

DESLIZAMIENTOS EN PUERTO RICO PRODUCIDOS POR LLUVIAS: DESCRIPCIÓN GENERAL

M. A. Pando¹, M. E. Ruiz² y M. C. Larsen³

Palabras clave: deslizamientos inducidos por lluvias, umbral de lluvias, deslizamientos en Puerto Rico.

Resumen: Los deslizamientos originados por fuertes lluvias son comunes en Puerto Rico (PR). La presencia de pendientes empinadas en un terreno predominantemente montañoso, junto con suelos residuales e intensas lluvias conducen a graves problemas de estabilidad de taludes en la isla. El problema es agravado por eventos climáticos extremos como huracanes y terremotos. En la actualidad, todos los pueblos de la isla han sufrido algún tipo de deslizamiento. La estabilidad de taludes, naturales o artificiales, se ha vuelto una gran preocupación para las autoridades y la comunidad de ingenieros civiles en Puerto Rico. Este artículo presenta una revisión del problema de deslizamientos provocados por lluvias intensas en PR, una revisión de la literatura existente publicada acerca del tema y propone un umbral de intensidad-duración de lluvia a partir del cual pueden ocurrir deslizamientos basado en eventos registrados desde 1959 a 2003. Este umbral puede ser potencialmente usado como criterio de alerta a la población.

RAINFALL INDUCED LANDSLIDES IN PUERTO RICO: AN OVERVIEW

Keywords: rainfall induced landslides, rainfall threshold, landslides in Puerto Rico.

Abstract: Rainfall-induced landslides are common in Puerto Rico (PR). The presence of steep slopes in mountainous terrain, coupled with weathered soils and intense rainfall, leads to severe slope-stability problems throughout the island. Episodic triggering events such as hurricanes and earthquakes further exacerbate these problems. All physiographic provinces of the island have experienced landslides. The stability of natural and man-made slopes is a serious concern for government authorities and the civil engineering community in Puerto Rico. This paper presents an overview of the rainfall induced landslide problem in PR, a summary of existing literature published on this subject, and proposes a rainfall intensity landslide threshold based on landslide events data from 1959 to 2003. This threshold can be used as a potential landslide warning criterion.

INTRODUCCIÓN

Los deslizamientos son comunes en la zona montañosa de Puerto Rico (PR), principalmente debido a la alta frecuencia de intensas lluvias y la elevada lluvia media anual (Larsen y Simon 1993). El problema se vuelve más crítico teniendo en cuenta la presencia de suelos residuales y erosionados, comunes en PR (Deere y Patton 1971; Sowers 1971) y eventos naturales extremos como huracanes y terremotos (Scatena y Larsen 1991). Uno de los deslizamientos más recientes fue el ocurrido en noviembre de 2003 donde fuertes lluvias provocaron inundaciones severas que resultaron en deslizamientos y derrumbes en el este, sur-este y sur-oeste de la isla. El evento fue declarado desastre natural por el Presidente Bush y se creó un equipo de mitigación de desastres (*Interagency Hazard Mitigation Team*). Los huracanes Hortense (1996) y Georges (1998) también ocasionaron numerosos deslizamientos e inundaciones en las montañas centrales (Larsen y Santiago-Román 2001). Es por ello, que los peligros asociados a deslizamientos representan un problema de gran preocupación para el estado, las agencias gubernamentales locales, universidades y la comunidad ingenieril en PR. En la Figura 1 pueden observarse, a modo de ejemplo, los rastros de deslizamientos ocurridos en el valle de la cuenca del Río Grande, Arecibo, luego del huracán Georges (1998).

¹ Profesor Asistente, University of Puerto Rico, Mayaguez, PR 00681; Tel.: 787-265-3815; fax: 787-833-8260; email: mpando@uprm.edu

² Asistente de Investigación, University of Puerto Rico, Mayaguez, PR 00681; Tel.: 787-265-3815; email: mruiz@gmx.net

³ Director Científico Interino del Área de Hidrología, U.S. Geological Survey, Reston, Virginia 20190; Tel.: 703-648-5044; fax: 703-648-5002; email: mclarsen@usgs.gov



Figura 1. Rastros de deslizamientos en Río Grande, Arcibo, luego del paso del huracán Georges (1998), adaptado de Larsen y Wieczorek (2004)

A pesar de la importancia de los problemas de estabilidad de taludes en PR, se observa una falta de investigación sistemática y análisis de las causas y consecuencias del problema. Aunque se cuenta con información pertinente recopilada por diversas agencias (e.g. U. S. Geological Survey (USGS), Departamento de Recursos Naturales y Ambientales de Puerto Rico) es necesario un análisis más exhaustivo de los datos disponibles para ayudar a las entidades gubernamentales a implementar una estrategia de mitigación de deslizamientos en Puerto Rico siguiendo lineamientos similares a los recientemente propuestos en el Programa Nacional de Mitigación de Deslizamientos del USGS (NRC 2004).

Los objetivos de este artículo son (1) presentar una revisión del problema de deslizamientos producidos por lluvias en Puerto Rico, (2) presentar una síntesis de trabajos previos realizados sobre el tema y (3) presentar un umbral de deslizamiento actualizado, basado en las características de intensidad y duración de las lluvias, que provea parámetros de precipitación por encima de los cuales pueda esperarse la ocurrencia de deslizamientos en la isla y que por tanto, pueda ser usado en un sistema preliminar de alerta sobre deslizamientos.

Antes de abordar el problema de los deslizamientos en PR se presenta un resumen de la información pertinente relacionada con este problema (topografía y geología, y clima).

TOPOGRAFÍA Y GEOLOGÍA DE PUERTO RICO

La isla de Puerto Rico es la más pequeña y la más oriental de las islas que componen las Antillas Mayores. La isla mide aproximadamente 160 km en dirección este-oeste y 55 km de norte a sur y limita al norte con el Océano Atlántico y al sur con el Mar Caribe (Figura 2). La mayor parte de la isla es montañosa e incluye una Cordillera Central, y la Sierra de Luquillo al noreste de la isla, la cual posee una altura máxima de 1074 m. La Cordillera Central corre de este a oeste en el centro de la isla presentando elevaciones promedio entre 330 m y 600 m por encima del nivel del mar. El pico más elevado de este macizo posee una altura de 1338 m por encima del nivel del mar. La zona costera alrededor de la isla presenta planicies de 8 a 16 km de ancho formadas por sedimentos aluviales y depósitos costeros.

