5	0.0001	3	0.0001	0.99	-0.01
326455	MoE2	Moca clay, 20 to 40 percent slopes, eroded	1.7	0.0002	10	0.0002	0.98	-0.02
326500	VoC2	Voladora clay, 5 to 12 percent slopes, eroded	3	0.0003	18	0.0003	0.97	-0.03
326442	JuE2	Juncal clay, 20 to 40 percent slopes, eroded	0.7	0.0001	4	0.0001	0.95	-0.05
1356080	CbF	Caguabo clay loam, 20 to 60 percent slopes	49.9	0.0057	291	0.0054	0.95	-0.05
326390	AoD2	Alonso clay, 12 to 20 percent slopes, eroded	0.7	0.0001	4	0.0001	0.95	-0.05
1386546	QbF	Quebrada clay loam, 40 to 60 percent slopes	14.2	0.0016	81	0.0015	0.93	-0.07
326829	MeF2	Maraguez silty clay loam, 40 to 60 percent slopes, eroded	23.1	0.0027	128	0.0024	0.9	-0.11
326548	HmD	Humatas clay, 12 to 20 percent slopes	15.6	0.0018	86	0.0016	0.9	-0.11
1887167	RuF	Rubias-Chiquito complex, 40 to 60 percent slopes	8.8	0.001	48	0.0009	0.89	-0.12
2706236	HmE	Humatas-Zarzal complex, 5 to 40 percent slopes	11.5	0.0013	62	0.0012	0.88	-0.13
326680	LsE	Los Guineos clay, 20 to 40 percent slopes	12.7	0.0015	68	0.0013	0.87	-0.14
326937	Ru	Rough stony land	0.4	0	2	0	0.86	-0.15
326596	PIE2	Plata clay, 20 to 40 percent slopes, eroded	8	0.0009	42	0.0008	0.85	-0.16
326889	GuE2	Guayabota silty clay loam, 20 to 40 slopes, eroded	2.1	0.0002	11	0.0002	0.85	-0.17
326524	CIE	Colinas clay loam, 20 to 40 percent slopes	31.7	0.0036	164	0.0031	0.84	-0.17
2706233	SoG	Sonadora-Caguabo complex, 40 to 90 percent slopes	4.1	0.0005	21	0.0004	0.84	-0.18
326796	CdF	Caguabo-Rock land complex, 20 to 60 percent slopes	31.9	0.0037	161	0.003	0.82	-0.2
326793	AnE2	Alonso clay, 20 to 40 percent slopes, eroded	4	0.0005	20	0.0004	0.82	-0.2
326826	LyFX	Los Guineos-Maricao association, steep	26.6	0.003	133	0.0025	0.81	-0.21
2553832	CaD	Caguabo gravelly clay loam, 12 to 20 percent slopes	0.6	0.0001	3	0.0001	0.8	-0.22
326679	LoF2	Lirios silty clay loam, 20 to 60 percent slopes, eroded	17.9	0.002	86	0.0016	0.78	-0.24
1385063	HmE	Humatas clay, 20 to 40 percent slopes	5.7	0.0007	27	0.0005	0.77	-0.26
326402	CbF	Caguabo-Rock outcrop complex, 20 to 60 percent slopes	8.5	0.001	40	0.0007	0.76	-0.27
2706239	YuF	Yunque-Moteado complex, 20 to 60 percent slopes	0.4	0	2	0	0.76	-0.28
2553845	PcE	Picacho-Ciales complex, 5 to 40 percent slopes	4.8	0.0006	22	0.0004	0.75	-0.29
326527	CmE	Colinas cobbly clay loam, 20 to 40 percent slopes	10.1	0.0012	46	0.0009	0.74	-0.3
326678	LmF	Limones clay, 40 to 60 percent slopes	1.1	0.0001	5	0.0001	0.71	-0.34
2706242	ZcF	Zarzal-Cristal complex, 20 to 60 percent slopes	5.8	0.0007	25	0.0005	0.7	-0.35
326423	DaD2	Daguey clay, 12 to 20 percent slopes, eroded	5.1	0.0006	22	0.0004	0.7	-0.35
326726	VkC2	Via clay loam, 5 to 12 percent slopes, eroded	1.9	0.0002	8	0.0001	0.7	-0.36
326601	Re	Reilly gravelly loam	4.2	0.0005	18	0.0003	0.7	-0.36
326805	DaD	Daguey clay, 12 to 20 percent slopes	2.8	0.0003	12	0.0002	0.7	-0.36
326501	VoD2	Voladora clay, 12 to 20 percent slopes, eroded	0.7	0.0001	3	0.0001	0.69	-0.37
326894	HtF2	Humatas clay, 40 to 60 percent slopes	20.4	0.0023	86	0.0016	0.69	-0.38
326470	Rm	Riverwash	2.6	0.0003	11	0.0002	0.69	-0.38
326638	AbD	Aibonito clay, 12 to 20 percent slopes	1	0.0001	4	0.0001	0.68	-0.38
326590	MxE	Mucara clay, 20 to 40 percent slopes	9.6	0.0011	40	0.0007	0.67	-0.39
326794	AnF2	Alonso clay, 40 to 60 percent slopes, eroded	8	0.0009	33	0.0006	0.67	-0.4
326525	ClF2	Colinas clay loam, 20 to 60 percent slopes, eroded	4	0.0005	16	0.0003	0.66	-0.42

MUKEY	MUSYM	MUNAME	Área (km ²)	Área (%)	Derrumbes (#)	Derrumbes (%)	FR	SI
1386421	MuF	Mucara loam, 40 to 60 percent slopes	14.7	0.0017	59	0.0011	0.65	-0.42
326653	CrF2	Colinas clay loam, 40 to 60 percent slopes, eroded	3.2	0.0004	13	0.0002	0.65	-0.42
326645	CaF	Caguabo clay loam, 40 to 60 percent slopes	218.5	0.0251	877	0.0164	0.65	-0.43
2706234	CzE	Cristal-Zarzal complex, 5 to 40 percent slopes	2.8	0.0003	11	0.0002	0.64	-0.45
326843	Re	Reilly gravelly loam	4.3	0.0005	17	0.0003	0.64	-0.45
326597	PIF2	Plata clay, 40 to 60 percent slopes, eroded	1	0.0001	4	0.0001	0.63	-0.47
1884632	CjD	Cerro Gordo mucky peat, 2 to 20 percent slopes	1.1	0.0001	4	0.0001	0.6	-0.51
326923	PaF2	Pandura loam, 40 to 60 percent slopes, eroded	126.5	0.0145	462	0.0086	0.59	-0.52
326589	MxD	Mucara clay, 12 to 20 percent slopes	1.1	0.0001	4	0.0001	0.59	-0.53
326659	DaD	Daguey clay, 12 to 20 percent slopes	24.2	0.0028	86	0.0016	0.58	-0.55
326646	CbF	Caguabo-Rock outcrop complex, 40 to 60 percent slopes	9.3	0.0011	33	0.0006	0.57	-0.55
326907	LsF	Los Guineos clay, 40 to 60 percent slopes	46.5	0.0053	164	0.0031	0.57	-0.56
326443	LME	Los Guineos-Maricao-Rock outcrop association, steep	19	0.0022	65	0.0012	0.56	-0.58
326700	PaE	Pandura sandy loam, 20 to 40 percent slopes	12.8	0.0015	43	0.0008	0.54	-0.61
326691	MtC	Montegrande clay, 5 to 12 percent slopes	1.6	0.0002	5	0.0001	0.52	-0.65
326569	McF2	Malaya clay, 20 to 60 percent slopes, eroded	47.1	0.0054	150	0.0028	0.52	-0.66
2553834	SoE	Sonadora-Caguabo complex, 20 to 40 percent slopes	1.3	0.0001	4	0.0001	0.51	-0.68
326669	HuF	Humatas-Rock outcrop complex, 20 to 60 percent slopes	3.9	0.0004	12	0.0002	0.51	-0.68
2706231	CaD	Caguabo gravelly clay loam, 12 to 20 percent slopes	0.3	0	1	0	0.5	-0.7
2553844	PiG	Picacho-Utuado complex, 40 to 90 percent slopes	4.7	0.0005	14	0.0003	0.49	-0.72
326635	VrC2	Voladora clay, 5 to 12 percent slopes, eroded	1	0.0001	3	0.0001	0.49	-0.72
1386415	MrF	Morado clay loam, 40 to 60 percent slopes	4	0.0005	12	0.0002	0.48	-0.73
326499	Vm	Vivi loam	11.8	0.0014	35	0.0007	0.48	-0.73
326921	NaF	Naranjito silty clay loam, 40 to 60 percent slopes	23.2	0.0027	67	0.0013	0.47	-0.76
326543	Du	Dique silt loam	2.1	0.0002	6	0.0001	0.47	-0.76
326906	LsE	Los Guineos clay, 20 to 40 percent slopes	9	0.001	25	0.0005	0.45	-0.79
1386397	McF	Malaya clay, 20 to 60 percent slopes	19.1	0.0022	53	0.001	0.45	-0.8
1386551	RoF	Rosario silty clay, 40 to 60 percent slopes	4.3	0.0005	12	0.0002	0.45	-0.8
326606	RSD2	Rosario clay, 12 to 20 percent slopes, eroded	1.1	0.0001	3	0.0001	0.44	-0.81
326836	MuE2	Mucara silty clay, 20 to 40 percent slopes, eroded	8.2	0.0009	22	0.0004	0.44	-0.82
326904	LrE2	Lirios silty clay loam, 20 to 40 percent slopes, eroded	5.2	0.0006	14	0.0003	0.44	-0.83
326633	VoD2	Voladora silty clay, 12 to 20 percent slopes, eroded	6.8	0.0008	18	0.0003	0.43	-0.84
326924	PdF	Pandura-Very stony land complex, 40 to 60 percent slopes	41	0.0047	106	0.002	0.42	-0.87
326651	CrD2	Colinas clay loam, 12 to 20 percent slopes, eroded	6.2	0.0007	16	0.0003	0.42	-0.87
326842	QeF2	Quebrada silty clay loam, 40 to 60 percent slopes, eroded	55.6	0.0064	141	0.0026	0.41	-0.89
326709	SaF	Sabana silty clay loam, 40 to 60 percent slopes	3.2	0.0004	8	0.0001	0.41	-0.89
326795	CbF2	Caguabo gravelly clay loam, 20 to 60 percent slopes, eroded	88.4	0.0101	222	0.0041	0.41	-0.9
326844	Rw	Riverwash	0.8	0.0001	2	0	0.4	-0.91
1386556	SmE	Santa Marta gravelly clay loam, 20 to 40 percent slopes	1.2	0.0001	3	0.0001	0.4	-0.92
326694	MxE	Mucara clay, 20 to 40 percent slopes	71.5	0.0082	168	0.0031	0.38	-0.96
326417	CrC	Corozal clay, 5 to 12 percent slopes	2.6	0.0003	6	0.0001	0.38	-0.96
326863	CbF	Caguabo clay loam, 20 to 60 percent slopes	128.6	0.0148	297	0.0055	0.38	-0.98
326905	LsD	Los Guineos clay, 12 to 20 percent slopes	0.9	0.0001	2	0	0.37	-1

