



Localizando señales sismo-volcánicas del volcán Turrialba (Costa Rica) usando Python y Computación Avanzada: Un caso de colaboración multidisciplinar para el desarrollo científico

Locating seismo-volcanic signals in Turrialba Volcano (Costa Rica) using Python and Advanced Computing: a case of multidisciplinary collaboration for scientific development

Guillermo Cornejo-Suárez¹, Leonardo van-der-Laat²,
Esteban Meneses³, Mauricio M. Mora⁴, Javier Fco. Pacheco⁵

Cornejo-Suárez, G; van-der-Laat, L; Meneses, E; Mora, M; Pacheco, J.F. Localizando señales sismo-volcánicas del volcán Turrialba (Costa Rica) usando Python y Computación Avanzada: Un caso de colaboración multidisciplinar para el desarrollo científico. *Tecnología en Marcha*. Vol. 32 Especial. Marzo 2019. Pág 18-26.

DOI: <https://doi.org/10.18845/tm.v32i5.4168>



- 1 Estudiante de Maestría en Computación del Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: gmocornejos@gmail.com
- 2 Estudiante de Bachillerato en Geología de la Universidad de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: leonardo.vanderlaat@ucr.ac.cr
- 3 Profesor de la Escuela de Computación del Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: emeneses@ic-itcr.ac.cr
- 4 Investigador de la Escuela Centroamericana de Geología de la Universidad de Costa Rica y de la Red Sismológica Nacional (RSN: UCR-ICE). Costa Rica. Correo electrónico: mauricio.mora@ucr.ac.cr
- 5 Investigador del Observatorio Vulcanológico y Sismológico de la Universidad Nacional de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: javier.pacheco.alvarado@una.cr

Palabras clave

Tremores volcánicos; localización de tremores; computación avanzada; Python; Volcán Turrialba.

Resumen

Las señales sismo-volcánicas de baja frecuencia son generadas por el movimiento interno de magma, gases, agua, entre otros. Suelen preceder o acompañar la actividad eruptiva. Por lo tanto, estudiarlos resulta fundamental para el monitoreo de la actividad volcánica y una apropiada estimación de la amenaza. Sin embargo, la complejidad del mecanismo de la fuente hace que los procedimientos clásicos de localización de sismos generados por procesos tectónicos, que son los más comunes, no puedan ser utilizados para los volcánicos. A esto se suma la heterogeneidad de los edificios volcánicos que modifican en gran medida las formas de onda de las señales sismo-volcánicas, lo que también dificulta su procesamiento. Es por ello que se requiere aplicar otro tipo de métodos de tratamiento de señal los cuales, por su complejidad computacional, requieren de plataformas de computación avanzada (supercomputadoras), sobretodo cuando se precisa de resultados en tiempo real. No obstante, los observatorios o entes encargados de la auscultación y monitoreo volcánico en la región centroamericana tienen recursos limitados y no pueden mantener un departamento completo de desarrollo de *software* especializado. La presente ponencia analiza un caso de estudio, en el cual se desarrolló un trabajo colaborativo entre especialistas en sismología volcánica y en computación avanzada, quienes implementaron una plataforma computacional para la localización de señales sismo-volcánicas en el Volcán Turrialba, Costa Rica. Nuestra principal conclusión es que la creación de redes de colaboración multidisciplinaria es una opción que permite maximizar recursos para abordar y superar muchas de las limitaciones que existen para el desarrollo de la investigación en nuestro contexto (falta de recursos humano, tecnología, presupuesto, entre otros).