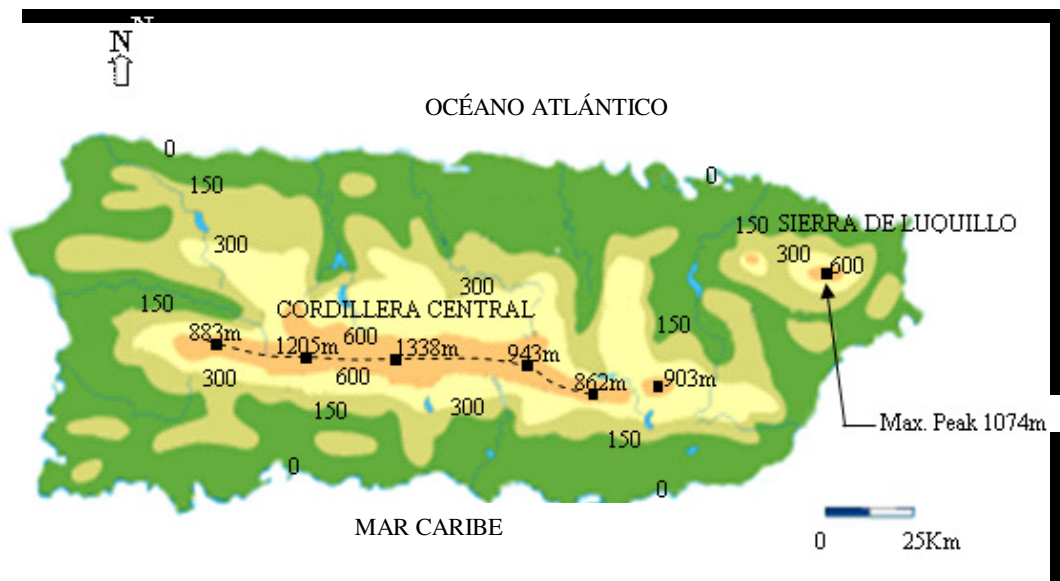


Figura 2. Topografía de Puerto Rico

El cordón montañoso central está compuesto en su mayor parte por rocas volcánicas y sedimentarias provenientes de comienzos de la era Cretácea y Eógena (Briggs y Akers 1965). Entre las rocas de fines de la era Cretácea se encuentra gran variedad de rocas piroclásticas, sedimentarias e ígneas, extrusivas e intrusivas (Deere 1955). La roca madre en la Cordillera Central se encuentra altamente meteorizada debido al alto porcentaje de humedad y temperaturas elevadas; además está cubierta por una capa de saprolita de 5 a 10 metros de espesor (St. John et al. 1969; Deere y Patton 1971; Sowers 1971). La Cordillera Central está rodeada por un cinturón de piedras calizas, lutitas y areniscas (Briggs y Akers 1965; Jibson 1987). Estas rocas sedimentarias se presentan en acantilados y cortes empinados en las laderas originando ocasionalmente coluviones en los faldones de las montañas. (Monroe, 1979; Jibson 1987). Las planicies costeras son, en su mayoría, ambientes deposicionales compuestos por arena, grava y arcilla que forman depósitos costeros cuaternarios, pantanos, dunas, planicies aluviales y sedimentos loésicos (Briggs and Akers 1965). En la Figura 3 se muestra un mapa simplificado con la geología de Puerto Rico.

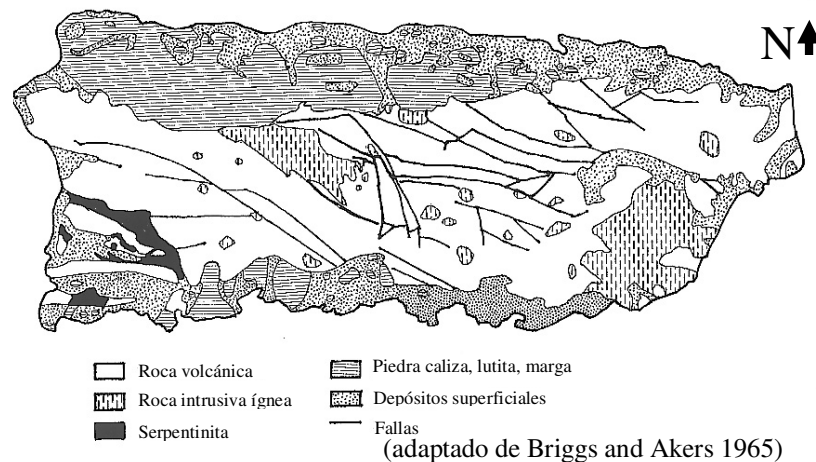


Figura 3. Geología de Puerto Rico

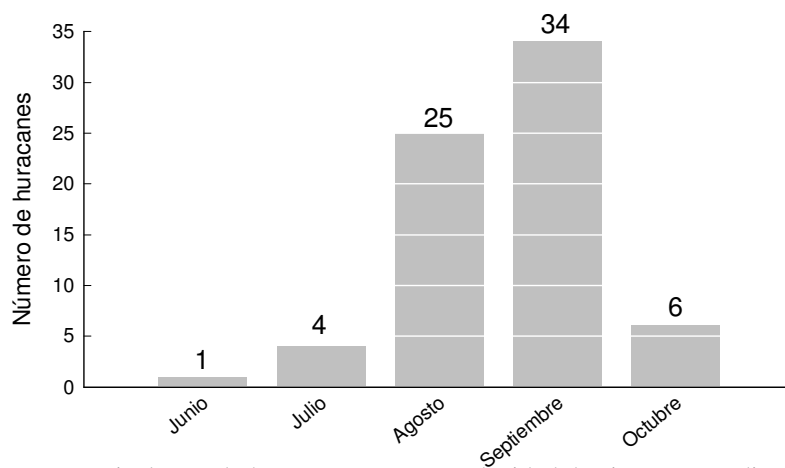
EL CLIMA DE PUERTO RICO

El clima de Puerto Rico es variable, debido a su topografía y a la acción de vientos predominantemente del noreste (Boose et al. 2004). El clima es tropical-húmedo en la zona del cordón montañoso central y en la zona costera norte. En la zona costera sur el clima varía según la estación, presentando clima tropical-húmedo en meses de verano y tropical-seco en meses de invierno (Larsen y Simon 1993). La precipitación media anual se encuentra entre los 1500 y 2000 mm en la parte noreste de la isla, alrededor de 750 mm en el suroeste y es mayor a 4000 mm en la Sierra de Luquillo (Boose et al. 2004). La mayor parte de la lluvia anual se debe a ondas tropicales, depresiones, tormentas y huracanes, que se

aproximan desde el este y sureste de la isla (Calvesbert 1970). La época lluviosa se desarrolla típicamente entre los meses de mayo y diciembre.

La frecuencia de ocurrencia de huracanes en PR se ubica entre las más altas en América del Norte (Neuman et al. 1987). Revisando registros históricos desde la época de la conquista, Boose et al. (2004) encontraron 85 huracanes que afectaron a Puerto Rico durante el período 1508 a 1997. La distribución estacional de estos huracanes (considerando sólo aquellos con velocidades de viento mayores a 94 km/h) se muestra en la Figura 4. La época de huracanes se extiende desde junio hasta octubre. Un 84% de los huracanes tiene lugar en los meses de agosto y setiembre.

La temperatura media anual varía con la elevación, desde 23° a 27° C (74° a 81° F) en la base de las montañas y sobre las planicies costeras y 19° a 23° C (66° a 74° F) en las montañas y en los picos más elevados (Deere 1955; Calvesbert 1970).



