

ZONIFICACIÓN DE AMENAZAS NATURALES EN LA CUENCA DEL RÍO SAMALÁ Y ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD Y RIESGO EN LA POBLACIÓN DE SAN SEBASTIÁN RETALHULEU, GUATEMALA

Manolo Barillas-Cruz¹, Cees van Westen², Elfego Orozco³, Ivo Thonon⁴, Estuardo Lira¹, Graciela Peters Guarín² y Pedro Tax⁵

¹ Oficina Regional USGS, Guatemala

Correo Electrónico: embarillas@intelnet.net.gt

² International Institute for Geo-information Science and Earth Observation, Enschede, The Netherlands

³ Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria, Facultad de Ingeniería, Campus Central Universidad de San Carlos, Guatemala

⁴ Facultad de Ciencias Geográficas, Universidad de Utrecht, Utrecht, Los Países Bajos

⁵ Depto. de Hidrología, INSIVUMEH, Guatemala

RESUMEN

Se realizó el análisis de amenazas naturales por inestabilidad de laderas, inundaciones, ocurrencia de flujos piroclásticos y lahares, con el propósito de cuantificar el impacto que estos fenómenos tienen sobre las más de 300,000 personas que habitan la región. La dinámica geohidrológica de la cuenca del río Samalá (de 1,500 km²) y del complejo volcánico Santa María-Santiago provoca la ocurrencia periódica de oleadas y flujos piroclásticos, lahares e inundaciones repentinas (*flash floods*) que afectan la infraestructura básica (Carretera Panamericana y Puente "Castillo Armas"), centros poblados (principalmente San Felipe, San Sebastián y Retalhuleu) y, en general, la actividad agrícola y ganadera de la región.

Para la determinación de las planicies de inundación del río Samalá se utilizó el método clásico de cálculo de caudales máximos a partir del procesamiento de series de datos históricos para períodos de 100, 50, 25 y 10 años del propio río o cuencas vecinas. Los caudales se utilizaron para un modelado espacial por medio del programa HEC-RAS. Se logró determinar que las crecidas máximas del río Samalá no afectan directamente a San Sebastián, pero pueden provocar enormes daños a la Carretera Panamericana.

El análisis de la inestabilidad de laderas se realizó en la subcuenca del río Nimá I, por ser una de las mayores fuentes de detritos que forman flujos de lodo encausados al río Samalá. Se utilizó un modelo semideterminístico en ambiente SIG llamado *Catch*, que simula el comportamiento de las laderas durante la ocurrencia de deslizamientos. Aparentemente, las mayores inestabilidades en la subcuenca no suceden durante fenómenos extremos (como el Huracán Mitch de 1998); es mucho más importante el comportamiento de la lluvia en períodos anteriores.

Se utilizó el modelo del "Cono de Energía" para determinar las zonas que serían afectadas por flujos piroclásticos en los alrededores del Volcán Santiaguito, a partir de ecuaciones que relacionan la altura teórica de la columna eruptiva, la energía de colapso, la configuración topográfica del terreno y la ubicación del cráter. A pesar que los grandes centros urbanos no serían afectados directamente por columnas de hasta 2,500 m de altura, se considera que al menos 120 poblados menores podrían sufrir algún impacto directo o indirecto.

Finalmente, se determinaron los niveles de riesgo en el poblado de San Sebastián ante inundaciones como las ocurridas durante el Huracán Mitch. Se realizaron entrevistas directas a pobladores afectados por dicho evento. En estas se investigó el daño causado a las viviendas y su contenido, la altura del nivel de agua y otros parámetros de calidad de la construcción y factores socio-económicos. El resultado de la integración de estos parámetros por medio de curvas o funciones de vulnerabilidad demuestra que para este tipo de eventos se pueden esperar pérdidas combinadas de hasta 10 mil dólares por vivienda, principalmente por los daños esperados en los contenidos de las viviendas más que en la edificación en sí.

INTRODUCCIÓN

El registro de eventos catastróficos en el complejo volcánico Santa María-Santiago se remonta a principios del siglo pasado, cuando sucedió la poderosa erupción pliniana del Volcán Santa María (25 de octubre de 1902) considerada como una de las diez más grandes del siglo, con un VEI=6 (Newhall y Self, 1982), columnas

eruptivas de hasta 28 km de altura, producción de entre 5-10 km³ de material dacítico y al menos 5,000 personas muertas (Sapper, 1903; Sapper, 1904; Rose, 1972). A finales de 1922, y en el interior del cráter producido por la erupción recién pasada, se empezó a formar un domo extrusivo dacítico que se ha mantenido activo desde entonces y al cual se le dio por nombre Santiaguito. Justo 7 años después de su nacimiento, el Volcán Santiaguito registró uno de

sus eventos más catastróficos, ya que produjo un flujo piroclástico de considerable volumen ($1,5 \times 10^7 \text{ m}^3$) que se extendió a más de 10 km de distancia y pudo haber matado desde varios cientos hasta 5,000 personas (Mercado *et al.*, 1988). Una gran cantidad de trabajos científicos han contribuido a ampliar el conocimiento sobre este activo complejo volcánico (Sapper, 1903; Sapper, 1904; Rose, 1987a y b).

