

LA SIMULACIÓN COMPUTACIONAL COMO HERRAMIENTA PARA EL ORDENAMIENTO TERRITORIAL Y LA GESTIÓN DEL RIESGO: EL CASO DE CAÍDA DE CENIZA PROVENIENTE DEL VOLCÁN IRAZÚ, COSTA RICA

COMPUTER SIMULATION AS A TOOL FOR LAND AND RISK MANAGEMENT: THE CASE OF ASHFALL FROM THE IRAZU VOLCANO, COSTA RICA

*Gustavo Barrantes Castillo*¹

*Santiago Núñez Corrales*²

*Eduardo Malavassi Vargas*³

RESUMEN

La posibilidad de aplicar la simulación computacional en la predicción del comportamiento de eventos naturales potencialmente desastrosos, la convierte en un instrumento versátil para la elaboración de mapas de amenaza. En el caso de las amenazas hidrometeorológicas es común su empleo

1 Profesor, Escuela de Ciencias Geográficas, Universidad Nacional de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: gbarran@una.ac.cr

2 Profesor, Escuela de Computación, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: snunez@iter.ac.cr

3 Jubilado, OVSICORI, Universidad Nacional de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: emalava@una.ac.cr

Fecha de recepción: 20 de agosto de 2011
Fecha de aceptación: 15 de octubre de 2011

y en otros campos como la Vulcanología su aplicación es bien conocida. Existen muchos y muy variados modelos, que van desde extremadamente complejos a muy simples; su selección debe responder a la necesidad de información, para la toma de decisiones en materia de prevención y mitigación, así como de la disponibilidad de datos y su calidad. Los resultados del modelado deben transformarse a un formato útil para el Ordenamiento Territorial, mediante el empleo de Sistemas de Información Geográfica que faciliten la creación de cartografía digital. En el caso concreto de la creación de mapas de amenaza por caída de ceniza provenientes del Volcán Irazú, un grupo multidisciplinario labora en el desarrollo de una plataforma que permita generar mapas de amenaza, a partir de una implementación particular del modelo numérico advección-difusión de Suzuki, conocido como NG-TEPHRA, y el SIG ArcMap. Esta experiencia permitirá desarrollar una metodología aplicable a cualquier otro volcán de la región.

Palabras Clave: simulación computacional, amenazas naturales, caída de ceniza.

ABSTRACT

The ability to apply computer simulation to predict the behavior of potentially disastrous natural events makes it a versatile instrument for the development of hazard maps. Its use is common in the case of hydrometeorological hazards and in other fields such as volcanology, where its application is well known. There are many and varied models ranging from simple to extremely complex. The selection must meet the information needs for decision making in prevention and mitigation, as well as data availability and quality. Modeling results should be transformed into a format useful for land use planning, using Geographic Information Systems to facilitate the creation of digital cartography. In the case of the creation of hazard maps by ashfall from the Irazú Volcano, a multidisciplinary group is working to develop a platform to generate hazard maps from a particular implementation of the advection-diffusion numerical model of Suzuki, known as NG-tephra, and GIS ArcMap. This experience will allow development of a methodology applicable to any other volcano in the region.

Keywords: computer simulation, natural hazards, ashfall, hazard maps, Irazú Volcano, Costa Rica

1. Introducción

Los volcanes presentan una serie de amenazas directas entre las que se encuentran: las coladas de lava, los flujos piroclásticos, las emanaciones de gases, los lahares y la caída de tefra. Este último, si bien puede considerarse el menos mortífero, representa uno de los más destructivos, al tomar en cuenta que puede cubrir cientos e incluso miles de kilómetros cuadrados (Keller & Blodgett, 2004).

El término tefra se utiliza para designar al depósito no consolidado y friable de piroclastos de caída (Gonzales & Teruggi, 1952). Estos depósitos pueden visualizarse como dos amenazas distintas, atendiendo al mecanismo de transporte de los mismos. De esta manera, se utiliza el término *proyección balística* para referirse a los materiales de mayor tamaño (bloques y bombas) que describen una parábola (Alvarado, Pérez,

& Sigarán, 200), y *caída de ceniza* para referirse al material eyectado por el conducto del volcán, que pasa a formar parte de una columna eruptiva y cae a superficie, mayormente, en función de la altura alcanzada, la velocidad límite de caída de las partículas y la velocidad y dirección del viento (Felpeto, 2002). Sobre estos últimos se concentra la investigación expuesta en este trabajo.