Nota: incluye solo huracanes con una velocidad de viento promedio mayor a 94 km/h (Basado en datos de Boose et al. 2004)

Figura 4. Distribución estacional de los huracanes en Puerto Rico (Desde 1508 a 1997)

DESLIZAMIENTOS INDUCIDOS POR LLUVIAS EN PUERTO RICO

Puerto Rico se ve afectado por muchos tipos de deslizamientos, sin embargo, el más frecuentemente observado es el flujo de derrubios originado por fuertes lluvias (Jibson 1987; Larsen y Simon 1993; Larsen y Torres-Sánchez 1995). Estos deslizamientos han causado daños sustanciales a propiedades y han ocasionado víctimas humanas. Se han reportado al menos 147 muertes en PR causadas por deslizamientos entre 1960 y 1985 (Jibson 1986, 1989; Larsen y Simon 1993). El deslizamiento de Mameyes, desencadenado durante una tormenta tropical en octubre de 1985, se considera como uno de los peores desastres en la historia de Estados Unidos (Jibson 1986). En esa ocasión se registraron 129 víctimas humanas (Jibson 1989). Las pérdidas económicas debidas a los deslizamientos en PR es difícil de estimar pero se basado en reportes de NOAA se estima en el orden de centenas de millones de dólares en la últimos 25 años.

Uno de los trabajos más importantes sobre deslizamientos inducidos por lluvias en Puerto Rico es el de Larsen y Simon (1993). En este trabajo los autores propusieron una relación entre la intensidad y la duración de precipitaciones en eventos que resultaron en deslizamientos. Esta relación, obtenida usando la metodología propuesta por Caine (1980), permite establecer un umbral al deslizamiento por encima del cual puede esperarse la ocurrencia de deslizamientos en la isla. Larsen y Simon (1993) realizaron una extensa recopilación de lluvias ocurridas entre los años 1959 y 1991 que provocaron deslizamientos en PR. Los autores sólo incluyeron eventos que produjeron abundantes deslizamientos (decenas a centenas). El término deslizamiento hace referencia a fallas de varios tipos desde flujos superficiales de derrubios y suelos a avalanchas o fallas circulares profundas. No se incluyeron como deslizamientos fallas locales. Las principales fuentes de información a cerca de la lámina de lluvia caída y ocurrencia de deslizamientos en ese estudio fueron: (1) Datos de lluvias del Servicio de Meteorología de Estados Unidos y (2) los archivos del periódico San Juan Star. Los registros de lluvias del Servicio de Meteorología cuentan con comentarios sobre la ocurrencia de deslizamientos. Esta información fue verificada con los archivos del periódico. Se encontraron así un total de 41 tormentas que originaron deslizamientos en Puerto Rico (Tabla 1). Estos 41 eventos representan en promedio 1.2 deslizamientos por año. Las 41 tormentas y el umbral intensidad-duración de lluvias propuesta por estos autores se presenta en la Figura 5. Más adelante este límite se comparará con los datos de tormentas adicionales que son recopilados para este artículo (período 1993-2003). Información detallada de la metodología utilizada se encuentra en Larsen y Simon (1993) y Caine (1980).

Tabla 1. Fecha de ocurrencia y características de las 41 lluvias que provocaron deslizamientos en PR entre 1959 y 1991 (Larsen y Simon 1993).

Número	Fecha	Año	Duración [h]	Precipitación acumulada [mm]	Intensidad [mm/h]
1	14-Oct	1976	2	142	71.12
2	27-Sep	1980	2	221	110.5
3	10-Dec	1975	3	203	67.73
4	15-Nov	1977	3	127	42.33
5	30-Oct	1976	4	102	25.48
6	18-Sep	1989	6	225	37.5
7	9-May	1982	6	203	33.87
8	9-Nov	1969	6	178	29.66
9	26-Jan	1969	6	127	21.16
10	27-Aug	1970	9	225	25
11	13-Jan	1965	9	544	60.44
12	3-Nov	1984	24	192	8
13	6-Dec	1987	24	493	20.54
14	6-Oct	1985	24	625	26.04
15	12-Sep	1982	48	330	6.88
16	6-Sep	1960	48	477	9.94
17	27-May	1980	48	288	6
18	23-Aug	1971	48	232	4.83
19	12-May	1986	48	279	5.81
20	9-Nov	1970	48	254	5.29
21	29-Aug	1979	72	502	6.97
22	9-Dec	1965	72	474	6.58
23	8-May	1970	72	254	3.53
24	4-Sep	1979	72	459	6.38
25	8-Dec	1970	96	419	4.36
26	26-Nov	1968	96	329	3.43
27	22-Apr	1969	96	268	2.79
28	15-May	1985	96	635	6.62
29	11-Dec	1981	96	740	7.71
30	18-May	1987	120	453	3.78
31	22-Oct	1978	120	459	3.83
32	24-Nov	1987	120	583	4.86
33	29-Nov	1960	144	438	3.04
34	4-Oct	1970	144	976	6.78
35	20-May	1981	144	254	1.76
36	5-Oct	1990	312	303	0.97
37	27-Aug	1961	24	456	19
38	4-May	1965	24	144	6
39	14-Oct	1962	24	216	9
40	23-Aug	1988	24	312	13
41	16-Apr	1988	12	168	14

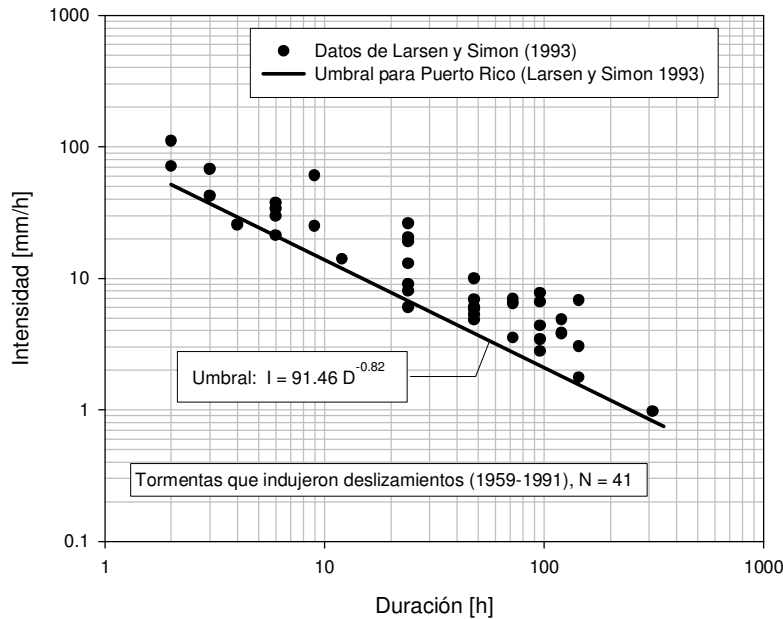


Figura 5. Umbral intensidad-duración propuesto por Larsen y Simon (1993)

