



## ACUERDO DE COOPERACIÓN CIENTÍFICA ENTRE UNIVERSITÀ DELLA CALABRIA (ITALIA) Y PROYECTO CONJUNTO DE INVESTIGACIÓN "DISCURRI- 12" DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO (ECUADOR)

### I. PARTES Y DETALLES DEL PROYECTO

Con el fin de fomentar la cooperación académica internacional entre Ecuador e Italia, y promoviendo la excelencia en la enseñanza y la investigación con especial énfasis en áreas científicas de gran relevancia y urgencia para la seguridad y el avance de la sociedad humana dentro de su entorno, la Università della Calabria (UNICAL), una institución pública educativa y de investigación científica, ubicada en Via Pietro Bucci, 87036, Arcavacata, Rende (CS), Italia, y la Universidad Nacional de Chimborazo (UNACH), una institución pública educativa y de investigación científica ubicada en Riobamba, Ecuador, aquí las Partes, acuerdan:

llevar a cabo actividades docentes y tutoriales e investigaciones científicas, también a través de la colaboración de personal, en relación con el Proyecto de Investigación Conjunto denominado "Diseño y Mejora de Simulaciones por Unidades de Automatas Celulares para la Investigación de Riesgos Reológicos" (DISCURRI-12) destinado, en primer lugar, a establecer un grupo de investigación interdisciplinar y, a continuación, a desarrollar una evaluación e investigación preliminares sobre emergencias sociales y territoriales de gran interés actual relacionadas con flujos superficiales (flujos de escombros, flujos de lava). La modelación y simulación numérica de estos fenómenos se desarrolló mediante el paradigma computacional de Automatas Celulares que produjo diferentes modelos con partes ampliamente comunes, que pudieron unificarse en un único modelo SCURRI (Simulation by Cellular Units of Rheological Risk). Los peligros volcánicos en Ecuador incluyen *principalmente* lahares (un tipo de flujo de escombros) y más generalmente flujos de escombros por deslizamiento, pero también flujos piroclásticos, aluviones, erosión del suelo por lluvia, todos ellos también relacionados o causados por eventos potencialmente debidos al calentamiento global, terremotos, tectónica y erupciones. Las urgencias ambientales que actualmente plantea el volcán Cotopaxi podrían simularse mediante el desarrollo del nuevo modelo unificador SCURRI, cuyo perfeccionamiento, aunque basado en modelos anteriores, representa ciertamente por sí mismo un valioso objetivo paralelo de investigación. La propuesta científica detallada se adjunta aquí como ANEXO 1.

La calidad de la preparación técnica y del trabajo relacionado con el desarrollo del proyecto estará bajo la supervisión y aprobación final de los dos Coordinadores, uno por la UNICAL y otro por la UNACH (ver ANEXO 1), aunque todos los participantes y miembros del proyecto serán igualmente responsables del desempeño del proyecto, y desde luego de su propio desempeño y deberes, de acuerdo con las políticas aplicables de las partes.

### II. COLABORACIÓN DEL PERSONAL INVESTIGADOR

En términos generales, las dos partes cooperarán en la enseñanza y la investigación en áreas científicas de interés mutuo y, en la medida de lo posible, fomentarán el contacto directo y la cooperación entre el personal docente, los departamentos y las instituciones de investigación en virtud de lo dispuesto en el presente Acuerdo. Ambas partes acuerdan consultarse previamente sobre el desarrollo concreto de la colaboración entre el personal docente e investigador. Entre las áreas de especial interés para una posible colaboración se incluyen la formación de postgrado y los proyectos de investigación.

En concreto, las partes cooperarán en el proyecto de investigación conjunto DISCURRI-12, cuyo enfoque transdisciplinar implica una metodología de Sistemas Complejos que requiere una experiencia suficientemente diversa como la que proporciona la integración de diferentes áreas de competencia. Ello implica una fase inicial de intercambio de conocimientos, métodos, datos y similares. Tras desarrollar una fase preliminar logística y organizativa, la investigación común tal y como se establece en el ANEXO 1 se iniciará simultáneamente por las dos partes.

Cada universidad se comprometerá a garantizar el mantenimiento y los salarios íntegros de su propio profesorado y personal investigador formalmente implicado en el Proyecto Conjunto durante el periodo de colaboración.

La universidad de acogida proporcionará instalaciones y privilegios de estudio e investigación para el profesorado y el personal invitados comparables a los disponibles para el profesorado y el personal de investigación residentes. Se espera que los profesores colaboradores estudien y trabajen de acuerdo con su plan de implicación profesional, docencia e investigación aprobado por la institución de acogida. El acuerdo específico para el uso de instalaciones o recursos especiales será acordado por las dos universidades o sus subunidades designadas antes de la colaboración.

### **III. COLABORACIÓN ENTRE ESTUDIANTES**

La colaboración estudiantil se limita a los programas académicos específicos acordados por cada universidad. Con carácter general, las partes acuerdan consultar las posibilidades de colaboración estudiantil en estudios de grado y postgrado relacionados con DISCURRI-12. Los periodos de tiempo para estas colaboraciones se acordarán previamente. Los periodos de tiempo específicos serán determinados por ambas universidades. Los estudiantes participantes continuarán como candidatos a titulación en su institución de origen y no serán necesariamente candidatos a titulación en la institución de acogida. En su caso, ambas universidades acuerdan desarrollar protocolos de colaboración más específicos siempre que sea necesario. Los estudiantes colaboradores realizarán los cursos y seminarios contemplados en el ANEXO 1. La duración de la colaboración de los estudiantes no podrá ser superior a la duración del Proyecto Conjunto, salvo que se establezca de forma específica y diferente para algún estudiante concreto.

Si se decide y programa una colaboración estudiantil, los estudiantes participantes pagarán su matrícula en su universidad de origen, y la universidad de acogida renunciará a su matrícula para aquellos estudiantes invitados. Los estudiantes de intercambio también serán responsables de pagar la manutención, el alojamiento, el seguro médico, el billete de avión de ida y vuelta y los gastos relacionados con el estudio y personales, etc. Las dos instituciones esperan que un número igual de sus propios estudiantes colaboren durante un periodo de 12 meses. Cada universidad se reserva el derecho de limitar las matrículas de la otra si el número de intercambios no está equilibrado a lo largo del periodo de 12 meses.

### **IV. CONFIDENCIALIDAD**

En el curso de las actividades del proyecto, puede producirse la divulgación de Información Confidencial (IC), incluyendo material, escrito o en otras formas, que puede representar la base de publicaciones en revistas revisadas por pares y/o solicitudes de patentes; o que debe ser gestionada con sensatez si está potencialmente relacionada con situaciones socialmente perjudiciales o peligros para instituciones e infraestructuras públicas. Las partes pueden verse perjudicadas por cualquier uso o divulgación no autorizados de IC, o pueden verse excluidas de la concesión de patentes, y pueden sufrir pérdidas o daños como consecuencia del uso o divulgación no autorizados de IC. Se clasifican como IC: los términos de este Acuerdo; cualquier información relativa a los tratos de las partes; relativa a empleados, contratistas, estudiantes u otras personas que realicen negocios con las partes; que sea por naturaleza confidencial; que sea designada como confidencial por las partes; que las partes sepan o deban saber que es confidencial, independientemente de si esa misma información fue revelada antes, en o después de la fecha de entrada de este Acuerdo; toda la información relativa al Proyecto. Las partes se obligan a: mantener la confidencialidad y seguridad de la IC; no utilizar ni copiar por ningún medio la IC para ningún otro fin que no sea el Propósito Aprobado (PA), entendiéndose por PA que las partes evalúen previamente la información de la IC para permitirles explorar una relación científica y/o comercial relacionada con el Proyecto o dotada por el mismo; no solicitar el registro de ninguna patente o cualquier otra forma de protección legal con respecto a la IC; sólo permitir el acceso a la IC al personal investigador del proyecto y a los estudiantes de las partes que tengan necesidad de conocer la IC para el PA, y que estén sujetos a obligaciones legales de confidencialidad con las partes al menos al nivel contemplado en este Acuerdo; no revelar por ningún medio la IC a terceros; no utilizar la IC por ningún medio en perjuicio de las partes.

Las obligaciones de confidencialidad aquí contempladas no se aplican a la IC: que las partes puedan demostrar que ya era conocida por una de las partes, que estaba en su legítima posesión o que fue desarrollada de forma independiente por una de las partes, de buena fe y libre de cualquier obligación de confidencialidad; que las partes puedan demostrar que es de dominio público de otra forma que no sea por incumplimiento de este Acuerdo o de otra obligación de confidencialidad; que deba ser revelada en virtud de la legislación aplicable, pero sólo si una de las partes ha dado a la otra toda la notificación disponible para permitir que una de las partes intente eliminar ese requisito y sólo revela la información mínima requerida.

Si una de las partes tiene conocimiento de que la otra ha incumplido el presente Acuerdo o cualquier otra obligación de confidencialidad, ambas partes deberán informarse mutuamente de inmediato y adoptar todas las medidas necesarias en relación con dicho incumplimiento.

## V. OTROS ARTÍCULOS

Cada institución se compromete a designar a un funcionario de enlace que se encargará de facilitar información sobre este acuerdo dentro de su Universidad y de actuar como persona de contacto para su homólogo en la otra Universidad. Los oficiales de enlace serán responsables de trabajar para desarrollar planes adicionales para posibles colaboraciones y preparar acuerdos suplementarios para regir el proceso de colaboración. Para la UNACH, el enlace será el Dr. Prof. Luis Alberto Tuaza Castro, Vicerrector de la Unach. El enlace para la UNICAL será el Dr. Gianpiero Barbuto, Jefe de la Oficina de Internacionalización de la UNICAL.

Ambas partes entienden que todos los eventuales acuerdos financieros serán negociados y dependerán de la disponibilidad de fondos en cada institución. Además, nada de lo dispuesto en el presente Acuerdo se interpretará como la creación de relaciones jurídicas o financieras entre las partes, y el presente Acuerdo no crea una relación entre las partes de fideicomiso, empresa, agencia, asociación o empleo.