En los últimos 30 años, la modelación física de los procesos volcánicos ha cobrado relevancia como una metodología para simular los efectos de una erupción y de esta forma, comprender sus posibles impactos en el ambiente (Felpeto, 2002). En la actualidad existen varios programas para simular la caída de ceniza, tales como FALL3D, HAZMAP y TEPHRA. Cada uno de ellos cuenta con diferentes niveles de complejidad (y por consiguiente de precisión), cantidad de parámetros de entrada y complejidad computacional (Scollo, Folch & Costa, 2008).

Una vez identificada el área cubierta por ceniza acorde con su frecuencia, se requiere trasladar esta información hacia los procesos de Ordenamiento del Territorio (OT), siendo el formato más apropiado para hacerlo los mapas de amenaza. El OT contempla tres etapas fundamentales que son: (1) el análisis territorial, (2) el diagnóstico y (3) las propuestas (Pujadas & Font, 1988). Durante la fase de *análisis territorial*, se requiere reunir y sintetizar toda la información sobre potencialidades, limitaciones y problemas existentes. Específicamente, las limitaciones se refieren al conjunto de elementos o condiciones del territorio, que representan una restricción u obstáculo para el uso, ocupación y desarrollo territorial futuro (Massiris, 2005). En este sentido, la amenaza por caída de tefra se constituye como una limitante a considerar en la planificación de los usos del territorio.

El *diagnóstico territorial* parte del análisis de los subsistemas biofísico, social y económico. Dentro de los resultados obtenidos a partir del análisis del subsistema biofísico debe encontrarse el conocimiento de las amenazas de origen natural y sus implicaciones (Massiris, 2005). Este conocimiento debe utilizarse, en la última etapa, para la elaboración de propuestas y líneas de actuación territorial que tendrán normalmente un carácter normativo (Pujadas & Font, 1988). En el caso de la amenaza volcánica, en la etapa de *propuestas* debe procurar armonizar la intensidad de los usos del suelo con su nivel de amenaza.

En el presente artículo se discute la metodología propuesta para la creación de mapas de amenaza por caída de ceniza, mediante la simulación computacional con el modelo NG-TEPHRA y un Sistema de Información Geográfica (SIG), utilizando como ejemplo su aplicación en el Volcán Irazú, Costa Rica.

2. La Simulación Computacional como Herramienta para la Estimación de la Amenaza

Los modelos matemáticos de los procesos naturales son una representación parcial de la realidad. Se trata de abstracciones que reproducen algunas características de la realidad de manera selectiva. Los modelos conceptuales creados a partir del conocimiento de la física del problema pueden ser traducidos en conjuntos de ecuaciones matemáticas, secuencias de reglas explícitas que convierten entradas numéricas en salidas numéricas, con un propósito específico (Dingman, 2008).

La simulación computacional corresponde a la implementación de un modelo matemático que describe la dinámica esencial del comportamiento de un sistema de interés. Su utilidad fundamental está en la posibilidad de diseñar y realizar experimentos computacionales con el modelo y extraer conclusiones relevantes, a partir de sus resultados. Una simulación permite examinar el comportamiento del sistema en casos en los que resulta imposible o poco práctico ejecutar el experimento en la realidad.

La simulación computacional inicia por determinar tres elementos base: un conjunto de escenarios de utilidad, un conjunto de distribuciones de probabilidad para las variables de interés descritas por observaciones y un conjunto de condiciones iniciales (Karniadakis, 2003). La simulación es una aplicación natural para la computación de alto rendimiento y la computación paralela distribuida, con lo cual se logra una fuerte sinergia entre aplicaciones y arquitecturas computacionales, orientadas a un procesamiento numérico masivo (Barrantes, Garita, Núñez, & Castro, 2007). Generalmente, su diseño busca un equilibrio entre la precisión y el costo computacional.

La amenaza por caída de tefra hace referencia a la probabilidad de la acumulación de un determinado monto de piroclastos sobre un lugar específico. Para establecer dicha amenaza se pueden seguir dos vías: la utilización del registro histórico de la actividad volcánica sumado a las

evidencias tefroestratigráficas, o por medio de modelos matemáticos de distribución de la tefra (Ortiz, 2004).

