

**Instituto Tecnológico de Costa Rica
Escuela de Computación**

Mejoramiento del modelo de la estructura interna de capas y corteza del Volcán Turrialba

Informe Final

Esteban Meneses, PhD (Coordinador)

2019

Tabla de contenido

Datos del proyecto	3
Autores y direcciones	3
Resumen	3
Palabras clave	3
Introducción	4
Marco teórico	5
Sismología computacional	5
Modelo de la corteza terrestre	6
Computación avanzada	7
Metodología	7
Resultados	8
Diseño del programa	9
Evaluación experimental	10
Discusión y Conclusiones	12
Recomendaciones	13
Agradecimientos	13
Referencias	14
Apéndice (confirmación de publicación de artículo)	17

Datos del proyecto

Código: 5402-1370-0007

Título: Mejoramiento del modelo de la estructura interna de capas y corteza del Volcán Turrialba

Autores y direcciones

Asesores externos: Dr. Mauricio Mora (mauricio.mora@ucr.ac.cr, Escuela Centroamericana de Geología, Universidad de Costa Rica), Dr. Javier Pacheco (javier.pacheco.alvarado@una.cr, Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica)

Estudiante de posgrado: Bach. Luis Guillermo Cornejo (gmocornejos@gmail.com)

Coordinador: Dr. Esteban Meneses (esmeneses@tec.ac.cr)

Resumen

La actividad volcánica tiene un efecto importante en las actividades humanas y la infraestructura. Las recientes erupciones volcánicas de los volcanes Poás y Turrialba han impactado económicamente a las comunidades circundantes: algunos parques nacionales y aeropuertos han debido cerrarse temporalmente; ganado, pobladores y escuelas se han tenido que reubicar. El reconocimiento de esta amenaza sirve como motivación para que las autoridades locales y la comunidad científica use infraestructura moderna de computación para mejorar nuestro entendimiento de los fenómenos vulcanológicos. Esta propuesta implica la construcción de una plataforma de computación avanzada para mejorar el modelo de la estructura interna de capas de un volcán y la ubicación de temblores volcánico-tectónicos. Toda esta información, junto con modelos teóricos, ofrecerá un mejor entendimiento de la dinámica del Volcán Turrialba.

Palabras clave

Sismología computacional, simulación, computación avanzada

Introducción

Los edificios volcánicos son estructuras muy complejas, que se construyen capa tras capa a partir de múltiples procesos eruptivos como flujos de lava, corrientes de densidad piroclástica, precipitaciones de cenizas y otros procesos violentos o erosivos tales como avalanchas de escombros y lahares. La composición, densidad, porosidad y granularidad varían de una capa a la siguiente, creando una estructura muy compleja en tres dimensiones. Esta complejidad y la topografía de los estratovolcanes hace que sea muy difícil calcular los tiempos de recorrido de onda y las variaciones de amplitud de onda dentro de una estructura volcánica con métodos tradicionales. Los tiempos exactos de recorrido y las amplitudes de onda son esenciales para la localización de temblores y la determinación de magnitud en un ambiente volcánico.

Sin un posible acceso físico a las muestras del interior volcánico, el único método de estudio disponible es la recolección pasiva de datos a través de la teledetección, el modelado y la simulación computacional. Como lo señalan [Cashman y Sparks, 2013], gracias a las mejoras en las instalaciones computacionales “nuestra comprensión de los procesos físicos que impulsan las erupciones volcánicas ha aumentado enormemente”. A raíz de esta argumentación, estos avances han sido motivados por el entendimiento de que la población y la infraestructura están expuestas a los peligros volcánicos más que nunca.

En Costa Rica, la actividad de los volcanes Poás y Turrialba ha afectado a los residentes, la agricultura y la industria turística. Desde el año 2015, una fuerte actividad eruptiva ha obligado a la reubicación de residentes, una escuela y granjas de ordeño cerca del volcán Turrialba [Dyer, a]. El 4 de mayo de 2017, la caída de ceniza volcánica forzó a los administradores a cerrar el Aeropuerto Internacional Juan Santamaría durante 12 horas, afectando una docena de vuelos [Dyer, b]. El volcán Poás presentó una fuerte actividad eruptiva desde abril y obligó a cerrar el Parque Nacional, afectando significativamente al turismo, que es la principal actividad económica de la región [Arias, a], [Arias, b].

Los observatorios geológicos costarricenses mantienen un registro de erupciones volcánicas, emanaciones, dispersión de cenizas y actividad sísmica. La información recogida se analiza para informar a la población y las autoridades sobre la actividad volcánica y los peligros potenciales. Sin embargo, el país carece de una plataforma de computación avanzada que implemente software de simulación y modelado geofísico moderno en un superordenador masivamente paralelo. El acceso abierto a esa plataforma para los científicos locales permitiría transformar esos datos en información más sofisticada y útil.

