EVALUACIÓN DE RIESGOS DE DERRUMBES CAUSADOS POR LLUVIAS TORRENCIALES

Emir José Macari[1]

RESUMEN: Durante las últimas décadas Puerto Rico ha sufrido varios cientos de derrumbes, en su mayoría ocasionados por tormentas intensas y de larga duración. Estos fenómenos han ocurrido debido a la cantidad de eventos ciclónicos (depresiones tropicales, tormentas tropicales o huracanes) en el Caribe. Este artículo trata sobre la inestabilidad y riesgo de derrumbes en las zonas montañosas del Oeste de Puerto Rico. Se presenta el desarrollo de una nueva metodología numérica que integra modelos hidrológicos, topográficos y geotécnicos dentro de un marco geográfico para establecer factores de seguridad contra fallas de pendientes o taludes naturales. Dado un evento de precipitación, los modelos hidrológicos proporcionan la información sobre cantidades de evapo-transpiración, de intercepción, de infiltración y de escape del agua producida por la lluvia. Las cantidades de infiltración son de suma importancia para poder establecer los niveles de saturación del suelo, que son un componente crucial para el cómputo del estado físico de los depósitos de suelo. Este artículo se centra en la integración de los resultados de estos modelos y el análisis dentro de un sistema de información geográfico (SIG). El aporte es el desarrollo de la metodología y se presenta un ejemplo ilustrativo para la zona occidental de Puerto Rico. La ventaja del SIG es que el análisis puede ser automatizado al tenerse la información de la zona de estudio en forma digital. La información del potencial de ocurrencia de derrumbes catastróficos, al ser combinada con datos espaciales (geográficos) adicionales, tales como la localización de infraestructura importante (hospitales, escuelas), infraestructura civil (caminos, puentes, tuberías subterráneas) y población (zonas residenciales, tipos de vivienda, densidad de la población), es de suma importancia para agencias gubernamentales tanto de planeación como de rescate.

INTRODUCCIÓN

Este trabajo trata del problema de derrumbes de laderas naturales en la región occidental de Puerto Rico. Los derrumbes pueden ser causados por numerosas razones, tales como precipitación (Larsen y Simon., 1993), terremotos (McCann, 1986; Asencio, 1980; Reid y Taber., 1919), deforestación o tala de árboles y desecación de sedimentos. Sin embargo, las dos causas principales son la lluvia y los sismos: la infiltración de lluvias y las vibraciones ocasionadas por sismos son de gran importancia para los mecanismos que accionan derrumbes de taludes naturales.

El énfasis principal de este artículo es de analizar inestabilidades de laderas naturales considerando grandes extensiones territoriales en función de la precipitación. Los cálculos, basados en modelos hidrológicos y análisis de inestabilidad de taludes, se realizan dentro de un sistema de información geográfica (SIG). El SIG desempeña un papel dual, ayudando en el manejo de datos y proveyendo una herramienta de visualización de los datos (Colisimo y Mendicino., 1996). El manejo de datos en SIG ayuda para preparar los parámetros vitales utilizados por los modelos matemáticos que calculan factores de seguridad contra inestabilidad de taludes. El aspecto de la visualización de resultados en SIG permite la identificación de zonas peligrosas y zonas que contienen infraestructura vital tal como escuelas, hospitales, caminos, y otras líneas de infraestructura importantes y por lo tanto puede llegar a ser de gran utilidad para agencias de gobierno encargadas de planeación y de manejo de emergencias (Singh y Fiorentino., 1996) así como para compañías aseguradoras y otras organizaciones de desarrollo urbano.

Este artículo trata específicamente sobre los siguientes temas:

1. Estimado de la cantidad y extensión de derrumbes en Puerto Rico occidental.
2. Mecanismos de fallas de taludes naturales causados por lluvias intensas.
3. Incorporación de aspectos hidrológicos dentro de métodos tradicionales de estabilidad de taludes para el análisis del riesgo de derrumbes.

[1] Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Lousiana State University, Baton Rouge, LA, Estados Unidos

4. Uso de Sistemas de Información Geográfica para estimar los factores de seguridad contra derrumbes en grandes extensiones territoriales; combinando modelos geotécnicos, hidrológicos y meteorológicos.

DERRUMBES DE LADERAS NATURALES

A lo largo de la historia registrada, numerosos derrumbes han ocurrido alrededor del mundo causando grandes daños a bienes materiales y pérdidas de vida humana (Cruden y Varnes., 1996). Turner (1986) presentó la documentación de Xue-Cai y An-ning del más viejo derrumbe en el expediente histórico que ocurrió en la provincia de Hunan de China central en 1767 a.c. El derrumbe, accionado por un terremoto, contuvo el río Yi y otros ríos más pequeños (Turner, 1996). De acuerdo con el tipo de estudio varias definiciones de derrumbes se pueden encontrar en la literatura. Sin embargo, en este trabajo se emplea la definición debida a Cruden (1991), quien definió derrumbes como " el movimiento de una masa de la roca, de los escombros o de la tierra abajo de una cuesta ".

