

Identificación de deslizamientos de terreno utilizando fotos aéreas de Ponce, Puerto Rico

Rosimar Ríos Berríos y Fernando Martínez Torres

11 de enero de 2011

Afilación Académica: Universidad de Puerto Rico en Mayagüez

Mentor de investigación: Dr. Fernando Gilbes

Resumen

Un deslizamiento de terreno es un proceso natural, especialmente en las zonas montañosas, caracterizado por un movimiento pendiente abajo de una masa de tierra debido a la inestabilidad del terreno y la acción de la fuerza de gravedad. Este fenómeno es la causa de múltiples pérdidas materiales valoradas en millones de dólares y peor aún, vidas humanas. Por ende, es sumamente importante desarrollar técnicas que permitan las áreas que son susceptibles a deslizamientos. Por ejemplo, el municipio de Ponce está caracterizado por la gran cantidad de deslizamientos que han ocurrido en la zona, siendo esto un gran problema para la población.

Una de las técnicas más eficientes a utilizar para identificar estos fenómenos es la percepción remota ya que permite estudiar las zonas utilizando imágenes capturadas por satélites, aviones o alguna otra plataforma que pase sobre el área. Para el caso de Ponce, se tenían disponibles fotos aéreas que fueron tomadas por una misión del Colegio de Ingenieros de PR. Estas fotografías fueron procesadas utilizando ENVI 4.7, creando imágenes que identificaban lugares donde se encontraban terrenos descubiertos; la pista principal para identificar estos deslizamientos de terreno. De este modo se facilita este proceso y al mismo tiempo se demuestra la eficiencia de este programa en este tipo de labor.

Los resultados obtenidos muestran que la técnica utilizada puede ser de gran ayuda en la identificación de deslizamientos, pero no es tan eficiente ya que requirió conocimiento de los autores para confirmar la presencia de los deslizamientos. Además, otros aspectos tales como la resolución espacial y espectral fueron de gran influencia en el uso de esta técnica.

Palabras claves: clasificaciones, deslizamientos, ENVI, fotos, percepción remota, Ponce, Puerto Rico.

Índice

1. Introducción	3
1.1. Área de estudio y su geología	4
2. Métodos	6
3. Resultados	10
3.1. Mosaico	10
3.2. Cerca del cielo	11
3.3. Mameyes	12
3.4. Vertedero	13
3.5. Validación de datos	14
4. Discusión	15
4.1. Mosaico	15
4.1.1. Minimum Distance	15
4.1.2. Maximum Likelihood	15
4.2. Cerca del cielo	16
4.2.1. Minimum Distance	16
4.2.2. Maximum Likelihood	16
4.3. Mameyes	16
4.3.1. Minimum Distance	17
4.3.2. Maximum Likelihood	17
4.4. Vertedero	18
4.4.1. Minimum Distance	18
4.4.2. Maximum Likelihood	18
4.5. Validación de resultados	19
5. Conclusiones & Recomendaciones	20

1. Introducción

Un deslizamiento de terreno es un fenómeno natural común en las montañas donde hay un movimiento de masa de tierra debido a la inestabilidad del área (Larsen y Torres, 1998). Estos eventos son sumamente conocidos por la cantidad de destrucción que causan en zonas pobladas, provocando pérdidas millonarias anualmente y en los peores casos, de vidas humanas. Sólo por mencionar varios ejemplos, en el 1985, en la comunidad de Mameyes en Ponce, más de 100 personas murieron en un deslizamiento de terreno y más reciente aún, la comunidad de Cerca del Cielo, también en Ponce, ha sufrido serios deslizamientos de terreno que han provocado la pérdida o el abandono compulsorio de hogares para algunas familias (Wang, 2010).

Según Larsen y Torres, 1998, en Puerto Rico este proceso geológico es sumamente común debido a tres factores principales. Primero, la Isla está caracterizada por la gran cantidad de montañas que domina su topografía, o sea, esto provoca que terrenos inestables estén en una

pendiente alta haciendo más susceptible el lugar para que el terreno vaya pendiente abajo, creando un deslizamiento. Segundo, Puerto Rico se encuentra en una zona de clima tropical por lo que la alta precipitación es una característica común del lugar, acelerando así el proceso de erosión y transportando terreno pendiente abajo, y eventualmente a los ríos. Finalmente, en la Isla hay un nivel alto de población trayendo así como consecuencia tener que crear nuevas estructuras para acomodar a las personas. Estas contrucciones muchas veces se realizan en lugares que no son llanos y se requiere mover cierta cantidad de terreno, convirtiendo algunas de estas áreas en lugares inestables y susceptibles a estos deslizamientos. Estos tres factores en general contribuyen a que Puerto Rico sea un lugar sumamente susceptible a este tipo de evento.

En esta investigación se pretendía desarrollar una técnica de percepción remota para identificar los deslizamientos de terreno. El primer paso a seguir fue identificar los lugares donde existe este fenómeno utilizando fotografías aéreas toma-

das por una misión dirigida por el Cuerpo de Ingenieros entre el 2006 y 2007. Las fotografías fueron procesadas en el programa de ENVI 4.7, el cual tiene múltiples herramientas para trabajar con diferentes tipos de imágenes. En este caso se utilizaron métodos de clasificación supervisada para identificar los deslizamientos de terreno presentes en el área de estudio. Finalmente, se crearon imágenes en donde se identificaban los terrenos descubiertos, ya que esto es una pista para localizar los deslizamientos de terrenos activos en el lugar.

1.1. Área de estudio y su geología

Esta investigación se concentró en el municipio de Ponce (figura 1), el cual está caracterizado por la alta susceptibilidad a deslizamientos de tierra ya que el 56 % de los 301km cuadrados que componen el municipio tiene pendientes mayores de 10 grados (Larsen et al., 2004). Según Larsen et al., 2004 el 34 % de la población de Ponce vive en una zona de alto riesgo de deslizamientos de tierra durante llu-

vias, un 24 % tiene un riesgo moderado y un 9 % tiene un bajo riesgo a deslizamientos de tierra en su zona. En la figura 1 se puede ver una mapa topográfico del municipio de Ponce, el cual indica la susceptibilidad a deslizamientos de tierra dependiendo el área donde se encuentren. Al ver estos datos se puede observar que los deslizamientos de tierra son bien comunes en este pueblo. Esto es debido a un factor adicional a los antes mencionados; a la geología presente en el lugar.