Por ejemplo, la localización de un temblor podría ser mapeada a conductos importantes del volcán. Un modelo de corteza más preciso podría ayudar a explicar la historia geofísica. Los registros antiguos podrían ser procesados con tecnología moderna para obtener indicios sobre la mecánica que propulsa la actividad volcánica intensa. Al combinar esta información con modelos teóricos de dinámica volcánica, los científicos pueden derivar una mejor comprensión del comportamiento local de los volcanes, mejorando así nuestra capacidad para evaluar el peligro volcánico.

El Instituto Tecnológico de Costa Rica tiene la investigación como área prioritaria de su quehacer (según se desprende del último congreso institucional). Esta investigación tiene un mayor impacto en el país si es aplicada directamente a la problemática de sismología en los ambientes volcánicos. Para lograr este impacto, este proyecto buscará la vinculación con expertos en sismología de la UCR y UNA. La vinculación es otra directriz fundamental en la institución para incrementar el impacto de la investigación.

Marco teórico

Sismología computacional

La sismología computacional permite entender fenómenos complejos que suceden bajo la superficie terrestre. En particular, la propagación de ondas sísmicas es de vital importancia para estimar el impacto de los fenómenos sismológicos en un área geográfica particular. La propagación de ondas es un tema muy estudiado. Las primeras publicaciones sobre el tema se hicieron ya desde finales del siglo XIX, y múltiples revisiones se han publicado desde entonces. La teoría base de la propagación de ondas es aplicada en muchas áreas de investigación, por ejemplo en telecomunicación, en aplicaciones médicas (ultrasonido) y en el caso específico de este proyecto, sismología. En cada área, los modelos de simulación se modifican y especializan según el objeto de estudio. Así por ejemplo, en ultrasonido médico, gran parte de los esfuerzos de investigación se dedican a estudiar y simular emisores para crear ondas enfocadas, mientras en sismología el interés se concentra en los modelos de propagación.

Las ondas sísmicas son ondas mecánicas que viajan a través de las capas de la tierra. Estas se pueden clasificar en 2 tipos: internas y superficiales [Chapman 2004]. Las ondas internas viajan largas distancias y con gran velocidad. Cuando llegan a la superficie, generan las ondas superficiales. Cuando se habla de propagación de ondas sísmicas, normalmente se refiere a la propagación de las ondas internas. Para su estudio y simulación existen dos enfoques principales: teoría de rayos (métodos analíticos) y métodos numéricos puros. La teoría de rayos (SeismicRayTheory), propuesta por Cerveny en 1971[Cerveny 2005]. En ésta, las ondas sísmicas son simplificadas y representadas por medio de rayos (similar a como imaginamos rayos de luz). Con este enfoque es posible estudiar características individuales de las ondas y en muchos casos se utilizan también aproximaciones para reducir la cantidad de cálculos requeridos. El resultado son simulaciones sencillas que entregan resultados en muy poco tiempo. Además, porque se toman en cuenta solamente pocas variables, los resultados se pueden analizar e interpretar fácilmente. Sin embargo, aunque en muchos casos esas simplificaciones y aproximaciones son aceptables, la potencial pérdida de información que resulta de ellas, obliga a investigadores a utilizar métodos numéricos.

Los métodos numéricos contemplan en su solución múltiples variables por lo que los resultados obtenidos son precisos, comparables con datos reales. Por la cantidad de datos que generan y el tiempo requerido para obtener resultados, los métodos numéricos se tornan imprácticos. Es con el auge de tecnologías de computación paralela que estos métodos se

vuelven populares, ya que se pueden obtener resultados en cuestión de un par de horas o incluso minutos, en lugar de días. Entre los métodos más utilizados se encuentran los métodos de elementos finitos [Moczo et al. 2007; Serón et al. 1990] porque se adaptan fácilmente a diversos tipos de problema. Una ventaja que sobresale es que los elementos utilizados no son necesariamente iguales, lo que permite también obtener resultados más detallados (usando más elementos de menor tamaño) en áreas donde sea necesario. Los métodos de elementos espectrales [Komatitsch et al. 2005] son preferidos cuando es necesario modelar la propagación de ondas dentro de geometrías complejas que presenten principalmente discontinuidades en forma de, por ejemplo grietas o fallas. Por último, probablemente el modelo más utilizado es el método de diferencias finitas [Virieux 1984; Graves 1996; Aochi et al. 2013]. En este método se utiliza una malla regular para los cálculos y su mayor ventaja sobre los dos métodos anteriores es la facilidad con que los problemas se pueden modelar e implementar. Además, estos métodos admiten una paralelización no compleja.