A pesar de los grandes eventos ya mencionados, está bien claro para muchos autores y para los pobladores de la región que los materiales volcánicos aportados a la red hidrográfica local constituyen el mayor problema hacia las poblaciones, infraestructura crítica y actividad agrícola de la zona, ya que año con año han ocurrido y ocurren destructivos “flujos de lodo” que han provocado destrucción de pueblos enteros como en El Palmar entre 1983 y 1984 (5,400 habitantes afectados), daños considerables a la Carretera Panamericana entre 1988 y 1993 y amenazan con seguir perturbando la actividad socio-económica de la región. No se descarta la posibilidad de que vuelvan a ocurrir grandes erupciones en el complejo volcánico y por ello se siguen monitoreando los eventos hidrometeorológicos periódicos que en conjunto mantienen bajo constante amenaza a más de 300,000 personas.

El diseño e implementación de medidas de mitigación y protección ante los fenómenos de impacto (lahares e inundaciones) debe estar basado en consideraciones técnicas emanadas de estudios y análisis científicos, ya que hasta el momento, las bordas de protección construidas en la margen occidental del río Samalá (con un costo de hasta 100 mil dólares) y las actividades de dragado en el tramo del Puente “Castillo Armas” (que le cuesta al Gobierno Local hasta 500 mil dólares anuales) no han sido suficientes para contenerlas. Al mismo tiempo, el conocimiento de las zonas de afectación de los diferentes fenómenos (Mapas de Amenaza) permitirá a los Organismos Nacionales la optimización de los recursos y fortalecer los niveles de organización comunitaria y preparación ante emergencias de todas las comunidades amenazadas que, en su conjunto, pueden sobrepasar los 120 centros poblados (entre fincas, caseríos, aldeas y ciudades).

DESCRIPCIÓN DEL AREA DE ESTUDIO

La cuenca del río Samalá abarca una superficie aproximada de 1,500 km², en su mayoría comprendidos en el departamento de Retalhuleu y en menor parte Quetzaltenango, con una longitud máxima de 100 km y un ancho máximo aproximado de 35 km. Está comprendida por las sub-cuencas principales Nimá I, que incluye los ríos Nimá I, Nimá II y El Tambor, e Ixpatz. (Figura 1).

METODOLOGÍAS DE ANÁLISIS

ANÁLISIS DE LLUVIAS, CAUDALES E INUNDACIONES EN LA CUENCA DEL SAMALÁ

La estimación de caudales máximos se basó en el análisis regional de 24 series de crecidas registradas en igual número de estaciones hidrométricas en cuencas de la Vertiente del Pacífico de Guatemala. El método consiste en obtener una ecuación que relacione el Caudal Máximo Medio (QMM) y el área de la cuenca, así como los caudales estandarizados en función de distribuciones de frecuencia. Se utilizaron 24 series de datos con diferente longitud de registro (entre 8 y 20 años) de 17 cuencas y sub-cuencas y la información de la estación Cantel (Cuenca Samalá) y la estación Caballo Blanco (Sub-cuenca Ocosito). Luego de la estandarización de las series de datos utilizando 4 distribuciones de frecuencia y ajuste de curvas regionales y curvas promedio se derivó la siguiente ecuación:

$$Q_{Tr} = QMM * k_{Tr}$$

donde: Q_{Tr} es el caudal correspondiente a diferentes períodos de retorno Tr ; QMM es la crecida índice (en este caso $681 \text{ m}^3/\text{s}$) y k_{Tr} es la crecida modular (o estandarizada).

Para la determinación de las planicies de inundación se utilizó el programa HEC-RAS, un modelo matemático hidro-dinámico que calcula las alturas de nivel de agua en función de caudales pre-establecidos a régimen permanente y las condiciones topográficas del cauce natural. Se utilizaron los caudales previamente calculados para 10, 25, 50 y 100 años de recurrencia y se determinaron las secciones transversales del cauce por medio de levantamiento topográfico convencional. Se utilizaron además los coeficientes de rugosidad de Manning (0.035 para cauce principal y 0.040 para planicies de inundación) y coeficientes de contracción y expansión del cauce (0.1 y 0.3 respectivamente). El modelado HEC-RAS se realizó para dos escenarios probables: para cauce actual con bordas de protección y para cauce hipotético sin bordas.

ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE LADERAS EN LA SUB-CUENCA DEL NIMÁ I

Se utilizó el modelo *Catch* (del vocablo anglo “*catchment*” que significa cuenca) el cual es un modelo semi-determinístico, es decir, que aplica ecuaciones físicas pero tiene una base conceptual. Este modelo simula cómo se comportan las laderas desde el punto de vista hidrológico y geodinámico. Para ello utiliza el módulo de hidrología subterránea y el de estabilidad de laderas. En el primero se incluyen la zona saturada y no-saturada del suelo y los procesos de infiltración y percolación. Con el segundo módulo se calcula el Factor de Seguridad a partir del concepto de la pendiente infinita y utilizando como datos de entrada los resultados del primer modelo (de Joode y van Steijn, 2003). Para ambos módulos se trabaja con datos de entrada tipo raster y datos numéricos al programa PCRaster (Wesseling *et al.*, 1996), el cual es un SIG matricial que permite