La primera vía plantea el problema de que generalmente el registro histórico es breve e impreciso. En América Latina, cuando mucho el registro histórico parte de las crónicas españolas (a lo sumo 500 años de datos no estandarizados), lo que genera una gran incertidumbre. Por otro lado, el registro geológico tiende a privilegiar a los mayores eventos, debido a que estos suelen preservarse mejor (Connor, 2001).

La segunda vía se basa en la simulación numérica, la cual parte de los registros geológicos e históricos, para establecer los parámetros de entrada de las series de corridas que permitan acercarse a la distribución espacial de la tefra, para así estimar sus probabilidades (Connor, 2001). La simulación como exploración de escenarios puede efectuarse rápidamente, siempre y cuando el recurso computacional exista, lo cual brinda una alta flexibilidad experimental.

El modelado de los procesos eruptivos suele realizarse con dos objetivos. Por un lado, inferir a partir de los depósitos de tefra diversas características del modelo eruptivo como la altura máxima de la columna, la masa de material arrojada, entre otros; este tipo de modelización se llama inversa. El segundo objetivo es pronosticar la evolución de la nube de cenizas, así como la distribución superficial de la tefra; este tipo de modelización se conoce como directa (Felpeto, 2002).

A pesar de la utilidad del segundo objetivo, en la reducción de las pérdidas por caída de ceniza, este se enfoca la mayoría de las veces en la atención de la emergencia, mediante la elaboración de pronósticos, dejando de lado aspectos centrales de la gestión del riesgo como la prevención y la mitigación. Con la intención de dar énfasis a estos aspectos se requiere de la integración de un conjunto de escenarios (cada cual con una probabilidad estimada) en la construcción de mapas de amenaza. Por este medio se podría disminuir el riesgo, a través de su estimación, al mostrar las zonas urbanas y las actividades económicas que se encuentran en las zonas de mayor peligro. De esta forma, se podrán efectuar estratégicamente los recursos necesarios para implementar obras de prevención y mitigación, antes de que un evento ocurra.

3. NG-TEPHRA

NG-TEPHRA (Next-Generation TEPHRA) es un modelo de simulación computacional que implementa el modelo Suzuki, en el cual la difusión, advección y sedimentación son calculadas mediante una ecuación de conservación de masa (Bonadonna, y otros, 2005). La primera versión del software fue implementada por Connor (2001) y posteriormente modificado y extendido por un grupo de investigación multidisciplinario, para su implementación en el Volcán Irazú (Núñez, Barrantes, Malavassi, & Brenes, 2010).

Partiendo de la constatación experimental de que la difusión vertical en la pluma volcánica es casi nula, el modelo se basa en una ecuación diferencial parcial de dos dimensiones, que describe la difusividad turbulenta y el efecto unidimensional del viento (Ec. 1).

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -U_x \frac{\partial C}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K \frac{\partial C}{\partial y} \right) \quad (1)$$

En donde C es la concentración de partículas, U_x la velocidad del viento en la dirección x y K representa la difusividad con vorticidad, que se supone variable en x , o en t .

Una función de densidad de probabilidad es utilizada para describir la difusión de tefra fuera de la columna en la atmósfera circundante, donde es posible el transporte por el viento. En su formulación se utiliza el parámetro β , el cual controla la distribución en altura de la concentración de ceniza. Altos valores de β resultan en una mayor proporción de tefra llegando alto en la columna eruptiva. La velocidad ascendente de las partículas decrece proporcionalmente con la altura, en función de la altura elevada a la potencia λ , al cual Connor asigna el valor de 1 (Connor, Hill, Winfrey, Franklin, & La Femina, 2001). De esta manera, la incertidumbre del modelo crece con la incorporación de estos dos parámetros, con la subsecuente necesidad de su calibración.

A pesar de que este modelo no contempla la topografía ni la agregación de partículas, se ha seleccionado por su fácil aplicación y su menor costo computacional. Se trata de un primer acercamiento a la comprensión de la fenomenología de caída de ceniza para el Volcán Irazú, siendo de-

seable entonces, contar con un modelo simple que requiera de datos que estén disponibles. Los parámetros requeridos por el modelo NG-TEPHRA se describen en el cuadro 1.