Keywords

Volcanic tremors; tremor location; advanced computing; Python; Turrialba Volcano

Abstract

Low frequency seismo-volcanic signals are generated by the internal motion of fluids like magma, gases and water. They commonly occur before or together with erupting activity. Therefore, their study is fundamental for monitoring volcanic activity and assessment of volcanic risk. Nevertheless, because of their source complexity, it's not possible to use the classical procedures for seismic location, which were developed for locating the more common tectonic earthquakes. Moreover, the volcanic edifice heterogeneity modifies the waveform of seismo-volcanic signals, making the process of finding its location more challenging. Hence, signals must be processed using other methods that, because of their computational complexity, require advanced computing platforms (supercomputers), specially if real-time processing is required. However, seismic observatories of volcano monitoring in Central America have limited resources and may not afford in-house professional software developers. The present work analyzes a study case about a collaborative experience between specialists in volcano seismology and in advanced computing. We developed a computational platform to locate seismo-volcanic signals in Turrialba Volcano. Our principal conclusion is that the creation of multidisciplinary collaboration networks allow resource maximization to tackle and overcome many limitations common in our context (lack of human resource, technology, low budget, among others).



Introducción

Cuando ocurre un sismo los sistemas de detección automática de la Red Sismológica Nacional de la Universidad de Costa Rica (RSN: UCR-ICE) y del Observatorio Vulcanológico y Sismológico Nacional de la Universidad Nacional de Costa Rica (OVSI-CORI-UNA) estiman, mediante algoritmos sofisticados, el hipocentro del evento en tiempo casi real. Para ello utilizan técnicas clásicas de localización, que se basan en la identificación de los tiempos de arribo de las ondas primarias (P) y secundarias (S) a cada estación sísmica y en el uso de un modelo de velocidades de propagación para dichas ondas. Este proceso permite conocer no sólo los parámetros focales del sismo, a saber: latitud, longitud, profundidad y magnitud, sino también el mecanismo de la fuente, generado con base en las polaridades de las ondas primarias o modelado de las formas de onda. La información de los parámetros focales es almacenada en catálogos sismológicos que luego pueden ser usados para estudiar el comportamiento de las placas tectónicas en las zonas de subducción [1] [2], o para efectuar análisis sismo-tectónicos de una fuente cortical particular o bien, realizar análisis de amenaza sísmica, entre otras aplicaciones.

En los volcanes se producen fallamientos corticales cuyo origen se debe a cambios en los esfuerzos regionales o esfuerzos locales generados por ascenso de magma, variaciones de presión en la cámara magmática o en los conductos volcánicos. Cuando ocurre esto último, los sismos que se generan son llamados sismos volcano-tectónicos o VT. Esta sismicidad es generalmente de baja magnitud ($M_w < 3,0$) aunque en algunos casos pueden generarse eventos de mayor magnitud que generalmente no superan los $M_w = 7,0$. Además existen otros procesos más complejos que ocurren en un volcán, como las vibraciones o expansión de fracturas y otras cavidades debido a la circulación de fluidos (magma, gas, agua, vapor de agua o mezclas de agua y gas o incluso de gas y ceniza), los cuales van a dar origen a una gran variedad de señales caracterizadas por sus bajas frecuencias ($f < 5$ Hz) y primeros arribos emergentes (de poca amplitud) (e.g. [3],[4],[5]). Estas últimas pueden considerarse como ruidos de la «tubería» en el interior del volcán debido a la circulación de fluidos asociados a la actividad magmática o hidrotermal. Esta gama puede dividirse en dos grandes grupos de señales sismo-volcánicas, aquellas que son de corta duración (algunos segundos a decenas de segundos) llamadas sismos de largo periodo (LP) y aquellas vibraciones que pueden durar varios minutos, horas e incluso ser permanentes y que se conocen como tremores.

Mientras que los sismos VT se pueden procesar y localizar con los métodos clásicos de la sismología, el amplio conjunto de señales sismo-volcánicas de baja frecuencia requiere de métodos de procesamiento y localización alternativos. En ambos casos, el análisis es particularmente difícil por cuanto muchas de las fuentes sísmicas involucran el movimiento de fluidos [6] [7] [8], se localizan a profundidades someras y la estructura geológica de los edificios volcánicos es muy compleja y heterogénea, lo cual perturba el campo de ondas y enmascara información importante sobre su fuente [9] [10].