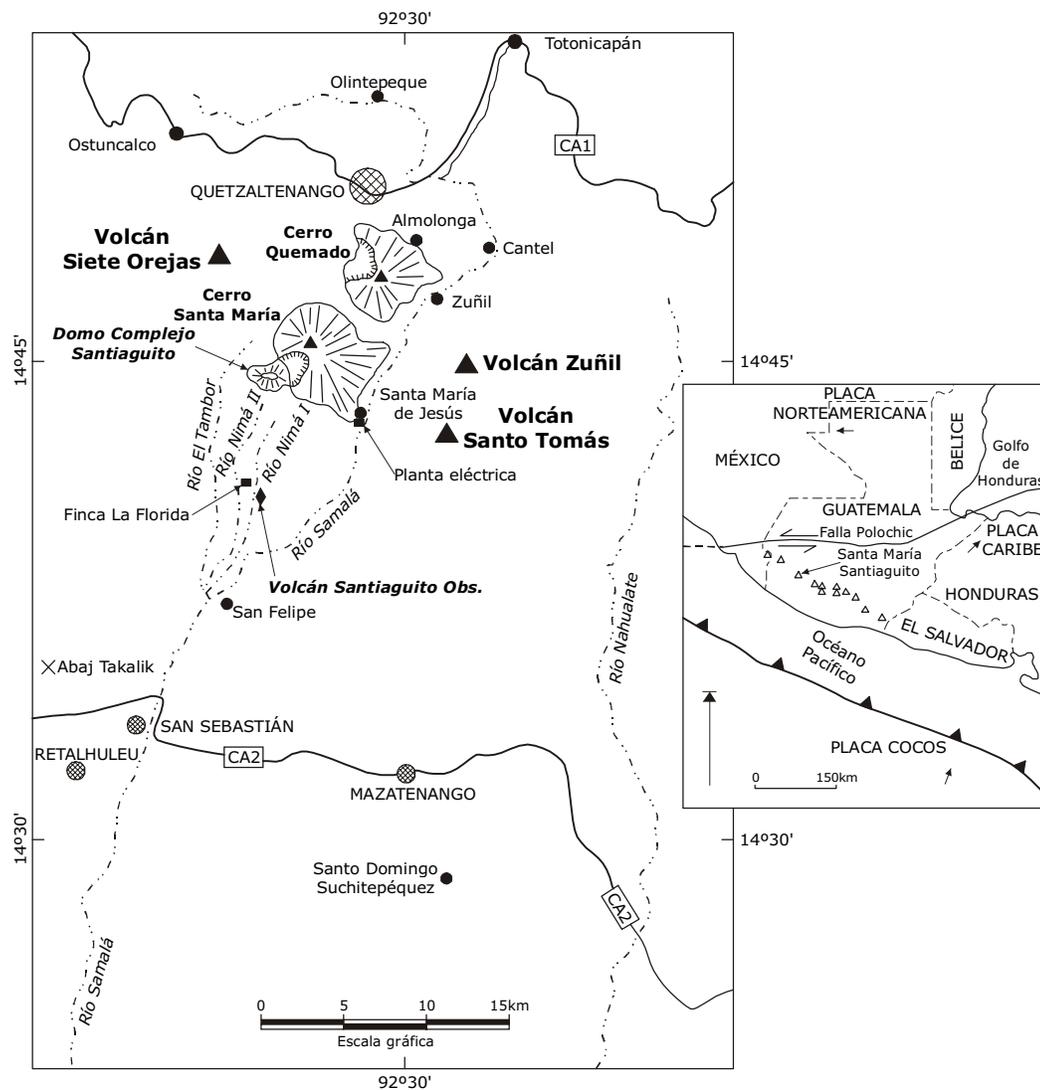


Figura 1. Mapa de ubicación general y elementos básicos del área. El complejo Santa María-Santiaguito forma parte del Cinturón Volcánico de Centro América originado por la influencia de la zona de subducción del Pacífico y su ubicación en la cabecera de la sub-cuenca Nimá I (ríos Nimá I, Nimá II y El Tambor) gobierna la ocurrencia periódica de eventos fluvio-volcánicos. Tomado de Rose (1987b).

correr modelos dinámicos y evaluar resultados en diferentes series de tiempo. Mayor información y detalles sobre este programa se pueden encontrar en <http://pcraster.geog.uu.nl>.

Para los cálculos del Módulo de Hidrología Subterránea se utilizaron los datos de precipitación para el año calendario 1998, con el propósito de evaluar no solamente el comportamiento de las laderas bajo condiciones lluviosas 'normales', sino también el efecto que produce una tormenta de gran intensidad (en noviembre de 1998 ocurrió el Huracán Mitch). El modelo sustrae la evapotranspiración de la cantidad de lluvia y el resto la infiltra en el suelo. La cantidad de agua que no puede ser almacenada en el suelo se elimina y se le considera como escurrimiento y ya no es considerada en las etapas posteriores. Para el cálculo de la percolación se toman en cuenta los parámetros de espesor del suelo, conductividad hidráulica saturada (K_{sat} , en mm/hr), contenido máximo de humedad (θ_{max} , adimensional), actual (AMC) y mínimo (θ_R). Uno de los objetivos de este módulo es calcular el espesor de la capa freática

como factor condicionante en la inestabilidad de las laderas. Este parámetro, junto a la gravedad, la pendiente, densidad, cohesión y ángulo de fricción interna (ϕ) se utilizan en el Módulo de Estabilidad de Laderas para el cálculo de la Presión de Poros (kPa) en el suelo y el Factor de Seguridad (F). El aumento del espesor de la capa freática en el suelo puede provocar que se vuelva inestable, ya que a mayor cantidad de agua hay menor fuerza de resistencia al fallamiento. Si el valor F de una celda en el modelo del terreno es menor que 1.0 se considera a esta celda inestable para una etapa de tiempo dada. Eso significa que existe la posibilidad que ocurra un evento de movimiento de ladera (deslizamiento o flujo de escombros). Si F es mayor que 1.0 se considera que la celda es estable y es improbable que ocurra un evento.