El personal colaborador durante un posible intercambio debe respetar las leyes del país de acogida y las normas y reglamentos de la universidad de acogida.

Cualquier artículo del presente Acuerdo podrá ser modificado o revisado por las partes previa consulta y de mutuo acuerdo. En la medida en que alguna parte de este Acuerdo sea nula o inaplicable por cualquier otro motivo, dicha parte se separará y este Acuerdo se interpretará como si la parte separable nunca hubiera existido. Cualquier cuestión no mencionada en el presente Acuerdo podrá resolverse de mutuo acuerdo.

El presente Acuerdo entrará en vigor en la fecha de su firma por los representantes de las dos universidades. La fecha de inicio del Proyecto Conjunto no será posterior al 3 de abril de 2023, y la última fecha válida de cierre del presente Acuerdo será el 2 de abril de 2024. El presente Acuerdo permanecerá en vigor durante dos años a partir de la fecha de entrada, por lo tanto hasta el 1 de abril de 2025 a más tardar, o hasta que una de las universidades notifique a la otra su deseo de rescindir el acuerdo al menos noventa (90) días antes del final del año académico en curso. Cada parte es responsable de sus propios costes, incluidos los impuestos, derivados de la celebración, ejecución o incumplimiento del presente Acuerdo. En caso de rescisión del presente Acuerdo, los derechos o recursos acumulados de las partes no se verán afectados; una parte deberá destruir o entregar a la otra parte cualquier IC que se haya puesto a su disposición y todas las copias de la IC, a discreción de la otra parte. La rescisión del presente Acuerdo no afectará a ninguna disposición del mismo que deba entrar en vigor o continuar después de la rescisión, incluidas las cláusulas de confidencialidad de la sección IV.

## VI. ASPECTOS ECONÓMICOS Y TÉCNICOS

El presente proyecto bilateral no contará con fondos de investigación de cada una de las partes. Las herramientas esenciales para el desempeño eficiente de este proyecto internacional son los webinars y otros instrumentos de comunicación de última generación a menudo implementados en plataformas Moodle y similares, ya que el proyecto prevé y planea seminarios específicos de enseñanza y el intercambio continuo de información a través de Internet y en línea entre Italia y Ecuador. Es responsabilidad y compromiso de cada una de las dos partes instalar y dedicar exclusivamente, antes del inicio de cualquier actividad, es decir, antes del 3 de abril de 2023 a más tardar, tales herramientas al proyecto, que deberán estar disponibles y en funcionamiento durante toda la duración del proyecto. Se trata de una cuestión de importancia capital, sobre todo teniendo en cuenta la reciente propagación de la pandemia COVID-19, que en modo alguno ha terminado y que sin duda dificultará la colaboración de los científicos, estudiantes y personal del proyecto.

El presente Acuerdo será válido si se firma en cualquier número de ejemplares, los cuales, tomados en su conjunto, constituirán un único Acuerdo. Cada una de las partes podrá comunicar su ejecución del presente Acuerdo mediante la transmisión satisfactoria de una copia ejecutada del mismo por fax o correo electrónico a la otra parte.

### ANEXO 1

Tal como se define en I.

EJECUCIÓN

Firmado como un Acuerdo. El presente Acuerdo: i) contiene el acuerdo íntegro de las partes; y ii) sustituye a todas las declaraciones, conductas y acuerdos anteriores, con respecto a su objeto.

FIRMADO:

Prof. Gonzalo N. Samaniego Erazo  
Rector de la UNACH

---

Prof. Nicola Leone  
El Rector de la UNICAL



NICOLA  
LEONE  
06.03.2023  
11:57:06  
UTC

---

Prof. Luis A. Tuaza Castro  
Vicerrector de la UNACH

---

Dr. Gianpiero Barbuto  
Jefe de la Oficina de Internacionalización de la  
UNICAL



GIANPIERO BARBUTO  
07.03.2023 08:44:12  
GMT+00:00

---

En Riobamba (Ecuador) y Arcavacata (Italia) el

[FECHA].

# ANEXO 1: EL PROYECTO CONJUNTO DE INVESTIGACIÓN "DISCURRI-12

## Título: DISCURRI-12 para "Diseño y mejora de simulaciones mediante autómatas celulares para la investigación de riesgos reológicos"

Duración: 12 MESES  
Coordinación: Paolo Catelan PhD, en la UNACH como Coordinador en Ecuador  
Francesco Chidichimo PhD, en la UNICAL como Coordinador en Italia

### **Introducción**

DISCURRI-12 pretende fundamentalmente responder a los retos planteados por dos esfuerzos científicos, por un lado la importante capacidad de los Autómatas Celulares (AC) para simular fenómenos complejos como los flujos superficiales, por otro la necesidad de mejorar la fiabilidad de las simulaciones ante situaciones de riesgo natural extremo de lahares como los que potencialmente puede desencadenar la actual erupción del Cotopaxi. Dentro de los límites de un proyecto sin financiación, y en el contexto de los trabajos actuales de las dos universidades implicadas en un marco interdisciplinario e internacional, es posible concretar una versión actualizada de un modelo de simulación de flujos superficiales monofásicos (llamado Modelo SCURRI, de "Simulations by Cellular automata Units for Rheological Risks Investigation") para ser aplicado a las posibles emergencias desencadenadas por las erupciones del Cotopaxi. Los resultados de esta investigación pueden constituir la base necesaria para un futuro proyecto muy articulado que estudie los riesgos provocados por los flujos superficiales: flujos de escombros, flujos de lodo, avalancha de escombros, flujos granulares, etc., así como los lahares. Las bases de tal proyecto se especifican en las dos secciones siguientes, que informan de la contribución científica del equipo DISCURRI-12, y de los objetivos derivados de los resultados y logros anteriores.

### **Bases para el desarrollo del Modelo SCURRI general para flujos superficiales**

Los autómatas celulares (AC) (von Neumann, 1966) son un paradigma de computación paralela (Ilachinsky, 2001) y buenos candidatos para modelizar y simular (M&S) sistemas dinámicos complejos, cuya evolución depende principalmente de las interacciones locales de sus partes constituyentes (sistemas localizados). Los comportamientos muy complejos surgen mediante reglas locales relativamente sencillas, y los AC pueden representar a menudo un enfoque alternativo a las ecuaciones diferenciales estándar para los fenómenos complejos a-céntricos (Toffoli, 1984).

Una extensión del AC clásico (Di Gregorio y Serra, 1999) se desarrolló inicialmente para modelar una variedad de fenómenos fluidodinámicos macroscópicos complejos, que se enfrentan a dificultades cuando se describen según otros esquemas como, por ejemplo, el método Lattice Boltzmann (Succi, 2001), principalmente debido a las grandes escalas espaciales que implican (Di Gregorio y Serra, 1999). En este caso, la descripción de las propiedades físicas de las celdas (por ejemplo, temperatura, altitud, etc.) requiere un gran número de estados; a su vez, dichos estados pueden representarse formalmente mediante subestados, que especifican las características que deben asignarse a cada estado de la celda, determinando así la evolución de la CA. El producto cartesiano de los conjuntos de todos los subestados constituye el conjunto de estados (Di Gregorio y Serra, 1999). Esto implica sobre todo una función de transición complicada, no reducible a una tabla de consulta; dicha función de transición debe a menudo dar cuenta de diferentes dinámicas que pueden influir en la célula (por ejemplo, variación de temperatura y altitud, variación por erosión hídrica) y puede incluir diferentes vecindarios (donde, por defecto, la unión de todos los vecindarios es el vecindario de la célula) (Di Gregorio y Serra, 1999).

A menudo, el modelo CA debe dar cuenta de "influencias externas" (como lluvias o flujos de lava de un cráter) en celdas particulares o en una porción extendida del espacio celular; éstas tienen que ser gestionadas por funciones particulares, que complementan la función de transición (Di Gregorio y Serra, 1999). Esta formalización permite en muchos casos, por ejemplo, los flujos superficiales, que las cantidades relativas a la tercera dimensión, es decir, la "altura", puedan incluirse fácilmente como subestados CA (por ejemplo, la altitud), dando lugar a modelos bidimensionales que describen adecuadamente fenómenos tridimensionales reales (Di Gregorio y Serra, 1999).

En la literatura publicada, tal extensión de AC se conoce como "Autómatas Celulares Macroscópicos" (véase Spataro et al., 2010), una terminología que no siempre es apropiada en el contexto de los Sistemas Complejos, para los que la noción de "macroscópico" no está ligada o limitada a dimensiones puramente físicas que, en cualquier caso, son

relativas al marco de referencia adoptado del sistema. Por esta razón, y para dar cuenta de las diferentes dinámicas de interacción, un término más apropiado es el de "Autómata Celular Multicomponente" (ACM), que se relaciona mejor con la diversidad de propiedades atribuibles a la célula.

Muchos fenómenos que implican flujos de una sustancia dada (por tanto, no limitados a los fenómenos actuales), tienden a evolucionar hacia condiciones de equilibrio para algún observable físico, al que eventualmente se le puede asignar un valor (piénsese, por ejemplo, en el caso de la difusión de un gas en un espacio vacío finito, cuando se libera de una caja inicialmente cerrada, hasta alcanzar el régimen en el que las diferencias espaciales en la densidad del gas se hacen despreciables). El punto fundamental para modelizar la dinámica de estos fenómenos transitorios es considerar los mecanismos de reducción de las condiciones de desequilibrio, en relación con los valores observables, en la vecindad de la célula.

Esto puede lograrse aplicando el Algoritmo de Minimización de Diferencias (AMD), que minimiza las diferencias de lo observable en la vecindad de la célula, cuando la sustancia fluye desde la célula hacia las células vecinas. El AMD rara vez se emplea en su versión puramente teórica, ya que a menudo es necesario adaptarlo a las características fácticas de los muy diversos fenómenos que se investigan.