El procesamiento de señales sismo-volcánicas ha progresado paralelamente al desarrollo de la tecnología y la informática. Desde el punto de vista tecnológico el desarrollo de los sismómetros de banda ancha que permiten registrar una amplia gama de periodos por debajo de 1 Hz han revelado una gran cantidad de procesos volcánicos que pueden ser capturados en ese rango, tales como la expansión-contracción de grietas por el paso de fluidos, así como explosiones volcánicas las cuales son generadas por la expansión súbita de un fluido. Estas señales se reconocen por tener períodos muy largos, con energía entre los 5 y 100 segundos, por lo que se denominan sismos de periodo muy largo (VLP o "Very Long Period"). La utilización de los sismómetros de banda ancha ha permitido observar estos movimientos de muy largo periodo ($T > 8$ s) asociadas a explosiones estrombolianas y vulcanianas y que se interpretan como la

respuesta del edificio volcánico a la presión y descompresión de los conductos ligados a las explosiones (e.g. [4], [11]).

Algunos de los avances más importantes en el estudio de las señales sismo-volcánicas son la caracterización del campo de ondas mediante antenas o redes sísmicas densas (conjunto de estaciones dispuestas en distancias cortas) y el desarrollo de métodos alternativos para localización hipocentral de los sismos de baja frecuencia [12] [13] [14] [11]. Sin embargo, el empleo de antenas requiere de la instalación de densas redes sísmicas que requieren de muchos sismógrafos y no son fáciles de mantener.

El trabajo colaborativo presentado en este documento surge de la necesidad de implementar un algoritmo de localización de señales sismo-volcánicas de baja frecuencia con el fin de tener mejores insumos para el seguimiento de la actividad del Volcán Turrialba. Se optó por utilizar el método de localización propuesto por [14], el cual utiliza como datos de entrada las amplitudes de las señales y permite localizar los sismos con una red dispersa y poco densa. Este método se basa en una función d que modela el decaimiento de la amplitud de la señal en función de la distancia:

$$A_{\text{teo}} = d(x,y,z,A_0) \quad (1)$$

Donde x , y y z representan la posición y A_0 la amplitud de la fuente. Para cada valor posible de x , y , z y A_0 , se calcula la diferencia entre un valor calculado teóricamente de la amplitud A_{teo} y el valor de la amplitud registrada en cada estación sísmica A_{obs} :

$$\text{Err} = \sqrt{\frac{\sum (A_{\text{teo}}^i - A_{\text{obs}}^i)^2}{\sum (A_{\text{obs}}^i)^2}} \quad (1)$$

Donde el índice i es el número de estaciones. De lo anterior se desprende que la búsqueda de la solución de la localización se efectúa en todo el volumen del edificio volcánico representado por una cuadrícula de espaciado regular. Aún cuando el costo computacional de evaluar la función Err (y por lo tanto d) puede ser bajo, la cantidad de puntos (x, y, z, A_0) que debe evaluarse hace que el procesamiento no pueda realizarse en computadoras de escritorio comunes. En el cuadro 1, se puede notar que cada incremento en la resolución de la cuadrícula de búsqueda provoca un incremento de tres órdenes de magnitud en el número total de puntos que deben ser evaluados. Por lo anterior, se constituye un escenario ideal en el que la computación avanzada puede brindar soluciones tecnológicas oportunas para mejorar la calidad de la investigación científica a través de la colaboración multidisciplinaria.