Según una encuesta sobre geología, en los Estados Unidos, los derrumbes son un peligro geológico serio y bastante común en casi todos los estados. Se estima que los derrumbes causan una pérdida de mil millones de dólares y 25-50 muertes cada año. Por lo tanto, con los avances en las áreas de métodos numéricos y de herramientas computacionales (tales como los sistemas de información geográfica), es importante reevaluar este peligro y desarrollar una herramienta o metodología para evaluar la susceptibilidad de derrumbes en una región. Recientemente han ocurrido varios derrumbes grandes en varios sitios del mundo causando grandes pérdidas; por ejemplo, en Indonesia 62 personas perdieron la vida debido a un derrumbe causado por lluvias intensas en agosto de 2001.

EL CICLO HIDROLÓGICO Y SU INFLUENCIA EN DERRUMBES

Los cuatro componentes principales del ciclo hidrológico son: 1) Infiltración, 2) Evapo-transpiración, 3) Escorrentía, y 4) Interceptación y/o Encharcamiento. Para el estudio de derrumbes inducidos por lluvia, la infiltración es la consideración más importante. Esto es debido a que la infiltración causa cambios en el nivel de la saturación y presiones del agua en el suelo. Este cambio del contenido en agua del suelo afecta la presión efectiva, y por lo tanto también la resistencia al corte del suelo. Este último es un parámetro muy importante que es usado en los cálculos de la estabilidad de taludes. La infiltración es la cantidad de agua que penetra dentro del suelo (Dingman, 1993). Para una localización espacial dada el índice de la infiltración cambia sistemáticamente con el tiempo y nivel de saturación del suelo. Diversos investigadores han propuesto varias maneras de computar la velocidad de infiltración del agua en el suelo.

Los factores que afectan el índice o grado de infiltración son (Dingman, 1993):

1. La cantidad de agua que llega a la superficie del suelo debido a precipitación, derretido de nieve, irrigación, etc.
2. La conductividad hidráulica saturada y parcialmente saturada del suelo en la superficie.
3. El grado de saturación de la superficie del suelo.
4. Las características químicas y físicas de la superficie del suelo.
5. Las características químicas y físicas del agua.

Para modelar la infiltración, se asume el proceso de infiltración como una filtración vertical del agua a través de los poros en un suelo cuasi-homogéneo. Hay varias maneras de modelar la cantidad cuantitativa de la infiltración. Varios investigadores han propuesto métodos analíticos y empíricos. Dos procedimientos son los más usados en la práctica de ingeniería: el modelo Green-Ampt (1911) y la ecuación de Richards (1931) (Dingman, 1993). La ecuación de Richards se combina con la ley de Darcy para el flujo no saturado vertical con la conservación de la masa.

Los métodos numéricos usados en la práctica que incorporan la ecuación de Richards han mostrado un muy buen acuerdo con mediciones en el terreno. Sin embargo, para regiones espaciales más extensas no es muy factible el uso de la ecuación de Richards. El modelo propuesto por Green y Ampt en 1911 también se basa en la conservación de la masa y utiliza la ley de Darcy, pero la formulación de diferencias finitas es más fácil de utilizar para el cómputo para áreas espaciales extensas. Las ecuaciones (1) y (2) describen el modelo Green-Ampt. La figura 1 muestra los resultados de los cálculos obtenidos usando el modelo Green-Ampt para una arena limosa.

$$t = \frac{F(t) - F(t_p)}{K_{hsat}} + \frac{|\psi_f|(\phi - \theta_0)}{K_{hsat}} \ln\left[\frac{F(t_p) + |\psi_f|(\phi - \theta_0)}{F(t) + |\psi_f|(\phi - \theta_0)}\right] + t_p \qquad (1)$$

$$f(t) = K_{hsat}\left[1 + \frac{|\psi_f|(\phi - \theta_0)}{F(t)}\right] \qquad (2)$$

En este estudio se implementó el modelo numérico Green-Ampt utilizando un código escrito en MATLAB®.