La idea intuitiva subyacente para la aplicación de la MCA a situaciones específicas en las que un sistema tiende al equilibrio siempre que fluye una sustancia, podría expresarse mediante las siguientes preguntas: Supongamos que el universo puede reducirse a la vecindad de una sola célula, y supongamos también que únicamente esa célula primordial es capaz de distribuir primero a las células cercanas una cantidad determinada de sustancia; ¿qué cantidad de sustancia se deja fluir para minimizar las condiciones de desequilibrio? ¿Cómo calibrar entonces la cantidad de sustancia que fluye según un paso de MCA que corresponde a una unidad de tiempo física? ¿Cómo se puede relacionar esto con las demás interacciones fenomenológicas? Las respuestas, por supuesto, deben darse de forma coherente y de tal manera que los principios científicos que rigen los sistemas, como las leyes de conservación de la física, se garanticen o al menos se aproximen adecuadamente a la tipología de los fenómenos considerados.

El AMD opera sobre datos de MCA promediados, lo que implica necesariamente una pérdida de información, como cuando se pierde la determinación rigurosa de una o varias pendientes geográficas reales asociadas a una celda. En tal caso, podemos suponer que se contemplan todas las pendientes posibles (una por cada celda adyacente), pero al mismo tiempo tratamos todas las celdas vecinas como "vasos comunicantes", de modo que la pérdida de información rigurosa pueda compensarse "estadísticamente", es decir, por término medio. En realidad, los MCA se utilizaron desde principios de los años 80 para modelizar el tráfico por carretera (por ejemplo, Di Gregorio y Festa, 1981a, b), luego flujos de lava (por ejemplo, Crisci et al., 1986) y deslizamientos de tierra de tipo flujo (por ejemplo, Barca et al., 1987); más tarde, se introdujo el AMD y se aplicó a los flujos de lava (por ejemplo, Barca et al., 1993, 1994), deslizamientos tipo flujo (p. ej. Di Gregorio et al., 1994, 1999a) y biorremediación de suelos contaminados (p. ej. Di Gregorio et al., 1997, 1999b), después de que se propusiera un primer teorema sobre el AMD (Di Gregorio y Serra, 1999). Una extensión de este primer teorema demuestra que la suma de las diferencias de valor entre todas las celdas pertenecientes al vecindario es minimizada por el AMD (Avolio et al., 2012a).

El AMD fue aplicado en varias investigaciones interdisciplinarias de M&S por nuestro grupo de investigación, así como por otros grupos de investigación involucrados en el modelado y simulación de flujos superficiales:

- M&S de flujos de lava mediante el Modelo SCIARA (Simulación por Autómatas Celulares Interactivos de la Reología del Flujo de Lava Etneano), aplicado principalmente a la descripción de los flujos de lava Etneanos, y al estudio de los peligros de los flujos de lava en la zona Etneana, Sicilia, Italia (véase Avolio et al., 2006 (a); Crisci et al., 1999, 2003, 2004, 2010; Spataro et al., 2008, 2010);
- M&S de flujos de escombros, lodo y granulares mediante el modelo SCIDDICA (Simulación mediante métodos computacionales innovadores para la detección de la trayectoria del flujo de escombros utilizando autómatas celulares interactivos), que se aplicó a deslizamientos subaéreos, subacuáticos y mixtos (subaéreos y subacuáticos) (véase Avolio et al., 2000, 2008; D'Ambrosio et al., 2002, 2003a, b, 2007; Iovine et al., 2003, 2005);
- M&S de la erosión del suelo por el Modelo SCAVATU - Simulación por Autómatas Celulares de la erosión de las Unidades Territoriales VAS (véase D'Ambrosio et al., 2001);
- M&S de flujos piroclásticos mediante el Modelo PYR (véase Avolio et al., 2006b);
- M&S de avalanchas de nieve mediante el modelo VALANCA - Modelo versátil de propagación de avalanchas mediante leyes y normas de autómatas celulares (véase Avolio et al., 2010, 2012b);
- También se han publicado resultados metodológicos sobre el seguimiento y la evaluación de los flujos superficiales (véase Avolio et al., 2003; D'Ambrosio y Spataro, 2007);
- M&S de los procesos de atracción y difusión en el comportamiento colectivo - flujos de moscas del olivo y del ámbar (véase Piscitelli et al., 2001; Pommois et al., 2006);
- M&S de lahares por LLUNPIY (véase Chidichimo et al., 2022; Lupiano et al., 2015a, 2018, 2020, 2021; Machado et al., 2015a, b, c).

El desarrollo completo del modelo SCURRI de MCA para la simulación de flujos superficiales implica un enfoque incremental con una fase inicial que se desarrollará en este proyecto. SCURRI tiene que englobar las principales características de los modelos SCIARA, SCIDDICA, VALANCA y LLUNPIY. Además, las sucesivas versiones de SCURRI tienen que implementarse en el contexto de OpenCAL, de forma diferente a lo que se ha hecho durante el desarrollo de los modelos SCIARA, SCIDDICA, VALANCA y LLUNPIY.

OpenCAL - Open Computing Abstraction Layer (D'Ambrosio et al., 2018) es una librería de software computacional paralelo, desarrollada como proyecto Open-Source en el Departamento de Matemáticas e Informática de la UNICAL. Permite definir modelos de simulación numérica basados en el formalismo general CA, soportando así MCA, el método de Diferencias Finitas Explícitas (FDM) y, en general, todos los métodos numéricos basados en grillas computacionales estructuradas.

OpenCAL está desarrollado en C para conseguir la máxima eficiencia, puede utilizarse en aplicaciones C/C++, y puede ejecutarse en paralelo tanto en CPUs, gracias a su implementación basada en OpenMP, como en GPUs, gracias a su implementación basada en OpenCAL. Esta implementación de OpenCAL puede ejecutarse en ordenadores de diferente potencia computacional, desde portátiles baratos hasta estaciones de trabajo potentes y caras, pero la máxima eficiencia en tiempo se da en entornos de GPU con mayor memoria, de forma que se permite un salto de calidad en la simulación.

### ***Bases para la evaluación de riesgos mediante simulación de lahar y especificidades del Cotopaxi***

Los lahares representan la tipología más peligrosa de flujos de escombros en zonas volcánicas, en términos de número de víctimas humanas, pero también por causar estragos en infraestructuras públicas y hábitats ecológicos. Las emergencias pueden surgir repentinamente de vez en cuando, y las técnicas y soluciones de alerta temprana no siempre son suficientes para hacer frente a las posibles catástrofes posteriores. Predecir posibles escenarios fiables mediante simulaciones numéricas permite programar intervenciones de emergencia eficientes y eficaces, una vez adoptado un enfoque de modelización transdisciplinar. Esto permitiría a los responsables públicos evitar planes y soluciones supuestamente momentáneos, que en la mayoría de los casos pueden incluso provocar impactos medioambientales negativos a largo plazo.

Las simulaciones numéricas realizadas en ordenadores de última generación o incluso en superordenadores paralelos poseen tal capacidad predictiva inherente que pueden explorarse nuevas posibilidades fiables de mitigación de riesgos, tras aplicar paradigmas computacionales basados en la teoría de los Sistemas Complejos, entre ellos el modelo CA. Nuestro modelo CA para lahares LLUNPIY, de la palabra quichua llunp'iy, que significa inundación, (ver Machado et al., 2014, 2015a, b; Chidichimo et al., 2016; Lupiano et al. 2018, 2020), a su vez una extensión computacional de SCIDDICA para flujos de detritos (ver Avolio et al. 2006a, 2006b, 2008, 2013, 2017; Iovine et al., 2005, 2007; Lupiano et al., 2014, 2015a, 2015b, 2016, 2017, 2018), fue desarrollada con fines de simulación numérica por un grupo de investigación interdisciplinar en Italia. Su fiabilidad y validación en varios eventos pasados, relacionados tanto con lahares primarios como secundarios, produjo muchos resultados científicos significativos, publicados posteriormente en revistas internacionales de primer nivel. Se han considerado y analizado escenarios futuros y potencialmente peligrosos mediante simulaciones de última generación, lo que nos ha permitido seleccionar y perfeccionar nuevas metodologías para la mitigación del riesgo de lahares y eventos catastróficos de flujos de escombros.

Sobre la base de la experiencia del LLUNPIY, el modelo general SCURRI para flujos superficiales se desarrollará en varias versiones y se aplicará a los riesgos naturales relacionados con el volcán Cotopaxi.

El volcán Cotopaxi es en realidad uno de los volcanes más estudiados (y peligrosos) del mundo, la zona del volcán Cotopaxi se vigila constante y sistemáticamente aún más desde la reactivación de un episodio eruptivo en 2015, actualmente todavía en curso, y no se puede excluir un nuevo episodio eruptivo catastrófico similar al de 1877.

Nuestro equipo realizó simulaciones LLUNPIY en las mejores zonas significativas del Cotopaxi dentro de los límites de la computación secuencial de la implementación LLUNPIY. Parte de esos límites deben ser superados en la progresiva implementación de SCURRI en un contexto de Computación Paralela. Eso significa tiempos de simulación más cortos y regiones más amplias a invadir en simulaciones con datos más precisos (en primer lugar, relativos a la morfología regional).

Nuestros estudios más recientes se han centrado en los flancos septentrionales del Cotopaxi como puntos potenciales para el desencadenamiento de lahares, que podrían caracterizarse por enormes movimientos de masas y corrimientos de tierras debido a la posible fusión de los glaciares superiores durante las erupciones (Lupiano et al. 2021; ver Fig.1 más abajo).

Las laderas norte del Cotopaxi, y más en general las zonas urbanas y suburbanas densamente habitadas del Valle de los Chillos, San Rafael y Quito podrían verse amenazadas por lahares que, una vez desencadenados en el cono superior, podrían incluso alcanzar regiones costeras tras impactar desastrosamente comunidades humanas, tierras agrícolas e infraestructuras públicas a lo largo de su trayectoria (Fig.1); sin embargo, este estudio se limita a la frontera de las

laderas norte del volcán Ilaló, y no se incluyen zonas suburbanas relevantes de Quito.