Cuadro 1. Número de evaluaciones de la función Err según la resolución de la cuadrícula.

| Condiciones | Puntos por km | Total de puntos en el volumen |
|-------------------------------------|---------------|-------------------------------|
| Área superficial: 4 km ² | 1 | 2240 |
| Profundidad máxima: 2 km | 10 | 2240000 |
| Amplitud máxima: 0.007 mm | 100 | 2240000000 |
| Pasos de amplitud: 0.0001 mm | 1000 | 2240000000000 |

En este trabajo se discuten los diferentes aspectos que deben considerarse al iniciar una colaboración que sigue un patrón semejante al expuesto anteriormente: un grupo de investigación consolidado en un área particular del conocimiento (sismología volcánica) junto con un grupo especializado en una tecnología particular (computación avanzada). El objetivo es consolidar dicha colaboración, mejorar la calidad e impacto de la investigación y el intercambio de habilidades entre los miembros de ambos grupos.

Materiales y métodos

Reconsidere el caso planteado anteriormente. Se tiene un grupo de especialistas en un área particular del conocimiento (los llamaremos *sofos*), además, un grupo de especialistas en una tecnología en particular (ídem, *tektons*). Se pretende responder la pregunta ¿cuáles son los elementos necesarios para que ambos grupos puedan colaborar exitosamente? Como punto de partida, vale la pena explorar la motivación que impulsa la colaboración, es decir, ¿por qué necesitamos de los otros?

La colaboración nace de la necesidad de resolver un problema concreto [15]. En nuestro caso de estudio, los sismólogos volcánicos no pueden utilizar cuadrículas muy finas para la localización de señales sismo-volcánicas, pues el problema se vuelve computacionalmente intratable. Como resultado, la oportunidad de colaboración nace a partir de la identificación de dicho problema por parte del grupo de *sofos*. Esto de ninguna manera significa que el grupo de *tektons* deba esperar pasivamente el acercamiento de sus pares. Todo lo contrario, su primera preocupación debe ser publicitar apropiadamente la tecnología que dominan como una herramienta al trabajo de investigación.

En resumen, el trabajo del grupo *sofos* es identificar aquellos elementos tecnológicos de su metodología de trabajo que limitan la precisión o calidad de sus investigaciones. El trabajo del grupo de *tektons* es educar a sus posibles pares sobre la tecnología de su especialidad. A partir de estas acciones, ambos grupos pueden encontrar un problema concreto que atacar de manera colaborativa.

Nótese que la oportunidad de colaboración aparece por una brecha entre las habilidades, conocimiento y recursos de ambos grupos. Paradójicamente, el esfuerzo colaborativo, en primera instancia, debe enfocarse en disminuir dicha brecha, pues en nuestra experiencia para una colaboración efectiva es necesario entender los fundamentos del trabajo de nuestros pares. De lo contrario, la relación se entendería como una prestación de servicios, que no aporta valor al trabajo científico, sino que simplemente lo hace posible. Es por ello que en un contexto económico y social complejo, donde existen dificultades para acceder a grandes fuentes de financiamiento y la contratación de personal está limitado por el crecimiento presupuestario, este tipo de alianzas resultan estratégicas. En sí mismas significan optimización y mejor uso de los recursos.

Esto es otro de los elementos que identificamos como necesarios en el trabajo colaborativo. Este debe resultar en productos de mayor valor que el trabajo individual, lo cual suele presentarse como la definición de colaboración sinérgica [15]. De manera más concreta, el trabajo colaborativo debe tener valor tanto para la comunidad del grupo *sofos* como para la comunidad del grupo *tektons*. En nuestro caso de estudio, la colaboración permitió localizar sismos volcánicos con una cuadrícula fina, lo que mejoró la calidad de los resultados (ciencia) y al mismo tiempo el esfuerzo técnico necesario para conseguirlo es un aporte al conocimiento en el área de computación avanzada (tecnología).