Cuadro 1
Parámetros requeridos por NG-TEPHRA

Parámetro	Descripción	Unidades
Latitud de la fuente	Localización de la fuente	UTM
Longitud de la fuente	Localización de la fuente	UTM
Total de masa	Monto total de masa eructada	kg
Tamaño máximo de las partículas	Diámetro máximos de partículas consideradas	Φ_{\max}
Tamaño mínimo de las partículas	Diámetro mínimo de partículas consideradas	Φ_{\min}
Tamaño medio de las partículas	Diámetro medio de partículas consideradas	Φ_{avg}
Desviación estándar del tamaño de las partículas	Desviación estándar del diámetro de partículas consideradas	$\sigma\Phi$
Densidad media de las partículas	Densidad individual de los clastos	gm/cm ³
Factor de forma	Factor de forma de los granos	-
Elevación de la fuente	Elevación del cráter	msnm
Altura de la columna	Elevación máxima de la columna eruptiva	m
Velocidad inicial	Velocidad inicial de la erupción en la fuente	m/s
Velocidad del viento	Velocidad media del viento	m/s
Dirección del viento	Dirección media del viento	grados
Beta	Parámetro que gobierna la distribución en la columna	-

Entre los cambios más significativos introducidos en NG-TEPHRA, con miras a obtener resultados pertinentes con un costo computacional razonable, están:

1. Apropiado para ejecutarse en ambientes de Clusters, Grids o Cloud Computing. Existen dos versiones para su aplicación, una basada en MPI para clusters de computadores y otra en infraestructura Grid/Cloud Computing de gran escala, utilizando el set de herramientas de Nimrod.
2. Connor aproxima la probabilidad de los depósitos de tefra, mediante muestreos estocásticos de la distribución en un rango de valores posibles de masa total, altura de la columna y velocidad de la erupción; se realizan 500 corridas a partir de estos datos (Connor, 2002). Esta gruesa aproximación es mejorada en NG-TEPHRA, mediante la creación de un generador de escenarios, el cual combina catorce alturas de columna con las direcciones y velocidades de vientos más probables (cada cual con direcciones y velocidades de viento, propias de las condiciones promedio de la atmósfera de estas altitudes), a su vez, cada altura de columna está asociada a un VEI con su respectiva probabilidad de ocurrencia.

4. Metodología para la Elaboración de Cartografía de Amenaza por Caída de Ceniza a partir de la Simulación Computacional.

El objetivo perseguido con la simulación computacional es generar los datos espaciales para crear mapas de amenaza por caída de ceniza, partiendo de la metodología propuesta por (Barrantes, 2006) los pasos a seguir se resumen a continuación:

- Determinación del periodo de retorno de los distintos tipos de erupciones (VEI), con base en el registro histórico y tefracronológico.
- Diseño de escenarios de simulación con base en condiciones ambientales medias (direcciones y velocidades de viento), para diferentes capas de altitud y para un rango de valores plausibles, con respecto a los parámetros de entrada. A cada escenario se le asigna una probabilidad de ocurrencia.

- Se agrupan los escenarios de acuerdo a su VEI y se estima la probabilidad de igualar o superar un determinado monto de ceniza.
- Los archivos de salida son importados a un Sistema de Información Geográfico (SIG), en donde se crea un mapa de superficie de contorno para probabilidades de excedencia de un determinado monto de tefra.
- Una vez obtenidos los mapas se reclasifican y superponen para generar un mapa de amenazas por caída de ceniza útil para el Ordenamiento Territorial y la Gestión de riesgo, de acuerdo con los siguientes lineamientos (MET-ALARN, 2005):

Acorde al volumen o altura de la ceniza (intensidad)				
Muy Alta				
Alta				
Moderada				
Baja				
Probabilidad o Tr	Alta	Media	Baja	Muy Baja

- Al mapa resultante se le sobrepone la red de carreteras, la ubicación de ciudades y pueblos, así como la división territorial administrativa para que se pueda emplear como parte de las limitantes del desarrollo urbano en la Planificación del Ordenamiento Territorial.
- Al sobreponer un mapa de uso del suelo, líneas vitales y redes de carreteras, se puede hacer una determinación de la vulnerabilidad física (nivel de exposición). Esto permitirá sugerir una serie de medidas de mitigación y de preparación que se articulan con las medidas de preparación de planes de gestión del riesgo.