En cambio, la última investigación simuló lahares que se originan en las laderas oeste/sur del Cotopaxi y fluyen hacia la zona urbana de Latacunga hasta la represa Agoyan en Baños (Chidichimo et al. 2022; ver Fig. 2 abajo).

Estas simulaciones representan una contribución al diseño de cualquier plan de evacuación de emergencia de las comunidades locales y un instrumento crítico si la salvaguarda de miles de personas estuviera en riesgo durante un episodio eruptivo novedoso.

En este proyecto tenemos previsto que las primeras versiones de SCURRI se apliquen para investigar las zonas del Cotopaxi que no se estudiaron en los trabajos anteriores, a saber, los lahares que se originan en las laderas orientales del Cotopaxi; además, realizaremos simulaciones mejoradas para las zonas urbanas más amenazadas y vulnerables, como la ciudad de Latacunga.

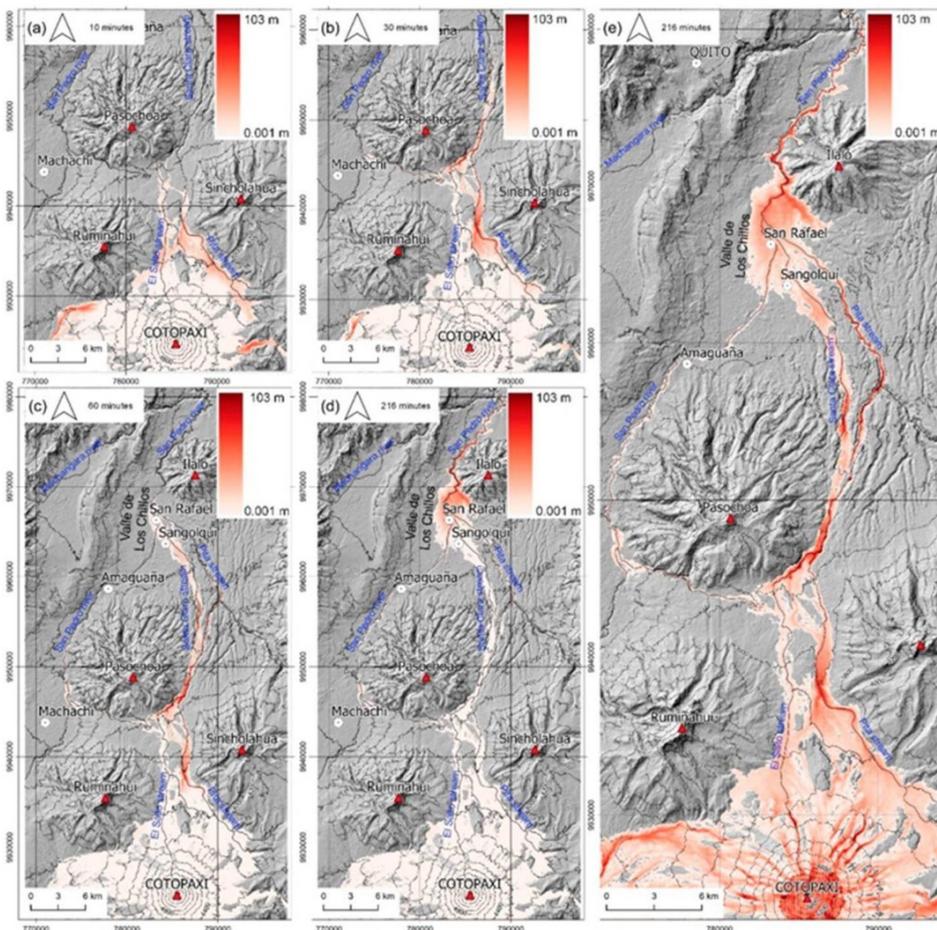


Fig.1 - Instantáneas de los resultados de la simulación de los lahares al norte del Cotopaxi, obtenidos suponiendo un proceso súbito de fusión del glaciar debido a bombas piroclásticas; los paneles (a), (b), (c) y (d) reportan el espesor máximo del lahar al final de la simulación. Se supone que el espesor del glaciar de la cumbre es constante e igual a 50 metros (de Lupiano et al. 2021).

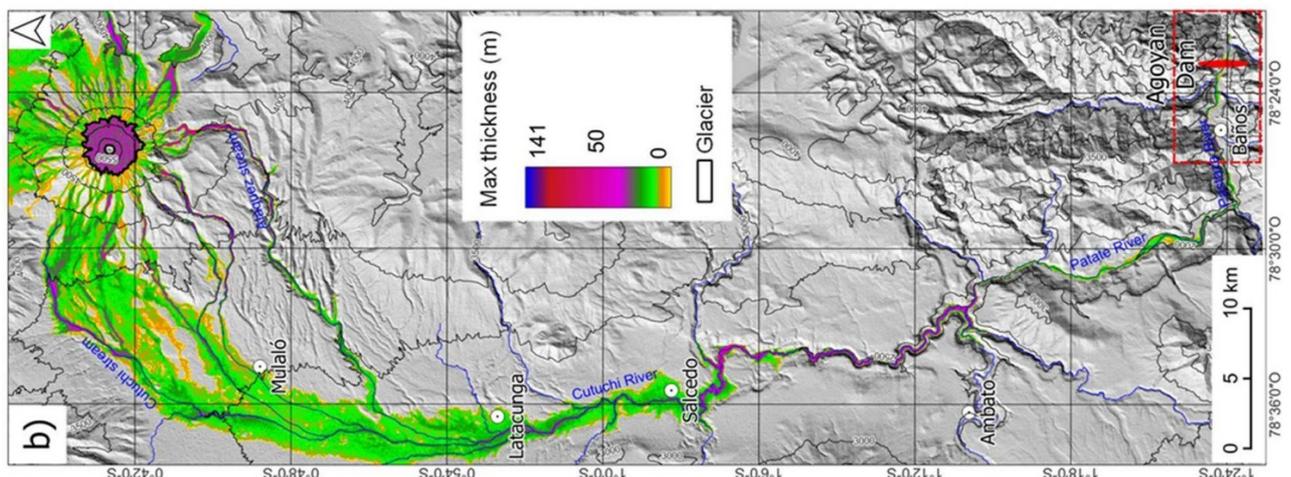


Fig.2 - Resultados de la simulación de los lahares oeste-sur del Cotopaxi, obtenidos asumiendo un proceso progresivo de fusión del glaciar debido a las bombas piroclásticas; el panel b reporta el espesor máximo del lahar al final de la simulación. Se asume que el espesor del glaciar de cumbre es constante e igual a 50 metros (de Chidichimo et al. 2022).

## **Actividades y objetivos**

El objetivo principal del proyecto DISCURRI-12 radica en una contribución significativa a la mitigación del riesgo de lahar del volcán Cotopaxi, adoptando un enfoque de estudio sistémico basado en la aplicación y desarrollo del Modelo SCURRI MCA en el contexto del cambio climático. La creación de un grupo de investigación interdisciplinario italo-ecuatoriano corresponde a una fase preliminar para poder perseguir los siguientes objetivos generales, partiendo de experiencias previas:

- Minicursos en línea sobre autómatas celulares destinados a introducir la metodología de modelización de AC y una cooperación científica en el desarrollo de nuevas versiones del modelo SCURRI.
- La primera versión actual de SCURRI (de SCIDDICA-SS4, Microsoft OS) necesita ser refundida para ser ejecutada por computación paralela/concurrente y luego aplicada a situaciones críticas del volcán Cotopaxi en Ecuador con el fin de suministrar planes de mitigación de riesgos a las autoridades públicas y a los actores sociales; esto requiere una exhaustiva recolección de datos de altos estándares de precisión, en relación con la morfología del territorio y las características geológicas del suelo. Este objetivo se perseguirá en el contexto del trabajo actual de la UNACH.
- Registro observacional por muestreo de los fenómenos meteorológicos desencadenantes de lahares secundarios con el fin de detectar patrones meteorológicos peligrosos relevantes; estudios climáticos a largo/corto plazo relativos a las extensiones de los glaciares volcánicos con el fin de establecer los niveles de peligro de los lahares primarios durante los episodios eruptivos volcánicos.
- Desarrollo de SCURRI (centrado exclusivamente en los aspectos del modelo) con el fin de simular de forma fiable los flujos superficiales bifásicos, para evaluar mejor las fases iniciales y finales de la evolución de los fenómenos fluidodinámicos, obteniendo así finalmente una predicción más fiable sobre los peligros que pueden amenazar a las comunidades humanas.

Para garantizar el éxito de este grupo de investigación interdisciplinar, se están reclutando científicos entre expertos de áreas científicas como la Física, las Ciencias Computacionales, la Informática, la Hidrología, la Ingeniería Medioambiental, la Geofísica, la Geomorfología, la Vulcanología, la Glaciología, la Meteorología e incluso la Antropología.