Modelo de la corteza terrestre

Después de un importante evento sísmico, los observatorios geológicos informan a la población sobre la magnitud del terremoto y el hipocentro. Esto implica utilizar un modelo de corteza para encontrar la fuente de las señales capturadas por los sismómetros. Este procedimiento se conoce como inversión de la fuente, su exactitud depende de la cobertura del sismómetro y de la exactitud del modelo de la corteza. El mapeo de la magnitud y la posición de los eventos ofrece información sobre las fuentes sísmicas naturales como las fallas locales y las zonas de subducción. Se espera que los eventos sísmicos se agrupen alrededor de este tipo de áreas.

La tomografía es un procedimiento que consiste en encontrar un modelo de corteza que explique con precisión las señales registradas en los sismómetros. Este es un problema inverso que requiere una fuente sísmica dada (explosión, terremoto, ruido) con características definidas. Las técnicas de tomografía modernas utilizan el ruido ambiente microsísmico --- ruido producido por la marea y las condiciones atmosféricas --- como se presenta en [Sabra et al., 2005], [Shapiro y Campillo, 2004]. La resolución espacial de la tomografía depende de la cobertura y distribución del sismómetro. El procedimiento requiere el cálculo de descriptores matemáticos simples, pero el número de cálculos es factorial en el número de estaciones sísmicas en la región y el tiempo de la señal se extiende a lo largo de meses, sumando hasta Terabytes de información. No obstante, estos cálculos son independientes y el paralelismo podría explotarse para acelerar el tiempo necesario para obtener resultados.

Como muestran los experimentos [Villaseñor et al., 2007], [Bensen et al., 2009], el modelo matemático de la corteza guarda similitud con las formaciones físicas reales. Por ejemplo, las formaciones más densas, como las montañas, aparecen como zonas de dispersión de ondas sísmicas de alta velocidad, mientras que las formaciones más suaves, como las cuencas, aparecen como zonas de dispersión de ondas sísmicas de baja velocidad. La combinación de esta información con la historia geofísica ayuda a explicar las formaciones y anomalías actuales. Suponiendo que el modelo de corteza generado con simulaciones es más preciso que el actual, se espera una mejora en la ubicación del hipocentro para los terremotos pasados.

Como se indicó anteriormente, los hipocentros se agrupan alrededor de las áreas y estructuras activas, su reubicación podría revelar la posición, la orientación y la longitud de esas estructuras.

Computación avanzada

La computación avanzada o computación de alto desempeño o HPC por sus siglas en inglés (high performance computing) tiene como objetivo utilizar la gran cantidad de procesamiento disponible en las diferentes arquitecturas de computación para resolver problemas científicos e ingenieriles [HAG10]. Usualmente, la comunidad de HPC utiliza supercomputadoras para correr programas que representan simulaciones de modelos científicos o ingenieriles. Las supercomputadoras son equipos paralelos que aglomeran gran cantidad de nodos computacionales. Los nodos aportan todo el poder computacional, pero requieren de otros componentes, como la red de interconexión, el sistema de almacenamiento y toda la colección de software necesaria para el correcto funcionamiento de las simulaciones. La supercomputación ha tenido un gran empuje en los últimos años gracias a la abundante disponibilidad de FLOPS (operaciones de punto flotante por segundo) en las arquitecturas modernas. Desde chips en computadoras de escritorio hasta chips en teléfonos celulares, los procesadores modernos son multi-núcleo. Este paralelismo generalizado hace que los métodos numéricos demandantes tengan una gran oportunidad. En particular, dispositivos de hardware especializados, llamados "aceleradores" han tenido un auge últimamente gracias a su bajo consumo energético [Kirk 2012]. Las unidades de procesamiento gráfico o GPU por sus siglas en inglés (graphic processing unit) encierran cientos de núcleos muy sencillos, pero a la vez poderosos, en un solo circuito integrado. Las últimas versiones de GPUs logran llegar a 1 teraFLOP (10¹² FLOPs). Es por ello que los GPUs representan un aliado indiscutible en las técnicas de simulación para sismología.

Metodología

Para el objetivo específico de *Analizar cobertura y distribución de sismómetros*, se usa el hecho de que un mapa de la ruta de rayo liga cada sismómetro con todos los otros en una región, la densidad de las rutas de rayo por unidad de área aproxima la probabilidad de tener bastante información para generar una inversión significativa de esa área. Generar un mapa de rutas de rayo fue el primer paso en el proceso. Esa información complementó el análisis de la exactitud de la tomografía.

Para el objetivo específico de *Aproximar la función de Green usando ruido sísmico de ambiente*, las señales de sismómetros dentro de la región geográfica delimitada, de junio de 2016 a junio de 2017 fueron recolectadas. El preprocesamiento de señal siguió la metodología presentada en [Bensen et al., 2007], pero como se indica en [Bensen et al., 2009], las señales de giro a valores binarios introducen ruido de alta frecuencia en el modelo. Por lo tanto, una ecualización de coseno-tapper se aplicó a los valores atípicos estadísticos relacionados con importantes eventos sísmicos, como los terremotos.