Este artículo presenta un umbral actualizado donde se incluyen eventos reportados después del trabajo de Larsen y Simon (1993). El nuevo umbral se obtuvo siguiendo la misma metodología utilizada por Larsen y Simon (1993). Los datos de deslizamientos causados por lluvias para el período 1993 a 2003 en PR se obtuvieron de la Administración Oceánica y Atmosférica Nacional (NOAA, <http://www7.ncdc.noaa.gov>) la cual fue complementada con información del periódico “El Nuevo Día” (<http://www.adendi.com>). Se encontraron un total de 34 eventos de precipitación que causaron deslizamientos entre 1993 y 2003. Estas tormentas se encuentran listadas en la Tabla 2. La ubicación aproximada de los deslizamientos provocados por las tormentas de las Tablas 1 y 2 se muestra en la Figura 6. La Figura 6 muestra cómo la mayoría de los deslizamientos se distribuyen a lo largo de la zona montañosa central de PR (Cordillera Central y Sierra de Luquillo).

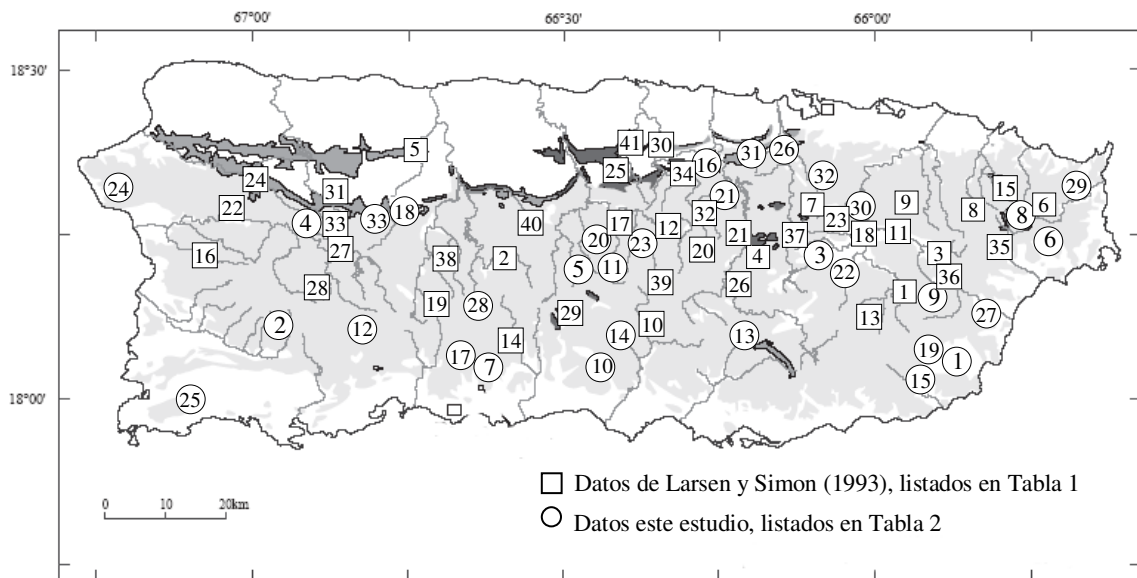


Figura 6. Localización de deslizamientos inducidos por lluvias entre 1959 y 2003

Tabla 2. Fecha de ocurrencia y características de las 34 lluvias que provocaron deslizamientos en PR entre 1993 y 2003 (este estudio).

Número	Fecha	Año	Duración [h]	Precipitación acumulada [mm]	Intensidad [mm/h]
1	Sep-20	1994	13	79	6.1
2	Aug-21	1995	4	89	22.2
3	Aug-15	1996	10	69	6.9
4	Sep-5	1996	3	300	100
5	Sep-10 ¹	1996	16	400	25
6	Jul-21	1997	4	81	20.3
7	Oct-13	1997	14	119	8.5
8	Feb-04	1998	9	145	16.1
9	Mar-07	1998	6	115	19.1
10	Apr-07	1998	6	175	29.2
11	May-15	1998	8	142	17.8
12	May-21	1998	4	117	29.2
13	Aug-24	1998	24	190	7.9
14	Sep-21/22 ²	1998	48	610	12.7
15	Oct-22	1998	11	274	24.9
16	Dec-03	1998	72	187	2.6
17	Sep-28	1999	6	101	16.9
18	Oct-16	1999	3	86	28.8
19	Nov-11	1999	7	114	16.3
20	Dec-02	1999	11	127	11.5
21	Dec-05	1999	22	103	4.7
22	Ago-22 ³	2000	48	305	6.35
23	Nov-02	2000	4	97	24.13
24	May-10	2001	2	76	38.1
25	May-06	2001	24	361	15.04
26	Nov-07	2001	48	422	8.8
27	May-30	2002	9	155	17.2
28	Jun-05	2002	12	116	9.7
29	Apr-17	2003	17	282	16.6
30	May-17	2003	4	127	31.8
31	May-21	2003	5	127	25.4
32	Sep-21	2003	5	79	15.7
33	Nov-13	2003	21	174	8.3
34	Dec-05	2003	14	91	6.5

NOTAS: ¹Huracán Hortense

²Huracán Georges

³Huracán Debby

La mayor parte de los deslizamientos tienden a ocurrir entre los meses de mayo y diciembre, como se observa en la Figura 7. Este período coincide aproximadamente con la época de huracanes, que se extiende desde junio hasta octubre. En la Figura 8 se ha representado la variación del número de lluvias que originaron deslizamientos desde 1959 a 2003. Puede observarse que en la última década se ha incrementado el número de tormentas que produjeron deslizamientos. Como se mencionó antes, Larsen y Simon (1993) encontraron un promedio de 1.2 eventos por año. El promedio actualizado, para los 75 eventos de deslizamientos registrados entre 1959 y 2003, es 1.7 eventos por año. Una de las razones que pueden explicar este aumento en el promedio del número de eventos de deslizamiento es el mayor número de huracanes ocurridos en los últimos años. Los archivos de NOAA indican que han pasado 12 huracanes a ± 2 grados de latitud de Puerto Rico entre los años 1993 y 2003 (1.2 huracanes por año), mientras que entre 1959 y 1991 se registraron 23 huracanes que produjeron serios daños en PR (0.7 huracanes por año).