**Palabras clave** - Peligro natural, Lahares primarios, Flujo de escombros, Erosión del suelo, Modelización y simulación, Autómatas celulares, Precipitación, Medidas de seguridad y protección

## **Estado actual de los conocimientos e importancia de la investigación conjunta**

Los lahares son uno de los fenómenos naturales más devastadores por el número de víctimas que causan en las zonas volcánicas (Neall, 1976; Waythomas, 2014). Son flujos distintos de los flujos de corriente comunes y consisten en depósitos piroclásticos mezclados con agua. Sus propiedades físicas (densidad, viscosidad y consistencia) son muy similares al hormigón húmedo que aún no se ha endurecido (Vallance, 2000). Este fluido, en condiciones de pendiente pronunciada, es capaz de alcanzar velocidades de hasta 100 km/h y distancias de hasta 300 km, y se solidifica cuando el agua se libera gradualmente en zonas llanas (Manville et al., 2013). Los lahares pueden ser de tipo primario (o sineruptivo) si están directamente relacionados con erupciones volcánicas; normalmente cuando los glaciares y/o la nieve son fundidos por flujos piroclásticos o de lava, se desarrollan a partir de la mezcla de material piroclástico con agua, como en el tremendo evento colombiano de 1985 del Nevado del Ruiz (Pierson et al., 1990). Otro caso podría darse cuando se dispone de una gran cantidad de agua procedente de la ruptura de un lago natural a causa de una erupción (Manville, 2010). Los lahares secundarios se producen cuando se dispone de una gran cantidad de agua directamente por fenómenos meteorológicos extremos o indirectamente por el desbordamiento de masas de agua superficiales. Se movilizan depósitos piroclásticos de actividades eruptivas anteriores, por ejemplo, los flujos piroclásticos del Monte Pinatubo en 1991 en Filipinas (Rodolfo et al., 1996). La erosión del suelo con inclusión de agua a lo largo de los arroyos aumenta el volumen de los lahares primarios y secundarios. Son posibles dos mecanismos desencadenantes principales:

1) El proceso de movilización está relacionado con los sedimentos piroclásticos a veces mezclados con algún material exótico (tefra): si la cantidad de agua superficial supera un umbral de altura de agua, relacionado con las características del estrato piroclástico y la pendiente del suelo, entonces la percolación puede provocar un desprendimiento en el estrato

no consolidado; 2) El proceso de erosión depende principalmente de la redistribución del sedimento volcánico a lo largo de las laderas (Leavesley et al., 1989; Major et al., 2000): la tefra no consolidada, arrastrada por los flujos, se mezcla con el agua y aumenta gradualmente su volumen debido al aporte tanto de sedimentos como de agua (Barclay et al., 2007). En la literatura se han considerado diferentes enfoques para la modelización de lahares: se han desarrollado modelos empíricos (por ejemplo, Muñoz-Salinas et al., 2009; Schilling, 1998), que tienen en cuenta principalmente algunos macroobservables.

Se han desarrollado modelos hidrológicos y reológicos simplificados que reducen el comportamiento de los lahares a un comportamiento tipo Newton (por ejemplo, Costa, 1997; O'Brien, 1993), se han desarrollado métodos numéricos para aproximar ecuaciones diferenciales parciales (por ejemplo, Pitman et al., 2003), y se ha desarrollado la metodología alternativa de Autómatas Celulares (AC) para la modelización de lahares, por parte de nuestro grupo de investigación. En muchas cuestiones relativas a los sistemas complejos, la investigación pudo avanzar gracias a las simulaciones por ordenador, que permitieron desarrollar enfoques multidisciplinarios y transdisciplinarios, vinculados en parte a la aparición de paradigmas informáticos alternativos, como los AC (Chopard, 1998; Iovine et al., 2007; Toffoli, 1984). Además, los AC permiten una fácil paralelización para un aumento significativo de la velocidad de cálculo (Calidonna et al., 2001, 2010, 2012). Los AC macroscópicos (ACM) son una extensión de los AC originales, desarrollados para el modelado y la simulación (M&S) de fenómenos complejos dinámicos macroscópicos, que evolucionan principalmente por interacciones locales (Di Gregorio y Serra 1999). Se desarrollaron aplicaciones de MCA para M&S de flujos superficiales, en particular varias versiones del modelo MCA SCIDDICA se produjeron desde 1987 tanto para flujos subaéreos como subacuáticos de escombros, granulares y de lodo (por ejemplo, Barca et al., 1987; Avolio et al., 2008, 2013; Lupiano et al., 2014, 2015a, b, 2017). Las simulaciones de lahares primarios y secundarios se realizaron mediante el modelo de MCALLUNPIY (Chidichimo et al., 2016; Machado et al., 2014, 2015a, b). A diferencia de otros modelos, que se utilizaron en simulaciones de lahares (LAHARZ - por ejemplo, Muñoz-Salinas et al., 2009; Schilling, 1998; TITAN2D - por ejemplo, Córdoba et al., 2015; Sheridan et al., 2005; Williams et al., 2008), CA permite la implementación del proceso de erosión. Sólo recientemente Frimberger et al. (2021) aplicaron la reología de Voellmy-Salm basada en PDEs, pero sus simulaciones no fueron capaces de sortear Salcedo, un poco más allá de Latacunga, en el altiplano central andino.

Las herramientas de simulación fiables son muy importantes para desarrollar estrategias de mitigación del riesgo y probarlas en diferentes condiciones. Tales instrumentos deben utilizarse con extrema precaución porque el complejo problema del peligro de lahar debe estudiarse con un enfoque interdisciplinario (Lane et al., 2003; Leung et al., 2003); por ejemplo, las medidas de mitigación que implican estructuras de protección de ingeniería podrían modificar las condiciones de peligro en el tiempo y aumentar el riesgo de catástrofe, como se especifica mejor a continuación. Además de las herramientas de alerta temprana, que sólo podrían funcionar parcialmente, y aparte de la evacuación temporal o definitiva de tierras, que podría implicar un fuerte impacto social y desabastecimiento económico, se han adoptado medidas de seguridad en territorio volcánico mediante la construcción de presas de contención, terraplenes, muros, diques, diques y embalses en posiciones clave para contener y desviar posibles lahares (Aguilera, 2003; Carey et al., 2012; Künzler et al., 2012; Scott, 1989; Verstappen, 1992). Esta solución podría implicar un fuerte impacto ambiental: es difícil garantizar la eficacia constante de estas obras, y su presencia, junto con los efectos de su funcionamiento, podría modificar gravemente las condiciones de riesgo (Janda et al., 1981, 1996; Procter et al., 2010; Scott, 1989; Shreve y Kelman, 2014; Wisner et al., 2012). Nuestra experiencia de simulación mediante el modelo MCA LLUNPYI se refiere a los lahares primarios del Cotopaxi, Versant Norte y Versant Oeste/Sur, (Lupiano et al., 2015b, 2018; Machado et al., 2015a) y a los lahares secundarios del Valle de Vascún (Chidichimo et al., 2016; Lupiano et al., 2015b, 2020; Machado et al., 2014, 2015a). Tal experiencia está conectada con las investigaciones previas sobre flujos superficiales con CA: flujo de lava, flujo de escombros, flujo piroclástico, avalanchas de nieve (Avolio et al. 2006a, 2008, 2013, 2017; Iovine et al., 2005, 2007; Lupiano et al., 2014, 2015a, 2015b, 2016, 2017, 2018). Esta es la base para las futuras investigaciones con el fin de proponer instrumentos innovadores para la mitigación de riesgos relativos a lahares, flujos de escombros e inundaciones. Tales investigaciones no pueden separarse de una investigación climática/meteorológica para estudiar la extensión variable de los glaciares (Cáceres et al., 2004), para desarrollar escenarios de precipitación pluvial (Avolio et al., 2010, Calidonna et al., 2015, Torcasio et al., 2016) y para monitorizar en el tiempo la pluma volcánica, la precipitación de cenizas y la acumulación (Calidonna et al., 2014, 2015).

## Personal científico

En DISCURRI-12 participan investigadores experimentados y jóvenes:

En Italia:

UNICAL - DIAMDr . Francesco Chidichimo (Coordinador en Italia)  
Dr. Prof. Salvatore Straface

- DeMaCS Dr./CM.Prof. Salvatore DiGregorio

UNICAL - BEST Emérito Prof. Gino Mirocle Crisci

CNR-IRPIDr . Valeria Lupiano

CNR-ISACDra . Claudia Calidonna  
Dr. Francesco Gullace

En Ecuador:

UNACH -Física Dr. Paolo Catelan (Coordinador

enEcuador) UNACH - Informática Dr. Santiago Cisneros

UNACH - Medio ambiente  
IngenieríaDr . Benito Mendoza

UNACH - Geografía Dr. Mauro Jiménez

UNACH - Antropología Dr. Pedro Carretero

La coordinación de este grupo de investigadores y de sus actividades científicas no es un privilegio de ningún tipo, sino más bien un servicio. Los coordinadores no pueden ser considerados responsables del comportamiento y el rendimiento de un solo científico, sino que cada miembro de este grupo de investigación es responsable de su comportamiento y rendimiento durante todo el periodo de su participación. El grupo de investigación no es una entidad estática e inmodificable, sino que puede ampliarse o reducirse en función de la necesidad impuesta por la propia actividad científica. En general, la contratación de personal científico y/o técnico novedoso será perseguida y decidida por los dos Coordinadores, tras acordar su propio consenso, y previa consulta al personal científico. Ciertamente, debe asumirse desde el inicio del proyecto que la UNICAL y la UNACH por sí solas no pueden cubrir completamente todas las áreas disciplinarias para gestionar con éxito una investigación transdisciplinar de este tipo, que necesariamente puede requerir la participación de los siguientes investigadores experimentados: Dra. Claudia Calidonna (CNR-ISAC) por parte de la UNICAL, Dr. Bolívar Cáceres (INAMHI - Ministerio de Ambiente y Agua) por parte de la UNACH; si fuera el caso, tanto la UNICAL como la UNACH podrían decidir involucrar además a otros especialistas científicos y técnicos de otras instituciones de investigación, concretamente de la Universidad de Salerno y/o de la Universidad de Nápoles FEDERICO II en Italia, y del IGEPN en Ecuador.

## **Región estudiada**

**Localización:** Región de Cotopaxi

En la Smithsonian Institution y su Global Volcanism Program se puede encontrar un buen resumen sobre el volcán Cotopaxi y su actual actividad eruptiva, véase <https://volcano.si.edu/volcano.cfm?vn=352050> y otros enlaces.

## **Cooperación y resultados y beneficios previstos**

El presente proyecto bilateral contribuirá a:

- 1) Intercambio de información y experiencias en el ámbito de la fenomenología general de los lahares;
- 2) Estudios e investigaciones interdisciplinarios comunes sobre los lahares y su modelización MCA;
- 3) Mejora de las redes en las que participa cada grupo;
- 4) Difusión de la aplicación y el uso del modelo SCURRI.