Para los objetivos específicos de *Generar un mapa de dispersión del área alrededor del Volcán Turrialba* y *Producir una inversión 3D o pseudo-3D del área que rodea al Volcán Turrialba*, las señales se recortaron por días y se apilaron para producir una estimación de la función de Green, que se utilizó para generar un mapa de inversión y dispersión de ondas superficiales 2D de la región. A partir de [Bensen et al., 2009] [Behr et al., 2011], se realizó la inversión de ondas corporales para producir un modelo de tomografía o pseudo-3D (según disponibilidad de datos) de la corteza bajo el volcán Turrialba.

Para el objetivo específico de *Recalcular la ubicación de los hipocentros de los temblores*, el procedimiento de reubicación se llevó a cabo utilizando el software SeisComp 3, utilizando el modelo de corteza desarrollado anteriormente. Los ajustes manuales, cuando fueron necesarios, se hicieron utilizando el software SEISAN, bajo la supervisión de personal capacitado de observatorios geológicos nacionales.

Los datos del proyecto se tomaron de los repositorios abiertos que proveen el OVSICORI y la RSN. También se utilizará la plataforma computacional del Centro Nacional de Alta Tecnología (CeNAT) al que tienen acceso todos los miembros de las universidades públicas de CONARE.

La delimitación del análisis está dado por:

- El área geográfica considerada está delimitada por las coordenadas 9.779 y 10.230 de latitud, -84.105 y -83.520 de longitud, expresadas como grados decimales en el sistema de referencia WGS84.
- Sólo se utilizarán estaciones sísmicas de las redes permanentes OV (OVSICORI) y TC (RSN-UCR).

Resultados

En la sismología clásica, para ubicar una fuente de eventos sísmicos, la forma de onda 3D registrada en cada estación sísmica se reduce a un solo valor. Este procedimiento podría entenderse como una extracción de características. Por ejemplo, las señales tectónicas se ubican usando los tiempos de llegada la onda primaria a cada estación. Luego, utilizando un modelo geofísico de velocidad de onda sísmica, el hipocentro se ubica como el punto más probable para producir esa diferencia en el tiempo de llegada entre los componentes de las ondas P (primaria) y S (secundaria). Las señales tectónicas son fáciles de detectar, ya que su forma de onda tiene un comienzo abrupto y el evento dura unos segundos. Por otro lado, otras señales volcánicas son emergentes, aumentan lentamente desde el ruido de fondo y pueden durar días. El método estándar para la ubicación del hipocentro de eventos sísmicos depende de la identificación clara del inicio de los componentes *P* y *S*, por lo tanto, no se puede usar en señales volcánicas. El método alternativo consiste en extraer otra característica de la señal en los registros sísmicos y luego La simulación de la propagación sísmica afecta esa característica. Esto se calcula para cada punto en una cuadrícula regular sobre el volumen del volcán. El punto en la cuadrícula que produce el error más pequeño se elige como el hipocentro de evento más probable. Naturalmente, este método es sensible a la resolución de la cuadrícula. Cuanto más fina es la cuadrícula, más preciso se vuelve, pero también aumenta el

tiempo de cómputo. Por lo tanto, los investigadores deben sopesar la resolución de la red por el tiempo de cálculo. Hay dos estrategias obvias para disminuir este problema, sin excluirse mutuamente: un algoritmo de búsqueda inteligente y el paralelismo. El primer enfoque utiliza una técnica de optimización como la escalada de colinas o la caminata aleatoria. Sin embargo, todavía es posible aumentar la resolución de la red hasta que el tiempo de computación se vuelva inaceptable. El segundo enfoque, en su forma más simple, utiliza la fuerza bruta para evaluar cada punto de la cuadrícula, pero divide el trabajo entre muchos procesadores, dividiendo efectivamente el tiempo de computación por el número de procesadores. Elegimos la segunda alternativa porque es más simple de implementar y asegura encontrar el punto de error mínimo. Las implementaciones posteriores podrían explorar enfoques mixtos y utilizar el que se presenta aquí como referencia

Diseño del programa

Sucintamente, el método consiste en encontrar las coordenadas $(x, y, z, A0)$ que minimiza la función $Err(x, y, z, A0, Aobs)$. El enfoque de fuerza bruta evalúa la duración de cada combinación posible de parámetros dentro de los límites físicos y geográficos. Luego, al final, se aplica la operación de reducción de $min()$. El pseudo-código en la Figura 1 muestra una implementación sencilla del algoritmo.