82 Mapa de Susceptibilidad a Deslizamientos de Tierra Desencadenados por Precipitación Intensa en Puerto Rico

MUKEY	MUSYM	MUNAME	Área (km ²)	Área (%)	Derrumbes (#)	Derrumbes (%)	FR	SI
2706237	PrF	Prieto very cobbly clay loam, 20 to 60 percent slopes	0.5	0.0001	1	0	0.36	-1.03
2553846	PiE	Picacho-Utuado complex, 5 to 40 percent slopes	5.1	0.0006	11	0.0002	0.35	-1.04
326612	SdF2	San Sebastian gravelly clay, 20 to 60 percent slopes, eroded	26.7	0.0031	56	0.001	0.34	-1.08
2706240	PaG	Palm-Yunque complex, 40 to 90 percent slopes, extremely stony	0.5	0.0001	1	0	0.34	-1.08
730211	GPQ	Gravel, pits and quarries	0.5	0.0001	1	0	0.34	-1.08
326878	DcE2	Daguao clay, 20 to 40 percent slopes, eroded	3.9	0.0004	8	0.0001	0.34	-1.09
326834	MtF2	Morado clay loam, 40 to 60 percent slopes	37.9	0.0043	78	0.0015	0.33	-1.09
326713	SoF	Soller clay loam, 40 to 60 percent slopes	14.6	0.0017	30	0.0006	0.33	-1.1
326899	JgE2	Jagueyes loam, 20 to 40 percent slopes, eroded	4	0.0005	8	0.0001	0.33	-1.12
1386661	EcF	El Cacique-La Taina complex, 20 to 60 percent slopes	46.6	0.0054	93	0.0017	0.32	-1.13
326583	MuE3	Moca clay, 20 to 40 percent slopes, severely eroded	1	0.0001	2	0	0.32	-1.14
326537	DaD2	Daguey clay, 12 to 20 percent slopes, eroded	6.2	0.0007	12	0.0002	0.32	-1.15
326648	CiC	Catalina clay, 4 to 12 percent slopes	1	0.0001	2	0	0.32	-1.15
326920	NaE	Naranjito silty clay loam, 20 to 40 percent slopes	24.1	0.0028	45	0.0008	0.3	-1.19
326441	JuD2	Juncal clay, 12 to 20 percent slopes, eroded	9.1	0.001	17	0.0003	0.3	-1.19
326939	SaF2	Sabana silty clay loam, 40 to 60 percent slopes, eroded	27.6	0.0032	51	0.001	0.3	-1.2
2706235	ZaG	Zarzal very cobbly clay, 40 to 90 percent slopes	3.3	0.0004	6	0.0001	0.29	-1.22
326637	AaC	Aceitunas clay, 5 to 12 percent slopes	18.8	0.0022	32	0.0006	0.28	-1.28
326484	SpF	Soller cobbly clay, 20 to 60 percent slopes	2.4	0.0003	4	0.0001	0.28	-1.29
326607	RsE2	Rosario clay, 20 to 40 percent slopes, eroded	0.6	0.0001	1	0	0.27	-1.3
326720	Um	Urban land-Mucara complex	16.1	0.0018	27	0.0005	0.27	-1.3
326686	MiF	Malaya clay loam, 40 to 60 percent slopes	2.5	0.0003	4	0.0001	0.26	-1.33
326644	CaE	Caguabo clay loam, 20 to 40 percent slopes	11.9	0.0014	19	0.0004	0.26	-1.35
326581	MuD2	Moca clay, 12 to 20 percent slopes, eroded	4.4	0.0005	7	0.0001	0.26	-1.35
326896	InE2	Ingenio silty clay loam, 20 to 40 percent slopes, eroded	5.7	0.0007	9	0.0002	0.26	-1.36
326919	MuE2	Mucara silty clay loam, 20 to 40 percent slopes, eroded	61.9	0.0071	96	0.0018	0.25	-1.38
326593	NcD2	Nipe clay, 5 to 20 percent slopes, eroded	2.6	0.0003	4	0.0001	0.25	-1.39
2553838	HmE	Humatas-Zarzal complex, 5 to 40 percent slopes	7.8	0.0009	12	0.0002	0.25	-1.39
326647	Ce	Candelero loam	2.6	0.0003	4	0.0001	0.25	-1.4
326902	LeE2	Limonos silty clay, 20 to 40 percent slopes, eroded	7.3	0.0008	11	0.0002	0.25	-1.4
326619	SsD2	Soller cobbly clay, 5 to 20 percent slopes, eroded	2.7	0.0003	4	0.0001	0.24	-1.41
326567	MaB	Mabi clay, 2 to 5 percent slopes	0.7	0.0001	1	0	0.24	-1.41
326467	Pt	Pits, sand	2.7	0.0003	4	0.0001	0.24	-1.43
326699	PaD	Pandura sandy loam, 12 to 20 percent slopes	6.1	0.0007	9	0.0002	0.24	-1.43
326410	CiF2	Colinas clay loam, 40 to 60 percent slopes, eroded	24.8	0.0028	35	0.0007	0.23	-1.47
1386412	MrE	Morado clay loam, 20 to 40 percent slopes	3	0.0003	4	0.0001	0.22	-1.52
2553836	CzE	Cristal-Zarzal complex, 5 to 40 percent slopes	9.1	0.001	12	0.0002	0.22	-1.53
336722	GPQ	Canteras and Graveros	1.5	0.0002	2	0	0.21	-1.54
2553833	GuF	Guayabota-Yunque complex, 20 to 60 percent slopes	0.8	0.0001	1	0	0.21	-1.56
326631	ToA	Toa silty clay loam, 0 to 2 percent slopes, occasionally flooded	12.5	0.0014	16	0.0003	0.21	-1.57
326660	DeF	Descalabrado clay loam, 40 to 60 percent slopes	6.4	0.0007	8	0.0001	0.2	-1.59