## **Plan de trabajo**

### **Primer mandato: Abril-Julio 2023**

- Estudios bibliográficos: Análisis de los modelos existentes, y en particular de los modelos de autómatas celulares, para los flujos superficiales, y estudios sobre la meteorología de Ecuador y los cambios climáticos, sobre todo en la zona del Cotopaxi.
- Primera predicción de escenarios de amenaza mediante la simulación de posibles eventos localizados en zonas urbanas y suburbanas vulnerables cercanas al Cotopaxi utilizando una primera versión del software SCURRI "Windows".
- Desarrollo inicial de la versión Linux de SCURRI.
- Difusión de los primeros resultados de la investigación (informes o artículos).

### **Segundo mandato: Agosto 2023-Noviembre 2023**

- Estudio sobre la extensión del glaciar Cotopaxi y su reducción temporal.
- Desarrollo de la versión Linux de SCURRI.
- Predicción de posibles escenarios de peligro mediante la simulación de eventos localizados en zonas urbanas y suburbanas vulnerables cercanas al Cotopaxi utilizando versiones anteriores de Microsoft de SCURRI.
- Predicción de posibles escenarios de peligro mediante la simulación de eventos que afectan a la región oeste-sur del Cotopaxi utilizando las versiones actualizadas de Microsoft de SCURRI o una novedosa versión Linux de SCURRI.
- Tomografía de suelos y cartografía geográfica con drones de zonas relevantes de la región del Cotopaxi para investigar las propiedades de la cubierta piroclástica.
- Elaboración preliminar de mapas de peligrosidad.

- Difusión de los resultados de la investigación (informes o artículos).

### **Tercer mandato: Diciembre 2023-marzo 2024**

- Desarrollo de la versión Linux de SCURRI.
- Elaboración de mapas de peligrosidad.
- Predicción de escenarios de riesgo mediante la simulación de eventos que afectan a regiones cercanas al Cotopaxi.
- Otras posibles ampliaciones del modelo SCURRI sobre la base de las experiencias anteriores.
- Difusión de los resultados de la investigación (informes o artículos).

El plan de trabajo aquí presentado se detalla con más detalle en el ANEXO 2. Dado que la reciente propagación pandémica de Covid-19, aún no ha finalizado, el mismo calendario que figura en el ANEXO 2 puede modificarse en función de la evolución de las variantes pandémicas. Cualquier modificación del plan de trabajo se considerará y aplicará principalmente con vistas a garantizar la seguridad y las buenas condiciones de salud de los científicos implicados, aunque podrán tenerse en cuenta otras razones no exclusivamente relacionadas con Covid-19 si fuera el caso. También es responsabilidad de los dos Coordinadores diagnosticar constantemente la evolución de la situación, tanto analizando el desarrollo de las variantes pandémicas de Covid-19 como de cualquier otra situación de peligro que aparezca en zonas volcánicas y similares. Los dos Coordinadores, tras acordar su propio consenso, y previa consulta al personal científico, decidirán cualquier actuación respecto a las modificaciones aquí contempladas.

## **Bibliografía**

- Aguilera, E., Pareschi, M.T., Rosi, M., y Zanchetta, G. Risk from lahars in the northern valleys of Cotopaxi Volcano (Ecuador), *Nat. Hazards*, 33, 161-189, 2004.
- Avolio, M.V., Di Gregorio, S., Mantovani, F., Pasuto, A., Rongo, R., Silvano, S., Spataro, W. Simulation of the 1992 Tessina landslide by a Cellular Automata model and future hazard scenarios. *JAG (Revista Internacional de Observación Aplicada de la Tierra y Geoinformación)*. 2 (1), 41-50, 2000.
- Avolio, M.V., Crisci, G.M., D'Ambrosio, D., Di Gregorio, S., Iovine, G., Rongo, R., Spataro, W. An extended notion of Cellular Automata for surface flows modelling. *WSEAS Transactions on Computers*, vol.2, Issue 4, pp 1080-1085, 2003.
- Avolio, M.V., Crisci, G.M., Di Gregorio, S., Rongo, R., Spataro, W., Trunfio, G.A. SCIARA 2: an improved Cellular Automata model for Lava Flows and Applications to the 2002 Etna crisis. *Computers & Geosciences*. 32, 897-911, 2006a.
- Avolio, M.V., Crisci, G.M., Di Gregorio, S., Rongo, R., Spataro, W., D'Ambrosio, D. Pyroclastic Flows Modelling using Cellular Automata. *Computers & Geosciences*. 32, 876-889, 2006b.
- Avolio, M.V., Lupiano, V., Mazzanti, P., Di Gregorio, S. Modelling combined subaerial-subaqueous flow-like landslides by Cellular Automata. H. Umecio, B. Chopard y S. Bandini (Eds.): *ACRI 2008, LNCS 5191*, pp.329-336, 2008.
- Avolio, M.V., Errera, A., Lupiano, V., Mazzanti, P., Di Gregorio, S. Development and calibration of a preliminary Cellular Automata Model for Snow Avalanches. S. Bandini et al. (Eds.): *ACRI 2010, LNCS 6350 Ascoli Piceno (Italia)*, Sept. 21-24, pp. 83-94, 2010.
- Avolio, M.V., Di Gregorio, S., Spataro, W., Trunfio, G.A. A Theorem about the Algorithm of Minimization of Differences for Multicomponent Cellular Automata - G.C. Sirakoulis and S. Bandini (Eds.): *ACRI 2012, LNCS 7495*, pp. 279-288, 2012a.
- Avolio, M. V., Errera, A., Lupiano, V., Mazzanti, P., Di Gregorio, S. A Cellular Automata Model for Snow Avalanches. De próxima aparición en *Journal of Cellular Automata*, 2012b.
- Avolio, M.V., Di Gregorio, S., Lupiano, V., y Mazzanti, P. SCIDDICA-SS3: a new version of cellular automata model for simulating fast moving landslides, *J. Supercomput.*, 65, 682-696, 2013.
- Avolio, M.V., Errera, A., Lupiano, V., Mazzanti, P., y Di Gregorio, S. A Cellular Automata Model for Snow Avalanches, *J. Cell. Autom.*, 12, 309-332, 2017.

- Barca, D., Di Gregorio, S., Nicoletta, F.P., Sorriso Valvo, M. Flow-type landslide modelling by cellular automata. Proceedings A.M.S. International Congress Modelling and Simulation, El Cairo, Egipto, marzo de 1987, pp. 3-7, 1987.
- Barca, D., Crisci, G.M., Di Gregorio, S., Nicoletta, F. Cellular automata methods for modelling lava flow: simulation of the 1986-1987 eruption, Mount Etna, Sicily. Chapter Twelve of Active Lavas, Kilburn and Luongo Eds., pp 291-309 - UCL Press London, 1993.
- Barca, D., Crisci, G. M., Di Gregorio, S., Nicoletta, F. Cellular Automata for simulating lava flows: a method and examples of the Etnean eruptions. *Transport Theory and Statistical Physics*, 23 (1-3), 195-232, 1994.
- Barclay, J., Alexander, J., y Sunik, J. Rainfall-induced lahars in the Belham Valley, Montserrat, West Indies, *J. Geol. Soc. London*, 164, 815-827, 2007.
- Cáceres, B., Ramírez, J., Francou, B., Eissen, J.P., Taupin, J.D., Jordan, E., Ungerechts, L., Maisincho, L., Barba, D., Cadier, E., Bucher, R., Peñafiel, A., Samaniego, P., Mothes, P. Determinación del volumen del casquete de hielo del volcán Cotopaxi. Informe INAMHI, IRD, IG-EPN, INGEOMINAS, 2004.
- Calidonna, C.R., Napoli, C.D., Giordano, M., Furnari, M.M., & Di Gregorio, S. A network of cellular automata for a landslide simulation. En *Proceedings of the 15th international conference on Supercomputing*, pp. 419-426, ACM, 2001.
- Calidonna, C.R., Naddeo, A., Trunfio, G.A., Di Gregorio, S. CANV2: a hybrid CA model by micro and macro-dynamics examples, *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 6350, pp. 128-137, 2010.
- Calidonna, C.R., Naddeo, A., Trunfio, G.A., Di Gregorio, S. From classical infinite space-time CA to a hybrid CA model for natural sciences modeling. *Matemática Aplicada y Computación* 218(16): 8137-8150, 2012.
- Calidonna, C.R., Bonasoni, P., Busetto, M., Cannata, C., Cristofanelli, P., De Rosa, R., Donato, P., Gulli, D., Landi, T.C., Marinoni, A., Sempreviva, A.M. Primera evidencia de pluma volcánica observada en un observatorio marino del Mediterráneo central. *ProScience*, 1, 143- 148, 2014.
- Calidonna, C.R., Gulli, D., Avolio, E., Federico, S., Lo Feudo, T., Sempreviva, A.M. One Year of Vertical Wind Profiles Measurements at a Mediterranean Coastal Site of South Italy, *Energy Procedia Volume 76*, Pages 121-127, 2015.
- Carey, M., Huggel, C., Bury, J., Portocarrero, C., y Haeberli, W. An integrated socio-environmental framework for glacier hazard management and climate change adaptation: lessons from Lake 513, Cordillera Blanca, Perú, *Climatic Change*, 112, 733-767, 2012.
- Chidichimo, F., Di Gregorio, S., Lupiano, V., Machado, G., Molina, L., y Straface, S. Learning from nature: favoring small lahars formation for hazard mitigation, en: ENEA Proceedings of the international meeting "Relationality: between environmental awareness and societal challenges", editado por: Fiorani, L., Román, Z., Falcioni, V., y Geremia, F., Budapest, Hungría, ISBN 978- 88-8286-345-6, 87-90, 2016.
- Chidichimo, F., Catelan, P., Lupiano, V., Straface, S., Di Gregorio, S. A First Simulation of the Impact Upon the Hidroagoyán Dam Due to Lahars Triggered by an 1877-Type Cotopaxi Eruption in Ecuador. *Geosciences*, 12(10), 376, 2022.
- Chopard, B. y Droz, M. Cellular automata modeling of physical systems - Cambridge University Press Collection Alea, Cambridge, Reino Unido, 1998.
- Córdoba, G., Villarosa, G., Sheridan, M.F., Viramonte, J.G., Beigt, D., and Salmuni, G. Secondary lahar hazard assessment for Villa la Angostura, Argentina, using Two-Phase-Titan modelling code during 2011 CordónCaulle eruption, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 15, 757-766, <https://doi.org/10.5194/nhess-15-757-2015>, 2015.
- Costa, J.E. Hydraulic modeling for lahar hazards at Cascades volcanoes, *Environ. Eng. Geosci*, 3, 21-30, 1997.
- Crisci, G.M., Di Gregorio, S., Pindaro, O., Ranieri, S.A. Lava flow simulation by a discrete cellular model: first implementation. *Int. Journal of Modelling and Simulation*. 6, 137-140, 1986.
- Crisci, G.M., Di Gregorio, S., Nicoletta, F., Rongo, R., Spataro, W. Analysing lava risk for the Etnean area by Cellular Automata methods of simulation. *Natural Hazards*, 20, 215-229, 1999.
- Crisci, G.M., Di Gregorio, S., Rongo, R., Scarpelli, M., Spataro, W., Calvari, S. Revisiting the 1669 Etnean eruptive crisis using a cellular automata model and implications for volcanic hazard in the Catania area. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 123, (1-2), 211-230, 2003.
- Crisci, G.M., Di Gregorio, S., Rongo, R., M, Spataro, W. El modelo de simulación SCIARA: los años 1991 y 2001 en el Etna. *Journal of Vulcanology and Geothermal Research*, 132, (2-3), 253-267, 2004.
- Crisci, G.M., Avolio, M.V., Behncke, B., D'Ambrosio, D., Di Gregorio, S., Lupiano, V., Neri, M., Rongo, R., Spataro, W. Predicting the impact of lava flows at Mount Etna, Italy. *J. Geophys. Res.*, 115, B04203, doi:10.1029/2009JB006431, 2010.