En todas las áreas del conocimiento existen espacios para el intercambio de ideas: congresos, seminarios, revistas, libros, por enunciar algunos. Como mencionamos anteriormente, uno de los elementos necesarios en el trabajo colaborativo es el intercambio de habilidades, que se cristaliza en espacios como reuniones de trabajo y talleres. En nuestro caso de estudio, los *tektons* han recibido tutorías para adquirir nuevas habilidades y conocimiento en el área de sismología volcánica. Los *sofos* han recibido talleres de programación científica y paralela. A largo plazo, los profesionales expuestos a este intercambio de habilidades se convierten en recurso humano especializado en la fusión de ambas disciplinas. Como contraparte, la plataforma tecnológica de ambos grupos también sufre cambios, pues se adapta también a dicha fusión.

Ahora bien, ¿por qué reconocemos estas acciones como elementos necesarios? Para identificar las oportunidades de innovación, los especialistas de cada área deben poder diferenciar el conocimiento establecido de las preguntas de investigación del área de sus pares (lo que se sabe contra lo que se puede descubrir) y considerar cómo pueden ayudar en su solución. Este es el verdadero fin del intercambio de habilidades. No se espera que los miembros de un grupo sean también especialistas en el área de sus pares, sino que puedan identificar los problemas reales y colaborar en su solución. En nuestro caso, contar con la capacidad de localizar rápidamente los sismos volcánicos dió origen a un tratamiento estadístico de los datos levemente diferente al establecido y resultó en una mayor certeza sobre la ubicación de los eventos, esta fue una sugerencia del grupo de *tektons*.

Durante la colaboración, los miembros de cada grupo deberán expresar sus ideas y dudas de manera que puedan ser comprendidas por sus pares. En nuestra experiencia la jerga propia de cada disciplina puede ser una barrera equivalente a la barrera lingüística. Durante los diferentes espacios de intercambio de habilidades, ambas partes deben esforzarse en crear un lenguaje común. No se trata de crear un lenguaje sectario, sino del proceso natural de creación de nuevos conceptos. Al interactuar dos grupos con perspectivas diferentes del mismo problema concreto con el fin de darle solución, los nuevos conceptos e ideas que surjan como parte de este esfuerzo serán expresados en esa jerga, que nace como una amalgama de las jergas propias de cada área.

Finalmente, una vez que los grupos han conseguido establecer una colaboración con los elementos mencionados, su principal preocupación debe ser la consecución de fondos, pues el financiamiento para los proyectos en conjunto es lo que permitirá consolidar la colaboración. Esto se facilita por dos razones fundamentales: 1) Existe en las universidades y otras instancias, fondos especializados para grupos de trabajo multidisciplinar; 2) La colaboración sinérgica suele resultar en ideas innovadoras, cuya dificultad de ejecución es menor que intentar conseguir innovar en cada una de las áreas de especialidad de los grupos. Esta idea no es nueva y se basa en la diferencia entre innovación creativa contra innovación híbrida [17].

Resultados y discusión

En esta sección presentaremos la estructura del proceso colaborativo que identificamos al aplicar las ideas expuestas en la sección anterior. Además, resaltaremos como se han implementado cada uno de los factores que identificamos como fundamentales para la colaboración multidisciplinaria efectiva: sinergia, intercambio de habilidades, lenguaje común y consecución de fondos. La figura 1 muestra una representación del proceso.

En primer lugar tenemos a los dos grupos involucrados: *sofos* y *tektons*. En nuestro caso de estudio, *sofos* está representado por los especialistas en sismología volcánica de la RSN y el OVSICORI. Ya existía en el grupo la conciencia de que se requería mayores recursos computacionales para varias de las investigaciones que se deseaban realizar en los observatorios y esto facilitó el inicio de la colaboración. En los casos en que dicha conciencia no sea compartida por muchos se debe buscar a miembros pioneros de la comunidad dispuestos a probar la nueva tecnología.

El grupo de los *tektons* está representado por los especialistas en computación avanzada del Centro Nacional de Alta Tecnología (CeNAT) y el Tecnológico de Costa Rica. La colaboración inició después de una reunión solicitada por este grupo a diferentes investigadores de los observatorios sismológicos. La reunión tenía como fin promover el uso de la infraestructura computacional instalada en el CeNAT y ofrecer a los investigadores soporte técnico para migrar sus investigaciones a dicha infraestructura.