El norte del Municipio de Ponce está caracterizado por la roca ígnea que se encuentra en el área, la cual es fácil de erosionar y meteorizar creando granos redondos y un suelo de saprolita (Jibson, 1989). Cuando este suelo se satura con agua, debido a las lluvias, se vuelve inestable y baja las pendientes de las montañas, mejor conocido como un “debris flow” o “debris slide” (Jibson, 1989). Estos “debris flow” son los deslizamientos más comunes que hay en el área de Ponce (Jibson, 1989). En el 1979 hubo cientos de estos deslizamientos que fueron provocados por las grandes cantidades de lluvia de los huracanes Da-

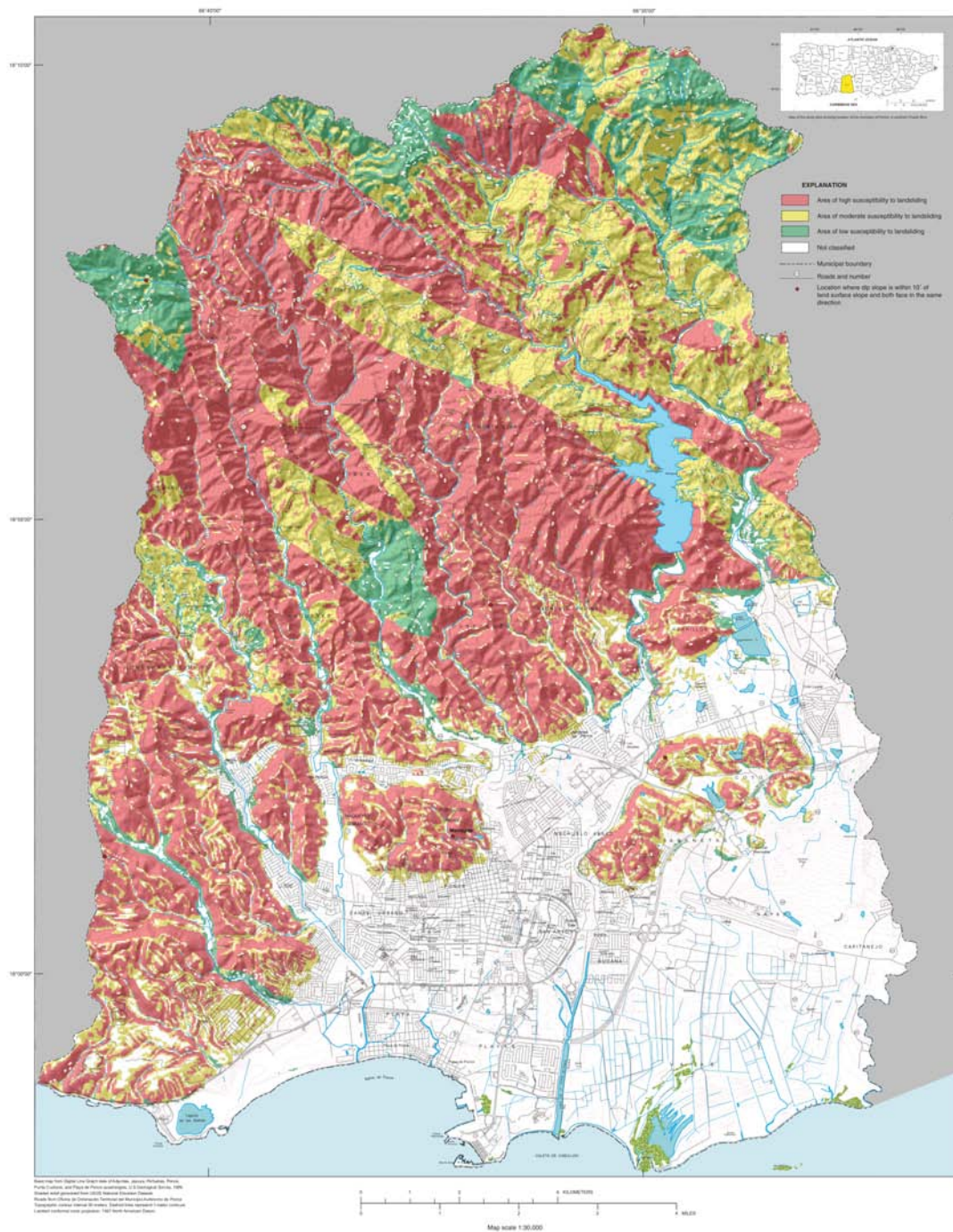


Figura 1: Mapa de susceptibilidad de deslizamientos de tierra provocado por lluvia en Ponce, Puerto Rico, por Larsen et al., 2004

vid y Frederic.

Las montañas de Ponce, en su mayoría, se componen de “limestone” que proviene de las formaciones de “Ponce limestone” y “Juana Díaz formation”. El “limestone” que se encuentra en esta zona produce capas débiles o permeables de residuos que son más susceptibles a caer pendiente abajo al momento de correr el agua sobre estas capas, creando un deslizamiento. En los casos de Mameyes y Cerca del cielo estas comunidades se encuentran en un bloque de “limestone” el cual se desliza en una anticlina de la formación de “calcareous unit”, la cual se compone principalmente de arenisca y tiene una grosor de 150 metros. Al deslizarse estos grandes bloques provocan grandes catástrofes, que fue lo que ocurrió en la comunidad de Mameyes en el 1985 (Jibson, 1986). Los “rock falls” en el área ocurren debido a la presión porosa del “limestone”, o sea está roca débil y fracturada, cuando los poros se llenan de agua crean presión haciendo que ésta se rompa y ocurra el “rock fall”.

En resumen, se puede ver que la geología presente en el lugar hace que sea más

susceptible a los deslizamientos de tierra y hay muchas investigaciones sobre esta área que explican la dinámica geológica presente mucho más detallada como Joyce, 2008. Como objetivo principal en esta investigación se pretendía enseñar la eficiencia del programa de ENVI 4.7 para identificar los deslizamientos de tierra en las fotografías aéreas de esta zona.