Tabla 1 Descripción de las variables usadas en el modelo Green-Ampt

T_p	Tiempo de encharcamiento
F(t)	Velocidad de infiltración
F(t)	Cantidad total de infiltración al tiempo "t"
$F(t_p)$	Cantidad total de infiltración al tiempo de encharcamiento
K_{hsat}	Conductividad hidráulica saturada
ϕ	Porosidad
θ_o	Contenido de humedad inicial
ψ_f	Carga de presión

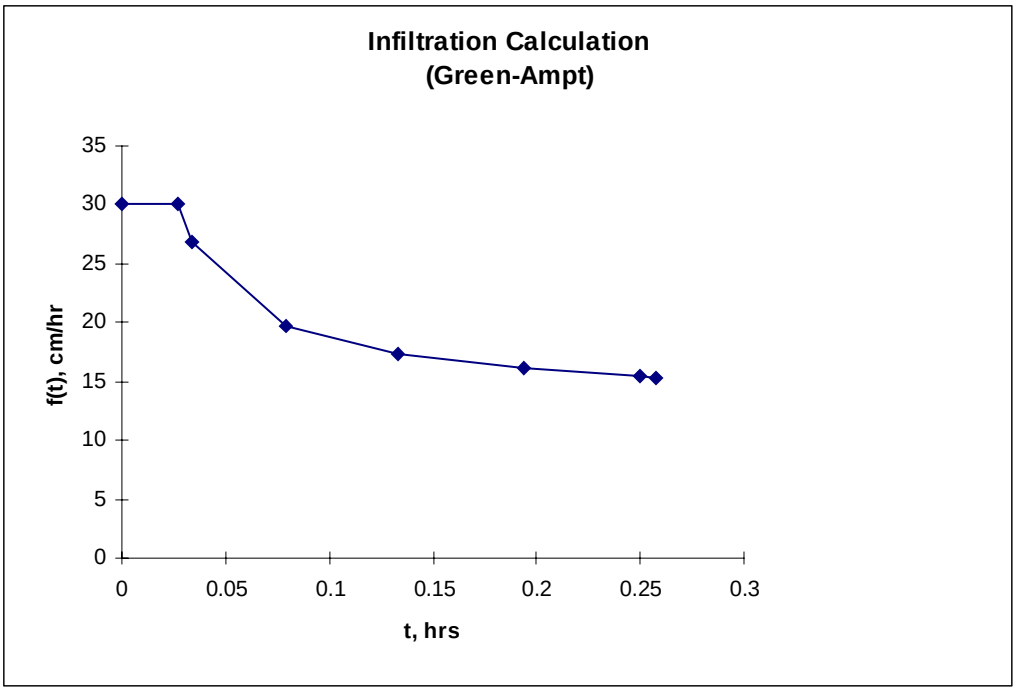

Figura 1: Resultados de Infiltración para un suelo arena limosa usando el modelo Green-Ampt.

LA FORMULACIÓN MATEMÁTICA DE LA ESTABILIDAD DE TALUDES

La inestabilidad de taludes puede ser evaluada computando el factor de la seguridad tomado como la relación de las fuerzas que resisten y aquellas que promueven el deslizamiento de un talud (Sharma, 1996). El factor de seguridad puede ser calculado por varios métodos determinísticos tal como el Método del Equilibrio Límite. En este método el talud se divide en varias dovelas y el factor de seguridad es calculado al resolver las ecuaciones de equilibrio estático. Los parámetros requeridos para realizar este tipo de análisis incluyen el tipo del suelo, ángulo

de fricción interna, cohesión del suelo, localización del nivel freático dentro del talud, geometría del talud, al igual que el tipo de análisis que se realizará (ya sea drenado o no-drenado). Por lo tanto, la exactitud del cómputo del factor de seguridad depende de la valoración apropiada de los parámetros del suelo, de las condiciones hidrogeológicas y de las condiciones geométricas (Duncan, 1996). Los resultados presentados en este artículo fueron obtenidos usando el modelo Estabilidad de Talud Infinito (Hammond *et al.*, 1992). El diagrama esquemático de este método se muestra en la figura 2.

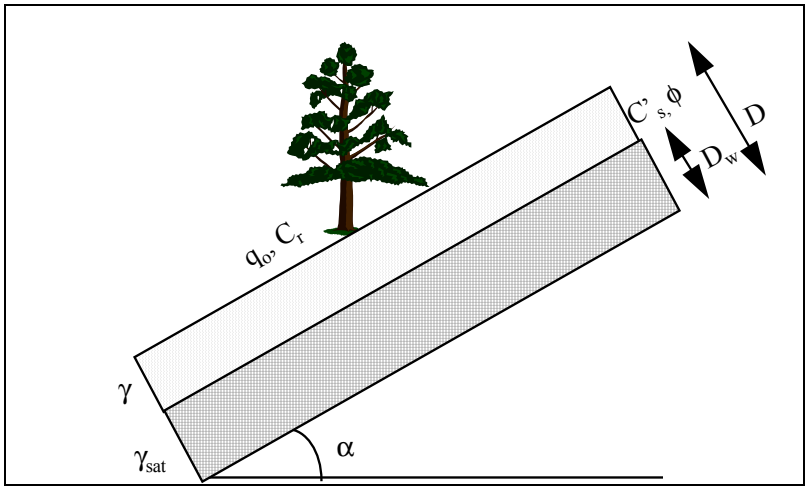

Figura 2: Esquema del modelo de estabilidad de laderas infinitas (Hammond et al., 1992)