Algorithm 1 Source location algorithm

Require: err: map of tuple to float
Require: Xrange: list of x values
Require: Yrange: list of y values
Require: Zrange: list of z values
Require: Arange: list of amplitude values
Require: Stations: a list of stations

```

1:   for x in Xrange do
2:     for y in Yrange do
3:       for z in Zrange do
4:         for A0 in Arange do
5:           error := 0
6:           obs := 0
7:           for s in Stations do
8:             r := s.distance(x, y, z)
9:             A := A0 * e(-B*r) / r
10:            error += (A - s.amplitude)2
11:            obs += (s.amplitude)2
12:          end for
13:          err[(x, y, z, A0)] = sqrt(error/obs)
14:        end for
15:      end for
16:    end for
17:  end for
18:  loc := min(err)

```

Figura 1. Algoritmo para encontrar la localización de la fuente.

Como se mencionó anteriormente, cada evaluación de $Err(x, y, z, A_0, A_{obs})$ es independiente y podría distribuirse de forma independiente entre procesadores de un sistema paralelo. Nosotros no usamos las operaciones de dispersión para distribuir los puntos (procesador x, y, z y A). En su lugar, usamos el número de procesador para reducir esos valores para cada rango. Así, se reduce la transmisión de datos. Al final, la operación de el $min()$ en la línea 18 del la Figura 1 se implementa como una operación colectiva. El rango cero lee los eventos de un catálogo y distribuye los datos del evento (amplitud de valores en cada procesador) utilizando un colectivo de difusión. Esto se ilustra en la Figura 2.

Algorithm 2 Program design

Require: events: catalog of events
 {Deduce x, y, z and A ranges from rank number}

2: **for** event in events **do**
 event = communicator.broadcast(event)

4: local_loc := {Call Algorithm 1}
 location := communicator.reduce(local_loc, MIN)

6: **end for**

Figura 2. Algoritmo para la ejecución paralela del Algoritmo 1.

Evaluación experimental

El Volcán Turrialba es un estratovolcán ubicado en la región central de Costa Rica. La altura de sus edificios es de 1900 metros, con un pico de 3340 metros sobre el nivel medio del mar. Pertenece a la región central de la costa, que comparte su sótano con el Volcán Irazú.

Desde 1996, los observatorios sísmicos nacionales registraron un rango de sismicidad y composición de gas emanado en el Volcán Turrialba. La actividad sísmica y la desgasificación se intensificaron a partir de 2003 y, finalmente, el volcán entró en actividad en erupción en 2007, con picos de actividad en los años siguientes. The Red Sismológica Nacional estima que alrededor de dos millones de personas podrían verse afectadas por la actividad del Volcán Turrialba. Para probar si la implementación de nuestra implementación tiene significado físico, procesamos 430 eventos de LP-tremor que ocurrieron desde mayo hasta junio de 2016. La Figura 3 muestra la ubicación de todos los eventos y los parámetros utilizados en el procedimiento de ubicación. Debido a que no hay experimentos previos en el campo, transmitimos la opinión de los expertos para evaluar la corrección del software. Según los sismólogos de Red Sismológica Nacional y el Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica, la distribución del evento que se muestra en la Figura 3 coincide con el comportamiento esperado. Los eventos se alinean de suroeste a noreste y el mayor número de eventos aparece debajo de la cumbre.

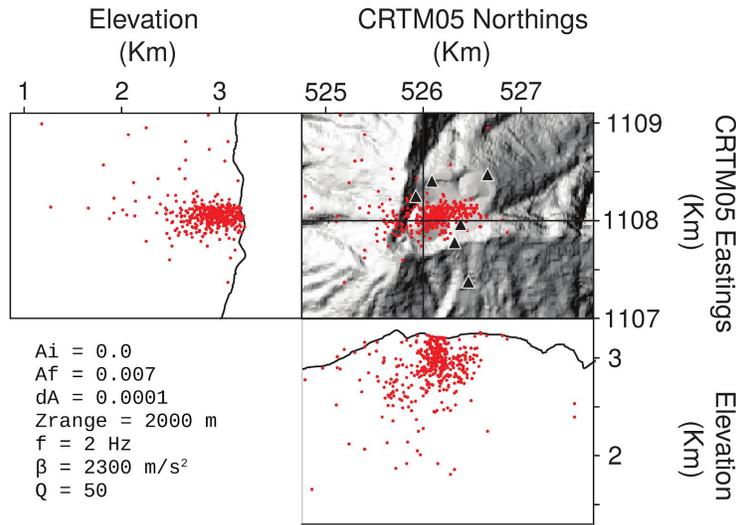
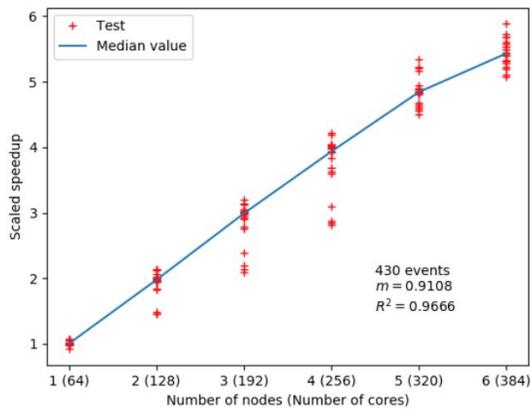
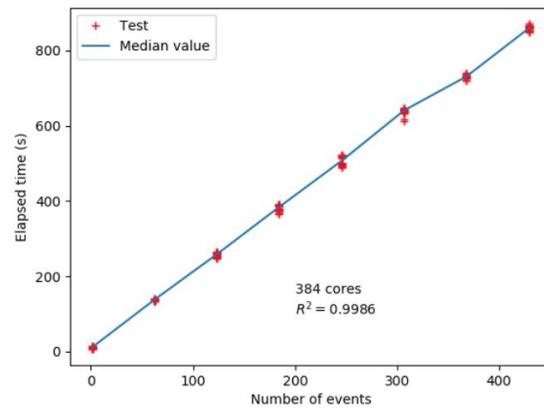