2. Métodos

Para realizar la identificación de deslizamientos de terreno se utilizó el programa ENVI 4.7 para procesar fotos aéreas de Ponce, PR que fueron tomadas durante una misión del Colegio de Ingenieros durante el periodo del 16 de noviembre de 2006 al 17 de febrero de 2007. Los instrumentos utilizados en la misión fueron dos “Leica ADS40 multi-spectral scanners”, los cuales fueron capaces de tomar fotos con una resolución espacial de 1 pie, resolución espectral de tres bandas en la región del visible (roja, azul y verde) en el espectro electromagnético y escala de 1:4,800 la cual fue determinada

por el largo focal del instrumento utilizado y la altura de vuelo el avión. Las fotos fueron organizadas por cuadrángulos (fig. 2), así que para objetivos de este estudio se utilizaron solo aquellas fotos bajo los cuadrantes PS y PO. Dada la situación de que la tan alta resolución espacial provocaba que las imágenes fueran realmente grandes, se procedió a seleccionar un área de estudio en el cual hubiera tanto áreas montañosas como lugares habitados por grandes cantidades de personas. La razón para escoger esas zonas era simplemente que el interés de los autores era estudiar los deslizamientos de terreno en áreas vulnerables o áreas que pudieran poner en riesgo la vida humana.

Luego de seleccionar el área de estudio, se realizó un mosaico (fig. 3a) con las fotos de los cuadrantes ya mencionados, y de paso se le bajó la resolución de un pie a tres metros para facilitar el procesamiento de las fotos. Entonces, se procedió a realizar clasificaciones multiespectrales con la imagen formada con el mosaico. La clasificación no supervisada no demostró ser muy eficiente, pues aún con el tamaño de

los pixeles siendo reducido, los valores digitales de dichos elementos de la imagen provocaban que los resultados no fueran coherentes. Por lo tanto, sólo se enfocó en realizar clasificaciones supervisadas utilizando los métodos de “Minimum Distance” y “Maximum Likelihood.”

Las tres clases utilizadas para entrenar el programa fueron: bosque, ciudad y terreno descubierto (fig. 3b). Bajo esta última clase se debían clasificar e identificar los deslizamientos de tierra.

El próximo paso a seguir fue entonces seleccionar comunidades específicas dentro del área de estudio. Dichas comunidades se identificaron utilizando tanto el mosaico original como las clasificaciones realizadas con dicha imagen. Las áreas seleccionadas fueron identificadas como: Cerca del cielo, Mameyes, y Vertedero (fig. 4a) . El nombre asignado es descriptivo de los sectores o lugares que formaban parte de las áreas escogidas. Más adelante, se procedió a realizar los cortes de imagen de esas tres comunidades, utilizando las fotos con la resolución espacial original (1 pie). A dichos cortes se les realizaron las