MUKEY	MUSYM	MUNAME	Área (km ²)	Área (%)	Derrumbes (#)	Derrumbes (%)	FR	SI
1384368	LpG	Los Penones-Limestone outcrop complex, 60 to 90 percent slopes	0.8	0.0001	1	0	0.2	-1.6
326657	CzC	Corozal clay, 5 to 12 percent slopes	0.9	0.0001	1	0	0.19	-1.67
326849	To	Toa silty clay loam, 0 to 2 percent slopes, occasionally flooded	5.2	0.0006	6	0.0001	0.19	-1.68
1386545	QbE	Quebrada clay loam, 20 to 40 percent slopes	3.6	0.0004	4	0.0001	0.18	-1.71
1407041	MfF	Maresua gravelly clay loam, 20 to 60 percent slopes	2.7	0.0003	3	0.0001	0.18	-1.71
326714	TaF	Tanama-Rock outcrop complex, 20 to 60 percent slopes	26.3	0.003	29	0.0005	0.18	-1.72
2553843	PaG	Palm-Yunque complex, 40 to 90 percent slopes, extremely stony	8.4	0.001	9	0.0002	0.17	-1.75
326604	RpD2	Rio Piedras clay, 12 to 20 percent slopes, eroded	4.7	0.0005	5	0.0001	0.17	-1.75
326556	JuD2	Juncal clay, 12 to 20 percent slopes, eroded	3.9	0.0004	4	0.0001	0.17	-1.79
326627	TcC2	Tanama clay, 5 to 12 percent slopes, eroded	3	0.0003	3	0.0001	0.16	-1.82
326705	RoC2	Rio Arriba clay, 5 to 12 percent slopes, eroded	12.1	0.0014	12	0.0002	0.16	-1.83
326454	MoD2	Moca clay, 12 to 20 percent slopes, eroded	10.1	0.0012	10	0.0002	0.16	-1.83
1386420	MuE	Mucara loam, 20 to 40 percent slopes	33.5	0.0038	33	0.0006	0.16	-1.83
326489	TaD2	Tanama clay, 12 to 20 percent slopes, eroded	7.2	0.0008	7	0.0001	0.16	-1.84
326650	Co	Cayagua sandy loam	8.2	0.0009	8	0.0001	0.16	-1.85
326521	CfC2	Cidral clay, 2 to 12 percent slopes, eroded	6.2	0.0007	6	0.0001	0.16	-1.85
326893	HtE2	Humatas clay, 20 to 40 percent slopes	16.5	0.0019	16	0.0003	0.16	-1.85
326595	PeD2	Perchas clay, 12 to 20 percent slopes, eroded	11.5	0.0013	11	0.0002	0.16	-1.86
326665	GuF	Guayama clay loam, 20 to 60 percent slopes	1	0.0001	1	0	0.16	-1.86
326730	YeF	Yunes silty clay loam, 40 to 60 percent slopes	4.2	0.0005	4	0.0001	0.16	-1.86
326558	LaD2	Lares clay, 5 to 20 percent slopes, eroded	5.5	0.0006	5	0.0001	0.15	-1.91
326799	CoF2	Callabo silty clay loam, 40 to 60 percent slopes eroded	114.7	0.0132	103	0.0019	0.15	-1.92
326922	PaE2	Pandura loam, 12 to 40 percent slopes, eroded	61.1	0.007	53	0.001	0.14	-1.96
326835	MuD2	Mucara silty clay, 12 to 20 percent slopes, eroded	2.3	0.0003	2	0	0.14	-1.97
326790	AgD	Aguilita gravelly clay loam, 12 to 20 percent slopes	3.5	0.0004	3	0.0001	0.14	-1.98
326652	CrE2	Colinas clay loam, 20 to 40 percent slopes, eroded	14.1	0.0016	12	0.0002	0.14	-1.98
326853	AcC	Aceitunas silty clay loam, 5 to 12 percent slopes	11.9	0.0014	10	0.0002	0.14	-1.99
326477	SgF	San German gravelly clay loam, 20 to 60 percent slopes	10.9	0.0013	9	0.0002	0.13	-2.01
2553847	IcA	Icacos loam, occasionally flooded	1.2	0.0001	1	0	0.13	-2.01
326429	EcC	Espinosa clay, 5 to 12 percent slopes	6.1	0.0007	5	0.0001	0.13	-2.02
1386544	QbD	Quebrada clay loam, 12 to 20 percent slopes	1.2	0.0001	1	0	0.13	-2.03
326810	GoF	Guanabano clay, 40 to 60 percent slopes	3.8	0.0004	3	0.0001	0.13	-2.05
326460	NaE	Naranjo clay, 20 to 40 percent slopes	6.4	0.0007	5	0.0001	0.13	-2.06
326486	TP	Tropopsamments	1.3	0.0002	1	0	0.12	-2.1
326468	Re	Reilly gravelly silt loam	5.4	0.0006	4	0.0001	0.12	-2.11
326592	NaD	Naranjo clay, 12 to 20 percent slopes	5.4	0.0006	4	0.0001	0.12	-2.12
326494	VaC2	Vega Alta sandy clay loam, 5 to 12 percent slopes, eroded	2.8	0.0003	2	0	0.12	-2.14
326791	AgF	Aguilita gravelly clay loam, 20 to 60 percent slopes	57.6	0.0066	40	0.0007	0.11	-2.18
1386550	RoE	Rosario silty clay, 20 to 40 percent slopes	1.5	0.0002	1	0	0.11	-2.24
2553837	ZaG	Zarzal very cobbly clay, 40 to 90 percent slopes	10.7	0.0012	7	0.0001	0.11	-2.24
326641	AmC	Almirante clay, 5 to 12 percent slopes	4.6	0.0005	3	0.0001	0.11	-2.25

84 Mapa de Susceptibilidad a Deslizamientos de Tierra Desencadenados por Precipitación Intensa en Puerto Rico

MUKEY	MUSYM	MUNAME	Área (km ²)	Área (%)	Derrumbes (#)	Derrumbes (%)	FR	SI
679205	LeF	La Tea-Limestone outcrop complex, 20 to 60 percent slopes	4.6	0.0005	3	0.0001	0.11	-2.25
334735	SdF	San German cobbly clay loam, 20 to 60 percent slopes	3.1	0.0004	2	0	0.1	-2.26
326806	EnC	Ensenada gravelly clay, 2 to 12 percent slopes	1.6	0.0002	1	0	0.1	-2.28
2553848	ZcF	Zarzal-Cristal complex, 20 to 60 percent slopes	26.1	0.003	16	0.0003	0.1	-2.31
326696	NaD2	Naranjito silty clay loam, 12 to 20 percent slopes, eroded	4.9	0.0006	3	0.0001	0.1	-2.31
2553842	YuF	Yunque-Moteado complex, 20 to 60 percent slopes	11.5	0.0013	7	0.0001	0.1	-2.32
326951	VeC	Vega Alta silty clay loam, 5 to 12 percent slopes	3.4	0.0004	2	0	0.1	-2.34
1385059	HmD	Humatas clay, 12 to 20 percent slopes	3.4	0.0004	2	0	0.1	-2.34
326461	NaF	Naranjo clay, 40 to 60 percent slopes	1.7	0.0002	1	0	0.1	-2.34
326818	JzD	Juana Diaz clay loam, 12 to 20 percent slopes	1.7	0.0002	1	0	0.1	-2.35
326568	MaC2	Mabi clay, 5 to 12 percent slopes, eroded	3.4	0.0004	2	0	0.09	-2.35
326928	PmE2	Patillas clay loam, 20 to 40 percent slopes, eroded	10.6	0.0012	6	0.0001	0.09	-2.39
326881	DgF2	Descalabrado and Guayama soils, 20 to 60 percent slopes, eroded	36.1	0.0041	20	0.0004	0.09	-2.41
326729	YeE	Yunes silty clay loam, 20 to 40 percent slopes	1.8	0.0002	1	0	0.09	-2.41
2553841	YnG	Yunque cobbly clay, 40 to 90 percent slopes, extremely stony	7.4	0.0009	4	0.0001	0.09	-2.43
326961	YuF2	Yunes silty clay loam, 20 to 60 percent slopes, eroded	11.2	0.0013	6	0.0001	0.09	-2.44
326483	SpD	Soller cobbly clay, 12 to 20 percent slopes	5.7	0.0006	3	0.0001	0.09	-2.45
326724	VaC2	Vega Alta clay, 2 to 5 percent slopes	7.6	0.0009	4	0.0001	0.09	-2.46
1386406	MkG	Maricao clay, 60 to 90 percent slopes	1.9	0.0002	1	0	0.08	-2.47
1386422	NpD	Nipe clay, 5 to 20 percent slopes	5.8	0.0007	3	0.0001	0.08	-2.47
326471	Ro	Rock outcrop, limestone	1.9	0.0002	1	0	0.08	-2.47
326383	AgC	Algarrobo fine sand, 2 to 12 percent slopes	8	0.0009	4	0.0001	0.08	-2.51
326466	Ps	Pits, gravel	2	0.0002	1	0	0.08	-2.51
326618	SrE	Soller-Limestone rockland complex, 20 to 40 percent slopes	43.6	0.005	21	0.0004	0.08	-2.55
326427	EbC	Espinosa sandy clay loam, 5 to 12 percent slopes	2.1	0.0002	1	0	0.08	-2.55
326936	Rs	Rock land	46.6	0.0054	22	0.0004	0.08	-2.57
326509	AoD	Anones clay loam, 12 to 20 percent slopes	2.1	0.0002	1	0	0.08	-2.57
326942	TeE	Teja gravelly sandy loam, 12 to 40 percent slopes	30.4	0.0035	14	0.0003	0.07	-2.59
326632	Ts	Toa silty clay	2.2	0.0003	1	0	0.07	-2.6
326603	RpC2	Rio Piedras clay, 5 to 12 percent slopes, eroded	2.3	0.0003	1	0	0.07	-2.63
326832	MsC	Montegrande clay, 2 to 12 percent slopes	11.5	0.0013	5	0.0001	0.07	-2.65
326684	MaC	Mabi clay, 5 to 12 percent slopes	11.7	0.0013	5	0.0001	0.07	-2.67
326693	MxD	Mucara clay, 12 to 20 percent slopes	12	0.0014	5	0.0001	0.07	-2.69
326428	EcB	Espinosa clay, 2 to 5 percent slopes	14.5	0.0017	6	0.0001	0.07	-2.7
326488	TaC2	Tanama clay, 5 to 12 percent slopes, eroded	7.4	0.0008	3	0.0001	0.07	-2.72
326480	SoC	Soller clay, 5 to 12 percent slopes	2.5	0.0003	1	0	0.07	-2.72
326523	CID	Colinas clay loam, 12 to 20 percent slopes	5.1	0.0006	2	0	0.06	-2.74
326562	Lm	Leveled sandy land	2.6	0.0003	1	0	0.06	-2.76
1385084	LkB	Lares clay, 0 to 5 percent slopes	2.6	0.0003	1	0	0.06	-2.76
326399	ByB	Bayamon clay, 2 to 5 percent slopes	38.9	0.0045	15	0.0003	0.06	-2.77
326873	Cn	Cobbly alluvial land	13	0.0015	5	0.0001	0.06	-2.77