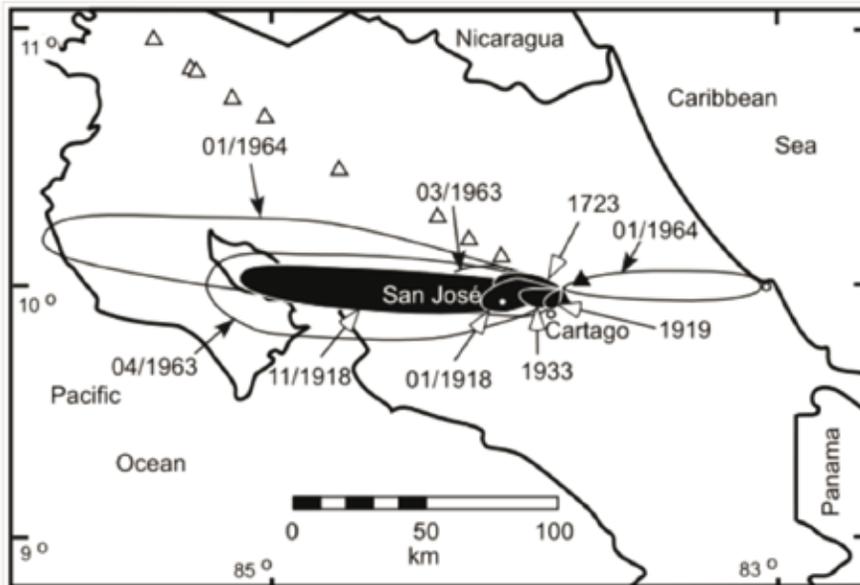
5. El caso de Volcán Irazú: Avance de Investigación

El Volcán Irazú, ubicado en la Cordillera Volcánica Central de Costa Rica es un estratovolcán activo que posee el cráter a mayor altitud del país (Bergoing, 2009). Entre 1963 y 1965, el Volcán Irazú entró en una fase eruptiva caracterizada por erupciones de ceniza que variaron en altura de columna, llegando a reportarse una altura de más de 8000 m. Al finalizar este periodo eruptivo los enormes volúmenes de ceniza, estimados en 0.03 km³, cubrieron un área de aproximadamente 300 km² (Clark, 1993).

El problema de la ceniza llevó a que la Ciudad Capital, ubicada a más de 10km de distancia, fuese conocida como “la ciudad de las escobas”, por ser este el principal medio utilizado para evitar el desplome de los techos por la acumulación de ceniza.

En esta época, la población del Costa Rica rondaba los 1.2 millones de habitantes, donde la mayoría de la población era rural. Actualmente, la población de Costa Rica supera los 4.5 millones de habitantes y la principal área urbana del país, conocida como el Gran Área Metropolitana (GAM), está localizada dentro del área de afectación por caída de ceniza (FIGURA. 1). Esta área que representa menos del 4% del territorio nacional ha experimentado un intenso proceso de urbanización que le ha llevado a concentrar más del 60% de la población total del país, y alrededor del 75% de todas las actividades económicas productivas. Lo anterior evidencia la necesidad de contar con mapas detallados de la amenaza, que sean utilizados tanto para la gestión del riesgo como para el Ordenamiento Territorial.

Figura. 1. Reconstrucción histórica de la distribución del área de caída de ceniza proveniente del Volcán Irazú.