Figura 3. Ubicación de 430 eventos de LP-tremor registrados desde mayo hasta junio de 2016 en el volcán Turrialba. Los triángulos pequeños representan estaciones sísmicas, los puntos rojos representan hipocentros. Utilizamos una resolución de 10m DEM

Se llegó a la conclusión de que el algoritmo de ubicación es vergonzosamente paralelo, por lo tanto, debe mostrar una aceleración casi lineal con respecto al número de unidades de procesamiento. Además, por el mismo motivo, el tiempo de cálculo debe mostrar un crecimiento lineal con respecto al número de eventos que recibe como entrada. Para probar estas predicciones teóricas, fijamos el número de eventos al máximo (430 eventos) y configuramos el número de nodos de uno a seis nodos. Eso significa usar desde 64 hasta 384 núcleos. Llevamos a cabo el experimento veinte veces para cada configuración. La Figura 4a muestra la curva resultante. De manera similar, para probar si la implementación se comporta linealmente con respecto a la carga de trabajo, fijamos el número de nodos en seis y establecimos el número de eventos (la carga) de 6 a 430 eventos. Una vez más, llevamos a cabo la Experimenta veinte veces para cada configuración. La Figura 4b muestra la curva resultante.



(a) Scaled speedup as a function of the number of nodes



(b) Elapsed time as a function of the number of events

Figura 4. Escalabilidad del algoritmo.

Discusión y Conclusiones

Encontrar la ubicación de origen más probable de un evento es un paso fundamental para comprender la dinámica del proceso que genera el fenómeno. Por ejemplo, en la sismología clásica, una proyección hipocentral es una gráfica 3D de hipocentros de diferentes eventos. Esa figura revela la geometría de anomalías relevantes, como fallas y planos de subducción. Las fuentes sismo-volcánicas son de naturaleza diferente de las sismo-tectónicas, sin embargo, la misma lógica se aplica al ubicar a sus hipocentros. Proyectarlos podría revelar regiones de intensa actividad sísmica, que podrían estar correlacionadas con otras observaciones como deformación, chorros de agua y erupciones. Debido a la complejidad de la fuente sísmica volcánica y el medio heterogéneo, nos vemos obligados a utilizar diferentes ubicaciones. Incluso cuando el método analizado en este proyecto no es matemáticamente complejo, requiere grandes cantidades de poder computacional

Esto justifica un enfoque de programación paralela para resolver el problema de ubicación. Para obtener el máximo provecho de una máquina paralela, la implementación debe mostrar una escalabilidad lineal. No todos los algoritmos podrían implementarse de esa manera. Afortunadamente, es el caso del método presentado en este documento. A partir de ese análisis, implementamos el diseño propuesto. Para probar la linealidad, ejecutamos esa implementación con diferentes configuraciones de número de núcleos y número de eventos. En primer lugar, arreglamos el número de eventos y manipulamos el número de núcleos. Al hacerlo, demostramos que la velocidad de escalado aumenta linealmente con respecto al número de núcleos. Además de un crecimiento casi lineal, un sistema perfectamente escalable tendría una eficiencia de uno. Para descubrir la eficiencia de nuestra implementación, se calculó una regresión lineal. La pendiente de esa curva podría interpretarse como la eficiencia promedio. Se puede concluir que nuestra implementación muestra escalabilidad lineal con una eficiencia promedio del 91%. De manera similar, sabemos que el tiempo de ejecución debe crecer linealmente con respecto al número de eventos. Por lo tanto, para probarlo

experimentalmente, fijamos el número de núcleos y manipulamos el número de eventos. El tiempo transcurrido crece linealmente con el número de eventos. Una regresión lineal sobre la prueba tiene un valor de r cuadrado de casi uno. Nuestro objetivo fue proporcionar una referencia de dispersión de datos mientras ayudamos a visualizar la tendencia lineal.