El modelo de talud infinito es un método simple para conseguir una estimación rápida del factor de la seguridad y es fácil de ejecutar para regiones extensas. La ecuación usada por el modelo infinito de la cuesta se presenta en la ecuación 3 y la descripción de las variables en la ecuación se da en la tabla 2.

$$FOS = \frac{C_r + C_s^{'} + \cos^2(\alpha)[q_o + \gamma(D - D_w) + (\gamma_{sat} - \gamma)D_w]\tan(\phi^{'})}{\sin(\alpha)\cos(\alpha)[q_o + \gamma(D - D_w) + \gamma_{sat}D_w]} \quad (3)$$

Tabla 2: Descripción de las variables usadas en el modelo de la pendiente infinita.

FOS	Factor de seguridad
α	Pendiente de la superficie del suelo, grados
D	Espesor de la capa de suelo, m
D_w	Espesor de la capa de suelo saturada, m
Cr	Resistencia (expresada como cohesión) proporcionada por raíces de arboles, kN/m^2
q_{uo}	Sobrecarga por el árbol, kN/m^2
$C`_s$	Cohesión del suelo, kN/m^2
ϕ’	Angulo de fricción interna efectiva, grados
γ_d	Peso unitario seco del suelo, kN/m^3
γ	Peso unitario húmedo del suelo, kN/m^3
γ_{sat}	Peso unitario del suelo saturado, kN/m^3
γ_w	Peso unitario del agua, kN/m^3

Hay varias suposiciones que son parte del modelo de taludes infinitos.

- La superficie plana y el nivel freático es paralelo a la superficie de tierra.
- El plano de falla también es paralelo a la superficie y es infinito.
- Se considera una sola capa del suelo. Para las capas múltiples, la fuerza de esqueleto del suelo se debe cargar dando más peso a la capa baja.
- El método de análisis es bi-dimensional.
- El suelo debajo del nivel freático está totalmente saturado.

DESCRIPCIÓN DEL PROCEDIMIENTO

La descripción de cada uno de los pasos de la metodología usado para predecir derrumbes se presenta en figura 3. Para producir los mapas de riesgo o de susceptibilidad de derrumbes, es preciso realizar los cálculos de la estabilidad de los taludes. Esta metodología fue implementada dentro de una formulación del modelo de estabilidad de taludes infinitos en MATLAB®. Los parámetros requeridos para los cálculos fueron obtenidos de una base de datos creada de la cobertura del SIG para la región (mostrada en la tabla 3) usando ArcView®.

Tabla 3: Base de Datos usados para el calculo de la estabilidad de taludes (USGS-PR).

Grupo de Datos	Descripción
Risl	Información del Suelo en Rincón
Rilulc	Uso de las tierras en Rincón
rist	Ríos en Rincón
ridem	Modelo de elevación digital para Rincón (7.5')
ritp	Topografía de Rincón
rish	Hidrología superficial en Rincón

La topografía de la zona de estudio se aproximó usando los datos de un DEM (modelo digital de la elevación; Digital Elevation Model) que fueron calculados de datos topográficos obtenidos por mediciones de satélites. De esta forma, el cálculo del factor de seguridad para cada una de las pendientes se pudo hacer individualmente y después se incorporó a una forma de cobertura digital del SIG y así se generaron mapas de susceptibilidad a derrumbes. Para este estudio se eligió una tormenta que generó una intensidad de precipitación de 30cm/hr obtenida de la base de datos del Servicio Meteorológico de los Estados Unidos. Usando la intensidad de la precipitación, se calculó de la infiltración. De acuerdo a estos cálculos, se evalúa la presión efectiva y la resistencia al corte del suelo para cada pendiente. Una vez que toda la información ha sido generada, se evalúa estabilidad de taludes y los resultados se presentan en forma de factores de la seguridad contra derrumbes para cada talud. Estos resultados son importados en forma de una cobertura de punto a punto dentro del SIG ArcView®. Los factores de la seguridad se usan para generar contornos de riesgo.

RESULTADOS

La región occidental de Puerto Rico se divide en 24 cuadrángulos (13 kilómetros por 13 kilómetros). Para este estudio, se ha seleccionado el cuadrángulo de Rincón. La figura 4 muestra la referencia geográfica al cuadrángulo de Rincón, mientras que en las figuras 5a y 5b se identifica la localización de las carreteras principales y de los ríos de la región. La figura 6a muestra los contornos de elevación de la región. Los cálculos de la estabilidad de taludes se presentan en la tabla 4. Como puede apreciarse en la tabla 4 y la figura 6b, hay varias regiones en el área del estudio de Rincón, que son susceptibles a derrumbes. Los resultados de este estudio muestran acuerdos generales en comparación con estudios anteriores (Larsen y Simon., 1993).