MUKEY	MUSYM	MUNAME	Área (km ²)	Área (%)	Derrumbes (#)	Derrumbes (%)	FR	SI
326411	CmF2	Colinas cobbly clay loam, 20 to 60 percent slopes, eroded	31.3	0.0036	12	0.0002	0.06	-2.78
326676	LaC2	Lares clay, 5 to 12 percent slopes, eroded	7.9	0.0009	3	0.0001	0.06	-2.78
2553840	YqE	Yunque-Los Guineos-Moteado complex, 5 to 40 percent slopes	7.9	0.0009	3	0.0001	0.06	-2.79
326491	To	Toa silty clay loam, 0 to 2 percent slopes, occasionally flooded	26.8	0.0031	10	0.0002	0.06	-2.8
326703	Re	Reilly sandy loam	2.7	0.0003	1	0	0.06	-2.81
326869	CgD2	Cayagua sandy loam, 12 to 20 percent slopes, eroded	5.4	0.0006	2	0	0.06	-2.81
326563	Lo	Limestone outcrop	115.9	0.0133	42	0.0008	0.06	-2.83
326664	Es	Estacion silty clay loam	8.4	0.001	3	0.0001	0.06	-2.84
326712	SoE	Soller clay loam, 20 to 40 percent slopes	2.8	0.0003	1	0	0.06	-2.85
326868	CgC2	Cayagua sandy loam, 5 to 12 percent slopes, eroded	14.1	0.0016	5	0.0001	0.06	-2.85
730214	W	Water > 40 acres	5.7	0.0007	2	0	0.06	-2.87
326496	VcC2	Vega Alta clay, 5 to 12 percent slopes, eroded	8.8	0.001	3	0.0001	0.06	-2.9
326405	CeC	Carrizales fine sand, 2 to 12 percent slopes	11.9	0.0014	4	0.0001	0.05	-2.9
1379827	DsF	Descalabrado clay, 20 to 60 percent slopes	47.8	0.0055	16	0.0003	0.05	-2.91
326586	MwE	Morado clay loam, 20 to 40 percent slopes	3.1	0.0004	1	0	0.05	-2.94
2553831	DwF	Dwarf-El Duque complex, 5 to 60 percent slopes, wind-swept	3.1	0.0004	1	0	0.05	-2.95
1386660	EcD	El Cacique-La Taina complex, 5 to 20 percent slopes	3.1	0.0004	1	0	0.05	-2.95
326809	FitC2	Fraternidad clay, 5 to 12 percent slopes, eroded	12.4	0.0014	4	0.0001	0.05	-2.95
326792	AhF	Aguilita stony clay loam, 20 to 60 percent slopes	44	0.005	14	0.0003	0.05	-2.96
326833	MtE	Morado clay loam, 20 to 40 percent slopes	3.2	0.0004	1	0	0.05	-2.96
326398	BsC	Bayamon sandy clay loam, 5 to 12 percent slopes	19.1	0.0022	6	0.0001	0.05	-2.97
326412	Cn	Coloso silty clay	25.8	0.003	8	0.0001	0.05	-2.99
326481	SoD	Soller clay, 12 to 20 percent slopes	9.8	0.0011	3	0.0001	0.05	-3
326387	AmC	Almirante sandy clay loam, 5 to 12 percent slopes	3.5	0.0004	1	0	0.05	-3.06
326672	JnD2	Juncal clay, 5 to 20 percent slopes, eroded	3.6	0.0004	1	0	0.04	-3.11
326408	CID2	Colinas clay loam, 12 to 20 percent slopes, eroded	3.8	0.0004	1	0	0.04	-3.14
326813	HxF	Humatas complex, 20 to 60 percent slopes	3.9	0.0004	1	0	0.04	-3.17
326485	SrF	Soller-Rock outcrop complex, 5 to 60 percent slopes	118.6	0.0136	30	0.0006	0.04	-3.19
326453	MoC2	Moca clay, 2 to 12 percent slopes, eroded	8	0.0009	2	0	0.04	-3.2
1690326	NOTCOM	No Digital Data Available	73.6	0.0084	18	0.0003	0.04	-3.22
326722	Uv	Urban land-Vega Alta complex	100.1	0.0115	24	0.0004	0.04	-3.24
730213	NOTCOM	No Digital Data Available	29.2	0.0034	7	0.0001	0.04	-3.25
326683	MaB	Mabi clay, 2 to 5 percent slopes	8.4	0.001	2	0	0.04	-3.25
326469	RIC	Rio Lajas sand, 2 to 12 percent slopes	4.2	0.0005	1	0	0.04	-3.26
326397	BsB	Bayamon sandy clay loam, 2 to 5 percent slopes	4.4	0.0005	1	0	0.04	-3.29
326394	Ba	Bajura clay	13.5	0.0016	3	0.0001	0.04	-3.32
326617	SrD	Soller-Limestone rockland complex, 5 to 20 percent slopes	14.3	0.0016	3	0.0001	0.03	-3.38
326464	PhC2	Perchas clay, 2 to 12 percent slopes, eroded	4.8	0.0005	1	0	0.03	-3.38
326728	W	Water	14.4	0.0016	3	0.0001	0.03	-3.38
326661	DgF	Descalabrado-Rock outcrop complex, 40 to 60 percent slopes	5	0.0006	1	0	0.03	-3.42

86 Mapa de Susceptibilidad a Deslizamientos de Tierra Desencadenados por Precipitación Intensa en Puerto Rico

MUKEY	MUSYM	MUNAME	Área (km ²)	Área (%)	Derrumbes (#)	Derrumbes (%)	FR	SI
326882	DrF	Descalabrado-Rock land complex, 40 to 60 percent slopes	51.5	0.0059	10	0.0002	0.03	-3.46
326474	RtF	Rock outcrop-Tanama complex, 12 to 60 percent slopes	239.4	0.0275	46	0.0009	0.03	-3.47
326473	RsF	Rock outcrop-San German complex, 20 to 60 percent slopes	10.9	0.0013	2	0	0.03	-3.52
326706	RpD2	Rio Piedras clay, 12 to 20 percent slopes, eroded	5.6	0.0006	1	0	0.03	-3.54
326935	RrC2	Rio Arriba clay, 5 to 12 percent slopes, eroded	17.3	0.002	3	0.0001	0.03	-3.57
326465	PhD2	Perchas clay, 12 to 20 percent slopes, eroded	5.9	0.0007	1	0	0.03	-3.59
326389	AnC	Almirante clay, 5 to 12 percent slopes	17.9	0.0021	3	0.0001	0.03	-3.6
326578	MsB	Matanzas clay, 2 to 5 percent slopes	6.1	0.0007	1	0	0.03	-3.62
326459	NaD	Naranjo clay, 5 to 20 percent slopes	6.2	0.0007	1	0	0.03	-3.64
326864	CdB	Candelerio loam, 2 to 5 percent slopes	6.2	0.0007	1	0	0.03	-3.65
326396	BcC	Bayamon sandy loam, 5 to 12 percent slopes	18.8	0.0022	3	0.0001	0.03	-3.65
326478	SmF	San Sebastian gravelly clay, 20 to 60 percent slopes	94.7	0.0109	15	0.0003	0.03	-3.66
2812031	NOTPUB	Not Public Information	51.1	0.0059	8	0.0001	0.03	-3.67
326953	VIC	Via silty clay loam, 3 to 10 percent slopes	6.5	0.0007	1	0	0.02	-3.69
326910	MaC2	Mabi clay, 5 to 12 percent slopes, eroded	13.6	0.0016	2	0	0.02	-3.73
615218	W	Water >40 acres	7.1	0.0008	1	0	0.02	-3.77
326388	AnB	Almirante clay, 2 to 5 percent slopes	21.2	0.0024	3	0.0001	0.02	-3.77
326715	To	Toa silty clay loam, 0 to 2 percent slopes, occasionally flooded	21.5	0.0025	3	0.0001	0.02	-3.79
326704	RoB	Rio Arriba clay, 2 to 5 percent slopes	7.2	0.0008	1	0	0.02	-3.79
326841	QeE2	Quebrada silty clay loam, 20 to 40 percent slopes, eroded	7.3	0.0008	1	0	0.02	-3.8
326804	CyB	Cuyon loam, 0 to 5 percent slopes	7.6	0.0009	1	0	0.02	-3.85
326624	StE	Soller clay, 20 to 40 percent slopes	7.7	0.0009	1	0	0.02	-3.86
1386419	MuD	Mucara loam, 12 to 20 percent slopes	7.8	0.0009	1	0	0.02	-3.87
326519	Cd	Catano sand	7.8	0.0009	1	0	0.02	-3.87
326945	Tt	Toa silty clay loam, 0 to 2 percent slopes, occasionally flooded	23.6	0.0027	3	0.0001	0.02	-3.88
326629	TcE2	Tanama clay, 20 to 40 percent slopes, eroded	16	0.0018	2	0	0.02	-3.89
326938	SaE2	Sabana silty clay loam, 20 to 40 percent slopes, eroded	24.3	0.0028	3	0.0001	0.02	-3.91
326798	CoE	Callabo silty clay loam, 20 to 40 percent slopes	34.3	0.0039	4	0.0001	0.02	-3.96
326817	JnC	Jacana clay, 5 to 12 percent slopes	8.6	0.001	1	0	0.02	-3.97
615217	NOTCOM	No Digital Data Available	53.7	0.0062	6	0.0001	0.02	-4.01
326476	SgD	San German gravelly clay loam, 5 to 20 percent slopes	9	0.001	1	0	0.02	-4.01
328580	W	Water	9.4	0.0011	1	0	0.02	-4.06
326885	Fo	Fortuna clay	10.1	0.0012	1	0	0.02	-4.13
326852	YcC	Yauco silty clay loam, 5 to 12 percent slopes	10.8	0.0012	1	0	0.02	-4.2
326533	CuB2	Coto clay, 2 to 5 percent slopes, eroded	33.5	0.0038	3	0.0001	0.01	-4.23
326934	RrB	Rio Arriba clay, 2 to 5 percent slopes	12.6	0.0014	1	0	0.01	-4.35
326823	LnC2	Llanos clay, 5 to 12 percent slopes, eroded	26.2	0.003	2	0	0.01	-4.39
326640	AmB	Almirante clay, 2 to 5 percent slopes	15.5	0.0018	1	0	0.01	-4.56
326482	SoF	Soller clay, 20 to 60 percent slopes	16.1	0.0018	1	0	0.01	-4.6
326874	Co	Coloso silty clay loam, occasionally flooded	33.4	0.0038	2	0	0.01	-4.63
326492	Ur	Urban land	16.8	0.0019	1	0	0.01	-4.64