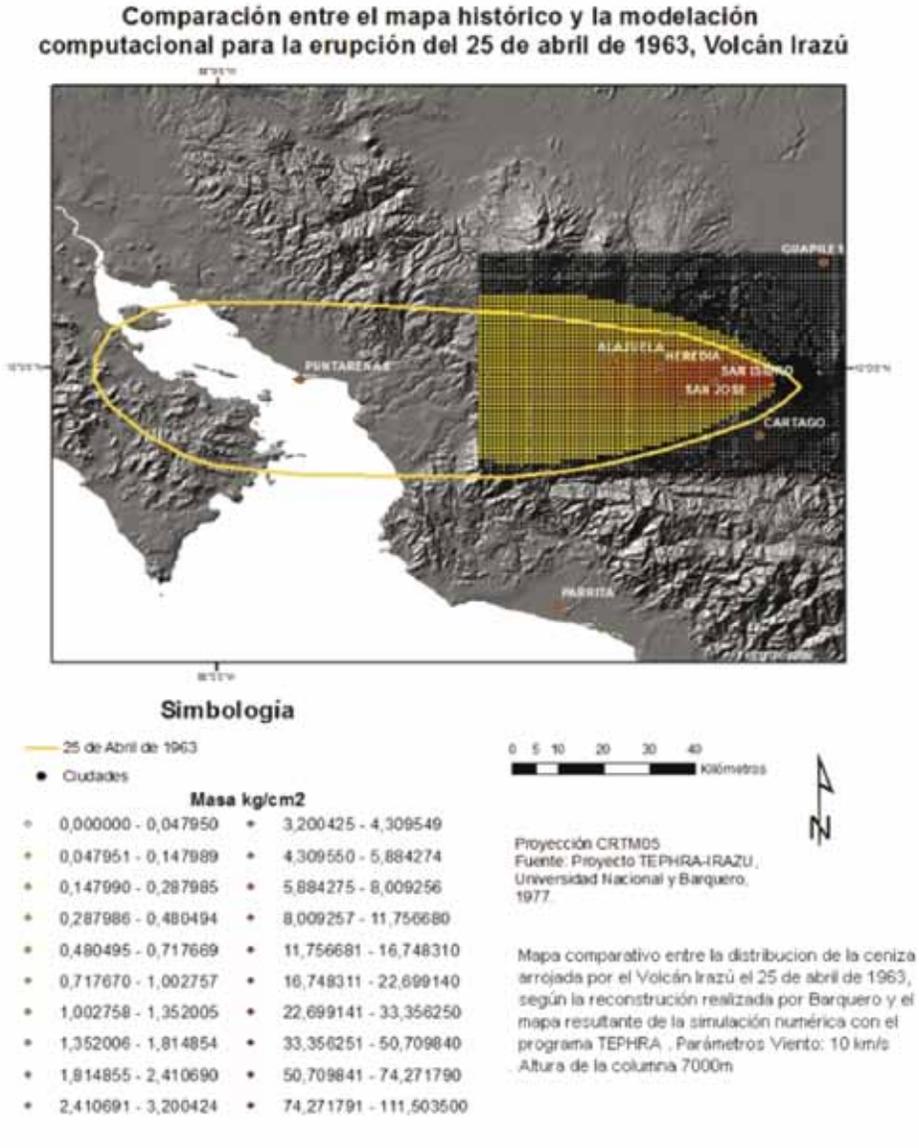
Fuente: (Clark, 2006).

5.1. Calibración del modelo

Todo modelo debe ser calibrado para aplicarse en un área distinta para la cual fue desarrollado. En este caso, la labor se realizó a partir del registro histórico disponible, para el episodio eruptivo 1963-65. Las erupciones que mostraron mayor consistencia de datos para realizar la calibración fueron las del 13 de marzo, 20 de abril, 25 de abril y primeras semanas de diciembre, todas ocurridas en 1963. Debido a la mala calidad y poca densidad de los datos, solamente fue posible hacer un análisis cualitativo. El valor de parámetros como ϕ , y el factor de forma, y la cantidad de masa fueron ajustados a partir del análisis de sensibilidad del modelo.

De acuerdo en la recopilación realizada (Barrantes y Núñez, 2009), 25 de abril se reportan dos erupciones importantes, con vientos mayores a 7 m/s, los poblados afectados por caída de ceniza fueron: San José, Heredia, Alajuela, San Ramón, Puntarenas y se indica que la ceniza alcanzó la Península de Nicoya, la simulación realizada se aprecia en la figura 2.