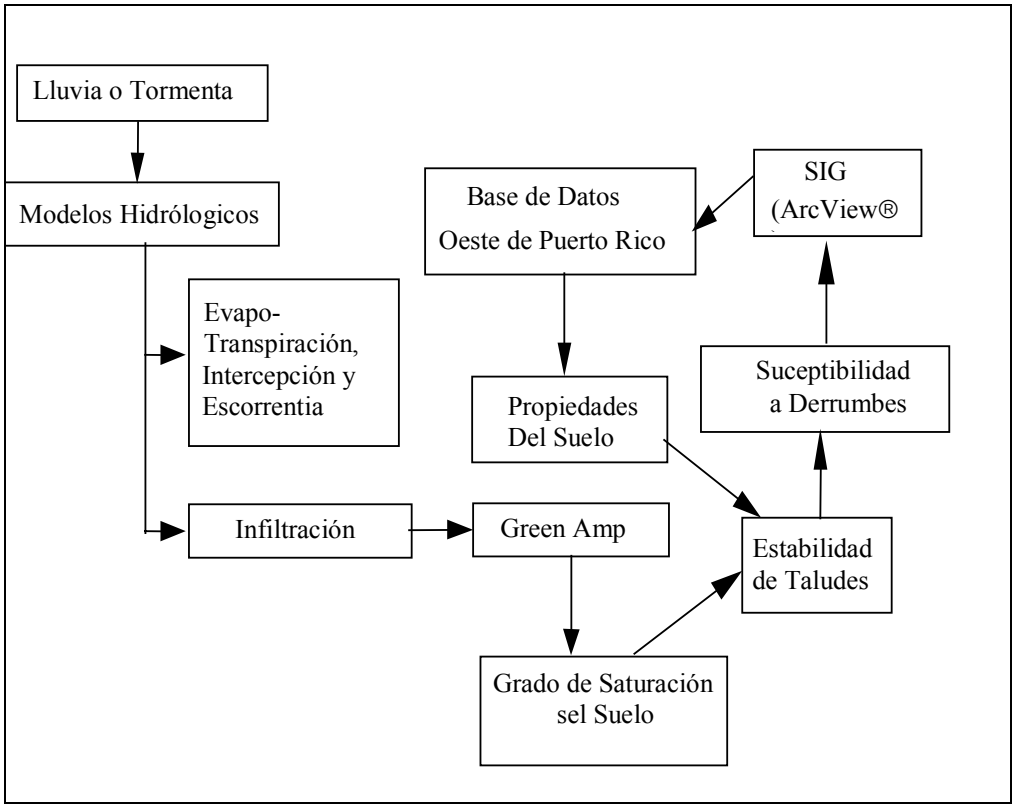

Figura 3: Esquema de la Metodología.