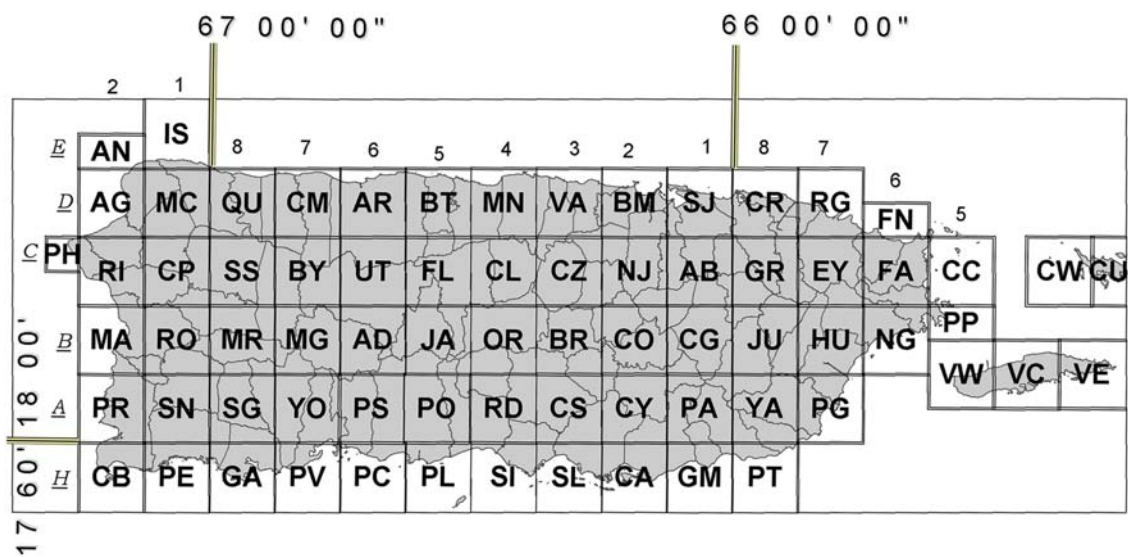


Figura 2: Cuadrángulos en los que se dividieron las fotografías

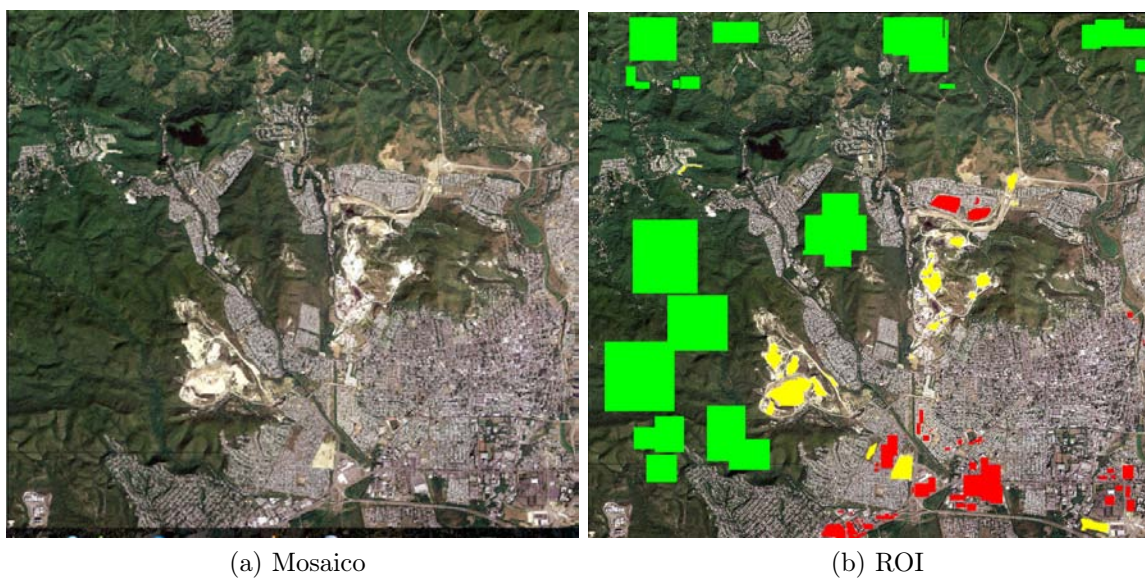


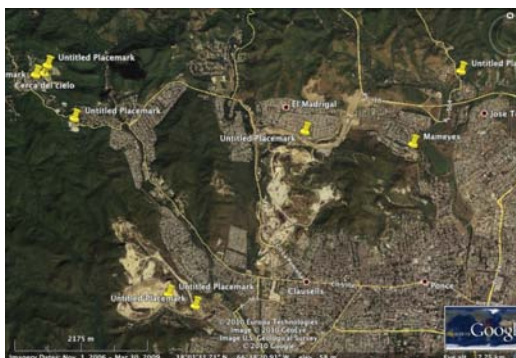
Figure 3: Área estudiada

mismas clasificaciones multiespectra-
 les mencionadas anteriormente. Esto fue
 realizado con los objetivos de comparar
 los efectos del cambio en resolución espa-
 cial, y dicho sea de paso, estudiar con más
 detalles los posibles deslizamientos que ya
 habían sido identificados en esas zonas.

Finalmente, se visitaron las tres comunidades para tomar datos de campo con un GPS para validar los resultados obtenidos (fig. 4b).



(a) Comunidades

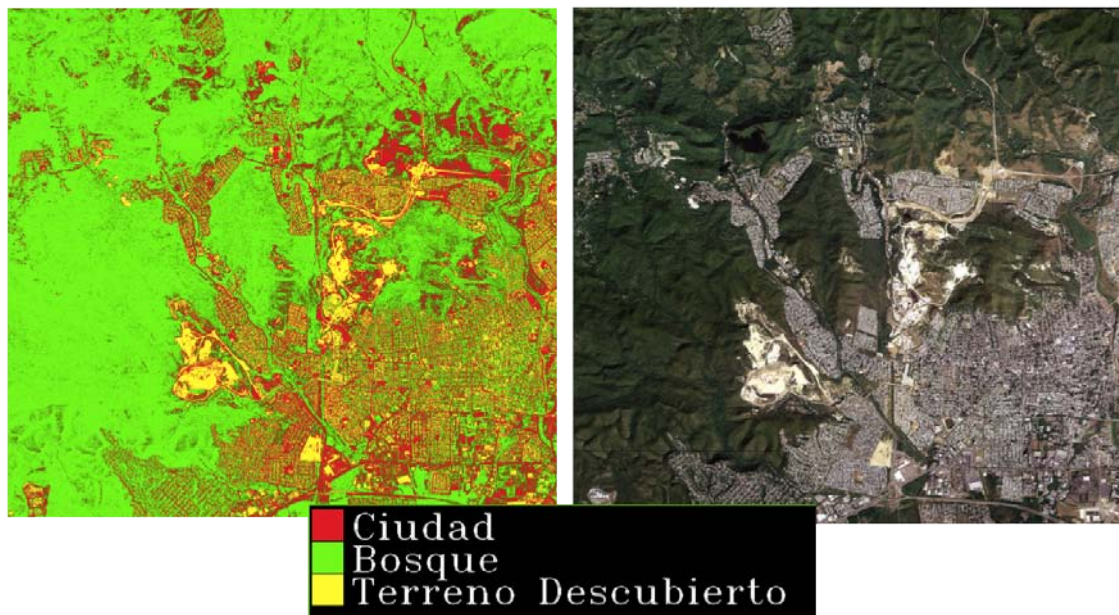


(b) Lugares de interés para visitar

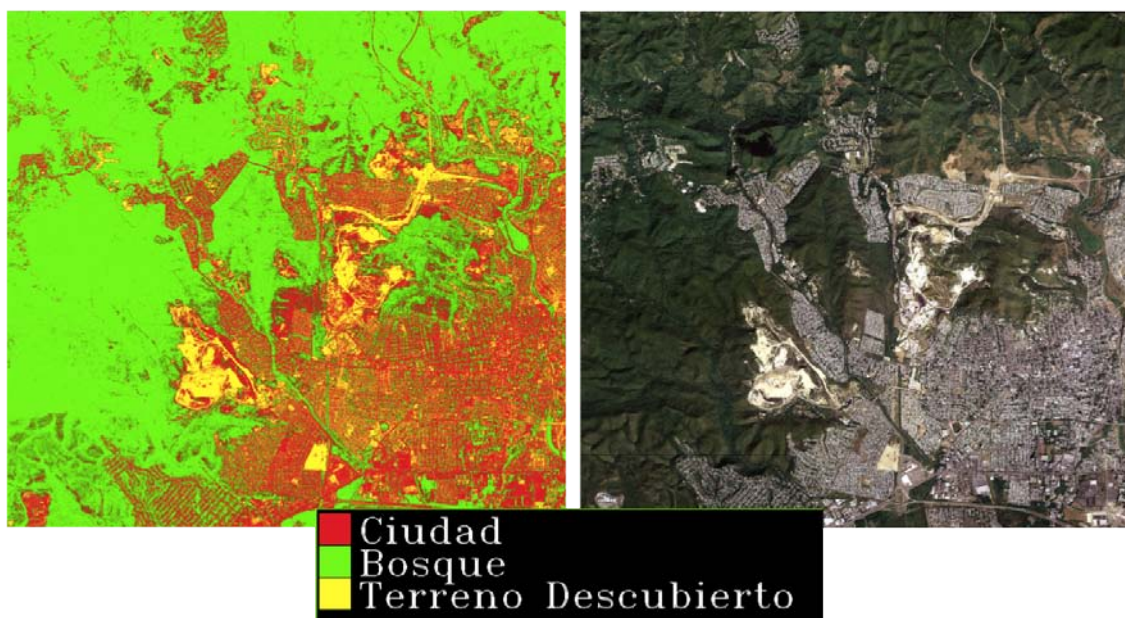
Figure 4: Área estudiada en la ciudad de Ponce.