MUKEY	MUSYM	MUNAME	Área (km ²)	Área (%)	Derrumbes (#)	Derrumbes (%)	FR	SI
1379825	DsD	Descalabrado clay, 12 to 20 percent slopes	17.7	0.002	1	0	0.01	-4.69
326909	MaB	Mabi clay, 0 to 5 percent slopes	20.9	0.0024	1	0	0.01	-4.86
326528	Cn	Coloso silty clay loam	24.3	0.0028	1	0	0.01	-5.01
326816	Jg	Jacaguas silty clay loam	24.6	0.0028	1	0	0.01	-5.02
1386571	Ua	Urban land	60.4	0.0069	1	0	0	-5.92
2706241	PiG	Picacho-Utuado complex, 40 to 90 percent slopes	0.2	0	0	0	0	-5
326819	JzE	Juana Diaz clay loam, 20 to 40 percent slopes	1	0.0001	0	0	0	-5
2553835	SoG	Sonadora-Caguabo complex, 40 to 90 percent slopes	3	0.0003	0	0	0	-5
326545	GnC	Guanajibo sandy loam, 2 to 12 percent slopes	2.1	0.0002	0	0	0	-5
326559	Lc	Leveled clayey land	2.4	0.0003	0	0	0	-5
326673	JuC	Juncos clay, 5 to 12 percent slopes	3	0.0003	0	0	0	-5
1379902	DqA	Dique loam, 0 to 2 percent slopes, frequently flooded	3.8	0.0004	0	0	0	-5
326898	JaC2	Jacana clay, 5 to 12 percent slopes, eroded	10.2	0.0012	0	0	0	-5
326932	Re	Reilly soils	13.3	0.0015	0	0	0	-5
326797	CoD	Callabo silty clay loam, 12 to 20 percent slopes	22.5	0.0026	0	0	0	-5
326850	TuF	Tuque stony clay loam, 12 to 60 percent slopes	29.4	0.0034	0	0	0	-5
326503	AaC2	Aceitunas clay, 2 to 12 percent slopes, eroded	11.8	0.0014	0	0	0	-5
326636	AaB	Aceitunas clay, 2 to 5 percent slopes	2.3	0.0003	0	0	0	-5
326381	AcC	Aceitunas clay, 5 to 12 percent slopes	0.5	0.0001	0	0	0	-5
326504	AbC2	Aceitunas sandy clay loam, 2 to 12 percent slopes, eroded	2.7	0.0003	0	0	0	-5
326380	AaC	Aceitunas sandy clay loam, 5 to 12 percent slopes	0.1	0	0	0	0	-5
326854	Ad	Aguadilla loamy sand	9.9	0.0011	0	0	0	-5
326855	Ag	Aguadilla sandy loam, moderately wet	2.8	0.0003	0	0	0	-5
334691	AgF	Aguilita silty clay loam, 20 to 60 percent slopes	0.6	0.0001	0	0	0	-5
334690	AgD	Aguilita silty clay loam, 5 to 20 percent slopes	3.1	0.0004	0	0	0	-5
334692	AkA	Aguirre clay, occasionally ponded	16.9	0.0019	0	0	0	-5
326508	An	Alluvial land	4	0.0005	0	0	0	-5
326386	AmB	Almirante sandy clay loam, 2 to 5 percent slopes	1.5	0.0002	0	0	0	-5
326384	AlB	Almirante sandy loam, 2 to 5 percent slopes	7.5	0.0009	0	0	0	-5
326385	AlC	Almirante sandy loam, 5 to 12 percent slopes	8.9	0.001	0	0	0	-5
1606301	AtD	Altamira gravelly clay, 2 to 20 percent slopes	15.9	0.0018	0	0	0	-5
1606302	AtF	Altamira gravelly clay, 20 to 60 percent slopes	1.6	0.0002	0	0	0	-5
326856	AmB	Amelia gravelly clay loam, 2 to 5 percent slopes	5.5	0.0006	0	0	0	-5
326857	AmC2	Amelia gravelly clay loam, 5 to 12 percent slopes, eroded	6.7	0.0008	0	0	0	-5
326393	ArC	Arecibo fine sand, 2 to 12 percent slopes	2.3	0.0003	0	0	0	-5
326858	An	Arenales sandy loam	1.6	0.0002	0	0	0	-5
326859	Ar	Arenales sandy loam, gravelly substratum	1.2	0.0001	0	0	0	-5
1316502	BaB	Bahia fine sand, 0 to 5 percent slopes	2.7	0.0003	0	0	0	-5
1385077	BhB	Bahia Salinas sand, 0 to 5 percent slopes, rarely flooded	2.2	0.0002	0	0	0	-5
326512	Ba	Bajura clay	9.3	0.0011	0	0	0	-5
326642	Ba	Bajura clay	15.9	0.0018	0	0	0	-5
1356074	BjA	Bajura clay, 0 to 1 percent slopes, frequently flooded	4.4	0.0005	0	0	0	-5
326861	Bc	Bajura clay, frequently flooded	21	0.0024	0	0	0	-5
326860	Ba	Bajura silty clay, saline	1	0.0001	0	0	0	-5

88 Mapa de Susceptibilidad a Deslizamientos de Tierra Desencadenados por Precipitación Intensa en Puerto Rico

MUKEY	MUSYM	MUNAME	Área (km ²)	Área (%)	Derrumbes (#)	Derrumbes (%)	FR	SI
326643	BmB	Bayamon clay, 2 to 5 percent slopes	2.8	0.0003	0	0	0	-5
326400	ByC	Bayamon clay, 5 to 12 percent slopes	7.8	0.0009	0	0	0	-5
326395	BcB	Bayamon sandy loam, 2 to 5 percent slopes	2.8	0.0003	0	0	0	-5
1379803	BkB	Beaches, sand, 0 to 5 percent slopes	0.4	0	0	0	0	-5
326513	BcB	Bejucos sandy clay loam, 2 to 5 percent slopes	1.6	0.0002	0	0	0	-5
326514	BeB	Bejucos sandy loam, 2 to 5 percent slopes	10.6	0.0012	0	0	0	-5
1716033	BmD	Bermeja-Cerro Mariquita complex, 12 to 20 percent slopes	1.1	0.0001	0	0	0	-5
1716036	BmF	Bermeja-Cerro Mariquita complex, 20 to 60 percent slopes	0.8	0.0001	0	0	0	-5
1716034	BmC	Bermeja-Cerro Mariquita complex, 5 to 12 percent slopes	0.7	0.0001	0	0	0	-5
1716038	BrF	Bermeja-Rock outcrop complex, 20 to 60 percent slopes, extremely cobbly	0.6	0.0001	0	0	0	-5
1356075	CaC	Cabo Rojo clay, 2 to 12 percent slopes	3	0.0003	0	0	0	-5
326862	CbD	Caguabo clay loam, 12 to 20 percent slopes	0.5	0.0001	0	0	0	-5
1356078	CbD	Caguabo clay loam, 12 to 20 percent slopes	0.6	0.0001	0	0	0	-5
326518	CcB	Camaguey clay, 2 to 5 percent slopes	1.6	0.0002	0	0	0	-5
326865	CdC2	Candelerlo loam, 5 to 12 percent slopes, eroded	14.6	0.0017	0	0	0	-5
326404	CcE	Caracoles loam, 20 to 40 percent slopes	2.1	0.0002	0	0	0	-5
326403	CcD	Caracoles loam, 5 to 20 percent slopes	2.5	0.0003	0	0	0	-5
326866	Ce	Cartagena clay	5.9	0.0007	0	0	0	-5
1379800	CeA	Cartagena clay, 0 to 2 percent slopes	12.8	0.0015	0	0	0	-5
2023625	CgF	Casabe clay, 20 to 60 percent slopes	0.7	0.0001	0	0	0	-5
1884546	CgD	Casabe clay, 5 to 20 percent slopes	1.7	0.0002	0	0	0	-5
326649	Cn	Catano loamy sand	0.8	0.0001	0	0	0	-5
326867	Cf	Catano loamy sand	17.3	0.002	0	0	0	-5
326406	Cf	Catano sand	2.7	0.0003	0	0	0	-5
1379802	ChA	Catano sand, 0 to 2 percent slopes	0.9	0.0001	0	0	0	-5
326520	Ce	Catano sandy clay loam	1	0.0001	0	0	0	-5
1716016	CkD	Cerro Mariquita gravelly clay loam, 12 to 20 percent slopes	1.8	0.0002	0	0	0	-5
334712	CkF	Cerro Mariquita gravelly clay loam, 20 to 60 percent slopes	10.4	0.0012	0	0	0	-5
326800	Cr	Cintrona clay	5.5	0.0006	0	0	0	-5
326870	ClB	Coamo clay loam, 2 to 5 percent slopes	3.3	0.0004	0	0	0	-5
1379810	CmB	Coamo clay loam, 2 to 5 percent slopes	0.2	0	0	0	0	-5
326522	Ch	Coastal beach	1.8	0.0002	0	0	0	-5
326407	Cg	Coastal beaches	0.9	0.0001	0	0	0	-5
326872	Cm	Coastal beaches	2.7	0.0003	0	0	0	-5
326409	CIE2	Colinas clay loam, 20 to 40 percent slopes, eroded	10.4	0.0012	0	0	0	-5
326526	CmD	Colinas cobbly clay loam, 12 to 20 percent slopes	0.5	0.0001	0	0	0	-5
1379808	CoA	Coloso clay, 0 to 2 percent slopes, occasionally flooded	15.9	0.0018	0	0	0	-5
326875	Cr	Coloso silty clay	9.5	0.0011	0	0	0	-5
326654	Cs	Coloso silty clay loam	11	0.0013	0	0	0	-5
326801	Ct	Constancia silty clay	28.1	0.0032	0	0	0	-5
326876	Cs	Corcega sandy loam	5.1	0.0006	0	0	0	-5