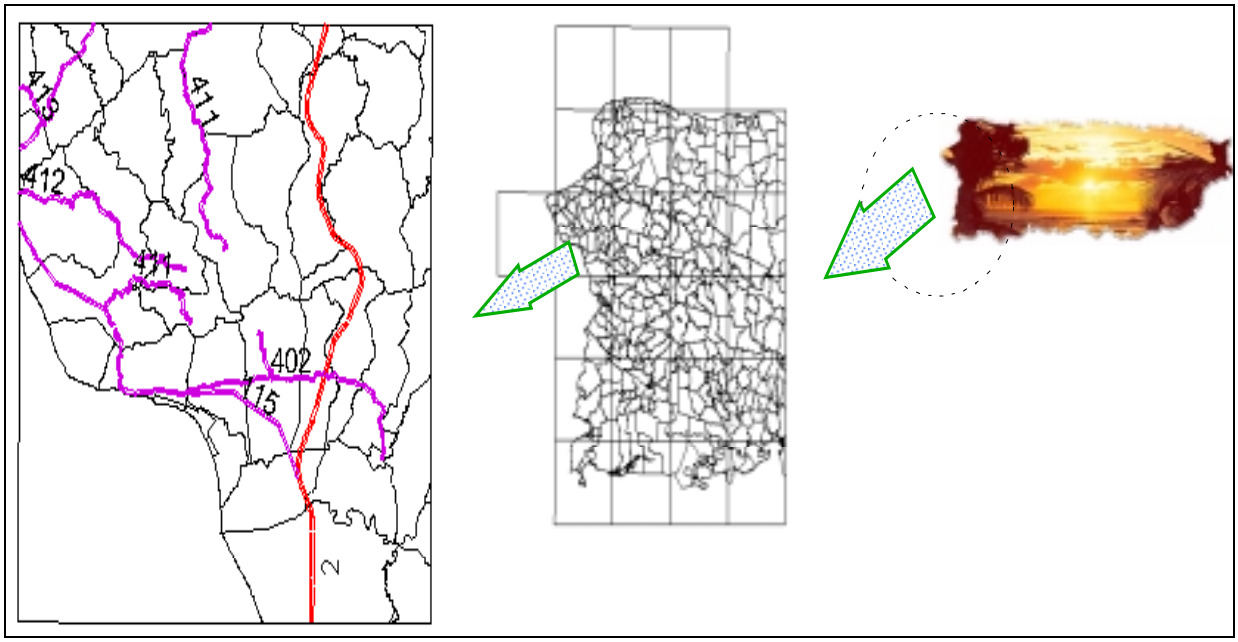

Figura 4: Localización del área de estudio.

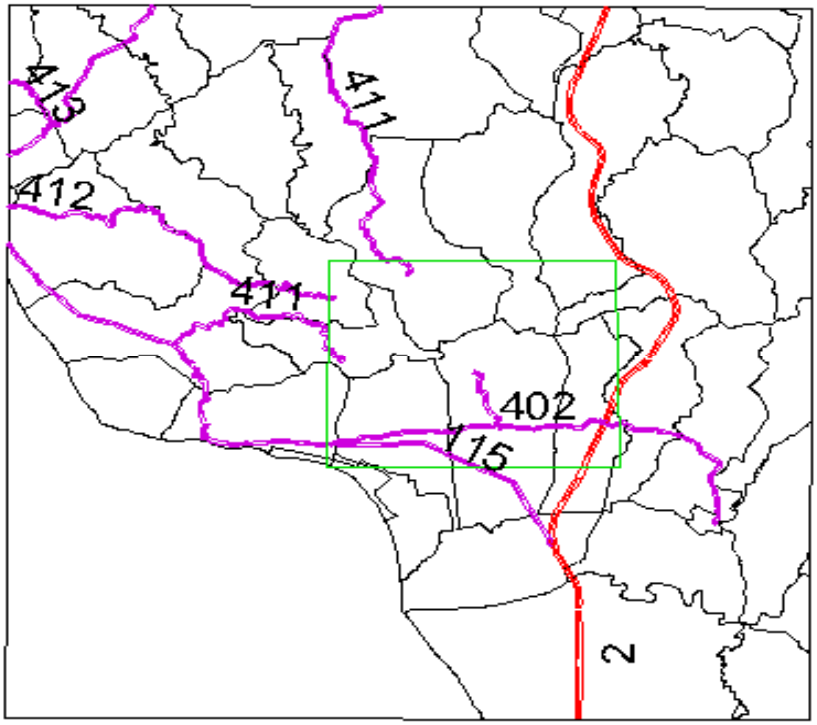

Figura 5a: Cuadrángulo de principales carreteras en Rincón.

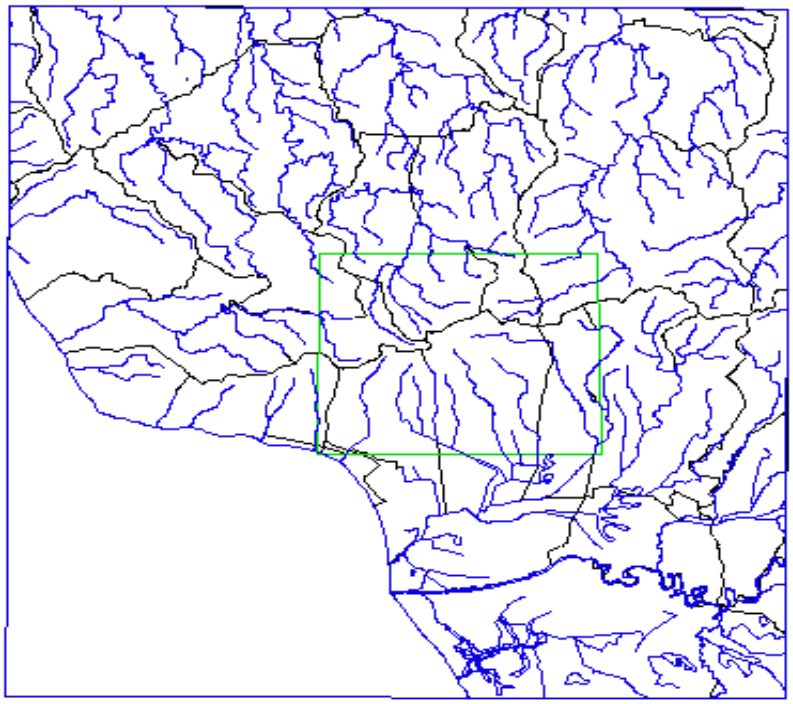

Figura 5b: Cuadrángulo de Ríos en Rincón.