3. Resultados

3.1. Mosaico



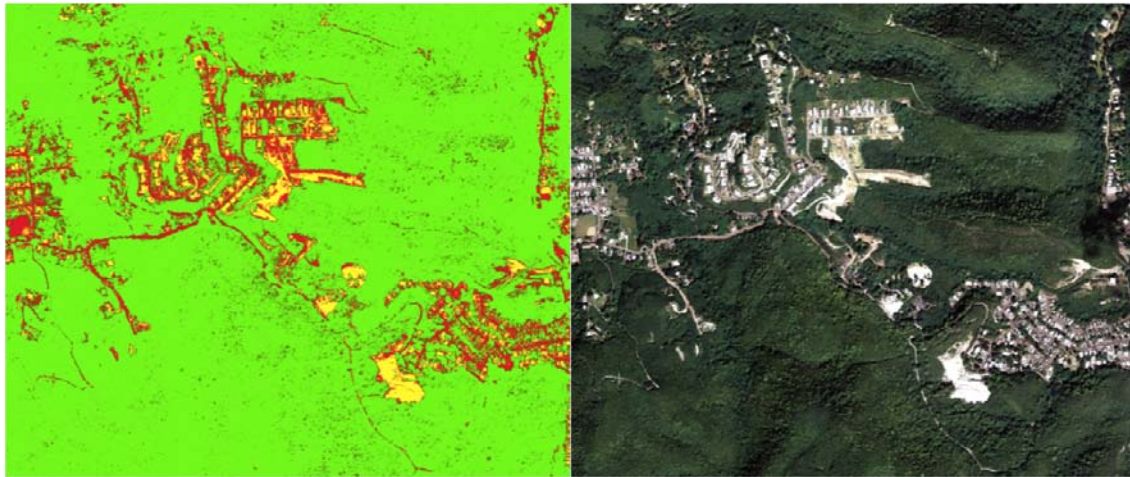
(a) Minimum Distance



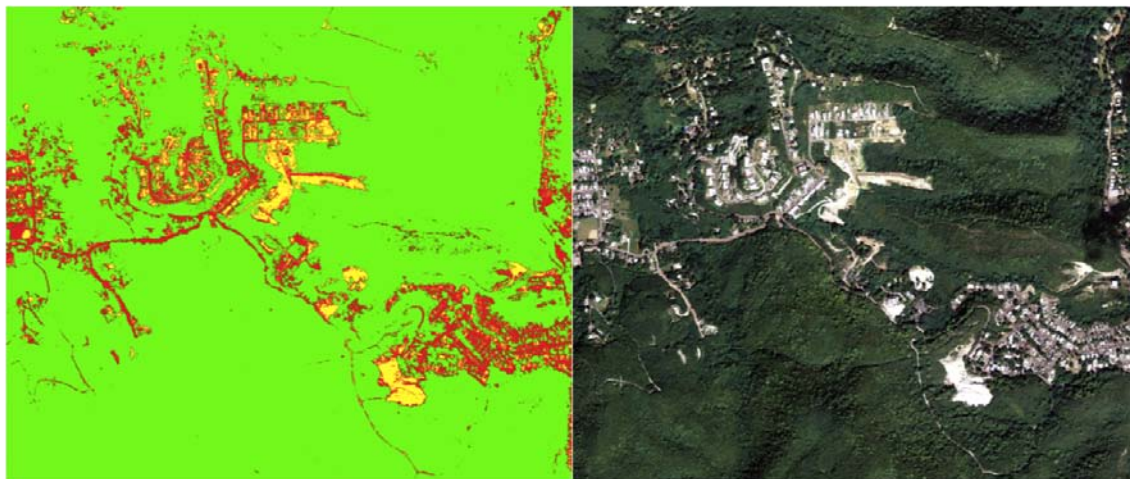
(b) Maximum Likelihood

Figura 5: Clasificaciones Supervisadas del Mosaico del área de estudio

3.2. Cerca del cielo



(a) Minimum Distance



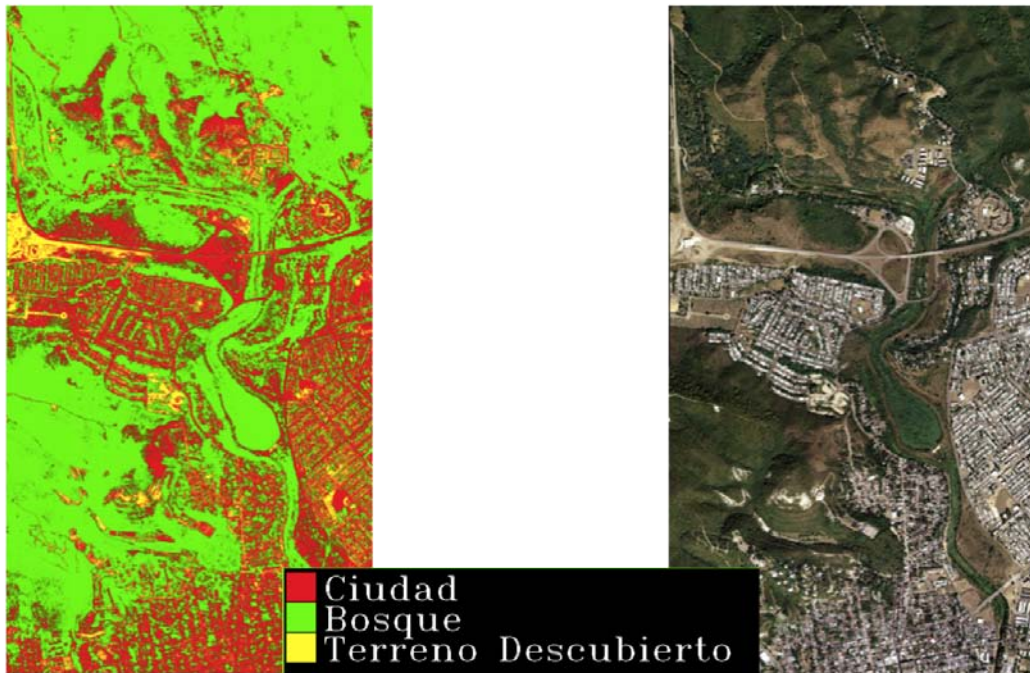
(b) Maximum Likelihood

Figura 6: Clasificaciones Supervisadas de Cerca del cielo

3.3. Mameyes



(a) Minimum Distance



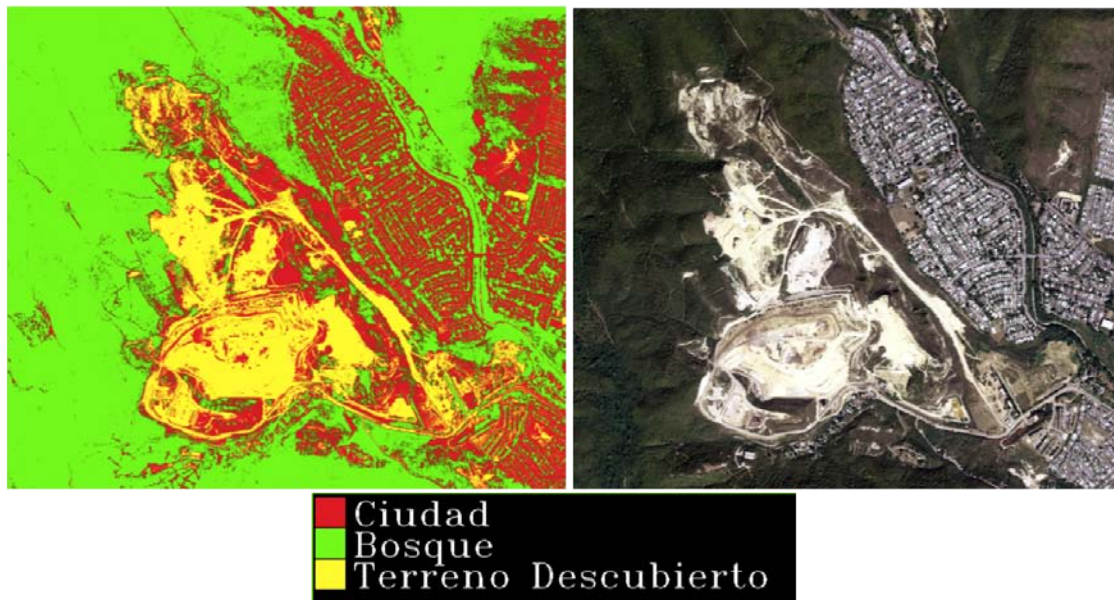
(b) Maximum Likelihood

Figura 7: Clasificaciones Supervisadas de Mameyes

3.4. Vertedero



(a) Minimun Distance



(b) Maximun Likelihood

Figura 8: Clasificaciones Supervisadas del Vertedero

3.5. Validación de datos

#	Lugar	Latitud (N)	Longitud (O)	Precisión	Clasificación
1	Cerca del cielo	18°02'21.3"	66°40'35.5"	±4m	Terrenos descubiertos
2	Cerca del cielo	18°02'27.5"	66°40'33.3"	±6m	Bosque
3	Cerca del cielo	18°02'29.5"	66°40'25.5"	±6m	Ciudad
4	Construcción de 3 edificios	18°02'03.9"	66°40'13.0"	±5m	Terrenos Descubiertos
5	Mameyes	18°01'25.8"	66°37'13.3"	±18m	Ciudad/Terrenos Descubiertos
6	Montañas	18°02'31.1"	66°36'33.8"	±8m	Ciudad
7	Carretera nueva	18°01'52.6"	66°37'51.1"	±7m	Terrenos Descubiertos
8	Vertedero	18°00'25.0"	66°39'18.3"	±7m	Terrenos Descubiertos
9	Deslizamiento/ vertedero	18°00'18.5"	66°38'57.7"	±8m	Terrenos Descubiertos

Cuadro 1: Puntos de validación del área de estudio

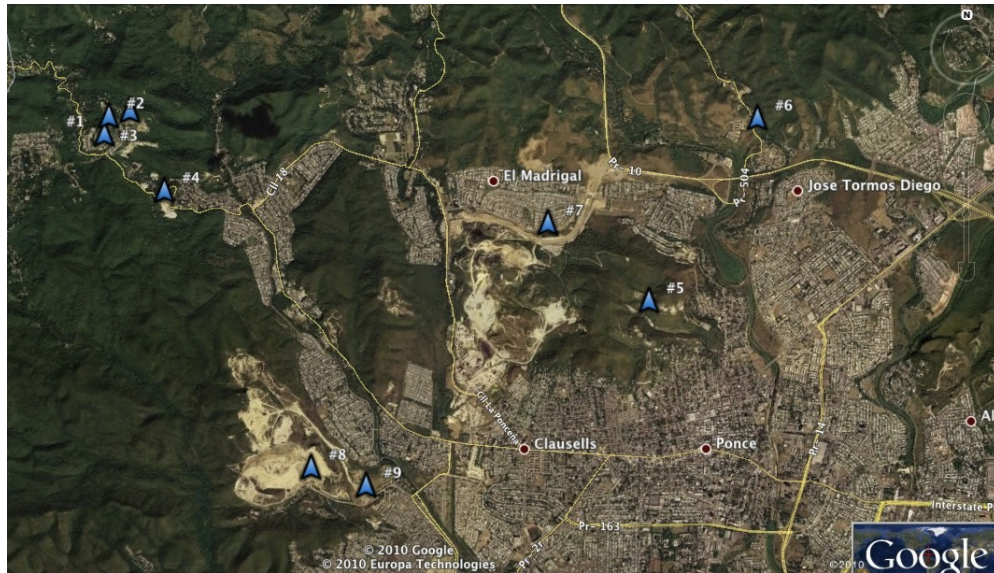


Figura 9: Localizaciones de los puntos

4. Discusión

terreno.

4.1. Mosaico

4.1.1. Minimum Distance