ANÁLISIS DE FLUJOS PIROCLÁSTICOS EN EL VOLCÁN SANTIAGUITO

Para este análisis se utilizó el Modelo del Cono de Energía (Malin y Sheridan, 1982) el cual considera que si una columna eruptiva o un domo colapsa, el flujo gravitacional que se genera se moverá hacia abajo del flanco del volcán bajo la influencia de la energía potencial y la gravedad. En el caso de eventos explosivos se adiciona un componente cinético a la energía del flujo provocando un desplazamiento ligeramente mayor (Sheridan, 1979). La aceleración de los flujos está gobernada entonces por la fuerza de la gravedad, la pendiente local del cono volcánico y sus alrededores y la tangente de la pendiente de la línea de energía, conocida como Coeficiente de Heim. Este concepto de la línea de energía define la relación entre la elevación de la columna de erupción (H) y la máxima distancia de desplazamiento del flujo piroclástico (L), es decir, trata de representar la tasa de disipación de la energía total del flujo.

Debido a que no se contó con los datos suficientes de los límites y alcances de los diferentes depósitos piroclásticos en el Volcán Santiaguito para calcular de forma precisa los parámetros de Heim se utilizaron los valores determinados por Sheridan (1979) para los eventos de 1973. Se evaluaron 7 escenarios diferentes en donde se variaron las alturas de columna eruptiva (desde 600 a 2,500 m). Los resultados obtenidos de cada escenario representan las áreas que serían afectadas ante la ocurrencia de flujos piroclásticos de diferente altura de columna y un coeficiente de Heim de 0.25 y 0.35.

EVALUACIÓN DE VULNERABILIDAD Y RIESGO EN SAN SEBASTIÁN

Para este análisis se realizó interpretación fotogeológica convencional para determinar patrones y efectos de daños por inundación en el tiempo. Se utilizaron fotografías aéreas de alta resolución para elaborar la base de datos catastral de manzanas, lotes y techos. Los atributos fueron recolectados por medio de entrevistas directas con personas de la comunidad.

Las entrevistas se centraron principalmente en la recopilación de datos de daños a viviendas y sus contenidos, altura de agua y otras características de la inundación provocada por el Huracán Mitch en 1998. También se colectaron datos relacionados con el material de construcción de las viviendas y parámetros socioeconómicos. La información de la altura del agua en diferentes puntos fue interpolada por el método de Krigging para generar un modelo de elevación digital de dicho evento.

Los datos recolectados del daño sufrido por edificios fueron graficados contra la altura del agua con el propósito de encontrar una relación. Igualmente, se hizo un graficado del daño sufrido por los edificios contra la distancia de los mismos a las corrientes de agua. Estas curvas de daños fueron convertidas en curvas de vulnerabilidad por medio de la valoración de 0 (sin daño) a 1 (daño total) con lo cual se produjo el Mapa de Vulnerabilidad de Edificios. La vulnerabilidad de los Contenidos de Edificios fue determinada basándose en los factores del valor de reemplazo del contenido y al porcentaje de daño de los contenidos estudiados. En ambos casos se definieron 4 clases socioeconómicas principales: Baja, Media-Baja, Media y Media-Alta. El valor de vulnerabilidad evaluado fue representado por el porcentaje de daños esperado para cada uno de los artículos para diferentes valores de altura de agua y luego multiplicados por el precio del artículo.

Debido a que no se pudo definir un período de retorno preciso para eventos como el de 1998 no fue posible calcular el riesgo total ante inundaciones en San Sebastián. En su lugar, se calculó la vulnerabilidad (daños) en las viviendas, contenidos y carreteras. Se obtuvieron algunos datos relacionados al valor comercial de los principales elementos en riesgo y se utilizaron para hacer las estimaciones de 'daño esperado' correspondientes.

RESULTADOS OBTENIDOS

Del análisis hidráulico realizado se determinó que la configuración actual de las bordas de protección permitiría contener crecidas con caudales de hasta Q_{50} – hasta 1,547 m³/s. Si las bordas actuales fueron reforzadas y se construyera un tramo nuevo de aproximadamente 800 m en la parte occidental entre las secciones 6 y 7 el área afectada por estas crecidas se podría limitar considerablemente (Figura 2). El peor de los escenarios, en el que sucediera un fallo de las bordas con caudales mayores de Q_{50} , afectaría las áreas cultivadas, los barrios periféricos de San Sebastián y un amplio tramo de la Carretera Panamericana. Aparentemente, el poblado de San Sebastián se ve más afectado por los eventos del río Ixpatz.