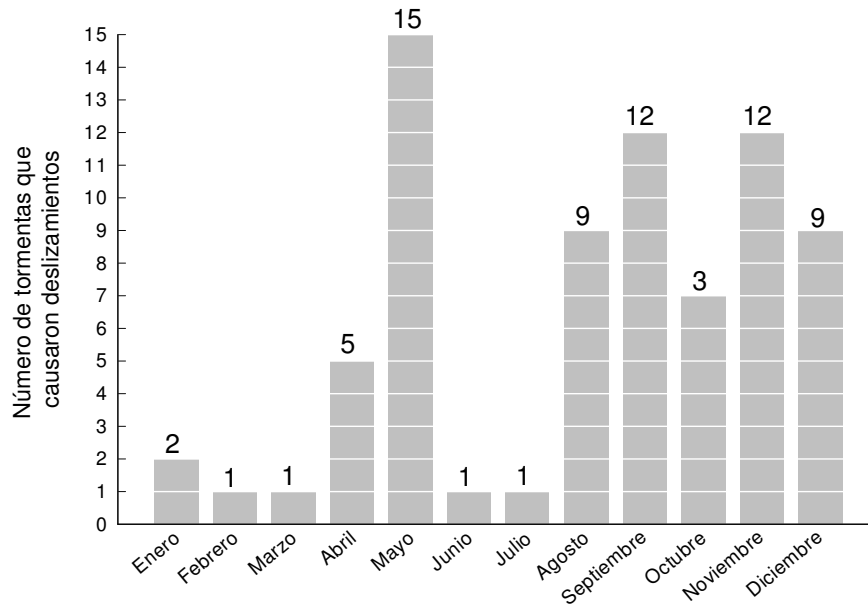


Figura 7. Distribución anual de tormentas que causaron deslizamientos

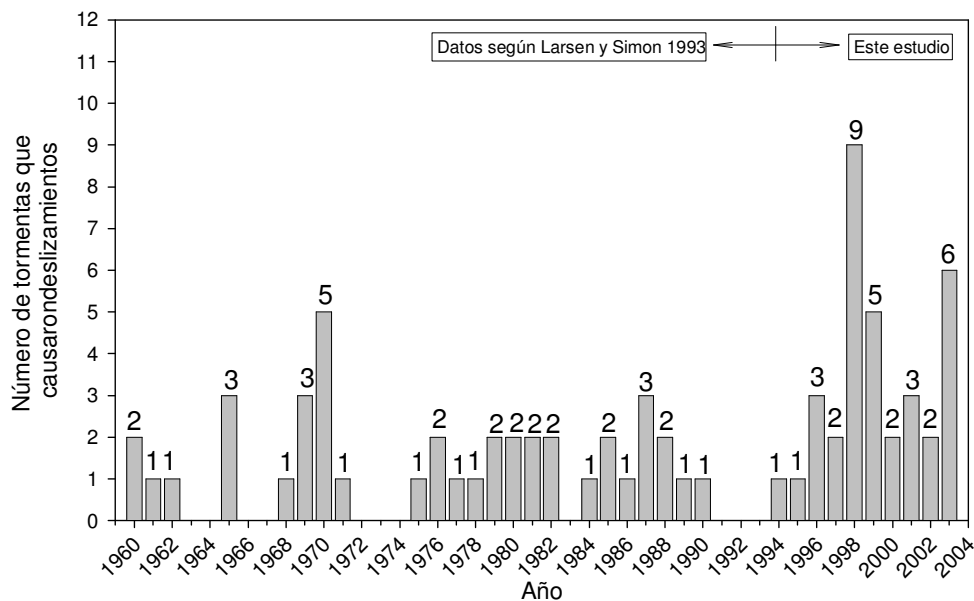


Figura 8. Tormentas que indujeron deslizamientos en Puerto Rico durante el período 1959-2003.

TRABAJOS PREVIOS SOBRE DESLIZAMIENTOS EN PUERTO RICO

Monroe (1979) elaboró un mapa de susceptibilidad a deslizamientos para Puerto Rico. El mapa propuesto por Monroe se muestra en la Figura 9. Monroe dividió la susceptibilidad al deslizamiento en cuatro categorías: (1) Zonas de gran susceptibilidad a deslizamientos, categoría asociada con áreas en donde se registraron deslizamientos en el pasado y donde se observaron deslizamientos recientes, (2) Zonas de alta susceptibilidad, áreas con pendientes mayor a 27 grados y áreas que presentan rocas y suelos propicios a los deslizamientos, (3) Zonas de susceptibilidad moderada, en donde incluyó zonas con pendientes menores a 27 grados, y (4) Zonas de baja susceptibilidad en coincidencia con zonas llanas. El mapa es generalizado y muestra grandes áreas de similar susceptibilidad al deslizamiento, sin embargo no es de aplicación para una cuantificación detallada de la susceptibilidad al deslizamiento, requerida para la planificación social y por la comunidad ingenieril. En trabajos más recientes, se han publicado mapas para zonas específicas de la isla, e.g., Larsen y Parks (1998) elaboraron un mapa de susceptibilidad al deslizamiento para la municipalidad de Comerío, ubica-

do en el centro de la isla y Larsen et al. (2004) publicaron un mapa de susceptibilidad al deslizamiento para la ciudad de Ponce, situado al sur de Puerto Rico.

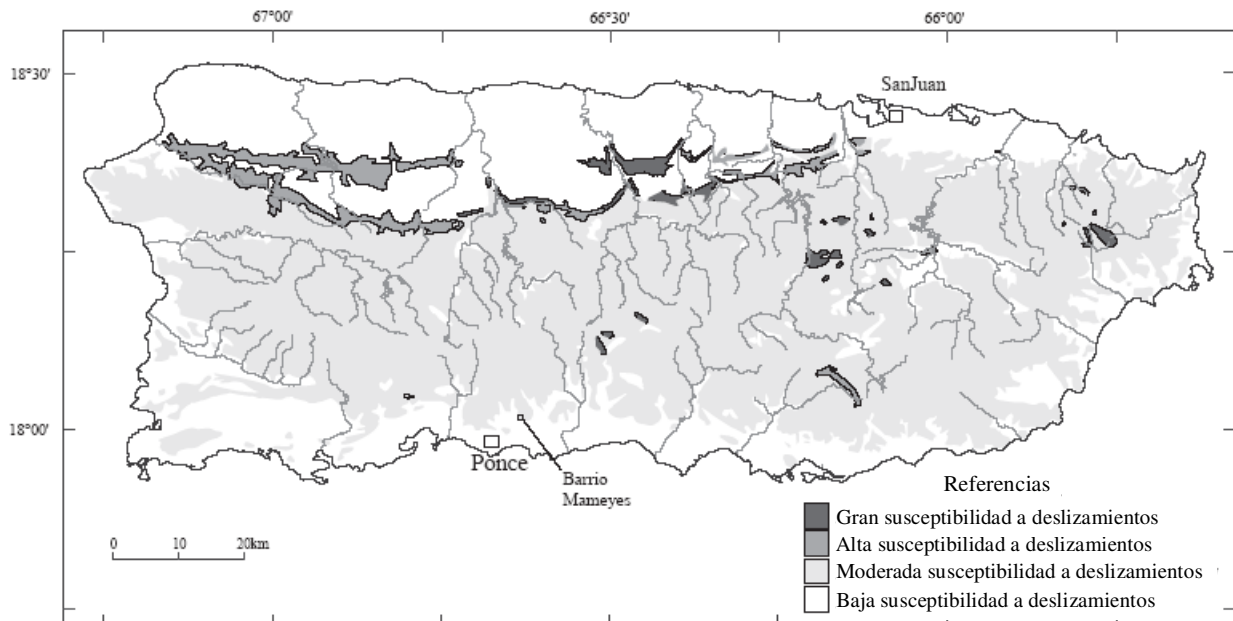


Figura 9. Mapa de susceptibilidad al deslizamiento para Puerto Rico, según Monroe (1979)

Los estudios más relevantes sobre deslizamientos inducidos por lluvias en PR se sintetizan en la Tabla 3.