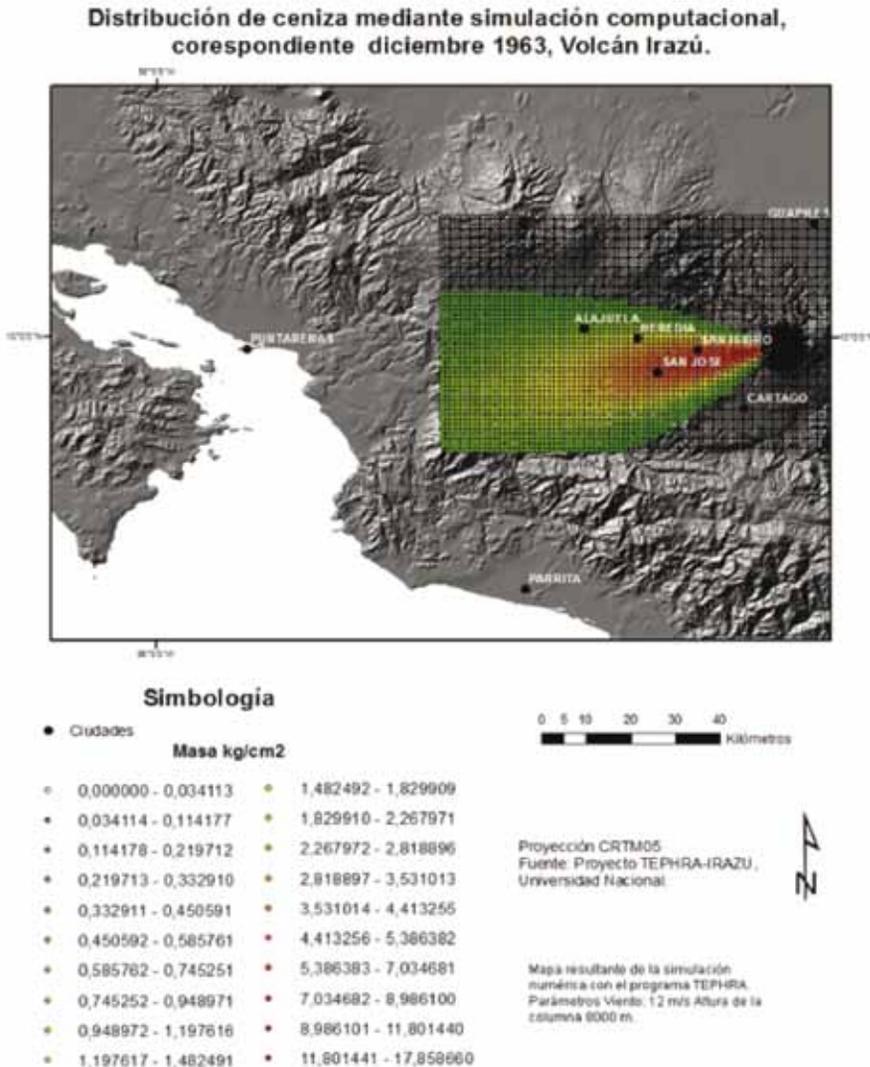
Figura. 2. Escenario construido por simulación para reproducir la dispersión de ceniza ocurrida el 25 de abril de 1963.



También se simuló la erupción ocurrida el 3 de diciembre, en esta ocasión se reportaron fuertes vientos que transportaron la ceniza del oeste

hasta el poblado de Cóbano, ubicado en la Península de Nicoya, a 140 Km de la cima. En San José se debió remover miles de toneladas de ceniza de techos y calles (ver figura 3).

Figura. 3. Escenario construido por simulación para reproducir la dispersión de ceniza ocurrida el 3 de diciembre de 1963.



6. Conclusiones

La simulación computacional se ha convertido en una herramienta para la elaboración de mapas de amenaza por caída de ceniza. TEPHRA es un modelo apto para realizar simulaciones con pocos datos disponibles, y NG-TEPHRA representa una automatización de experimentos para ser ejecutado en plataformas computacionales de alto rendimiento.

Los mapas de amenaza generados a partir de la simulación se constituyen como una herramienta apropiada para las primeras etapas del proceso de OT, a partir del nivel de amenaza por caída de ceniza se requiere restringir el uso del suelo.

Al sobreponer mapas de carreteras, poblados y otras infraestructuras es posible establecer la vulnerabilidad física de los mismos, información que debe utilizarse para elaborar planes de inversión estratégica en medidas de mitigación y prevención, que contribuyan en una disminución significativa del riesgo.

La simulación numérica de dispersión de ceniza mediante el programa TEPHRA se ajusta adecuadamente para las erupciones en las que se tiene suficiente información, de lo que puede deducirse que es apropiado para realizar mapas de amenaza que involucran miles de corridas para establecer la probabilidad de caída de ceniza.

7. Referencias bibliográficas

- Alvarado, G.; Pérez, C.; & Sigarán, C. (2000). Vigilancia y peligro volcánico. En P. Dennyer, & S. Kussmaul, (*Geología de Costa Rica*). Cartago, Costa Rica: Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- Barrantes, G. (2006). *Desarrollo de un Sistema de Información Geográfica para la evaluación del riesgo por caída de tefra proveniente del volcán Irazú*. Cartago: Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Barrantes, G.; Garita, C.; Núñez, S. y Castro, J. (2007). Aplicación de Sistemas de Información Geográfica en la Creación de Escenarios de Riesgo por Caída de Tefra. *Ponencia presentada en la Conferencia Latinoamericana de Informática, 9-12 octubre*. San José, Costa Rica.
- Barrantes, G. y Núñez, S. (2009). (*Recopilación de erupciones ocurridas entre 1963 y 1965 en el Volcán Turrialba*). Informe interno de proyecto TEPHRA-Irazú. Universidad Nacional.