En el caso del análisis de laderas, se pudo determinar que las áreas más inestables durante la tormenta extrema del Mitch (entre 65-78 mm diarios, Fulgencio Garavito, INSIVUMEH, comunicación verbal, 2003) se ubican hacia la parte oeste de la cuenca, la cual está conformada principalmente por lavas de baja densidad y poco consolidadas. Se considera que la presión de poros es bastante alta en los escarpes rocosos, ya que el agua subterránea se concentra en estos lugares antes de drenar en el cauce de los ríos por lo que disminuye considerablemente el valor del Factor de Seguridad (F). El período total de inestabilidad para el año Mitch alcanzó los 30 días (Probabilidad de Inestabilidad Anual = 8%); sin embargo, las laderas no son influenciadas por la lluvia durante todo el año sino únicamente durante la época de invierno, por lo que es válido suponer que estos días de inestabilidad solamente ocurren durante la época lluviosa y por lo tanto la probabilidad de inestabilidad anual aumenta al 15% durante todo el invierno. Se logró demostrar que, al parecer, existe una correlación directa entre los cambios de espesor de la capa freática y la estabilidad de las laderas. Al caer la lluvia, el espesor de la capa freática aumenta y eso incide directamente en el área que se vuelve inestable. Asimismo, se determinó que las mayores inestabilidades no sucedieron durante la ocurrencia del fenómeno extremo (Mitch) sino que es mucho más importante el comportamiento de la lluvia en períodos anteriores. El máximo porcentaje de inestabilidad determinado fue del 3% y ese valor se alcanzó entre los días 263-271 (finales de septiembre), justo después de un período de precipitación abundante. En contraste, se

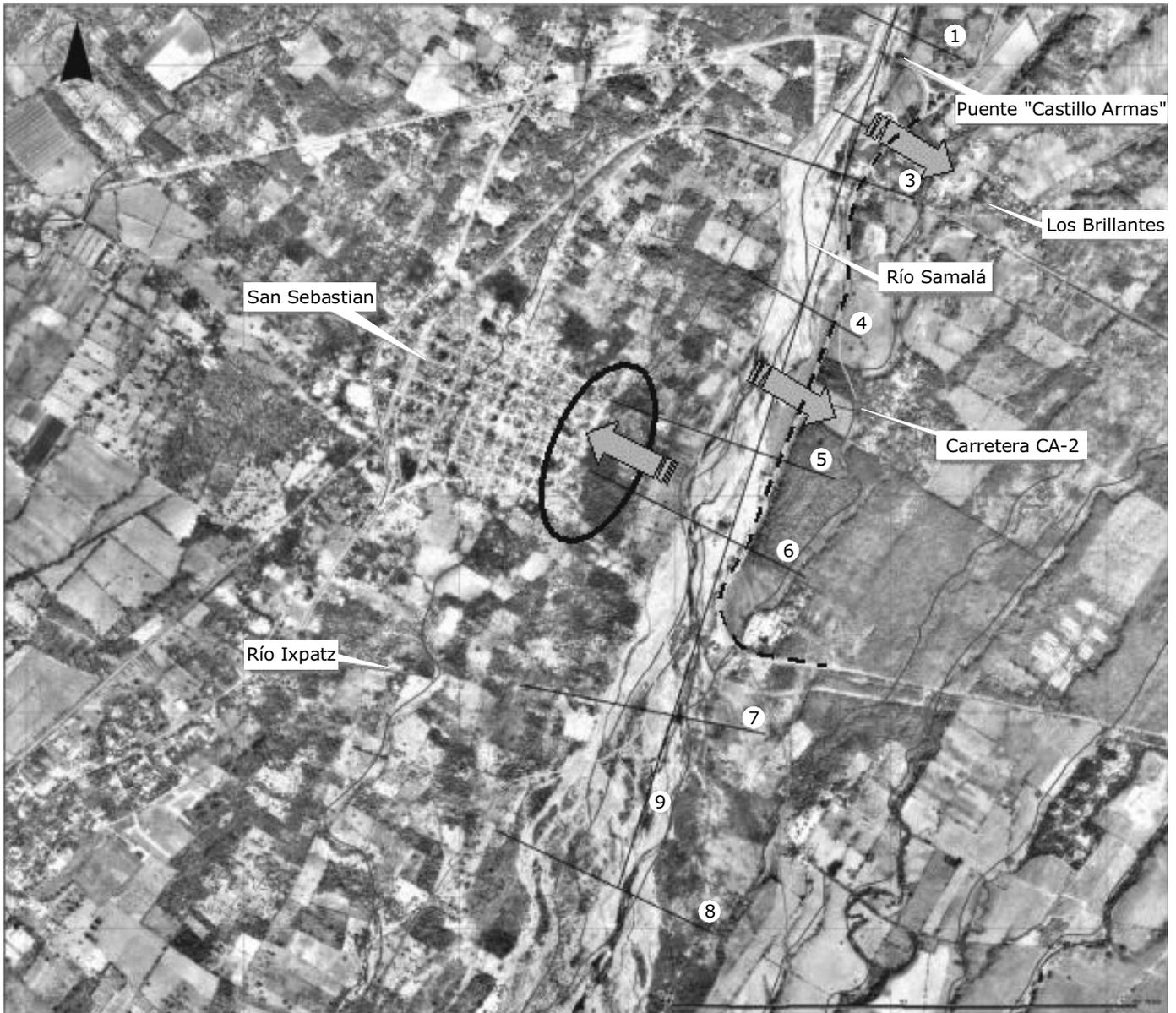


Figura 2. Zonas de afectación para 3 diferentes escenarios de inundación. Las flechas indican los puntos críticos de rebalse afectando la Carretera Panamericana (línea punteada), Finca Los Brillantes y San Sebastián (elipse).

observó que la tormenta de mayor intensidad del año (en el día 170) provocó poca inestabilidad, ya que en los días previos la precipitación había sido escasa y por eso el espesor de la capa freática era reducido (Figura 3).