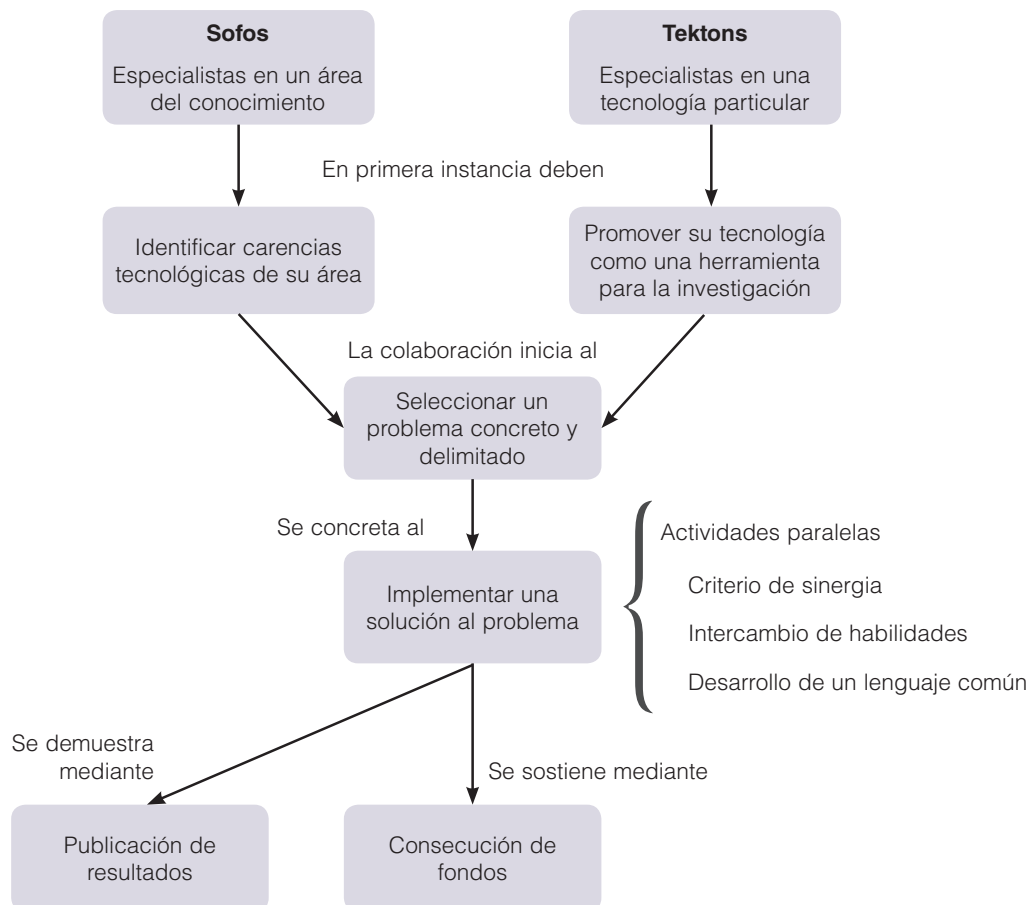


Figura 1. Representación del proceso de colaboración.

A partir de dicha reunión se seleccionaron varios problemas a tratar, entre ellos: localización de señales sismo-volcánicas, tomografía sísmica del Volcán Turrialba, tomografía sísmica de Costa Rica e identificación de sismos pequeños en el sur de Costa Rica. Todos estos proyectos presentan algún grado de desarrollo, sin embargo, por sus particularidades técnicas, el proyecto de localización de señales sismo-volcánicas ha avanzado más rápidamente que el resto, hasta el punto de conseguir redactar publicaciones y permitir asegurar fondos.