- D'Ambrosio, D., Di Gregorio, S., Gabriele, S., Gaudio, R. A Cellular Automata Model for Soil Erosion by Water. *Physics and Chemistry of the Earth*, 26(1), 33-39, 2001.
- D'Ambrosio, D., Di Gregorio, S., Iovine, G., Lupiano, V., Merenda, L., Rongo, R., Spataro, W. Simulating the Curti-Sarno Debris Flow through Cellular Automata: the model SCIDDICA (release S2). *Physics and Chemistry of the Earth* 27, 1577-1585, 2002.
- D'Ambrosio, D., Di Gregorio, S., Iovine, G., Lupiano, V., Rongo, R., Spataro, W. Primeras simulaciones de los flujos de escombros de Sarno mediante modelización de autómatas celulares. *Geomorphology* 54(1-2), 91-117, 2003a.
- D'Ambrosio, D., Di Gregorio, S., Iovine, G. Simulación de flujos de escombros mediante un modelo de autómatas celulares hexagonales: SCIDDICA S3- hex. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 3, 545-559, 2003b.
- D'Ambrosio, D., Iovine, G., Spataro, W. Miyamoto, H. A macroscopic collisional model for debris-flows simulation. *Environmental Modelling and Software*. 22 (10), 1417-1436, 2007.
- D'Ambrosio, D., Spataro, W. Parallel evolutionary modelling of geological processes - *Parallel Computing*, 33(3), 186-212, 2007.
- D'Ambrosio, D., De Rango, A., Oliverio, M., Spataro, D., Spataro, W., Rongo, R., Mendicino G. & Senatore, A. The open computing abstraction layer for parallel complex systems modeling on many-core systems. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 121, 53-70, 2018.
- Di Gregorio, S., Festa, D.C. Cellular Automata for Freeway Traffic. *Proceedings of the First International Conference "Applied Modelling and Simulation"*, Lyon, Francia, 7-11 de septiembre de 1981, vol. V, pp. 133-136, 1981a.
- Di Gregorio, S., Festa, D.C. A global model for freeway traffic simulation. *Contributed papers of ICTS Int. Meeting "Transportation research: state of the art, perspectives and in-ternational cooperation"*, Amalfi, Italia, 11-14 de noviembre de 1981, vol. I, pp. 277- 283, 1981b.
- Di Gregorio, S., Nicoletta, F., Rongo, R., Sorriso-Valvo, M., Spataro, W. A two-dimensional Cellular Automata Model for Landslide Simulation. *Proceedings of 6th Joint EPS-APS International Conference on Physics Computing "PC'94" Lugano, Suiza 22-26 Agosto 1994* Ed.s R.Gruber and M.Tommasini, pp. 523-526, 1994.
- Di Gregorio, S., Serra, R., Villani, M. A Cellular Automata Model of Soil Bioremediation. *Complex Systems*, 11, 31-54, 1997.
- Di Gregorio, S., Serra, R. An empirical method for modelling and simulating some complex macroscopic phenomena by cellular automata. *FGCS*, 16, 259-271, 1999.
- Di Gregorio, S., Rongo, R., Siciliano, C., Sorriso-Valvo, M., Spataro, W. Mount Ontake landslide simulation by the cellular automata model SCIDDICA-3. *Física y Química de la Tierra. (A)*, 24 No.2, 97-100, 1999a.
- Di Gregorio, S., Serra, R., Villani, M. Applying cellular automata to complex environmental problems: the simulation of the bioremediation of contaminated soils. *Theoretical Computer Science*, 217(1), 131-156, 1999b.
- Frimberger, T., Andrade, S.D., Weber, S., Krautblatter, M. Modelling future lahars controlled by different volcanic eruptionscenarios at Cotopaxi (Ecuador) calibrated with the massively destructive 1877 lahar. *Earth Surf. Earth Surf. Land*. 46, 680-700, 2021.
- Ilachinsky, A. *Cellular Automata, A discrete Universe*. World Scientific, Nueva Jersey, EE.UU., 2001.
- Iovine, G., Di Gregorio, S., Lupiano, V. Debris-flow susceptibility assessment through cellular automata modeling: an example from 15-16 December 1999 disaster at Cervinara and San Martino Valle Caudina (Campania, southern Italy). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 3, 457-468, 2003.
- Iovine, G., D'Ambrosio, D., Di Gregorio, S. Applying genetic algorithms for calibrating a hexagonal cellular automata model for the simulation of debris flows characterised by strong inertial effects. *Geomorphology*. 66, 287-303, 2005.
- Iovine, G., Di Gregorio, S., Sheridan, M.F., y Miyamoto, H. Modelling, computer-assisted simulations, and mapping of dangerous phenomena for hazard assessment, *Environ. Modell. Softw.*, 22, 1389-1391, 2007.
- Janda, R.J., Scott, K.M., Nolan, K.M., y Martinson, H.A. Lahar movement, effects, and deposits, *US Geol. Prof. Pap. Prof. Pap.*, 1250, 461-478, 1981.
- Janda, R.J., Daag, A.S., Delos Reyes, P.J., Newhall, C.G., Pierson, T.C., Punongbayan, R.S., Rodolfo, K.S., Solidum, R.U., y Umbal, J.V. Assessment and response to lahar hazard around Mount Pinatubo, 1991 to 1993, en: *Fire and mud: Eruptions and lahars of Mount Pinatubo*, Philippines, USGS Books and Other Publications, Washington, USA, 107-140, 1996.
- Künzler, M., Huggel, C., y Ramírez, J.M. A risk analysis for floods and lahars: case study in the Cordillera Central of Colombia, *Nat. Hazards*, 64, 767-796, 2012.
- Lane, L.R., Tobin, G.A., y Whiteford, L.M. Volcanic hazard or economic destitution: hard choices in Baños, Ecuador, *Global Environmental Change Part B: Environmental Hazards*, 5, 23- 34, 2003.