MUKEY	MUSYM	MUNAME	Área (km ²)	Área (%)	Derrumbes (#)	Derrumbes (%)	FR	SI
326531	Cr	Corcega silty clay loam	1.3	0.0002	0	0	0	-5
326418	CsC	Corozo fine sand, 2 to 12 percent slopes	7	0.0008	0	0	0	-5
326803	Cx	Cortada silty clay loam	14.9	0.0017	0	0	0	-5
1386555	CtA	Cortada silty clay loam, 0 to 2 percent slopes, occasionally flooded	1	0.0001	0	0	0	-5
1716031	CuF	Costa-Pitahaya complex, 20 to 60 percent slopes	17.8	0.002	0	0	0	-5
1716030	CuD	Costa-Pitahaya complex, 5 to 20 percent slopes	6.1	0.0007	0	0	0	-5
326532	CtB2	Cotito clay, 0 to 5 percent slopes, eroded	2.7	0.0003	0	0	0	-5
326419	CtB	Coto clay, 2 to 5 percent slopes	0.2	0	0	0	0	-5
326420	CtC	Coto clay, 5 to 12 percent slopes	0	0	0	0	0	-5
326534	CuC2	Coto clay, 5 to 12 percent slopes, eroded	16.3	0.0019	0	0	0	-5
326535	CvB	Coto sandy clay loam, 2 to 5 percent slopes	0.7	0.0001	0	0	0	-5
326877	DaC	Daguao silty clay loam, deep variant, 2 to 12 percent slopes	1.3	0.0001	0	0	0	-5
1379822	DeD	Delicias clay, 5 to 20 percent slopes	2	0.0002	0	0	0	-5
326880	DeE2	Descalabrado clay loam, 20 to 40 percent slopes, eroded	14.3	0.0016	0	0	0	-5
326879	43801	Descalabrado clay loam, 5 to 12 percent slopes, eroded	3.4	0.0004	0	0	0	-5
1379824	DsC	Descalabrado clay, 2 to 12 percent slopes	8	0.0009	0	0	0	-5
326662	Dm	Dique loam	1.3	0.0001	0	0	0	-5
326663	Dr	Durados sandy loam	1.3	0.0001	0	0	0	-5
1884721	EdD	El Descanso-Hoconuco complex, 5 to 20 percent slopes	0.1	0	0	0	0	-5
1690984	EpD	El Papayo gravelly clay loam, 12 to 20 percent slopes	4.6	0.0005	0	0	0	-5
1690982	EpC	El Papayo gravelly clay loam, 2 to 12 percent slopes	4.1	0.0005	0	0	0	-5
1716015	EpF	El Papayo gravelly clay loam, 20 to 60 percent slopes	4.1	0.0005	0	0	0	-5
326544	Es	Espinal sand	2.4	0.0003	0	0	0	-5
326426	EbB	Espinosa sandy clay loam, 2 to 5 percent slopes	1.8	0.0002	0	0	0	-5
326424	EaB	Espinosa sandy loam, 2 to 5 percent slopes	2.3	0.0003	0	0	0	-5
326425	EaC	Espinosa sandy loam, 5 to 12 percent slopes	4.8	0.0006	0	0	0	-5
328579	Es	Estacion silty clay loam	0	0	0	0	0	-5
326883	FaC	Fajardo clay, 2 to 10 percent slopes	1.3	0.0001	0	0	0	-5
326884	FaC2	Fajardo clay, 2 to 10 percent slopes, eroded	1.9	0.0002	0	0	0	-5
326807	Fe	Fe clay	2.6	0.0003	0	0	0	-5
334703	FeA	Fe clay, 0 to 2 percent slopes	4.3	0.0005	0	0	0	-5
326886	FrA	Fraternidad clay, 0 to 2 percent slopes	9.3	0.0011	0	0	0	-5
334704	FrA	Fraternidad clay, 0 to 2 percent slopes	20.7	0.0024	0	0	0	-5
326808	FtB	Fraternidad clay, 2 to 5 percent slopes	34.6	0.004	0	0	0	-5
326887	FrB	Fraternidad clay, 2 to 5 percent slopes	1.4	0.0002	0	0	0	-5
334705	FrB	Fraternidad clay, 2 to 5 percent slopes	9.9	0.0011	0	0	0	-5
326430	Ga	Garrochales muck	3.7	0.0004	0	0	0	-5
615215	GPQ	Gravel pits, quarry	2	0.0002	0	0	0	-5
1690325	GPQ	Gravel, Pits, Quarries	1.6	0.0002	0	0	0	-5
326888	Gm	Guamani silty clay loam	15.9	0.0018	0	0	0	-5
1379915	GbF	Guanabano clay, 20 to 60 percent slopes	1.5	0.0002	0	0	0	-5
1379916	GhC	Guanajibo gravelly sandy clay loam, 2 to 12 percent slopes	3.2	0.0004	0	0	0	-5

90 Mapa de Susceptibilidad a Deslizamientos de Tierra Desencadenados por Precipitación Intensa en Puerto Rico

MUKEY	MUSYM	MUNAME	Área (km ²)	Área (%)	Derrumbes (#)	Derrumbes (%)	FR	SI
334709	GnA	Guanica clay, 0 to 1 percent slopes	16.3	0.0019	0	0	0	-5
334710	GuB	Guayabo fine sand, 0 to 5 percent slopes	1.2	0.0001	0	0	0	-5
1716028	GyB	Guayacan clay, 0 to 5 percent slopes	5.9	0.0007	0	0	0	-5
1716026	GyD	Guayacan clay, 12 to 20 percent slopes	1.2	0.0001	0	0	0	-5
1716024	GyC	Guayacan clay, 5 to 12 percent slopes	4.4	0.0005	0	0	0	-5
326891	GyC2	Guayama clay loam, moderately deep variant, 2 to 12 percent, slopes, eroded	3.3	0.0004	0	0	0	-5
326431	GeC	Guerrero sand, 2 to 12 percent slopes	13.4	0.0015	0	0	0	-5
326547	GuB	Guerrero sand, 2 to 5 percent slopes	3.3	0.0004	0	0	0	-5
326666	Hm	Humacao loam	0.3	0	0	0	0	-5
326892	HmB	Humacao loam, 2 to 5 percent slopes	4.3	0.0005	0	0	0	-5
2706245	HtF2	Humatas clay, 40 to 60 percent slopes	0	0	0	0	0	-5
326551	HuE	Humatas gravelly clay, 12 to 40 percent slopes	0	0	0	0	0	-5
326814	Hy	Hydraquents	0.7	0.0001	0	0	0	-5
326432	HD	Hydraquents, frequently flooded	2.1	0.0002	0	0	0	-5
326433	HS	Hydraquents, saline	1.3	0.0002	0	0	0	-5
326670	Hy	Hydraquents, saline	3.5	0.0004	0	0	0	-5
326815	HZ	Hydraquents, saline	8.2	0.0009	0	0	0	-5
326552	Ig	Igualdad clay	1.5	0.0002	0	0	0	-5
326438	IsC	Islote sandy clay loam, 2 to 12 percent slopes	3.9	0.0005	0	0	0	-5
334713	JaB	Jacana clay, 0 to 5 percent slopes	5.7	0.0007	0	0	0	-5
326897	JaB	Jacana clay, 2 to 5 percent slopes	3	0.0003	0	0	0	-5
334714	JaC	Jacana clay, 5 to 12 percent slopes	6.2	0.0007	0	0	0	-5
326671	JaE2	Jagueyes loam, 20 to 40 percent slopes, eroded	0.7	0.0001	0	0	0	-5
326439	Ja	Jareales clay	7.5	0.0009	0	0	0	-5
326440	JoC	Jobos sandy loam, 2 to 12 percent slopes	11.1	0.0013	0	0	0	-5
326555	JoB	Jobos sandy loam, 2 to 5 percent slopes	9.6	0.0011	0	0	0	-5
1407076	JBA	Joyuda, Atolladero, and Bajura soils, very frequently flooded	2.5	0.0003	0	0	0	-5
326674	JuD	Juncos clay, 12 to 20 percent slopes	3.1	0.0004	0	0	0	-5
326900	JuC	Junquitos gravelly clay loam, 5 to 12 percent slopes	6.3	0.0007	0	0	0	-5
1716023	LcE	La Covana-Limestone outcrop-Seboruco complex, 12 to 40 percent slopes	8.9	0.001	0	0	0	-5
1857273	LdA	La Luna silty clay loam, 0 to 2 percent slopes, occasionally flooded	3.9	0.0004	0	0	0	-5
328581	LDF	Landfill	0.2	0	0	0	0	-5
730212	LFD	Landfill	0	0	0	0	0	-5
615216	LFD	Landfill	0.2	0	0	0	0	-5
1386581	LfC	Landfill, 0 to 8 percent slopes	0.9	0.0001	0	0	0	-5
326557	LaB2	Lares clay, 0 to 5 percent slopes, eroded	5.7	0.0006	0	0	0	-5
326675	LaB	Lares clay, 2 to 5 percent slopes	1	0.0001	0	0	0	-5
326820	LeC	Lares clay, 5 to 12 percent slopes	1.3	0.0002	0	0	0	-5
326901	Lc	Leveled clayey land	2.1	0.0002	0	0	0	-5
326560	Le	Leveled clayey land, shallow	0.3	0	0	0	0	-5
326561	Lf	Leveled land, frequently flooded	2	0.0002	0	0	0	-5