Tabla 3. Síntesis de los trabajos previos sobre deslizamientos inducidos por lluvias en Puerto Rico.

Autores	Tormenta y Región	Descripción y principales conclusiones
Sowers (1971)	Tormenta no especificada Zona norte de PR	<ul style="list-style-type: none"> Estudia deslizamientos ocurridos durante la construcción de un camino en la zona de El Yunque. Los deslizamientos se generaron como consecuencia de excavaciones y se relacionaron con la estructura del suelo residual.
Campbell et al. (1985)	Tormenta tropical en octubre de 1985 Ponce	<ul style="list-style-type: none"> Describe los daños producidos por los deslizamientos en Las Delicias, Mameyes, y Las Terrazas en la zona de Ponce. Los autores recomiendan acciones inmediatas a implementar para reducir el riesgo de deslizamientos futuros.
Jibson (1986)	Tormenta tropical en octubre de 1985 Zona central y sur de PR	<ul style="list-style-type: none"> Evaluación de los daños producidos por los deslizamientos de octubre de 1985. Deslizamientos investigados: Mameyes, Peñuelas, Lions Club, Tallaboa, Comerío, Coamo, y The Intercontinental Hotel, en Ponce.
Jibson (1987)	Tormenta no especificada Todo PR	<ul style="list-style-type: none"> Describe las características geológicas de varias zonas propicias a los deslizamientos. Resumen los puntos más importantes de los deslizamientos más dañinos ocurridos en PR. El autor recomienda algunas medidas de mitigación para reducir el peligro de los deslizamientos.

Tabla 3. (Cont.) Síntesis de los trabajos previos sobre deslizamientos inducidos por lluvias en Puerto Rico.

Autores	Tormenta y Región	Descripción y principales conclusiones
Deere et al (1989)	Lluvias entre 1983 y 1985 Ruta PR-10 entre Arecibo y Utuado	<ul style="list-style-type: none"> • Presenta una revisión de la construcción de la carretera en donde se observaron numerosos deslizamientos entre 1983 y 1985. • Ilustra la complejidad del problema de deslizamientos.
Jibson (1989)	Tormenta tropical en octubre de 1985 Sur de PR	<ul style="list-style-type: none"> • Describe flujo de deyecciones en Peñuelas, Lions Club, Río Jueyes, y Tallaboa. • Discute los mecanismos de falla y los límites de duración e intensidad de lluvias para el sur de Puerto Rico.
Simon, Larsen and Hupp (1990)	Tormenta no especificada Bosque húmedo, este de PR	<ul style="list-style-type: none"> • Estudio para determinar los principales mecanismos de falla de taludes en el bosque húmedo tropical al este de PR. Se registraron 66 fallas de taludes. • En base a observaciones y pruebas de campo, como tests de resistencia al corte, se estimó que el principal mecanismo de falla fueron deslizamientos traslacionales planos.
Larsen and Simon (1993)	Lluvias que originaron deslizamientos entre 1957 y 1992 Todo PR	<ul style="list-style-type: none"> • Desarrollan un límite de intensidad-duración para lluvias en PR, basado en 41 tormentas que produjeron deslizamientos entre 1959 y 1991. • El límite se define en base a la comparación de las lluvias que originaron y que no originaron deslizamientos.
Larsen y Parks (1995)	Deslizamiento en la Sierra de Luquillo	<ul style="list-style-type: none"> • Se utilizó GIS para cuantificar la frecuencia de deslizamientos en zonas cercanas a carreteras en zonas montañosas forestadas.
Larsen and Torres-Sánchez (1995 and 1998)	Lluvias que originaron deslizamientos entre 1957 y 1992 Cuencas de los ríos Blanco, Cibuco y Coamo	<ul style="list-style-type: none"> • Los autores cuantifican la susceptibilidad a los deslizamientos utilizando fotografías aéreas, GIS, registros de lluvias y documentación de archivo. • Se presenta un límite, por encima del cual la frecuencia de los deslizamientos se incrementa para pendientes mayores a 12 grados. • Se estudia la influencia de la orientación de las laderas en la frecuencia de los deslizamientos para cada una de las tres cuencas.
Divarkala and Macari (1998)	Oeste de PR	<ul style="list-style-type: none"> • El artículo describe la metodología propuesta por los autores para utilizar el GIS para desarrollar mapas de deslizamientos.
Santiago and Larsen (2001)	Tormenta no especificada San Juan, área metropolitana	<ul style="list-style-type: none"> • Se desarrolló un mapa de susceptibilidad a los deslizamientos inducidos por terremotos para el área de San Juan. • El mapa muestra que sólo el 6% del área metropolitana de San Juan es altamente susceptible a los deslizamientos inducidos por terremotos. • La susceptibilidad a los deslizamientos se evaluó utilizando la metodología HAZUS.
Martínez-Gómez and Acevedo-Quiles (2002)	Huracán Georges (1998)	<ul style="list-style-type: none"> • Este estudio consistió en la simulación de dos deslizamientos (uno en Utuado y otro en el bosque húmedo tropical El Yunque). • Los modelos se elaboraron con muestras de suelos de ambos sitios. • Los modelos fallaron en forma similar a lo observado en el campo y con intensidades de lluvia razonablemente cercanas a las registradas.

PRIMER UMBRAL INTENSIDAD-DURACIÓN

Se considera que Caine (1980) fue el primero en proponer el uso de una relación empírica entre la ocurrencia de deslizamientos y las características de precipitaciones (intensidad y duración de lluvia) para obtener un umbral de deslizamiento. Caine (1980) utilizó datos de lluvias de distintos lugares del mundo para obtener una relación entre la intensidad y duración de las lluvias que indujeron deslizamientos. El trabajo de Caine agrupó deslizamientos ocurridos en zonas de diferentes características geológicas y climatológicas en distintos puntos del planeta, por ello el umbral definido por Caine es de aplicación mundial. El umbral obtenido por Caine, para una población de 73 tormentas, se muestra en la Figura 10.