En los primeros meses del presente año se desarrolló una aplicación paralela en el lenguaje de programación Python. Se capacitó brevemente a uno de los colaboradores del grupo *sofos* en programación científica (intercambio de habilidades), quien desarrolló una implementación mínima del programa de localización de tremores. Esta implementación se optimizó y se reescribió para la plataforma computación de CeNAT. La versión paralela consigue localizar los eventos sísmicos con una resolución de 10 metros en unas 90 horas. Se estima que la versión mínima requeriría un par de meses para completar el trabajo.

Este proyecto también cumple con el criterio de sinergia. Recapitulando, el resultado del trabajo colaborativo debe ser valioso para ambos grupos y no podría haber sido alcanzado individualmente [16]. Los resultados de localización de tremores en el Volcán Turrialba ya han sido presentados en foros especializados de sismología y se preparó un artículo para un foro especializado en ingeniería. Este artículo evidencia el fenómeno de creación de un lenguaje común, pues el fundamento matemático de los modelos utilizados en sismología son comunes en ingeniería, denominado en cada una de las áreas funciones de Green y funciones de transferencia, respectivamente. También el análisis en tiempo-frecuencia utilizado en sismología son similares a los espectrogramas utilizados en análisis de señales.

Finalmente, se aseguró la continuidad de la colaboración a través del fondo para redes temáticas de la Vicerrectoría de Investigación de la Universidad de Costa Rica que permitió conformar la Red en sismología computacional para el estudio de los volcanes activos en Costa Rica. En el marco de esta misma red, se han redactado propuestas para las vicerrectorías de investigación de las universidades, con el fin de financiar también los proyectos mencionados anteriormente. En todos estos casos, las propuestas de investigación no habrían podido ser planteadas sin la colaboración de ambos grupos, pues es la mezcla de habilidades la que permite proponer soluciones innovadoras.

Conclusiones y recomendaciones

En el presente trabajo se describió una metodología general de colaboración entre dos grupos de especialistas: uno conformado por expertos en un área particular del conocimiento (*sofos*) y el otro conformados por expertos en una tecnología particular (*tektons*). El proceso inicia cuando *sofos* identifica una necesidad en su trabajo de investigación y por su parte *tektons* divulga efectivamente la existencia de la tecnología para llenar esa necesidad.

Ambos grupos deben trabajar en definir un problema de interés común, concreto y delimitado. Al implementar una solución al problema, existen actividades transversales que identificamos como fundamentales en el proceso de colaboración, estas son: vigilar el criterio de sinergia, crear espacios para el intercambio de habilidades y desarrollar un lenguaje común. El éxito del trabajo colaborativo puede evidenciarse mediante publicaciones y la creación de otros productos tangibles.

Finalmente, una preocupación prioritaria deber ser la consecución de fondos para el sostenimiento de la colaboración. En nuestra experiencia, el trabajo colaborativo multidisciplinar facilita esta tarea, pues existen fondos especializados y la simple composición del grupo suele generar soluciones innovadoras que involucran las habilidades de ambas áreas de especialidad.



Agradecimientos

G.C.S desea agradecer al Dr. rer. nat. Francisco Siles Canales por sus discusiones sobre la naturaleza de la colaboración multidisciplinaria. Este trabajo es parte de la actividad de investigación *Red en sismología computacional para el estudio de los volcanes activos en Costa Rica* (N° 113-B8-767) y también financiado parcialmente por los proyectos Geofísica y Geodinámica Interna del Arco Volcánico en Costa Rica (N°113-B5-A00) y Apoyo de asistentes a la Sección de Sismología, Vulcanología y Exploración Geofísica (N° 113-A1-716), todos inscritos en la Vicerrectoría de Investigación de la Universidad de Costa Rica. Asimismo el financiamiento que la RS (UCR-ICE) y el OVSICORI-UNA reciben de la Ley Nacional de Emergencias N° 8488 es fundamental para la sostenibilidad y modernización de la instrumentación sismológica instalada en el volcanes activos. Se reconoce la labor de los técnicos Luis Fernando Brenes y Jean Paul Calvo por el mantenimiento de la red de instrumentos de la RSN (UCR-ICE).