MUKEY	MUSYM	MUNAME	Área (km ²)	Área (%)	Derrumbes (#)	Derrumbes (%)	FR	SI
326564	Lr	Limestone rock land	5.2	0.0006	0	0	0	-5
326903	LoC2	Lirios clay loam, 3 to 10 percent slopes, eroded	2.4	0.0003	0	0	0	-5
326822	LnB	Llanos clay, 2 to 5 percent slopes	11.8	0.0014	0	0	0	-5
334695	LnA	Llanos Costa loam, 0 to 2 percent slopes	2.6	0.0003	0	0	0	-5
1316499	LnB	Llanos Costa loam, 2 to 5 percent slopes	3.5	0.0004	0	0	0	-5
1316500	LnC	Llanos Costa loam, 5 to 12 percent slopes	6.3	0.0007	0	0	0	-5
326908	LyF	Los Guineos-Yunque-Stony rock land association steep	1.8	0.0002	0	0	0	-5
2706230	LuB	Luquillo-El Verde complex, 0 to 5 percent slopes, occasionally flooded	0.5	0.0001	0	0	0	-5
2553830	LuB	Luquillo-El Verde complex, 0 to 5 percent slopes, occasionally flooded	0.6	0.0001	0	0	0	-5
326682	MaA	Mabi clay, 0 to 2 percent slopes	1.2	0.0001	0	0	0	-5
326911	MaD2	Mabi clay, 12 to 20 percent slopes, eroded	3.2	0.0004	0	0	0	-5
1386391	MaB	Mabi clay, 2 to 5 percent slopes, rarely flooded	1.5	0.0002	0	0	0	-5
326912	McA	Machete loam, 0 to 2 percent slopes	4	0.0005	0	0	0	-5
326913	McB	Machete loam, 2 to 5 percent slopes	4.9	0.0006	0	0	0	-5
326828	Ma	Machuelo clay	7.5	0.0009	0	0	0	-5
326685	Md	Made land	0.6	0.0001	0	0	0	-5
326914	Md	Made land	15.4	0.0018	0	0	0	-5
1386393	MbA	Maguayo very gravelly sandy clay loam, 0 to 2 percent slopes	1.3	0.0002	0	0	0	-5
1386395	MbC	Maguayo very gravelly sandy clay loam, 2 to 12 percent slopes	2.1	0.0002	0	0	0	-5
326570	MdB	Maleza fine sandy loam, 2 to 5 percent slopes	2.7	0.0003	0	0	0	-5
334743	MDA	Manglillo, Boqueron and Serrano soils, very frequently flooded	11.4	0.0013	0	0	0	-5
326572	Mn	Mani clay	2.3	0.0003	0	0	0	-5
1386398	MeA	Mani clay, 0 to 2 percent slopes, occasionally flooded	2.7	0.0003	0	0	0	-5
326571	Mh	Mani silty clay loam, overwash	0	0	0	0	0	-5
326573	MoD2	Maresua silty clay loam, 12 to 20 percent slopes, eroded	0	0	0	0	0	-5
1386561	MgF	Maresua-Serpentinite outcrop complex, 40 to 60 percent slopes	0.8	0.0001	0	0	0	-5
334720	MiD	Mariana gravelly clay loam, 12 to 20 percent slopes	2.1	0.0002	0	0	0	-5
334721	MiE	Mariana gravelly clay loam, 20 to 40 percent slopes	2.4	0.0003	0	0	0	-5
326688	Mp	Martin Pena muck	9	0.001	0	0	0	-5
326452	MnB	Matanzas clay, 2 to 5 percent slopes	2.9	0.0003	0	0	0	-5
326689	MsB	Matanzas clay, 2 to 5 percent slopes	3.5	0.0004	0	0	0	-5
326579	MtB	Matanzas-Limestone rockland complex, 0 to 5 percent slopes	3.1	0.0004	0	0	0	-5
326451	MmF	Matanzas-Rock outcrop complex, 5 to 60 percent slopes	4.1	0.0005	0	0	0	-5
326915	Me	Maunabo clay	20.2	0.0023	0	0	0	-5
326916	MIC	Mayo loam, 3 to 10 percent slopes	2.4	0.0003	0	0	0	-5
334717	MnA	Melones clay, 0 to 2 percent slopes	0.5	0.0001	0	0	0	-5
1602235	MnC	Melones clay, 2 to 12 percent slopes	4.7	0.0005	0	0	0	-5
326831	Mr	Meros sand	4.5	0.0005	0	0	0	-5
326917	MrB	Meros sand, 1 to 6 percent slopes	2.7	0.0003	0	0	0	-5

92 Mapa de Susceptibilidad a Deslizamientos de Tierra Desencadenados por Precipitación Intensa en Puerto Rico

MUKEY	MUSYM	MUNAME	Área (km ²)	Área (%)	Derrumbes (#)	Derrumbes (%)	FR	SI
326582	MuD3	Moca clay, 12 to 20 percent slopes, severely eroded	1	0.0001	0	0	0	-5
326580	MuC2	Moca clay, 5 to 12 percent slopes, eroded	3	0.0003	0	0	0	-5
1716018	MoB	Montalva clay, 0 to 5 percent slopes	4.7	0.0005	0	0	0	-5
1716017	MoC	Montalva clay, 5 to 12 percent slopes	3.4	0.0004	0	0	0	-5
326584	MvC	Montegrande clay, 2 to 12 percent slopes	3.1	0.0004	0	0	0	-5
1386408	MqC	Montegrande clay, 2 to 12 percent slopes	8.5	0.001	0	0	0	-5
326690	MtB	Montegrande clay, 2 to 5 percent slopes	0.8	0.0001	0	0	0	-5
1386411	MrD	Morado clay loam, 12 to 20 percent slopes	1	0.0001	0	0	0	-5
326457	MuE	Mucara clay, 20 to 40 percent slopes	0.5	0.0001	0	0	0	-5
326588	MxC	Mucara clay, 5 to 12 percent slopes	0	0	0	0	0	-5
1386418	MuC	Mucara loam, 5 to 12 percent slopes	3.5	0.0004	0	0	0	-5
326918	MuD2	Mucara silty clay loam, 12 to 20 percent slopes, eroded	6.5	0.0008	0	0	0	-5
336721	NOTCOM	No Digital Data Available	63.2	0.0072	0	0	0	-5
2812030	NOTPUB	Not Public Information	3.7	0.0004	0	0	0	-5
1379801	OrA	Olivares muck, ponded	1.4	0.0002	0	0	0	-5
326462	Pa	Palmar muck	2.2	0.0002	0	0	0	-5
334722	PaA	Palmarejo loam, 0 to 2 percent slopes	0.8	0.0001	0	0	0	-5
334723	PaB	Palmarejo loam, 2 to 5 percent slopes	2.4	0.0003	0	0	0	-5
334724	PaC	Palmarejo loam, 5 to 12 percent slopes	0.8	0.0001	0	0	0	-5
2706244	PdF	Pandura-Very stony land complex, 40 to 60 percent slopes	0	0	0	0	0	-5
326925	PeC2	Parcelas clay, 5 to 12 percent slopes, eroded	4.6	0.0005	0	0	0	-5
1384474	PgA	Parguera clay, 0 to 2 percent slopes	1.4	0.0002	0	0	0	-5
334708	PgB	Parguera clay, 2 to 5 percent slopes	1.2	0.0001	0	0	0	-5
326926	PIB	Paso Seco clay, 0 to 5 percent slopes	11.6	0.0013	0	0	0	-5
326838	PaB	Paso Seco clay, 2 to 5 percent slopes	11.7	0.0013	0	0	0	-5
326927	PmD2	Patillas clay loam, 12 to 20 percent slopes, eroded	2	0.0002	0	0	0	-5
2706243	PcE	Picacho-Ciales complex, 5 to 40 percent slopes	0	0	0	0	0	-5
326929	Pn	Pinones silty clay	3.6	0.0004	0	0	0	-5
1407028	PsF	Pitahaya-Limestone outcrop-Seboruco complex, 40 to 60 percent slopes	33	0.0038	0	0	0	-5
1887151	PsG	Pitahaya-Limestone outcrop-Seboruco complex, 60 to 90 percent slopes	1.7	0.0002	0	0	0	-5
1386537	Pt	Pits and Quarries	1.4	0.0002	0	0	0	-5
326930	Po	Poncena clay	9.8	0.0011	0	0	0	-5
326931	PrC2	Pozo Blanco clay loam, 5 to 12 percent slopes, eroded	1.9	0.0002	0	0	0	-5
334728	PzB	Pozo Blanco clay, 0 to 5 percent slopes	0.7	0.0001	0	0	0	-5
334730	PzD	Pozo Blanco clay, 12 to 20 percent slopes	0.2	0	0	0	0	-5
334729	PzC	Pozo Blanco clay, 5 to 12 percent slopes	1.7	0.0002	0	0	0	-5
2553839	PrF	Prieto very cobbly clay loam, 20 to 60 percent slopes	0.8	0.0001	0	0	0	-5
326840	QeD2	Quebrada silty clay loam, 12 to 20 percent slopes, eroded	5.1	0.0006	0	0	0	-5
1386547	ReA	Reilly sandy loam, 0 to 2 percent slopes, frequently flooded	5.5	0.0006	0	0	0	-5
326933	Rp	Reparada clay	0.9	0.0001	0	0	0	-5
326602	RIB	Rio Lajas sand, 2 to 5 percent slopes	4.5	0.0005	0	0	0	-5