En el caso de los flujos piroclásticos, se determinó que los grandes centros urbanos (Quetzaltenango, Retalhuleu y San Sebastián) no serían afectados por columnas eruptivas de hasta 2,500 m. Sin embargo, más de 120 centros poblados (fincas, aldeas y caseríos) se encuentran ubicados en la zona de Baja Amenaza, lo cual significa que más de 40,000 personas (MAGA, 2001) tienen el 40% de probabilidades de verse afectadas por un evento de tal magnitud. Además, se vería afectada la carretera que conduce hacia Quetzaltenango y una línea eléctrica de 60Kv que atraviesa la zona en dirección norte-sur. Según se observa en la Figura 4, esta zona coincide aproximadamente con el alcance que tuvo el flujo piroclástico de 1929-polígono negro (Rose, 1987b).

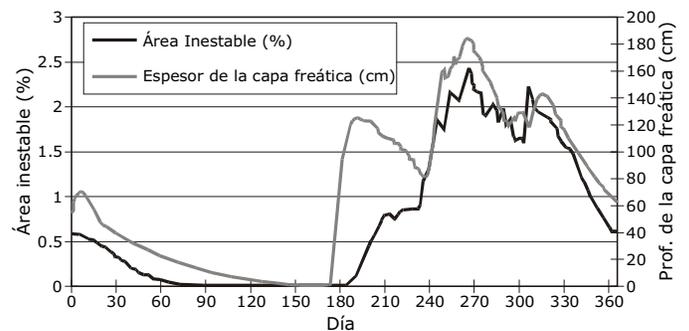


Figura 3. Gráfica que muestra la aparente correlación directa entre el aumento de la inestabilidad de laderas en la subcuenca Nimá I en respuesta al aumento del espesor de la capa freática.

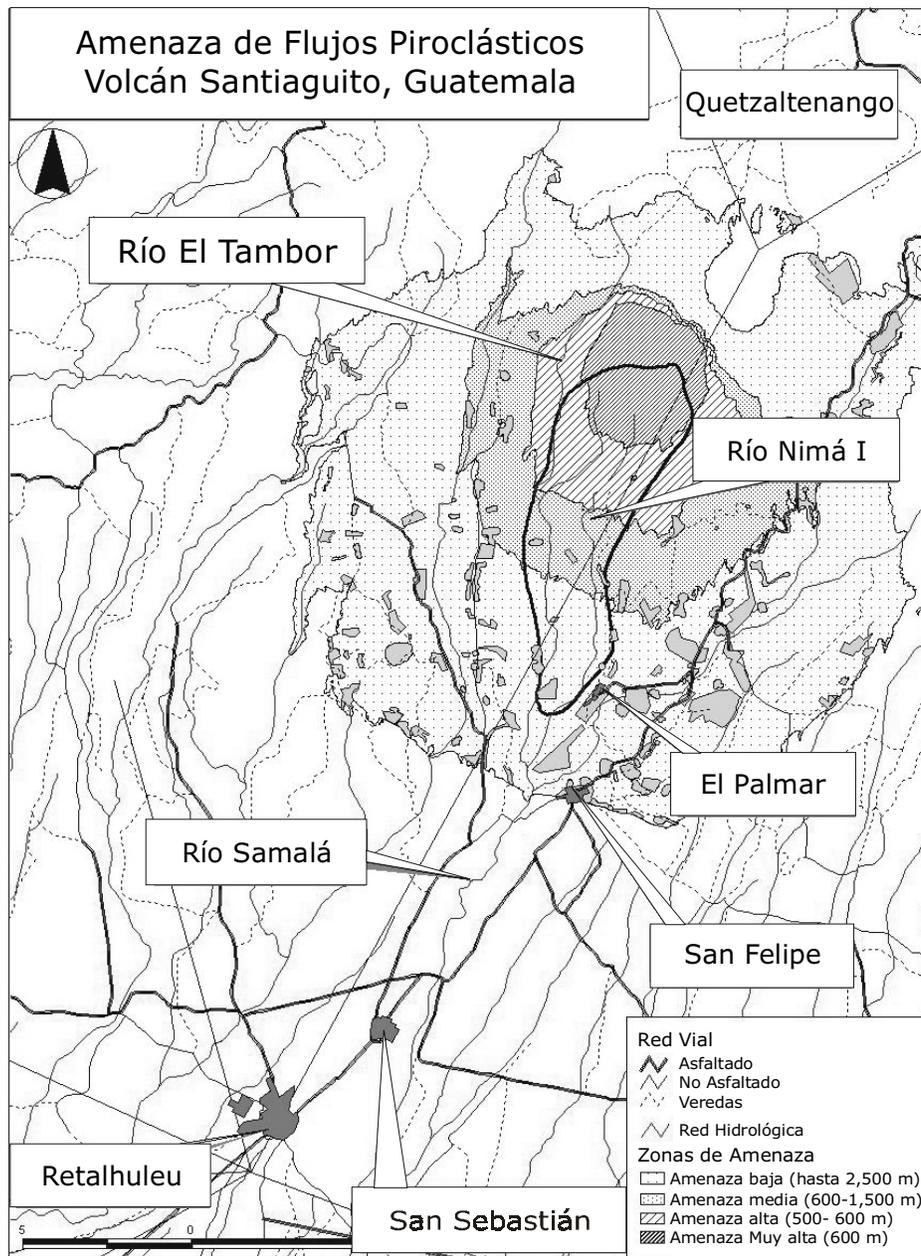


Figura 4. Mapa de Amenaza por Flujos Piroclásticos en el Volcán Santiaguito.