Referencias

- [1] I. Grajales, «Tecnología permite visualizar sismos en 3D», *Investiga TEC*, n.o 30, pp. 2–2, 2017.
- [2] S. Husen, R. Quintero, E. Kissling, y B. Hacker, «Subduction-zone structure and magmatic processes beneath Costa Rica constrained by local earthquake tomography and petrological modelling», *Geophys. J. Int.*, vol. 155, n.o 1, pp. 11–32, 2003.
- [3] B. A. Chouet, «New methods and future trends in seismological volcano monitoring», en *Monitoring and mitigation of volcano hazards*, Springer, 1996, pp. 23–97.
- [4] B. A. Chouet, «Long-period volcano seismicity: its source and use in eruption forecasting», *Nature*, vol. 380, n.o 6572, p. 309, 1996.
- [5] S. R. McNutt, «Volcano seismology and monitoring for eruptions», *Int. Geophys. Ser.*, vol. 81, n.o A, pp. 383–406, 2002.
- [6] B. R. Julian, «Volcanic tremor: nonlinear excitation by fluid flow», *J. Geophys. Res. Solid Earth*, vol. 99, n.o B6, pp. 11859–11877, 1994.
- [7] S. R. McNutt, Volcanic Seismicity, Chapter 63 of *Encyclopedia of Volcanoes*, Sigurdsson, H., B. Houghton, SR McNutt, H. Rymer, and J. Stix (eds.), Academic Press, San Diego, CA, 2000.
- [8] B. Chouet, «Volcano seismology», *Pure Appl. Geophys.*, vol. 160, n.o 3-4, pp. 739–788, 2003.
- [9] J. P. Métaixian, P. Lesage, R. Barquero, y A. Creusot-Eon, «Características espectrales de las señales sísmicas y estimación de Vp en la estructura superficial del volcán Arenal», *Bol. Obs. Vulcanológico Arenal Costa Rica Año*, vol. 6, pp. 11–12, 1996.
- [10] M. Mora, «Etude de la structure superficielle et de l'activité sismique du volcan Arenal, Costa Rica», PhD Thesis, 2003.
- [11] B. Chouet, P. Dawson, y A. Arciniega-Ceballos, «Source mechanism of Vulcanian degassing at Popocatepetl Volcano, Mexico, determined from waveform inversions of very long period signals», *J. Geophys. Res. Solid Earth*, vol. 110, n.o B7, 2005.
- [12] A. Jurkevics, «Polarization analysis of three-component array data», *Bull. Seismol. Soc. Am.*, vol. 78, n.o 5, pp. 1725–1743, 1988.
- [13] P. Lesage, F. Glangeaud, y J. Mars, «Applications of autoregressive models and time–frequency analysis to the study of volcanic tremor and long-period events», *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, vol. 114, n.o 3-4, pp. 391–417, 2002.
- [14] J. Battaglia y K. Aki, «Location of seismic events and eruptive fissures on the Piton de la Fournaise volcano using seismic amplitudes», *J. Geophys. Res. Solid Earth*, vol. 108, n.o B8, 2003.
- [15] J. S. Katz y B. R. Martin, «What is research collaboration?», *Res. Policy*, vol. 26, n.o 1, pp. 1–18, 1997.
- [16] H. Corbin, L. Corwin, y M. B. Mittelmark, «Producing synergy in collaborations: A successful hospital innovation», *Innov. J. Public Sect. Innov. J.*, vol. 17, n.o 1, p. Article–5, 2012.
- [17] C. Christensen, M. Horn, y H. Staker, *Is K–12 blended learning disruptive? An introduction of the theory of hybrids* Christensen Institute. Clayton Christensen Institute for Disruptive Innovation. 2013.