- Bergoeing, J. P. (2009). *Costa Rica; Paisajes volcánicos*. San José: Jadeine.
- Bonadonna, C., Connor, C. B., Houghton, B. F., Connor, L., Byrne, M., Laing, A., y otros. (2005). Probabilistic modeling of tephra dispersal: Hazard assessment of a multiphase rhyolitic eruption at Tarwera, New Zealand. *Journal of geophysical research*, 110.
- Clark, S. (1993). *The recent eruptive history of Irazú volcano, Costa Rica*. Tesis para optar al grado de maestría en Geología, Universidad de Iowa.
- Clark, S., Reagan, M., & Trimble, D. (2006) *Volcanic hazards in Central America*, Tephra deposits for the last 2,600 years from Irazú volcano, Costa Rica. En W. Rose, G. Bluth, M. Carr, J. Ewert, L. Patino, & J. Vllance (Edits.), (págs. 225-223).
- Connor, C. (2001). Estimation of volcanic hazard from tephra fallout. *Natural Hazards Review*, 2 (1), 33-42.
- Connor, C. (2002). *Tephra Dispersion Modeling in Parallel*. Recuperado el 10 de junio de 2010, de www.cas.usf.edu/~cconnor/parallel/tephra/tephra.html
- Connor, C.; Hill, B.; Winfrey, B., Franklin, N. y La Femina, P., (2001). Estimation of Volcanic Hazards from tephra Fallout. *Natural hazard review*, 2 (1), 33-42.
- Dingman, L. S., (2008). *Physical Hydrology*. USA: Waveland Press, Inc.
- Felpeto, A., (2002). *Modelización Física y Simulación Numérica de Procesos Eruptivos para la Generación de Mapas de Peligrosidad Volcánica*. Tesis para optar al grado de Doctor en Ciencias Físicas . España: Universidad Complutense de Madrid.
- Gonzales, F. y Teruggi, M., (1952). *Léxico Sedimentológico*. Buenos Aires: Museo Argentino de Ciencias Naturales.
- Karniadakis, G. K. (2003). *Parallel Scientific Computing in C++ and MPI: A Seamless Approach to Parallel Algorithms and their Implementation*. USA: Cambridge University Press.
- Keller, E. y Blodgett, R. (2004). *Riesgos Naturales*. España: Pearson, Prentice-Hall.
- Massiris, A. (2005). *Fundamentos Conceptuales y Metodológicos del Ordenamiento Territorial*. Bogotá: Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.

- MET-ALARN, P., (2005). *Erupciones Volcánicas; Mapas de Amenazas: Recomendaciones Técnicas para su Elaboración*. Managua: INETER-COSUDE.
- Núñez, S., Barrantes, G., Malavassi, E. y Brenes, J., 2010. NG-TEPHRA: Enabling large-scale Volcanic Hazard Simulations in the PRAGMA Grid Environment. *18th PRAGMA Workshop, March 3-4*. San Diego, California.
- Núñez, S.; Bethwaite, B.; Brenes, J.; Barrantes, G.; Castro, J.; Malavassi, E.; Abramson, D. NG-TEPHRA: A Massively Parallel, Nimrod/G-enabled Volcanic Simulation in the Grid and the Cloud. Aceptado en el IEEE e-Science 2010 Conference. Brisbane, Queensland. Dic 7-10.
- Ortiz, R., (2004). Riesgo volcánico. *Serie Casa de los Volcanes N° 5*. Recuperado el 22 de enero de 2007, de www.icoddelosvinos.com/volcan/download/Riesgo/RiesgoVolcanico.pdf
- Pujadas, R., & Font, J. (1988). *Ordenación y Planificación Territorial*. Madrid: Editorial Síntesis S.A.
- Scollo, S., Folch, A., y Costa, A., 2008. A Parametric and Comparative Study of Different Tephra Fallout Models. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* (176), 199-211.