En la fig. 5a se pueden apreciar los resultados obtenidos para este caso. En el cuadrante derecho se muestra el mosaico preparado y en el cuadrante izquierdo se presenta la clasificación supervisada utilizando la técnica de “Minimum Distance” (el mismo formato se utiliza para presentar los resultados en las demás secciones). Se puede apreciar en la imagen que las clases fueron muy bien identificadas, especialmente la clase de bosque. Se pueden identificar varias áreas de deslizamientos significativos, o al menos de terreno descubierto ya que si se observa bien la imagen original, se puede ver que algunas de esas áreas corresponden a construcciones de complejos de viviendas o carreteras. Sin embargo, también se puede notar que en las áreas de ciudad, algunos pixeles fueron clasificados como terreno descubierto. Esto se debió a que dichos pixeles tenían valores digitales similares o iguales a los valores digitales de los deslizamientos de

4.1.2. Maximum Likelihood

En este caso (fig. 5b) se pueden apreciar resultados bastante similares a los que se obtuvieron utilizando la otra técnica de clasificación supervisada. No obstante, es evidente que con esta técnica se redujo la cantidad de pixeles que fueron clasificados como terreno descubiertos en zonas donde en la imagen original sólo se ven residencias. Además, se puede observar que los deslizamientos más prominentes, aquellos que fueron identificados en la fig. a, fueron clasificados como terreno descubierto también. Sin embargo, hacia la parte noroeste de la imagen, hay ciertas áreas que fueron identificadas como terreno descubierto en este caso, pero como ciudad en la clasificación anterior. Más adelante se le prestará mayor atención a esa área en particular.