Recomendaciones

- La colaboración con investigadores de otros dominios científicos es un elemento enriquecedor en el desarrollo de proyectos de investigación. Superados los primeros obstáculos (construcción de terminología común, asimilación de idiosincrasias de otras comunidades) el complemento técnico y filosófico que ofrecen otros investigadores ofrece nuevas perspectivas de los problemas y nuevas estrategias de solución.
- La incorporación de estudiantes asistentes es vital para el cumplimiento de los objetivos. Las estructuras de investigación en los centros científicos del primer mundo son jerárquicos, donde el profesor ejerce un rol de liderazgo y administración de un grupo de trabajo. Esta jerarquía debería incorporar: estudiantes de doctorado (principalmente), estudiantes de maestría, estudiantes asistentes de grado, investigadores y otros invitados.
- Un elemento transformador en la investigación es la colaboración internacional. Mantener contactos con colegas de otras universidades no solo incrementa la productividad científica (al incrementar el equipo de trabajo), sino que refina la autocrítica y la retroalimentación de las ideas. Nuestros colegas en otros países sirven como punto de comparación para evaluar el estado de nuestras capacidades de investigación.
- Contar con financiamiento complementario, como el Fondo de Desarrollo de la Unidad (FDU), es una ayuda de muy alto impacto. La disponibilidad de estos fondos, aunque de reducido presupuesto, permiten la adquisición rápida de elementos para la investigación y potencian el desarrollo de la misma.
- Establecer convenios para acceso a equipo es recomendable para facilitar el desarrollo de proyectos de investigación. En particular, el acceso al cluster computacional del CeNAT hizo que los experimentos fueran mucho más sencillos de correr (por el entorno ya instalado en el CeNAT) y con capacidades mucho mayores a las disponibles en el TEC.

Agradecimientos

Luis Guillermo Cornejo es un estudiante del programa de Maestría en Computación con énfasis en Ciencia de la Computación del Instituto Tecnológico de Costa Rica. Luis Guillermo colaboró en el proyecto gracias a una beca de la Dirección de Posgrado del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Esta investigación contó con el apoyo de una asignación computacional en la supercomputadora Kabré del Centro Nacional de Alta Tecnología de Costa Rica.

Referencias

[Aochi et al. 2013] Aochi, H., Ulrich, T., Ducellier, A., Dupros, F. and Michea, D. Finite difference simulations of seismic wave propagation for understanding earthquake physics and predicting ground motions: Advances and challenges. *Journal of Physics: Conference Series*. 2013, Vol. 454(1), pp. 012010

[Arias, a] Arias, L. . President Solís tours Poás volcano region following strong explosion. *The Tico Times*. April 24th, 2017.

[Arias, b] Arias, L. Update: Poás volcano eruption prompts temporary closure of national park. *The Tico Times*. April 13rd, 2017.

[Behr et al., 2011] Behr, Y., Townend, J., Bannister, S., and Savage, M. K. (2011). Crustal shear wave tomography of the Taupo volcanic zone, New Zealand, via ambient noise correlation between multiple three-component networks. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 12(3):n/a–n/a. Q03015.

[Bensen et al., 2007] Bensen, G. D., Ritzwoller, M. H., Barmin, M. P., Levshin, A. L., Lin, F., Moschetti, M. P., Shapiro, N. M., and Yang, Y. (2007). Processing seismic ambient noise data to obtain reliable broad-band surface wave dispersion measurements. *Geophysical Journal International*, 169(3):1239–1260.

[Bensen et al., 2009] Bensen, G. D., Ritzwoller, M. H., and Yang, Y. (2009). A 3-d shear velocity model of the crust and uppermost mantle beneath the United States from ambient seismic noise. *Geophysical Journal International*, 177(3):1177–1196.

[Bolt 2012] Bolt, B. *Seismology: Surface Waves and Earth Oscillations*. Elsevier Science, 2012

[Cashman and Sparks, 2013] Cashman, K. V. and Sparks, R. S. J. (2013). How volcanoes work: A 25 year perspective. *GSA Bulletin*, 125(5-6):664.

[Castro et al. 2016] Castro, M., Francesquini, E., Dupros, F., Aochi, H., Navaux, P. O. and Mhaut, J.-F. Seismic wave propagation simulations on low-power and performance-centric manycores. *Parallel Computing*, 2016

[Cerveny 2005] Cerveny, V. *Seismic ray theory*. Cambridge University Press, 2005

[Chapman 2004] Chapman, C. Fundamentals of seismic wave propagation. Cambridge University Press, 2004

[Childs et al. 2010] Childs, H., Pugmire, D., Ahern, S., Whitlock, B., Howison, M., Prabhat, Weber, G. H. and Bethel, E. W. Extreme Scaling of Production Visualization Software on Diverse Architectures. IEEE Computer Graphics and Applications, IEEE Computer Society, 2010 , Vol.30(3), pp. 22-31

[Di Grazia et al., 2006] Di Grazia, G., Falsaperla, S., and Langer, H. (2006). Volcanic tremor location during the 2004 mount etna lava effusion. Geophysical Research Letters, 33(4):n/a–n/a. L04304.