En el área de Amenaza Media (60% de probabilidad) se ubican hasta 19 centros poblados y fincas cafetaleras que ya han sufrido daños anteriores (La Florida y El Faro) y que juntas podrían agrupar hasta 1,500 personas. Esta zona equivaldría a una zona de transición entre ocurrencia de eventos moderados como los de 1929 y eventos pequeños como los de 1973 y corresponde también al área de afectación por flujos de lava. Finalmente, a pesar de que el área de Amenaza Alta (80-100%) incluye únicamente 2 centros poblados (Santo Domingo Palajunoj y San José Patzulín) con unas 47 personas, podría tener una mayor importancia como "área fuente" de material volcánico (piroclastos y lavas) para la formación de lahares y flujos de lodo a lo largo de los ríos Nimá I y El Tambor.

Los resultados del análisis de riesgo en San Sebastián demuestran que una inundación como la del Huracán Mitch provocaría pérdidas de hasta 10 mil dólares por vivienda, principalmente en las ubicadas cerca de las corrientes y zonas bajas. Seguramente, la combinación de los diferentes daños esperados (Figura 5) resultaría en la pérdida de por lo menos 800 mil dólares, sin incluir los aproximadamente 500 mil dólares de daños esperados en la red vial.

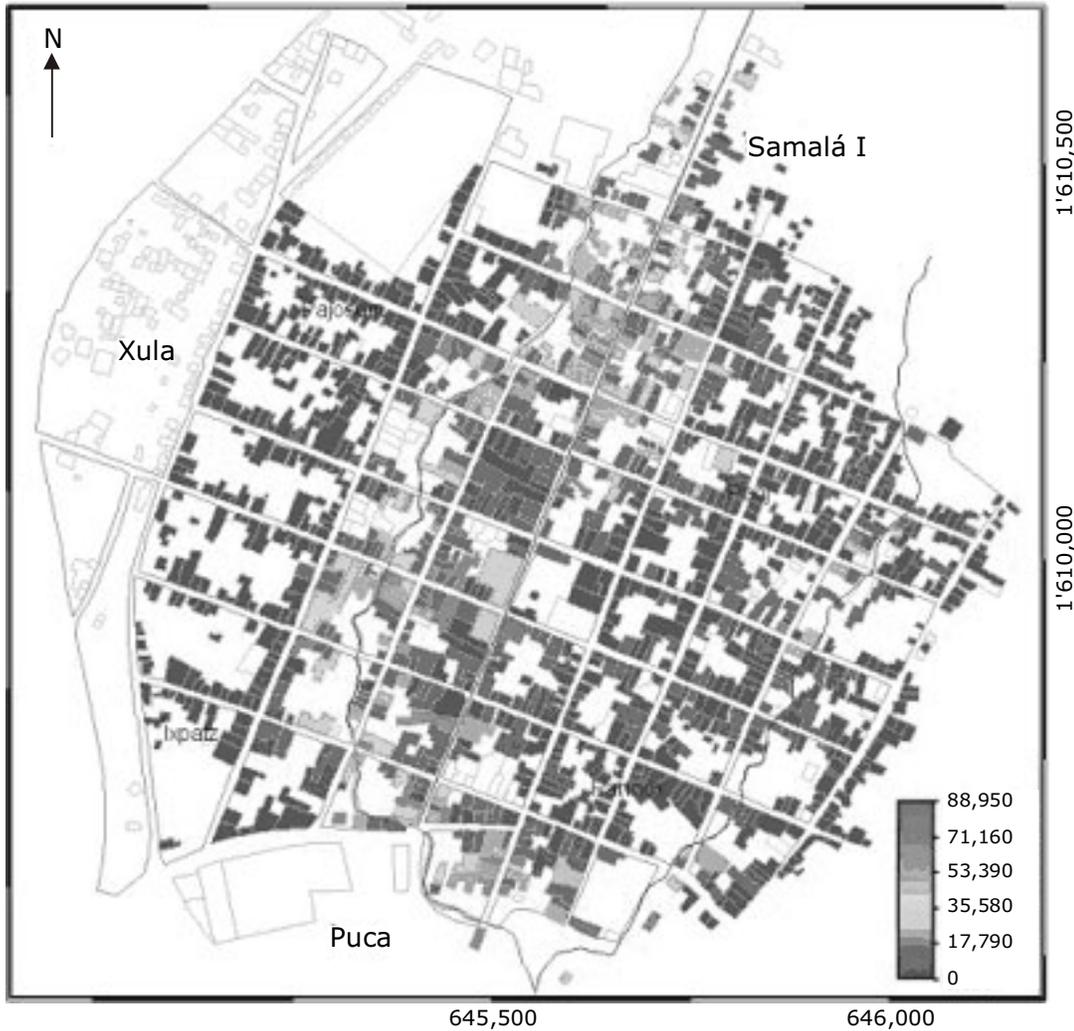


Figura 5. Mapa de Daño Total esperado en las viviendas de San Sebastián.