- Leavesley, G.H., Lusby, G.C., y Lichty, R.W. Infiltration and erosion characteristics of selected tephra deposits from the 1980 eruption of Mount St. Helens, Washington, USA, *Hydrolog. Sci. J.*, 34, 339-353, 1989.
- Leung, M.F., Santos, J.R., y Haimes, Y.Y. Risk modeling, assessment, and management of lahar flow threat, *Risk Anal.*, 23, 1323-1335, 2003.
- Lupiano, V., Avolio, M.V., Di Gregorio, S., Peres, D.J., and Stancanelli, L. M. Simulation of 2009 debris flows in the Peloritani Mountains area by SCIDDICA-SS3, in: *Proceedings of the 7th International Conference on Engineering Mechanics, Structures, Engineering Geology (EMESG 2014)*, 3-5 de junio de 2014, Salerno, Italia, 53-61, publicado por WSEAS Press, 2014.
- Lupiano, V., Peres, D.J., Avolio, M.V., Cancelliere, A., Foti, E., Spataro, W., and Di Gregorio, S. Use of the SCIDDICA-SS3 model for predictive mapping of debris flow hazard: an example of application in the Peloritani Mountains area, in: *Proceedings of the International Conference on Parallel and Distributed Processing Techniques and Applications (PDPTA)*, 27-30 de julio de 2015, Las Vegas, Estados Unidos, 625-631, 2015a.
- Lupiano, V., Machado, E.G., Crisci, G.M., Di Gregorio, S. A modelling approach with Macroscopic Cellular Automata for hazard zonation of debris flows and lahars by computer simulations - *International Journal of Geology Volume 9*, 35-46, ISSN: 1998-4499, 2015b.
- Lupiano, V., Machado, G., Molina, L.P., Crisci, G.M., and Di Gregorio, S. Simulations of debris/mud flows invading urban areas: a cellular automata approach with SCIDDICA, in: *ACRI 2016*, editado por: El Yacoubi, S., Was, J., y Bandini, S., LNCS 9863, 291-302, Springer, Berlín, Heidelberg, Alemania, 2016.
- Lupiano, V., Machado, G., Molina, L.P., Crisci, G.M., and Di Gregorio, S. Simulations of flow-like landslides invading urban areas: a cellular automata approach with SCIDDICA, *Nat. Comput.*, 17, 553-568, <https://doi.org/10.1007/s11047-017-9632-3>, 2017.
- Lupiano, V., Machado, E.G., Di Gregorio, S. Revisiting the 1877 Cataclysmic Lahars of Cotopaxi Volcano by a Cellular Automata Model and Implications for Future Events - *CSAE '18 Proceedings of the 2nd International Conference on Computer Science and Application Engineering*, Article No. 76, Hohhot, China - October 22 - 24, 2018, ACM New York, NY, USA, ISBN: 978-1-4503-6512-3, doi>10.1145/3207677.3278665, 2018.
- Lupiano, V., Chidichimo, F., Catelan, P., Machado, E.G., Molina, L.P., Straface, S., Calidonna, C.R., Crisci, G.M. Di Gregorio, S. From Examination of Natural Events a Proposal for Risk Mitigation of Lahars by a Cellular Automata Methodology: a Case Study for Vascun Valley, Ecuador From examination of natural events to a proposal for risk mitigation of lahars by a cellular-automata methodology: a case study for Vascún valley, Ecuador - *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 20, 1-20, <https://doi.org/10.5194/nhess-20-1-2020 A56>, 2020.
- Lupiano, V., Catelan, P., Calidonna, C.R., Chidichimo, F., Crisci, G.M., Rago, V., Straface, S., Di Gregorio, S. LLUNPIY Simulations of the 1877 Northward Catastrophic Lahars of Cotopaxi Volcano (Ecuador) for a Contribution to Forecasting the Hazards. *Geosciences*, 11, 81, <https://doi.org/10.3390/geosciences 11020081>, 2021.
- Machado, G., Lupiano, V., Avolio, M.V., y Di Gregorio, S. A preliminary cellular model for secondary lahars and simulation of 2005 case of Vascún Valley, Ecuador, en: *ACRI 2014*, editado por: Was, J., Ch.TS10 Sirakoulis, G., y Bandini, S., LNCS 8751, 208- 217, Springer, Berlín, Heidelberg, Alemania, 2014.
- Machado, E.G., Lupiano, V., Crisci, G.M., Di Gregorio, S. Modelling Fast-moving Flow-like Landslides by Cellular Automata: Simulations of Debris Flows and Lahars - *Proceedings of EG'15 8th International Conference on Advances in Environmental and Geological Science and Engineering, Special Session: Analysis and Modelling of Fast-Moving Flow-Like Phenomena - Salerno, Italia*, 27-29 de junio, pp 401-411, 2015a.
- Machado, E.G., Lupiano, V., Avolio, M.V., Gullace, F., Di Gregorio S. A cellular model for secondary lahars and simulation of cases in the Vascún Valley, Ecuador -*Journal of Computational Science*, DOI: 10.1016/j.jocs.2015.08.001, 2015b.
- Machado, E.G., Lupiano, V., Crisci G.M., Di Gregorio, S. LLUNPIY preliminary extension for simulating primary lahars: Application to the 1877 Cataclysmic Event of Cotopaxi Volcano - *SIMULTECH 2015 - Proceedings of 5th International Conference on Simulation and Modeling Methodologies, Technologies and Applications*, 21 - 23 July 2015, Colmar, Alsace, France, pp 367 - 376, 2015c.
- Major, J., Pierson, T., Dinehart, R., y Costa, J. Sediment yield following severe volcanic disturbance. A two-decade perspective from Mount St. Helens, *Geology*, 28, 819-822, 2000.
- Manville, V. An overview of break-out floods from intracaldera lakes, *Global Planet. Change*, 70, 14-23, 2010.
- Manville, V., Major, J.J., y Fagents, S.A. Modeling lahar behavior and hazards, en: *Modeling Volcanic Processes: The Physics and Mathematics of Volcanism*, 300-330, Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido, 2013.
- Muñoz-Salinas, E., Castillo-Rodríguez, M., Manea, V., Manea, M., and Palacios, D. Lahar flow simulations using LAHARZ program: application for the Popocatepetl volcano, Mexico, *J. Volcanol. Geoth. Res.*, 182, 13-22, 2009.

- Neall, V.E. Lahars as major geological hazards. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology - Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur*, 13.1, 233-240, 1976.
- O'Brien, J.S., Julien, P.Y., y Fullerton, W.T. Two-dimensional water flood and mudflow simulation, *J. Hydraul. Eng.*, 119, 244- 261, 1993.
- Pierson, T.C., Janda, R.J., Thouret, J.C., y Borrero, C.A. Perturbation and melting of snow and ice by the 13 November 1985 eruption of Nevado del Ruiz, Colombia, and consequent mobilization, flow and deposition of lahars, *J. Volcanol. Geoth. Res.*, 41, 17-66, 1990.
- Piscitelli, M., Badalamenti, F., D'Anna, G., Di Gregorio, S. A Cellular Automata Model of Fish-Aggregating-Devices Performance. En *Proceedings of EUROSIM 2001 Delft*, Países Bajos, 26-29 de junio, CdRom ISBN: 90-806441-1-0, 2001.
- Pitman, E.B., Nichita, C.C., Patra, A., Bauer, A., Sheridan, M., y Bursik, M. Computing granular avalanches and landslides, *Phys. Fluids*, 15, 3638-3646, 2003.
- Pommois, P., Brunetti, P., Bruno, V., Mazzei, A., Baldacchini, V., Di Gregorio S. FlySim: A Cellular Automata Model of Bactrocera Oleae (Olive Fruit Fly) Infestation and First Simulations. S. El Yacoubi, B. Chopard y S. Bandini (Eds.): *ACRI LNCS 4173*, pp. 311 - 320, 2006.
- Procter, J.N., Cronin, S.J., Fuller, I.C., Sheridan, M., Neall, V.E., y Keys, H. Lahar hazard assessment using Titan2D for an alluvial fan with rapidly changing geomorphology: Whangaehu River, Mt. Ruapehu, *Geomorphology*, 116, 162-174, 2010.
- Rodolfo, K.S., Umbal, J.V., Alonso, R.A., Remotigue, C.T., Paladio-Melosantos, M.L., Salvador, J.H., Evangelista, D., y Miller, Y. Two years of lahars on the western flank of Mount Pinatubo: Initiation, flow processes, deposits, and attendant geomorphic and hydraulic changes, en: *Fire and mud: eruptions and lahars of Mount Pinatubo, Philippines*, editado por: Newhall, C G. y Punongbayan, R. S. S., University of Washington Press, Seattle, EE.UU. y Londres, Reino Unido, 989-1013, 1996.
- Schilling, S.P. LAHARZ, GIS programs for automated mapping of lahar-inundation hazard zones, No. 98-638, US Geological Survey, Information Services, Washington, USA, 1998.
- Scott, K.M. Magnitude and frequency of lahars and lahar-runout flows in the Toutle-Cowlitz River system, US Geological Survey, Professional Paper, USA, 1447, 1989.
- Sheridan, M.F., Stinton, A.J., Patra, A., Pitman, E.B., Bauer, A., y Nichita, C.C. Evaluating Titan2D mass-flow model using the 1963 Little Tahoma Peak avalanches, Mount Rainier, Washington, *J. Volcanol. Geoth. Res.*, 139, 89-102, 2005.
- Shreve, C.M. y Kelman, I. ¿Salva la mitigación? Reviewing cost-benefit analyses of disaster risk reduction, *Int. J. Disast Risk Re.*, 10, 213-235, 2014.
- Spataro, W., D'Ambrosio, D., Avolio, M.V., Trunfio, G.A., Di Gregorio, S. Lava Flow Hazard Evaluation Through Cellular Automata and Genetic Algorithms: An Application to Mt Etna Volcano. *Fundamenta Informaticae*. 87 (2), 247-268, IO Press, Amsterdam, Países Bajos, 2008.
- Spataro, W., Avolio, M.V., Lupiano, V., Trunfio, G.A., Rongo, R., D'Ambrosio, D. The latest release of the lava flows simulation model SCIARA: First application to Mt Etna (Italy) and solution of the anisotropic flow direction problem on an ideal surface. *Procedia Computer Science*, vol 1, Issue 1, pp 17-26, 2010.
- Succi, A.S. *The Lattice Boltzmann Equation for Fluid Dynamics and Beyond*. Oxford University Press, Oxford, Reino Unido, 2001.
- Toffoli, T. Cellular Automata as an alternative to (rather than an approximation of) differential equations in modeling physics. *Physica*, 10D, 117-127, 1984.
- Torcasio, R.C., Stefano, F., Calidonna, C.R., Avolio, E., Drofa, O., Landi, T.C., Malguzzi, P., Buzzi, A., and Bonasoni, P. THREE-MODEL ENSEMBLE WIND PREDICTION IN SOUTHERN ITALY, *Annales Geophysicae*, 34, pp 347-356, Copernicus, 10.5194/angeo-34-347-2016, 2016.
- Vallance, J.W. *Lahars*, Encyclopedia of Volcanoes, Academic Press, San Diego, CA, USA, 2000.
- Verstappen, H.T. Volcanic hazards in Colombia and Indonesia; lahars and related phenomena, *Geosciences in International Development Report*, 15, 33-42, 1992.
- von Neumann, J. *Theory of self-reproducing automata*. Uni. of Illinois Press, Urbana, 1966.
- Waythomas, C.F. Water, ice and mud: lahars and lahar hazards at ice-and snow-clad volcanoes, *Geology Today*, 30.1, 34-39, 2014.
- Williams, R., Stinton, A., y Sheridan, M. Evaluation of the Titan2D two-phase flow model using an actual event: Case study of the 2005 Vazcún Valley Lahar, *J. Volcanol. Geoth. Res.*, 177, 760-766, 2008.
- Wisner, B., Gaillard, J.C., y Kelman, I. (Eds.): *Handbook of hazards and disaster risk reduction and management*, Routledge, Abingdon-on-Thames, Reino Unido, 2012.



y riesgo												
Generalización teórica, numérica y computacional del modelo SCURRI a partir de los conocimientos adquiridos.												

- Pueden producirse cambios debido a posibles variaciones en las actividades regulares de la universidad.