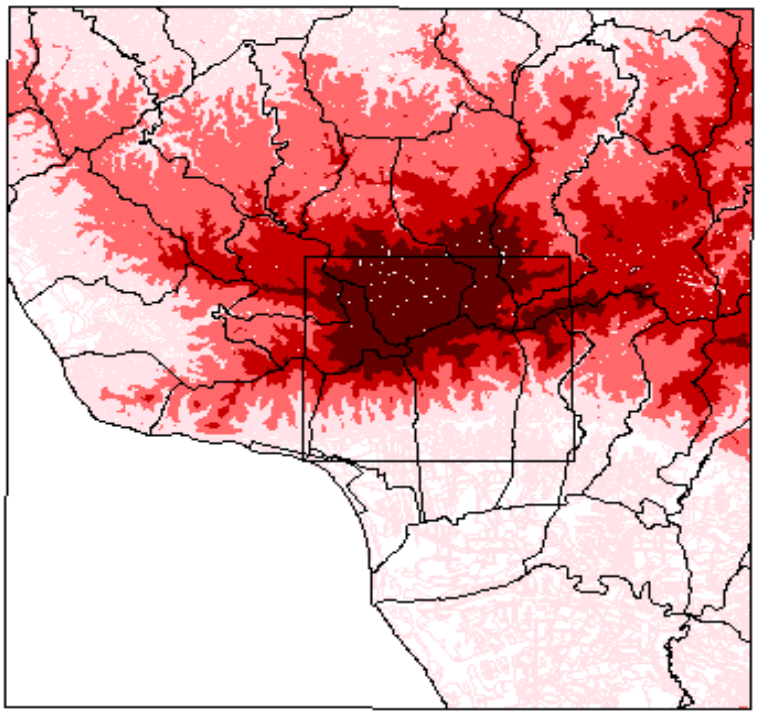

Figura 6a: Cuadrángulo Topográfico de Rincón (Areas más oscuras indican más elevado).

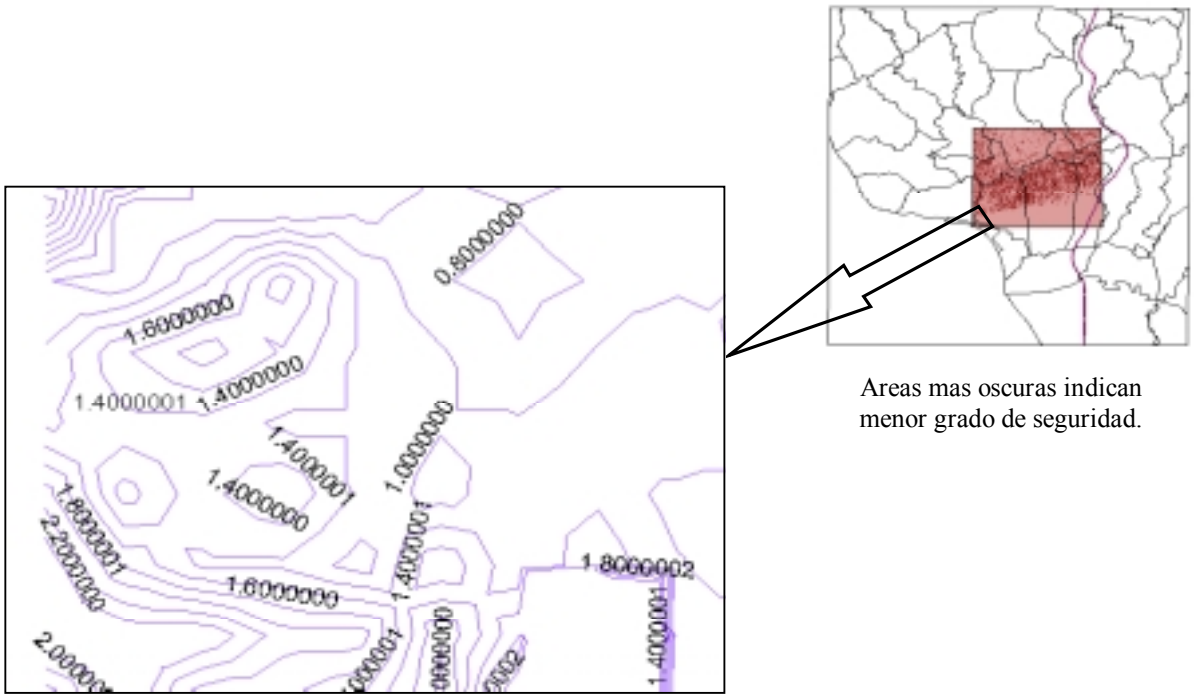

Figura 6b: Cuadrángulo de Factor de Seguridad contra derrumbes en Rincón.