4.2. Cerca del cielo

Esta zona fue escogida por dos razones. Primero, porque se tenía conocimiento previo de que esta comunidad está siendo afectada por un deslizamiento activo y segundo, porque en el mosaico se pudo identificar el deslizamiento con ambas clasificaciones realizadas.

4.2.1. Minimum Distance

La fig. 6a muestra el corte realizado a la imagen original para incluir sólo la comunidad de Cerca del Cielo (resolución espacial: 1 pie) y también muestra la clasificación supervisada utilizando el método de “Minimum Distance.” En general, se pueden identificar cuatro áreas de deslizamientos mayores, en adición a otras áreas de deslizamientos menores. Nuevamente se observan zonas de terreno descubierto en zonas urbanas debido a la razón explicada en la sección 4.1.1. La mayoría de los deslizamientos se encuentran en zonas aledañas a comunidades de viviendas. Esto no fue tan apreciable en la clasificación

del mosaico.

4.2.2. Maximum Likelihood

Los resultados utilizando la técnica de “Maximum Likelihood” para la comunidad de Cerca del Cielo (fig. 6b) se parecen a los resultados mostrados en la figura 5b en el sentido de que disminuyó la cantidad de píxeles clasificados como terreno descubierto en las zonas urbanas. Además, en las áreas montañosas disminuyó también la cantidad de píxeles clasificados como ciudad. Se pueden observar los mismos deslizamientos que en el caso anterior (fig. c), los cuales están ubicados cerca de comunidades de viviendas y carreteras, representando así un peligro tanto para los que residen como para los que transitan por esas zonas.

4.3. Mameyes

Esta zona fue escogida accidentalmente, ya que se pretendía estudiar la comunidad de “Mameyes Nuevo” y las zonas montañosas al noreste del área de estudio

mostrada en el mosaico (sección 4.1.2), pero resultó incluir también el sector de “Mameyes viejo” que fue afectado por el desastre del 1985 (fig. 7b) .

4.3.1. Minimum Distance

Primeramente, se aprecia que en la zona de “Mameyes viejo” aún hay áreas de deslizamientos, pero algunas áreas fueron clasificados bajo la clase de ciudad. Además, en esta imagen se ve ahora que las zonas montañosas al norte fueron clasificadas como ciudad, y sólo una pequeña parte fue clasificada como terreno descubierto y algunos pixeles también fueron clasificados como ciudad. En la imagen original se aprecia la construcción de una nueva vía de rodaje, la cual fue clasificada como ciudad en su mayoría, aunque parte fue clasificada como terreno descubierto. Por lo tanto, esa zona no se consideró como un deslizamiento de terreno.

4.3.2. Maximum Likelihood

Esta clasificación (fig. 7a) identificó muy bien las zonas de ciudad y las distinguió bastante de zonas de terreno descubierto. Las áreas de vegetación se clasificaron excelentemente bajo la clase de bosque. El área de “Mameyes viejo” también presenta aquí zonas de deslizamientos de terreno. En la zona de construcción de la nueva carretera apareció un área mayor de terreno descubierto, pero ya se explicó anteriormente que es sólo parte de la construcción. Las montañas al norte también fueron clasificadas como ciudad al igual que con la otra técnica de clasificación multiespectral (fig. 7b). Sin embargo, una cantidad mayor de pixeles fue clasificada como terreno descubierto en esa misma zona, aunque al compararse con la imagen original se aprecia que esos pixeles corresponden a un complejo de viviendas. Dada la situación que esa zona no presenta características similares a los otros deslizamientos, se optó por incluir esa área en los lugares donde se pretendía tomar datos de campo para la validación de resultados.

En esa sección se aclara la duda sobre lo que había realmente en esas montañas. los pixeles en las zonas urbanas clasificados como deslizamientos.

4.4. Vertedero

Al momento de elegir esta comunidad los autores desconocían que era un vertedero, ya que en la imagen original presenta características similares a otras áreas de construcción. Así que basados en esa teoría se realizó la clasificación multiespectral.

4.4.1. Minimum Distance

La figura 8a muestra el corte de la foto aérea original y la clasificación realizada. En general, se puede apreciar una zona de terreno descubierto principal con otras áreas similares y aledañas. Los “caminos” fueron clasificados como terrenos descubiertos también. Al noreste de la imagen hay un área parecida a las áreas montañosas discutidas en el caso de Mameyes, pero en este caso fueron clasificadas como bosque y unos pocos pixeles como ciudad. Se observa, además el mismo problema de

4.4.2. Maximum Likelihood

Al igual que en casos anteriores, en la fig. 8b se puede ver que los resultados arrojados al utilizar el método de “Maximum Likelihood” muestran menos pixeles clasificados como terreno descubierto en las zonas urbanas. Los deslizamientos principales fueron muy bien identificados, pero hay zonas clasificadas como ciudad en las áreas montañosas. Además, el área al sureste de la imagen muestra zonas de terreno descubierto que en la imagen anterior fueron clasificadas como ciudad. Al comparar con la imagen original, se observa que evidentemente esos pixeles correspondían a la clase de terreno descubierto. Estos detalles no habrían podido ser distinguidos en el mosaico que se realizó al reducir la resolución espacial de 1 pie a 3 metros.

4.5. Validación de resultados

La validación de resultados es una parte esencial en este proyecto, pues como ya se ha mencionado hay muchas áreas que fueron identificadas como deslizamientos, pero al mirar en la imagen original parecen ser construcciones, montañas u otros lugares hasta en zonas urbanas. La figura 9 muestra una imagen de Google Earth con los lugares visitados. Las coordenadas exactas fueron tomadas con un GPS y en la tabla. 1 se presentan las mismas. En dicha tabla también se presenta una columna en la que se especifica la clase bajo la cual había sido clasificada el área donde se tomaron las medidas.