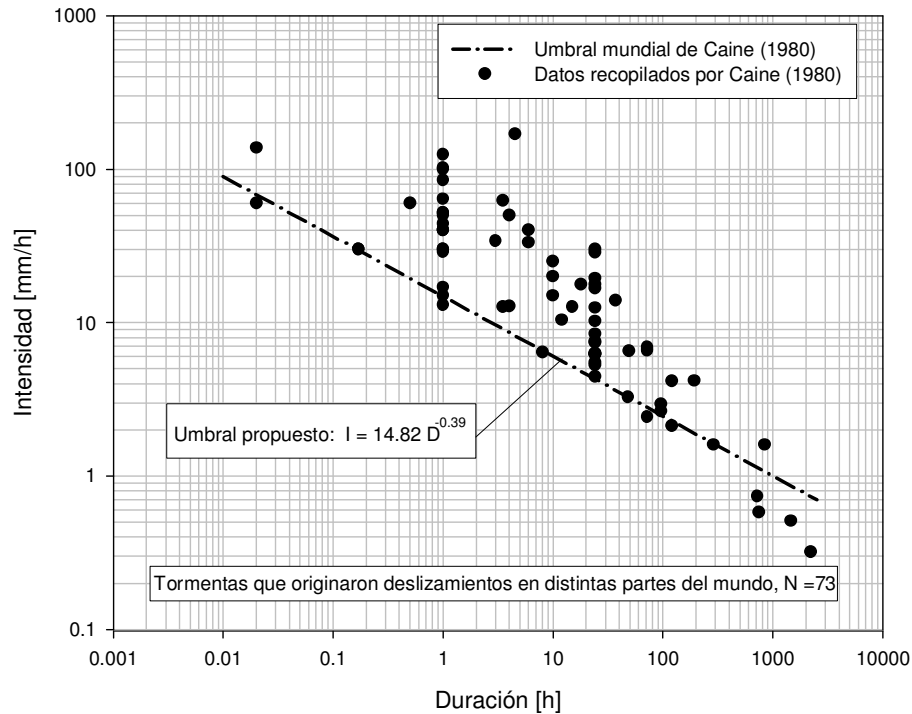


Figura 10. Umbral intensidad-duración propuesto por Caine (1980)

UMBRAL INTENSIDAD-DURACIÓN PROPUESTO PARA PUERTO RICO

Utilizando la metodología descrita en la sección anterior, Larsen y Simon (1993) establecieron un umbral de deslizamientos para Puerto Rico usando las 41 tormentas registradas entre 1959 y 1993 (mostradas en la Figura 5).

La base de datos actualizada, compuesta por 75 tormentas que originaron deslizamientos entre 1959 y 2003, dio origen a la recta límite empírica que se muestra en la Figura 11. Este umbral se trazó inspeccionando el límite inferior de los 75 puntos graficados. La expresión para la curva obtenida es:

$$I = 53.37D^{-0.78} \quad (1)$$

Donde I es la intensidad de lluvia en milímetros por hora y D es la duración de la lluvia en horas.

A los efectos de comparación, la Figura 11 muestra el umbral obtenida por Caine (1980) basada en 73 puntos de diversos lugares del mundo y la obtenida por Larsen y Simon (1993) basada en 41 puntos, en Puerto Rico. La recta propuesta por Larsen y Simon (1993) se encuentra por encima de los límites propuestos por Caine (1980) y este estudio, pero se mantiene prácticamente paralela a esta última.

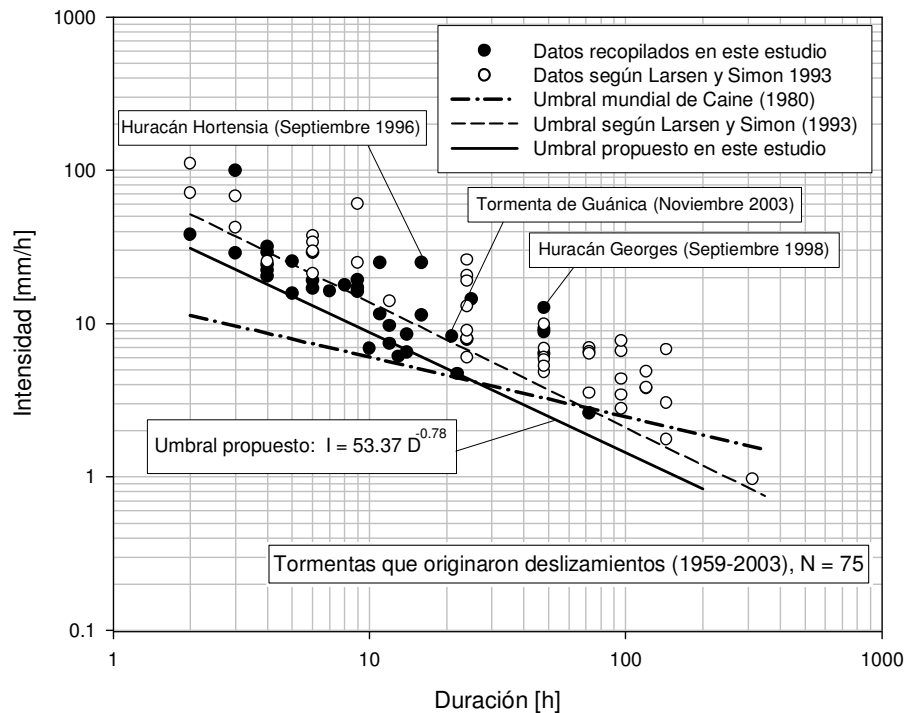


Figura 11. Umbral de intensidad-duración propuesto para Puerto Rico

A pesar de que estos umbrales por ser empíricos presentan ciertas limitaciones, han mostrado gran potencial para ser utilizados como parte de un sistema de alerta de deslizamientos, como muestran Keefer et al. (1987).

Debe tenerse en cuenta que según investigaciones recientes se reconoce alguna variación regional de estos umbrales, basadas en diferencias en litología, suelos, vegetación, condiciones climáticas, lluvias antecedentes, topografía y otros factores (Polemio y Petrucci 2000; Preston 2000). Los datos disponibles tampoco permitieron tomar en cuenta la influencia de los efectos debido al uso de la tierra, construcciones, y otras acciones del hombre. Ya que el presente artículo apunta a actualizar el umbral de deslizamientos basado en intensidad-duración de lluvias propuesto por Larsen y Simon (1993) no se han incluido estos y otros factores. Sin embargo se recomienda la extensión de este estudio para incluirlos.

RESUMEN Y CONCLUSIONES

Se realizó una revisión de literatura sobre deslizamientos inducidos por lluvias en Puerto Rico para resumir la información existente sobre el problema recurrente de deslizamientos en Puerto Rico. A lo largo del período 1959-2003 se recopilaban un total de 75 tormentas que indujeron deslizamientos. El umbral propuesto es una primera aproximación que puede ser utilizada como parte de un posible sistema de alerta de deslizamientos. Ya que se trata de un umbral generalizado, no se ha diferenciado entre características geológicas y topográficas, tipos de fallas o usos de la tierra. Estudios futuros sobre este tema deberán incluir estos factores para mejorar nuestro entendimiento a cerca de los mecanismos de deslizamientos en Puerto Rico.