DISCUSIÓN DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

La actividad geohidrológica en el área de la cuenca Samalá gobierna la ocurrencia de diversos escenarios de amenazas, ya sea actuando individualmente o en forma compleja (amenazas múltiples).

El complejo volcánico Santa María-Santiaguito ha registrado eventos de diferente magnitud, desde la erupción pliniana de 1902, los flujos piroclásticos de 1929 y 1973 y los eventos periódicos menores (flujos de lava, caída de ceniza, etc.). Estos eventos por sí solos constituyen una amenaza directa contra las poblaciones, infraestructura y actividad agrícola en los alrededores. Los flujos piroclásticos derivados de columnas eruptivas de hasta 2,500 m de altura podrían afectar a más de 40,000 personas en 120 poblados. Sin embargo, todo el material volcánico generado constituye una amenaza secundaria como "material fuente" para la generación de lahares de diferente intensidad.

Durante los meses lluviosos (mayo-octubre) se 'activan' las amenazas húmedas por inundación y flujos de lodo. Los ríos Ixpatz y Cachel provocan daños a la población de San Sebastián como los registrados en 1998 durante el Huracán Mitch. Las pérdidas por eventos como este podrían alcanzar hasta los 10 mil dólares por vivienda y en su conjunto ocasionar daños de al menos 800 mil dólares. Los Lahares originados en los ríos Nimá I, Nimá II y El Tambor, que luego son encauzados al río Samalá, han provocado y seguirán provocando graves daños a las fincas cafetaleras de la región, los centros poblados y la infraestructura vial. La destrucción total de El Palmar en 1984 es una evidencia latente del peligro al que seguirán estando expuestas otras poblaciones como San Felipe, San Sebastián y Retalhuleu.

AGRADECIMIENTOS

La comunidad científica guatemalteca, especialmente aquellos expertos involucrados en este proyecto, agradecen el soporte financiero del gobierno holandés y la asesoría permanente y muy valiosa de los investigadores del ITC (Prof. Cees van Westen), de la Univer-

sidad de Utrecht (Prof. Theo van Asch e Ivo Thonon) y de la Universidad de Delft (Prof. Siefko Slob). Así también, los autores, co-autores y colaboradores agradecen el apoyo de sus Instituciones para el aporte en este trabajo, especialmente al INSIVUMEH (Pedro Tax, Manuel Mota y Gustavo Chigna), CONRED (Juan Gabriel Samayoa y Eugenia García), IGN (Jorge Cárcamo), FAUSAC (Guillermo Santos), ERIS (Elfego Orozco) y USGS (Manolo Barillas, Estuardo Lira, Lorena Aguilar y Alfredo Arévalo). Finalmente, un agradecimiento a la Unidad de Planificación Estratégica de CONRED, especialmente a Cecilia Zamora, y al Secretario y Sub-secretario Ejecutivo de CONRED por el incondicional apoyo y soporte administrativo en este proyecto. Al final, este trabajo se benefició también con los comentarios de un árbitro anónimo.

REFERENCIAS

- de Joode, A. and van Steijn, H., 2003, PROMOTOR-*df*: a GIS-based simulation model for debris-flow hazard prediction, in press.
- Malin, M.C. and Sheridan, M.F., 1982. Computer-assisted mapping of pyroclastic surges, *Science*, vol. 217, p. 637-693.
- Mercado, R., Rose, W.I., Matias, O. y Giron, J., 1988. November 1929 Dome Collapse and Piroclastic Flow at Santiaguito Dome, Guatemala, *Trans. Am. Geophys. Un.*, 69, p. 1487.
- Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación (MAGA), 2001. Base de datos cartográfica digital 1:250,000, Programa de Emergencia por Desastres Naturales, Unidad de Políticas e Información Estratégica.
- Newhall, C.F. and Self, S., 1982, The Volcanic Explosivity Index (VEI): an estimate of explosive magnitude for historical volcanism, *Journal Geophysical Research*, vol. 87, p. 1231-1238.
- Rose, W.I., 1972. Notes on the 1902 eruption of Santa Maria Volcano, Guatemala, *Bulletin of Volcanology*, Vol. 36, pp. 29-45.
- Rose, W.I., 1987a. Santa Maria, Guatemala: Bimodal soda-rich calcalkalic stratovolcano, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 33, p. 109-129.
- Rose, W.I., 1987b. Volcanic activity at Santiaguito volcano, 1976-1984, *Geological Society of America, Special Paper 212*, p. 17-27.
- Sapper, K., 1903. Der ausbruch des vulkans Santa Maria en Guatemala, *Centralblatt f. Mineral., Geol. und Palaont.*, p. 33-44.
- Sapper, K., 1904. Die vulkanischen Ereignisse in Mittelamerika in Jahre 1902, *Neues Jahrbuch fur Mineralogie Geologie un Palontologie*, 1, 39 p.
- Sheridan, M.F., 1979. Emplacement of pyroclastic flows: A review. *Geological Society of America, Special Paper 180*, p. 125-136.
- Wesseling, C.G., Karssenberg, D., van Deursen, W.P.A. and Burrough, P.A., 1996. Integrating dynamic environmental models in GIS: the development of a Dynamic Modelling language, *Transactions in GIS*, vol. 1, p. 40-48.