Tabla 4: Resumen de resultados de 47 pendientes.

Media	1.55
Máximo	2.20
Mínimo	0.80
Rango	1.40
Variable	0.17
Desviación Estándar	0.41

CONCLUSIONES

En este artículo se ha presentado la integración del análisis tradicional de la estabilidad de taludes con modelos hidrológicos dentro de un marco de Sistemas de Información Geográfica. Como un estudio de cómo se analizó en detalle, el cuadrángulo de Rincón en Puerto Rico. Los resultados indican varias áreas con un potencial para un derrumbe, en los que el factor de seguridad sobrepasa la unidad. Los taludes en estas áreas deben ser analizados más detalladamente para confirmar el factor de seguridad, puesto que el ejemplo utilizado fue desarrollado utilizando un modelo simplificado asumiendo la presencia de pendientes infinitas. La metodología presentada permite estimar de una manera rápida y confiable la susceptibilidad de una región a derrumbes de taludes naturales ocasionados por lluvias torrenciales. Como continuación de este esfuerzo de investigación se planean utilizar modelos más rigurosos en la evaluación de la estabilidad de taludes, tales como el método de Spencer.

RECONOCIMIENTOS

El autor agradece a la Fundación Nacional de Ciencias de los Estados Unidos (NSF) por el financiamiento para llevar acabo este estudio bajo el contrato Presidencial de la Casa Blanca No. MSS-9396264. También se agradece al Sr. John E. Parks y al Dr. Matthew C. Larsen, de la oficina del Departamento Geológico de Puerto Rico USGS-PR, por su colaboración para conseguir los datos digitales usados en este estudio.

REFERENCIAS

Asencio, E. (1980). *Western Puerto Rico Seismicity*, U.S. Department of the Interior Geological Survey, Open File Report, 80-192.

Caine, N. (1980). “The Rainfall Intensity-Duration Control of Shallow Landslides and Debris Flows,” *Geogr. Ann.* 62A 23-27.

Colisimo C. y Mendicino G. (1996). “GIS for Distributed Rainfall-Runoff Modeling,” *Capitulo 8 en Geographical Information Systems in Hydrology*, Kluwer Academic Publishers.

Cruden, D. M. (1991). “A Simple Definition of a Landslide,” *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, No. 43, pp. 27-29.

Cruden, D. M. y Varnes D. J. (1996). “Landslides Types and Processes,” *Landslides Investigations and Mitigation*, Ed. Turner, A., Special Report, TRB 1996.

Dingman S. L. (1993). *Physical Hydrology*, Prentice Hall.

Duncan, M. J. (1996). Soil Slope Stability Analysis, *Landslides Investigations and Mitigation*, Ed. Turner, A., Special Report, TRB 1996.

Hammond, C., Hall, D., Miller, S. y Swetik, P. (1992). *Level I Stability analysis documentation*, USDA, Report INT-285.

Larsen M. C. y A. Simon, (1993). “A Rainfall Intensity-Duration threshold for Landslides in a Humid-Tropical Environment, Puerto Rico,” *Geogr. Ann*. 75-A(1-2)., pp 13-23.

McCann, W. R. (1986). "Historic Earthquakes and the Earthquake Hazard of Puerto Rico." Proceedings of Conference XXXVI, *A Workshop on Assessment of Geologic Hazards and Risk in Puerto Rico*, May 14-16, 1986, U.S. Department of the Interior Geological Survey, Open File Report, 87-008.

Reid, H. R. y S. Taber (1919). *The Puerto Rico earthquake of 1918, with descriptions of earlier earthquakes*. Report of the Earthquake Investigation Commission, House of Representatives, Document 269, Washington, D.C. 74 pps.

Richards, L. A. (1931). "Capillary Conduction of Liquids in Porous Mediums," *Physics*, vol 1. pp. 318-333.

Sharma, S. (1996). "Slope Stability Concepts," *Capitulo 6 en Slope Stability and Stabilization Methods*, Wiley, Inc.

Singh, V. P. y Fiorentino M. (1996). *Geographical Information Systems in Hydrology*, Kluwer Academic Publishers.

Turner, A. (1996). *Landslides Investigations and Mitigation,* Special Report, TRB 1996. ISBN : 0-309-06208-X.

U.S. Geological Survey, P. O. Box 364424, San Juan, PR, 00936-4424.

U.S. Weather Service, 1959-1990: *Storm Data with Annual Summaries*, Nat. Oceanic and Atmospheric Administration, Vol.1 No. 1 to Vol.32 No. 8.