AGRADECIMENTOS

Los autores agradecen los fondos semilla otorgados al primer autor por parte del Centro de Investigación y Desarrollo del Recinto Universitario de Mayagüez de la Universidad de Puerto Rico. También se agradece el auspicio del Departamento de Ingeniería Civil y Agrimensura del Recinto Universitario de Mayagüez de la Universidad de Puerto Rico. Los autores agradecen al Dr. Juan Bernal por sus sugerencias y recomendaciones para el manuscrito final de este trabajo.

REFERENCIAS

- Boose, E. R., Serrano, M. I., y Foster, D. R. (2004). "Landscape and regional impacts of hurricanes in Puerto Rico." *Ecological Monographs*, Vol. 74(2), 335-352.
- Briggs, R.P. y Akers, J.P. (1965). "Hydrologic map of Puerto Rico and adjacent islands." U.S. Geological Survey Hydrologic Investigations Atlas HA-197.

- Caine, N. (1980). "The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows." *Geogr. Ann.* Vol. 62 A, 23-27.
- Calvesbert, R. J., (1970). "Climate of Puerto Rico and the U.S. Virgin Islands." U. S. Department of Commerce, Climatography of the States, no. 60-52, 29p.
- Campbell, R. H., Herd, D. G., y 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.
- Deere, D. U. (1955). "Engineering properties of the Pleistocene and recent sediments of the San Juan bay area, Puerto Rico." Ph.D. Thesis, University of Illinois, Urbana, Illinois.
- Deere, D. U., y Patton, F. D. (1971). "Slope stability in residual soils." *In Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Proceedings, American Society of civil Engineeris*, Vol. 1, 87-170.
- Deere, D.U., Jimenez, P., y Hernandez, D. (1989). "Complex Landslides at Plateau Margins with an Example from Puerto Rico." *In Symposium, The art and science of geotechnical engineering : at the dawn of the twenty-first century : a volume honoring Ralph B. Peck*, Prentice-Hall, Chapter 19, 349-366.
- Divarkala, P. y Macari, E. J. (1998). "Stability Analysis of Slopes in Western Puerto Rico." *In Proceedings: ASCE Geo-Congress 98: Stability of Natural Slopes in the Coastal Plain*, ASCE Geotechnical Special Publication No. 77, 59-68.
- 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.
- Jibson, R.W. (1987). "Landslide hazards of Puerto Rico." *In Proc., Assessment of Geologic Hazards and Risk in Puerto Rico*, U.S. Geological Survey Open-File Report 87-008, Editors W.W. Hays and P. L. Gori, 183-188.
- Jibson, R.W. (1989). "Debris flows in Southern Puerto Rico." *In Proc., Landslide Processes of Eastern United States and Puerto Rico*, Editors A.P. Schultz and R.W. Jibson, Geological Society of America Special Paper No. 236, 29-55.
- Keefer, D. K., Wilson, R. C., Mark, R. K., Brabb, E. E., Brown, W. M. III, Ellen, S. D., Harp, E. L., Wieczorek, C. F., Alger, C. S., y Zarkin, R. S. (1987). "Real-time landslide warning during heavy rainfall." *Science*, Vol. 238,921-925.
- Larsen, M.C. y 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., Palcsak, B.B., Fitzpatrick, F. and Montgomery", D.ed.s., American Geophysical Union Water Science & Application Volume 4, Geomorphic Processes and Riverine Habitat, 119-138
- Larsen, M.C., y Simon, A. (1993). "Rainfall-threshold conditions for landslides in a humid-tropical system, Puerto Rico." *Geografiska Annaler*, Vol. 75A (1-2), 13-23.
- Larsen, M.C., y Torres-Sánchez, A. J. (1995). "Geographic relations of landslide distribution and assessment of landslide hazards in the Blanco, Cibuco, and Coamo river basins, Puerto Rico." U.S. Geological Survey Water Resources Investigations Report 95-4029, 56 p.
- Larsen, M.C., y Parks, J.E. (1998). "Map showing landslide hazards in the municipality of Comerio, Puerto Rico." U.S. Geological Survey Open-file Report 98-566, 1 sheet.
- Larsen, M.C., y Torres-Sánchez, A.J. (1998). "The frequency and distribution of recent landslides in three mountain tropical regions of Puerto Rico." *Geomorphology*, Vol. 24, 309-331.
- Larsen, M.C., Santiago, M., y Jibson, R. W. (2004). "Map showing landslide susceptibility in the municipality of Ponce, Puerto Rico." USGS Scientific Investigations Map Report Number I-2818.
- Larsen, M. C. y Wieczorek, G. (2004). "Landslide hazards and mitigation in the tropics: examples from Puerto Rico, Venezuela, and the Dominican Republic". Presentación en taller sobre Huracanes, Inundaciones y Deslizamientos, NOAA-NASA-USGS, Agosto 23-26, Intercontinental Hotel, San Juan, PR.
- Monroe, W.H. (1979). "Map Showing Landslides and Areas of Susceptibility to Landsliding in Puerto Rico." U.S. Geological Survey Miscellaneous Investigations, USGS Map No. I-1148, 1 sheet.
- Martinez-Gamez, J. A., y Acevedo-Quiles, M. (2002). "Hazard mitigation of landslides induced by hurricane and extreme rainfall events-Phase 1." FEMA project PR-0072.
- NRC (National Research Council) (2004). "Partnerships for Reducing Landslide Risk: Assessment of the National Landslide Mitigation Strategy." National Academy Press, Washington, D.C., 131 pp.
- Neumann, C. J., Jarvinen, B. R., y Pike, A. C. (1987). "Tropical cyclones of the North Atlantic Ocean 1871-1986.". Third revised edition. NOAA-National Climatic data Center, Asheville, North Carolina, USA.

- Polemio, M., y Petrucci, O. (2000). "Rainfall as a landslide triggering factor: An overview of recent international research." *In Proc.*, Landslides in Research Theory and Practice, Cardiff, June, 1219-1226.
- Preston, N. J. (2000). "Feedback effects of rainfall-triggered shallow landsliding." *In Proc.*, Landslides in Research Theory and Practice, Cardiff, June, 1239-1244.
- Scatena, F. N., y Larsen, M. C. (1991). "Physical aspects of Hurricane Hugo in Puerto Rico." *Biotropica*, Vol. 23, no. 4A, 317-323.
- Santiago, M., y Larsen, M.C. (2001). "Map showing susceptibility to earthquake-induced landsliding, San Juan Metropolitan Area, Puerto Rico." U.S. Geological Survey Open-file Report 01-39, 1 CD.
- Simon, A., Larsen, M. C., y Hupp, C. R. (1990). "The role of soil processes in determining mechanisms of slope failure and hillslope development in a humid-tropical forest eastern Puerto Rico." *Geomorphology*, Vol. 3 (3-4), 263-286.
- Sowers, G.G. (1971). "Landslides in Weathered Volcanic Soil in Puerto Rico." *In Proc.*, 4th Panamerican Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 1, 105-115.
- St. John, B. J., Sowers, G. F. y Weaver, C. E. (1969). "Slickensides in residual soils and their engineering significance." 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexico, Proceedings. Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos 2:591-597.