[Dyer, a] Dyer, Z. Costa rica expands no-go zone around turrialba volcano. The Tico Times. November 2nd, 2015.

[Dyer, b] Dyer, Z. Update: Costa rica's turrialba volcano erupts, forcing capital airport to temporarily close. The Tico times. May 4th, 2015.

[Graves 1996] Graves, R. W. Simulating seismic wave propagation in 3D elastic media using staggered-grid finite differences. Bulletin of the Seismological Society of America, Seismological Society of America, 1996 , Vol. 86(4), pp. 1091-1106

[Komatitsch et al. 2005] Komatitsch, D., Tsuboi, S. and Tromp, J. The spectral-element method in seismology. Seismic Earth: Array Analysis of Broadband Seismograms, Wiley Online Library, 2005, pp. 205-227

[Michéa et al. 2012] Michéa, D., Pouderoux, J., Dupros, F. and Aochi, H. Steering and in-situ visualization for simulation of seismic wave propagation on graphics cards. Applied Parallel and Scientific Computing. Springer, 2012 , pp. 107-114

[Moczo et al. 2007] Moczo, P., Kristek, J., Galis, M., Pazak, P. and Balazovjeh, M. The finite difference and finite-element modeling of seismic wave propagation and earthquake motion. Actaphysicasslovaca, Institute of Physics, Slovak Academy of Sciences; 1997, 2007 , Vol. 57(2)

[Sabra et al., 2005] Sabra, K. G., Gerstoft, P., Roux, P., Kuperman, W. A., and Fehler, M. C. (2005). Extracting time-domain green's function estimates from ambient seismic noise. Geophysical Research Letters, 32(3):n/a–n/a. L03310.

[Sato et al. 2012] Sato, H., Fehler, M. C. and Maeda, T. Seismic wave propagation and scattering in the heterogeneous earth. Springer, 2012 , Vol. 496

[Serón et al. 1990] Serón, F., Sanz, F., Kindelán, M. and Badal, J. Finite-element method for elastic wave propagation. Communications in Applied Numerical Methods, Wiley Online Library, 1990, Vol.6(5), pp. 359-368

[Shapiro and Campillo, 2004] Shapiro, N. M. and Campillo, M. (2004). Emergence of broadband rayleigh waves from correlations of the ambient seismic noise. Geophysical Research Letters, 31(7):n/a–n/a. L07614.

[Shapiro et al., 2005] Shapiro, N. M., Campillo, M., Stehly, L., and Ritzwoller, M. H. (2005). High-resolution surface-wave tomography from ambient seismic noise. Science, 307(5715):1615–1618.

[Villaseñor et al., 2007] Villaseñor, A., Yang, Y., Ritzwoller, M. H., and Gallart, J. (2007). Ambient noise surface wave tomography of the iberian peninsula: Implications for shallow seismic structure. Geophysical Research Letters, 34(11):n/a–n/a. L11304.

[Virieux 1984] Virieux, J. SH-wave propagation in heterogeneous media: velocity-stress finite difference method. Geophysics, Society of Exploration Geophysicists, 1984, Vol. 49(11), pp. 1933-1942

[Virieux 1986] Virieux, J. P-SV wave propagation in heterogeneous media: Velocity-stress finite difference method. Geophysics, Society of Exploration Geophysicists, 1986, Vol. 51(4), pp. 889-901

Apéndice (confirmación de publicación de artículo)

3/16/2019

Escuela de Ingeniería en Computación Mail - CONCAPAN 2018 proceedings paper



Oficina de TI

Esteban Meneses Rojas <emeneses@ic-itcr.ac.cr>

CONCAPAN 2018 proceedings paper

CONCAPAN 2018 <concapan2018@easychair.org>
To: Esteban Meneses Rojas <emeneses@cenat.ac.cr>

Thu, Dec 6, 2018 at 9:15 AM

Paper: 34

Authors: Guillermo Comejo-Suárez, Leonardo Van der Laet, Esteban Meneses Rojas, Javier Pacheco and Mauricio Mora

Title: Using parallel computing for seismo-volcanic event location based on seismic amplitudes

Estimados Autores,

Gracias por vuestra contribución a CONCAPAN 2018.

Al final de esta semana se estará enviando el proceeding a IEEE, esperamos que en el transcurso de 1 mes ya esté visible en el IEEE Xplore, posteriormente y en aproximadamente 1 mes más estará indexado en SCOPUS.

Además, les estaré enviando un link para descargar el proceeding completo.

Gracias nuevamente por contribuir a que CONCAPAN 2018 fuera un éxito total.

Cualquier duda escribir a: manuel.cardona@udb.edu.sv

Saludos.