MUKEY	MUSYM	MUNAME	Área (km ²)	Área (%)	Derrumbes (#)	Derrumbes (%)	FR	SI
326707	RpE2	Rio Piedras clay, 20 to 40 percent slopes, eroded	3.3	0.0004	0	0	0	-5
326605	Rr	Riverwash	0	0	0	0	0	-5
326472	Rr	Rock outcrop, sandstone	0.6	0.0001	0	0	0	-5
1386549	RoD	Rosario silty clay, 12 to 20 percent slopes	1.2	0.0001	0	0	0	-5
326475	SaB	Sabana Seca clay, 2 to 5 percent slopes	5.3	0.0006	0	0	0	-5
326710	ScB	Sabana Seca clay, 2 to 8 percent slopes	3	0.0003	0	0	0	-5
326711	Sm	Saladar muck	6.2	0.0007	0	0	0	-5
1386543	Sa	Salt flats, ponded	5.1	0.0006	0	0	0	-5
1386554	Sb	Salt pits	1.2	0.0001	0	0	0	-5
326940	Sm	Salt water marsh	5.1	0.0006	0	0	0	-5
326845	Sa	San Anton clay loam	24.1	0.0028	0	0	0	-5
334731	ScA	San Anton clay loam, 0 to 2 percent slopes, occasionally flooded	10.9	0.0012	0	0	0	-5
334734	SdD	San German cobbly clay loam, 5 to 20 percent slopes	0.2	0	0	0	0	-5
326611	ScB	San German cobbly sandy loam, 0 to 5 percent slopes	0.1	0	0	0	0	-5
326609	SaD	San German gravelly clay loam, 12 to 20 percent slopes	14.2	0.0016	0	0	0	-5
326610	SaE	San German gravelly clay loam, 20 to 40 percent slopes	8.3	0.001	0	0	0	-5
1407068	SgF	San German-Duey complex, 20 to 60 percent slopes	18.7	0.0021	0	0	0	-5
1407070	SgD	San German-Duey complex, 5 to 20 percent slopes	1	0.0001	0	0	0	-5
326479	SnC	Santa Clara clay, 2 to 12 percent slopes	5	0.0006	0	0	0	-5
326613	SeB	Santa Clara silty clay loam, 2 to 5 percent slopes	2.1	0.0002	0	0	0	-5
334737	SiA	Santa Isabel clay, 0 to 2 percent slopes	2	0.0002	0	0	0	-5
326615	Sn	Santoni clay	3.5	0.0004	0	0	0	-5
1379905	SoC	Seboruco silty clay loam, 2 to 12 percent slopes	2	0.0002	0	0	0	-5
326846	Se	Serrano sand	3.4	0.0004	0	0	0	-5
326623	StD	Soller clay, 12 to 20 percent slopes	4	0.0005	0	0	0	-5
326621	StB	Soller clay, 2 to 5 percent slopes	0	0	0	0	0	-5
326622	StC	Soller clay, 5 to 12 percent slopes	1.3	0.0002	0	0	0	-5
326620	SsE2	Soller cobbly clay, 20 to 40 percent slopes, eroded	1.6	0.0002	0	0	0	-5
334739	SsB	Sosa sandy loam, 2 to 5 percent slopes	6.5	0.0007	0	0	0	-5
334740	SsC	Sosa sandy loam, 5 to 12 percent slopes	0.5	0.0001	0	0	0	-5
326625	Ta	Talante loam	3.6	0.0004	0	0	0	-5
326941	Ta	Talante soils	20.1	0.0023	0	0	0	-5
326628	TcD2	Tanama clay, 12 to 20 percent slopes, eroded	3.8	0.0004	0	0	0	-5
326487	TaB	Tanama clay, 2 to 5 percent slopes	1.3	0.0001	0	0	0	-5
326626	TcB2	Tanama clay, 2 to 5 percent slopes, eroded	2	0.0002	0	0	0	-5
326847	Te	Teresa clay	14.4	0.0017	0	0	0	-5
334741	TeA	Teresa clay, 0 to 1 percent slopes	3.7	0.0004	0	0	0	-5
334742	TfA	Teresa clay, ponded	0.7	0.0001	0	0	0	-5
326490	Tb	Tiburones muck	14.1	0.0016	0	0	0	-5
326848	Tf	Tidal flats	1.8	0.0002	0	0	0	-5
326943	Tf	Tidal flats	4.7	0.0005	0	0	0	-5
326630	Td	Tidal swamp	2.4	0.0003	0	0	0	-5
326944	Ts	Tidal swamp	49.5	0.0057	0	0	0	-5
1386570	ToA	Toa clay loam, 0 to 2 percent slopes, occasionally flooded	17.1	0.002	0	0	0	-5

94 **Mapa de Susceptibilidad a Deslizamientos de Tierra Desencadenados por Precipitación Intensa en Puerto Rico**

MUKEY	MUSYM	MUNAME	Área (km ²)	Área (%)	Derrumbes (#)	Derrumbes (%)	FR	SI
326716	TrB	Torres loamy sand, 2 to 5 percent slopes	3.6	0.0004	0	0	0	-5
326717	Ts	Tropopsamments	0.5	0.0001	0	0	0	-5
1386574	UbB	Urban land-Bahia complex, 0 to 5 percent slopes	0.4	0.0001	0	0	0	-5
326719	Ud	Urban land-Durados complex	14	0.0016	0	0	0	-5
1386576	UgB	Urban land-Guayabo complex, 0 to 5 percent slopes	0.1	0	0	0	0	-5
326721	Us	Urban land-Sabana Seca complex	8.6	0.001	0	0	0	-5
1386577	UsC	Urban land-Sosa complex, 5 to 12 percent slopes	0.2	0	0	0	0	-5
326946	UpF	Utuaado-Picacho-Stony rockland association, very steep	0.3	0	0	0	0	-5
326948	Va	Vayas silty clay loam, occasionally flooded	1.7	0.0002	0	0	0	-5
1407077	VaA	Vayas silty clay, 0 to 2 percent slopes, occasionally flooded	2.7	0.0003	0	0	0	-5
326949	Vc	Vayas silty clay, frequently flooded	5.4	0.0006	0	0	0	-5
326495	VcB	Vega Alta clay, 2 to 5 percent slopes	5.4	0.0006	0	0	0	-5
326723	VaB	Vega Alta clay, 2 to 5 percent slopes	1.6	0.0002	0	0	0	-5
326493	VaB	Vega Alta sandy clay loam, 2 to 5 percent slopes	0.7	0.0001	0	0	0	-5
326950	VeB	Vega Alta silty clay loam, 2 to 5 percent slopes	3.3	0.0004	0	0	0	-5
326497	VeB	Vega Baja clay, 2 to 5 percent slopes	6.4	0.0007	0	0	0	-5
326725	Vg	Vega Baja silty clay	0.2	0	0	0	0	-5
326952	VgA	Vega Baja silty clay loam, 0 to 3 percent slopes	2	0.0002	0	0	0	-5
326498	Vg	Vigia muck	6.4	0.0007	0	0	0	-5
326957	VvA	Vives clay, 0 to 2 percent slopes	6.2	0.0007	0	0	0	-5
326958	VvB	Vives clay, 2 to 7 percent slopes	9.6	0.0011	0	0	0	-5
326956	Vs	Vives silty clay loam, high bottom	12	0.0014	0	0	0	-5
326727	Vv	Vivi loam	0.9	0.0001	0	0	0	-5
326959	Vw	Vivi loam	7	0.0008	0	0	0	-5
1386780	VoD	Voladora clay, 12 to 20 percent slopes	0.9	0.0001	0	0	0	-5
1386764	VoC	Voladora clay, 5 to 12 percent slopes	2.6	0.0003	0	0	0	-5
1690327	W	Water	18	0.0021	0	0	0	-5
334747	W	Water	5.3	0.0006	0	0	0	-5
326960	Wa	Wet alluvial land	14.2	0.0016	0	0	0	-5
326851	YcB	Yauco silty clay loam, 2 to 5 percent slopes	3.1	0.0004	0	0	0	-5