Los primeros tres puntos en la tabla corresponden a medidas tomadas en la comunidad de Cerca del Cielo. Dicha comunidad está siendo afectada por un deslizamiento de terreno activo. De hecho, el deslizamiento principal fue identificado bajo la clase de terreno descubierto, a pesar de que ya han transcurrido aproximadamente 4 años desde la fecha en la que tomaron las fotos. Sin embargo, hubo un deslizamiento que estaba cubierto por

árboles y por ende, el mismo fue identificado por ENVI bajo la clase de bosque. El tercer punto fue tomado en una calle donde las construcciones habían sido paralizadas. Este punto fue clasificado como ciudad, a pesar de que también había terreno descubierto pero que no presentaba características similares a los otros deslizamientos de terreno.

El próximo punto también estaba ubicado en el corte de foto que se le asignó el nombre de Cerca del Cielo. En las clasificaciones supervisadas éste fue identificado como uno de los deslizamientos principales. Cuando se realizó la validación de datos se encontró que realmente había una construcción de tres edificios. Sí había deslizamientos en la zona, pero éstos fueron provocados por el proyecto de construcción.

El quinto punto fue ubicado en la comunidad de Mameyes. Como ya fue mencionado, los autores estaban en la búsqueda del barrio “Mameyes nuevo,” pero para su sorpresa terminaron tomando datos en un totalmente abandonado “Mameyes viejo.” En la zona se pudieron perci-

bir algunas zonas de deslizamientos, edificios abandonados y mucha vegetación. Esta zona fue clasificada por ENVI como ciudad y en otros casos como terrenos descubiertos.

El sexto punto también corresponde a la comunidad de Mameyes. Sin embargo, los datos fueron tomados en las zonas montañosas que en algunos casos, como por ejemplo en el mosaico, fueron clasificadas como ciudad con un método mientras que utilizando otro método fueron identificadas como terreno descubierto. Cuando los autores llegaron al lugar se toparon con que dicha zona no representaba ni ciudad ni terreno descubierto; simplemente la vegetación en la zona no era abundante.

El punto # 7 fue seleccionado para validar los datos en la zona de la construcción de la vía de rodaje. En la actualidad ya la carretera está en uso y hay algunas zonas de terreno descubierto que, al igual que en la construcción de edificios, fueron provocados por la necesidad que requería el proyecto. En la clasificación multiespectral esa zona fue identificada como terreno

descubierto en el mosaico, pero como ciudad o terreno descubierto en las otras clasificaciones de la comunidad de Mameyes.

Los últimos dos puntos corresponden al vertedero. Los autores identificaron esa zona como una construcción en las imágenes originales, pero para sorpresa de los mismos se encontraron que realmente había un vertedero allí. Este es otro caso donde el terreno descubierto corresponde a una acción del hombre. Sin embargo, unos metros antes de llegar al vertedero, se encontró un deslizamiento de terreno activo. Esa zona fue clasificada como terreno descubierto en algunas clasificaciones, aunque en los cortes de imagen con resolución de 1 pie, algunos píxeles fueron clasificados como ciudad al utilizar el método de “Minimum Distance.”

5. Conclusiones & Recomendaciones

La clasificación supervisada por medio del programa de ENVI 4.7 es una técnica buena para identificar los deslizamientos de terreno preliminarmente, pero ésta pre-

senta sus errores que hacen que necesite ser verificada por otros medios. Esta herramienta sólo puede identificar los pixeles entrenados como terreno descubierto, pero no siempre esto representa un deslizamiento como se observó en los resultados, que algunos pixeles clasificados bajo esa clase correspondían a construcciones, y algunas casas tenían valores digitales similares a los del terreno descubierto. También existe el problema de que algunos deslizamientos no están muy activos y están cubiertos por vegetación, por lo cual fueron clasificados en otras clases. La mejor técnica para asegurarse de que si un lugar era un deslizamiento de terreno era por medio de la validación de datos, que se pudo agilizar ya que las clasificaciones indicaban las áreas de interés y se podía ir directamente al lugar.

En general se pudo observar que la técnica de “Maximun Likelihood” fue la que produjo los mejores resultados, ya que se acercaban más a la realidad. También se pudo observar que tener una buena resolución espacial ayuda a tener resultados más realísticos, pero tales imágenes son mu-

cho más difíciles de procesar por la cantidad de tiempo que toma. Sin embargo, se pueden seleccionar subregiones de estudio, como las comunidades estudiadas en este trabajo, para las cuales las imágenes no serán de un tamaño muy grande y podrán ser procesadas para estudiar aspectos específicos de esas subregiones.

Para futuras investigaciones se recomienda utilizar imágenes con mayor resolución espectral, ya que si se tiene la banda infrarroja en las fotografías se puede utilizar el método de índice de vegetación lo cual puede ayudar también a identificar los deslizamientos. También es recomendable que las fotos sean más recientes para que la validación arroje mejores resultados ya que se podrá probar lo que había presente en el momento, o en un tiempo no muy lejano, en que fueron tomadas.

Referencias

- [1] Larsen, M.C., Torres-Sánchez, A.J., 1998. The frequency and distribution of recent landslides in three montane tropical regions of Puerto Rico. *Geomorphology* 24(4), 309-331.
- [2] Larsen M.C., Santiago, M., Jibson,

- R., 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.
- [3] 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.
- [4] Jibson, R.W., 1989. Debris flows in southern Puerto Rico. Geol. Soc. Am., Special paper 236, 29-55.
- [5] Joyce, J., 2008. Geology of the Cerca del Cielo landslide site. Geotechnical Report on Landslide Investigation, Analyses and Remedial Measures at Cerca Del Cielo Community Tallaboa Ward, Ponce, Puerto Rico, Suelos Inc., May 2008 (Internal engineering report, not formally published)
- [6] Krushensky, R., & Watson, M., 1975, Geologic Map Of The Ponce Quadrangle, Puerto Rico: Commonwealth of Puerto Rico & Department of Natural Resources.
- [7] Wang, G.Q., 2010, Kinematics of the Cerca Del Cielo, Ponce, Puerto Rico landslide extracted from long-term continuous GPS monitoring (Manuscript).